



**YUMUŞAK VE SERT ODUN PELETLERİNDEN
TORREFAKSİYONLA BİYOKÖMÜR ÜRETİMİ**

Elvan ÇATAK

**Yüksek Lisans Tezi
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Melek YILGIN**

AĞUSTOS -2019

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YUMUŞAK VE SERT ODUN PELETLERİNDEN TORREFAKSİYONLA
BİYOKÖMÜR ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elvan ÇATAK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 08.07.2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 08.08.2019

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

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Dursun PEHLİVAN (F.Ü)

Prof. Dr. Hüseyin KARACA (İ.Ü)

TEMMUZ-2019

ÖNSÖZ

Yumuşak ve sert odun peletlerinden torrefaksiyonla biyokömür üretimi adlı tez konumun seçilmesinde bana yardımcı olan, ayrıca deneysel çalışmalarım esnasında hem bilgi hem de tecrübeleriyle benden desteğini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Melek YILGIN' a saygılarımı sunar, teşekkür ederim.

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

Elvan ÇATAK

Elazığ-2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. BİYOKÜTLE	4
2.1. Biyokütlenin Bileşimi	5
2.1.1. Selüloz	6
2.1.2. Hemiselüloz	6
2.1.3. Lignin.....	7
2.2. Biyokütle Enerjisinin Kaynakları.....	8
2.2.1. Bitkisel Kaynaklar	8
2.2.2. Hayvansal Kaynaklar	8
2.2.3. Şehir ve Endüstriyel Kaynaklar	9
2.3. Biyokütle Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları.....	10
2.4. Biyokütle Dönüşüm Teknolojileri.....	11
2.5. Türkiye ve Dünyada Biyokütle Enerjisi.....	13
3. TORREFAKSİYON.....	17
3.1. Genel Proses Tarifi.....	19
3.1.1. Proses Aşamaları	19
3.2. Torrefiye Ürün Özellikleri	23
3.2.1. Alternatif Hammadde	24
3.2.2. Peletleme.....	25
3.2.3. Taşıma.....	25
3.2.4. Taşıma ve Depolama Özellikleri	26
3.2.5. Öğütülebilirlik.....	27
3.2.6. Yanma özelliği.....	28
4. TORREFAKSİYON İŞLEMİNDE KULLANILAN REAKTÖR TURLERİ ..	29

4.1. Döner Silindir Reaktör	29
4.2. Helezon Reaktör	29
4.3. Herreshoff Fırın veya Çoklu Ocak Fırın Reaktörü	30
4.4. Torbed Reaktör.....	31
4.5. Hareketli Yataklı Reaktör	32
4.6. Bant Konveyör Reaktörü.....	33
4.7. Mikrodalga Reaktörü	34
5. PELETLEME	35
6. PELETLEME İLE TOREFAKSİYONUN BİRLİKTE UYGULANMASI.....	42
6.1. Torrefiye Peletlerin Özellikleri	45
6.2. Temel TOP Prosesi Kavramı	46
7. LİTERATÜR TARAMASI.....	49
8. MATERYAL VE METOD	53
8.1. Pelet Hazırlama	53
8.2. Torrefaksiyon Deneyi	54
8.3. Kısa (Proximate) analiz.....	55
8.4. Elementel Analiz.....	57
8.5. Termogravimetrik Analiz (TGA)	57
9. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	58
9.1. Meşe Ağacı Odunun Torrefaksiyonunda İşlem ŞartlarınınÜrün Verimine Etkisi	58
9.2. Çam Ağacı Odunun Torrefaksiyonunda İşlem Şartlarının Ürün Verimine Etkisi	60
9.3. Çam ve Meşe Ağacı Odunlarının Torrefaksiyonundan Elde Edilen Katı Ürün Verimlerinin Karşılaştırılması.....	62
9.4. Katı Ürünün Karakterizasyonu	64
9.4.1. Katı Ürünün Kısa (Proximate) ve Elementel Analizi	64
9.4.2. Katı Ürünün TGA Analizi	68
SONUÇLAR.....	74
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	84

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YUMUŞAK VE SERT ODUN PELETLERİNDEN TORREFAKSİYONLA BİYOKÖMÜR ÜRETİMİ

Elvan ÇATAK

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

2019,

Günümüz dünyasında sera gazı emisyonunun gitgide artmasının neden olduğu iklimsel değişiklik endişeleri enerji üretiminde kullanılan yanma, gazlaştırma ve piroliz gibi ısı kimyasal işlemler için yenilenebilir hammaddeler olarak lignoselülozik biyokütlelere daha fazla ilgi gösterilmesini sağlamaktadır. Lignoselülozik kütleler genellikle karmaşık kimyasal yapıya heterojen maddelerdir. Menşelerine bağlı olarak fiziksel ve kimyasal bileşimlerinin geniş bir aralıkta değişmesinden dolayı ısı kimyasal işlem teknolojilerinin uygulanabilirliği karmaşıktır. Çoğu uygulamada asıl işlem öncesi ön işlemlere sokulmaları gerekmektedir. Torrefaksiyon da bilinen biyokütle ön işleme yöntemlerinden biridir.

Bu çalışmada sert ve yumuşak ağacı odunundan hazırlanan peletlerin torrefaksiyon işlemi ile kullanılabilir bir katı yakıtı dönüştürülmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle meşe ve çam ağacı odunu gibi iki farklı odun türü sabit yatak sisteminde torrefaksiyon işlemine tabi tutuldu. Ürün verimi ve katı ürünün özelliklerine, sıcaklık, işlem süresi ve biyokütle türü gibi parametrelerin etkisi araştırıldı. Torrefaksiyon işlemi 230, 260, 300 °C sıcaklık ve 10, 20, 40, 60 dakika işlem süresinde gerçekleştirildi. İşlem sonunda elde edilen katı ürünün özelliklerinin belirlenmesi ve ham biyokütle ile karşılaştırılması için; kısa, elementel, TGA ve DTG analizleri yapıldı.

Meşe ve çam ağacı odunlarının torrefaksiyon işlemi ile kullanılabilir bir katı yakıtı dönüştürülmesi amacıyla yapılan çalışma sonucunda, ürün veriminin en fazla çalışma

sıcaklığından etkilendiği ve artan sıcaklıkla katı ürün verimi düşerken sıvı ürün veriminin arttığı belirlendi. İşlem süresinin ise düşük sıcaklıklarda etkili olduğu görüldü. Meşe ağacı odunundan elde edilen katı ürün veriminin çam ağacı odunundan düşük olduğu tespit edildi. Artan işlem sıcaklığının katı ürünün sabit karbon oranını artırdığı ve oksijen içeriğinde azalmaya neden olduğu belirlendi. İşlem sıcaklığı ile peletlerin yoğunluğunun azaldığı görüldü. Ham biyokütle ve torefiye biyokütlelerin TGA ve DTG eğrileri incelendiğinde, torrefaksiyon sıcaklığının lignoselülozik yapı üzerinde etkili olduğu ve artan torrefaksiyon sıcaklığı ile lignin içeriği yüksek bir katı ürün elde edilebileceği sonucuna varıldı. Katı ürünlerdeki lignin içeriğinin meşe ağacı odununda belirgin bir şekilde yüksek olduğu gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Torrefaksiyon, sert ağaç odunu, yumuşak ağaç odunu, biyokömür

ABSTRACT

Master Thesis

PRODUCTION OF BIOCOAL FROM SOFT AND HARD WOOD PELLETS BY TORREFACTION

Elvan ÇATAK

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Chemical Engineering

2019,

In today's world, due to the worries about climate change stemming from increasing green house gas emissions, much attention has been given to the use of lignocellulosic biomasses as renewable raw materials in thermo chemical processes such as combustion, gasification and pyrolysis for energy production. Lignocellulosic masses are usually heterogeneous materials of complex chemical structure. Because of their physical and chemical compositions vary over a wide range depending on source, the applicability of thermo chemical process technologies is a complex issue. In majority of applications, they need taking up some pre-processes before the main process.

In this study, it is aimed to convert the pellets prepared from hard and soft wood into a more valued solid fuel by torrefaction process. For this reason, two different types of wood, such as oak and pine wood, were subjected to torrefaction in a fixed bed system. The effects of parameters such as temperature, processing time and biomass type on product yield and solid product properties were examined. The torrefaction was carried out at temperatures of 230, 260, 300 ° C and processing time of 10, 20, 40, 60 minutes. To determine the properties of the solid product obtained at the end of the process and to compare with raw biomass, proximate, elemental, TGA and DTG analyzes were performed.

As a result of the study carried out with the aim of converting oak and pine wood into a usable solid fuel by torrefaction process, it was determined that the yield of the product was affected mostly by the working temperature and the liquid product yield

increased with increasing temperature while the solid product yield decreased. Process was found to be effective at low temperatures. It was determined that solid product yield obtained from oak wood was lower than pine wood. It was determined that the increased process temperature increased the solid carbon content of the solid product and caused a decrease in oxygen content. It was observed that torrefied pellets became more porous as severity of torrefaction increased. When the TGA and DTG curves of crude biomass and torrefied biomasses were examined, it was concluded that torrefaction temperature had an effect on the lignocellulosic structure and a solid product with high lignin content could be obtained with increasing torrefaction temperature. It was observed that the lignin content in the solid product was significantly higher in oak wood.

Keywords: Torrefaction, hardwood, softwood, biocoal

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No:

Şekil 2.1.	Biyokütlenin temel bileşenleri	4
Şekil 2.2.	Bitki hücre duvarı ve lignoselülozik biyokütlenin bileşenleri	6
Şekil 2.3.	Dünyada 2011 yılı birincil enerji kullanımı	14
Şekil 3.1.	Torrefaksiyon işlemi	19
Şekil 3.2.	Torrefaksiyon basamakları	21
Şekil 3.3.	Biyokütlenin torrefaksiyonu ile elde edilen ürün verimleri	22
Şekil 3.4.	Biyokütlenin tane boyutunun katı ürün verimi üzerine etkisi (tane boyutu mm)	23
Şekil 3.5.	240-340 ° C sıcaklıkta torrefaksiyonu yapılmış ağaçtan yapılan 6 mm peletlerin higroskopikliği. Kontrol beyaz peletlerdir. Testler 30 ° C ve % 90 bağıl nemde (RH) yapılmıştır.	27
Şekil 3.6.	Kayın ağacının torrefaksiyon süresine bağlı olarak öğütme enerjisi (500 mm elek ile Retsch ZM1 ultrasantrifüj öğütücü ile elde edilen sonuçlar)	28
Şekil 4.1.	Döner Silindirik Reaktör	29
Şekil 4.2.	Helezon Reaktör	30
Şekil 4.3.	Herreshoff fırın veya çoklu ocak fırın reaktörü	31
Şekil 4.4.	Torbed Reaktörü	32
Şekil 4.5.	Hareketli Yatak Reaktörü	33
Şekil 4.6.	Bant konveyör	33
Şekil 4.7.	Rotawave mikrodalga reaktör	34
Şekil 5.1.	Pelet üretim aşamaları	37
Şekil 5.2.	Pelet yakıtı fabrika üretim şeması	38
Şekil 5.3.	Pelet oluşumu türleri (a)düz kalıplı ve (b) çember kalıplı görünümü.	40
Şekil 6.1.	Peletlemeden önce torrefaksiyonun uygulandığı işlem	43
Şekil 6.2.	Peletlemeden sonra torrefaksiyonun uygulandığı işlem	45
Şekil 6.3.	Peletleme, torrefaksiyon ve TOP sürecinin temel süreç yapıları. Alt kısım, biyokütlenin önceden kurutulması dahil olmak üzere, torrefaksiyon işleminin öngörülen kavramsal yapısını göstermektedir. (DP: basınç düşüşü geri kazanımı)	47

Şekil 8.1.	Hidrolik Pres	53
Şekil 8.2.	Meşe ve çam ağacı odun tozundan hazırlanan peletler.....	54
Şekil 8.3.	Torrefaksiyon Deney Düzenegi	55
Şekil 9.1.	Meşe ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen katı ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi	59
Şekil 9.2.	Meşe ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen sıvı ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi	59
Şekil 9.3.	Meşe ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen gaz ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi	60
Şekil 9.4.	Çam ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen katı ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi	61
Şekil 9.5.	Çam ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen sıvı ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi	61
Şekil 9.6.	Çam ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen gaz ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi	62
Şekil 9.7.	Meşe ve çam ağacı odun peletlerinin 230 °C’ de farklı sürelerde torrefaksiyonundan elde edilen katı ürün verimleri.....	63
Şekil 9.8.	Meşe ve çam ağacı odun peletlerinin 260 °C’de farklı sürelerde torrefaksiyonundan elde edilen katı ürün verimleri.....	63
Şekil 9.9.	Meşe ve çam ağacı odun peletlerinin 300 °C’de farklı sürelerde torrefaksiyonundan elde edilen katı ürün verimleri.....	64
Şekil 9.10.	MAO ve ÇMAO’nun farklı sıcaklıklarda 20 dk torrefaksiyonu sonucu elde edilen torrefiye ürünlerdeki renk değişimi	64
Şekil 9.11.	Meşe ağacı odununun TGA, DTG ve DTA analizi	69
Şekil 9.12.	Meşe ağacı odununun 230 °C’de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi	69
Şekil 9.13.	Meşe ağacı odununun 260 °C’de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi	70
Şekil 9.14.	Meşe ağacı odununun 300 °C’de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi	70
Şekil 9.15.	Çam ağacı odununun TGA, DTG ve DTA analizi	71
Şekil 9.16.	Çam ağacı odununun 230 °C’de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi	72

Şekil 9.17. Çam ağacı odununun 260 °C'de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi	72
Şekil 9.18. Çam ağacı odununun 300 °C'de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi	73



TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa No:

Tablo 2.1. Saman ve odundaki hemiselüloz, selüloz ve lignin miktarları	5
Tablo 2.2. Bazı lignoselülozik materyallerin kimyasal bileşimleri.....	7
Tablo 2.3. Biyokütle çevrim yöntemleri, elde edilen yakıtlar ve uygulama alanları	12
Tablo 2.4. Biyочar üretilen termokimyasal proseslerin parametre aralıkları	12
Tablo 2.5. Gelişmekte olan ülkelerde pişirme ve ısınma için biyoyakıt kullanan insan sayısı (Milyon)	14
Tablo 2.6. Türkiye'nin 2013 yılındaki yıllık biyokütle enerjisi.....	15
Tablo 2.7. Türkiye'de mevcut ve planlanmış biyokütle enerji potansiyeli.....	16
Tablo 2.8. Türkiye'de yapımı tamamlanan biyokütle ve atık yakıt kaynaklı elektrik üretim tesisleri.....	16
Tablo 3.1. Odun ve torrefiye odunun elementel analizi	18
Tablo 3.2. Sıcaklık ile polimerik yapıdaki ağırlık kaybı.....	22
Tablo 3.3. Torrefiye katının diğer yakıtlar ile karşılaştırılması	24
Tablo 5.1. Talaş ve odun tozundan hazırlanmış peletlerin özellikleri	38
Tablo 5.2. Bazı tarımsal atıkların ısı değerleri ve kül içerikleri.....	39
Tablo 5.3. Peletlerin fiziksel ve kimyasal parametrelerinin üretim ve yakma üzerindeki etkileri	41
Tablo 6.1. Odun talaşı, odun peleti, torrefiye pelet, torrefiye talaş ve kömürün özellikleri	42
Tablo 6.2. Biyokütlenin peletlemeden önce ve sonra torrefaksiyonu sonucu elde edilen torrefiye peletlerin özellikleri	46
Tablo 9.1. Meşe ağacı odunu ve torrefiye meşe ağacı odunun kısa ve elementel analizi	65
Tablo 9.2. Çam ağacı odunu ve torrefiye çam ağacı odununun kısa ve elementel analizi	66

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların elektrik üretiminde kullanımı nedeniyle ortaya çıkan çevresel sorunlar ve fosil yakıtların rezervlerindeki azalma güneş, rüzgar ve biyokütle gibi alternatif yenilenebilir enerji kaynakların kullanımını arttırmıştır (Roknia vd., 2018; Agbor vd., 2014). Biyokütle, genellikle karbon, hidrojen, oksijen ve azottan oluşan herhangi bir hidrokarbon malzemesi olarak tanımlanabilir. Kükürt daha az oranda bulunur. Bazı biyokütle türleri içerisinde inorganik madde miktarı yumuşak odunda %1'den otuz ve tarımsal atıklarda %15'e kadar değişmektedir. Biyokütle kaynakları arasında odunsu ve otuz türler, odun artıkları, küspe, tarım ve sanayi kalıntıları, atık kağıtlar, belediye katı atıkları, talaş, çim, gıda işleme artıkları, hayvan atıkları, su bitkileri ve algler gibi çeşitli doğal ve türevli malzemeler sayılabilir (Yaman, 2004). Biyokütlenin yanması veya kömürle birlikte yakılması ile elde edilen biyoenerji önemlidir ve küresel birincil enerji üretiminde şu anda %10'luk kısmı temsil etmektedir (Uris vd., 2014).

Biyokütle veya yaygın ismi ile lignoselülozik maddeler genellikle karmaşık kimyasal yapılı heterojen ham maddelerdir. Odunsu bitkisel dokulara mikroskobik olarak bakıldığında hücre duvarlarını oluşturan selüloz (%30-40), hemiselüloz (%25-35) ve lignin (%12-30) gibi ana kimyasal yapılardan oluştuğu görülür. Belirtilen miktar oranları genel olup, bu aralıklar yumuşak ve sert odunlarda biraz farklıdır (Prins vd., 2006a).

Biyokütle gazlaştırma, piroliz, anaerobik parçalama, fermentasyon ve transesterifikasyon gibi çeşitli yöntemlerle gaz veya sıvı yakıtlara dönüştürülebilir. Aynı zamanda doğrudan ısı ve güç üretimi için katı bir yakıt olarak da kullanılabilir. Bununla birlikte, biyokütle yüksek nem içeriği, düşük kalori değeri, higroskopik yapısı ve düşük yığın yoğunluğunun yanı sıra toplama, öğütme, depolama ve nakliye konularında zorluklara neden olur. Bu nedenlerle, biyokütle genellikle santrallerde tek başına kullanılmak yerine kömür ile birlikte kullanılır (Sami vd., 2001). Biyokütlenin dezavantajlarını gidermek için geçmişte birtakım ön işlemler uygulanmıştır. Bu yöntemler içerisinde katı yakıt üretiminde torrefaksiyon ve peletleme en fazla dikkat çeken yöntemlerdir. Torrefaksiyon ve peletleme işlemleri biyokütlenin endüstriyel uygulamalarda kullanımı için sayısız avantajlar sağlamaktadır (Chen vd., 2015).

Torrefaksiyon işlemi, biyokütlenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde önemli pozitif değişimleri sağlayan bir ön işlemdir. Bu işlem inert ortamda ve düşük ısıtma hızında 200 °C- 300 °C gibi dar bir sıcaklık alanında yürütülen ve başlıca katı ürün elde etmek için uygulanan bir ön işlemdir (Chen ve Kuo, 2010). Biyokütlerdeki hemiselülozun büyük bir kısmı selülozun ise belirli bir kısmı parçalanır (Rousset, 2012). Torrefaksiyon işlemi süresince biyokütlerde dehidratasyon, deoksijenasyon ve dehidrojenasyon reaksiyonları meydana gelmektedir. Biyokütlenin lignoselülozik yapısındaki bu parçalanma onun öğütülebilirliği, reaktivitesi ve daha üniform bir yapı kazanmasını sağlar (Chen vd, 2012). Aynı zamanda O/C ve H/C oranının azalması nedeni ile enerji yoğunluğu artmakta ve bu işlem ile biyokütle daha az hidrofilik hale gelmektedir (Dudyn'ski vd., 2015). Ayrıca torrefaksiyon işlemi ile biyokütlerde daha az uçucu madde kaldığından dolayı yanma sırasında daha az uçucu madde salınabilir ve nem içeriği azaldığından dolayı daha kolay tutuşabilir (Ren vd., 2017).

Peletleme işlemi fiziksel bir işlemdir. Bu ön işlemde biyokütle atıkları mekaniksel bir kuvvet uygulanarak sıkıştırılır ve üniform hacimli katı peletler üretilir (Chen vd., 2015). Odun pelet halinde yanma ve gazlaştırmayı içeren pek çok evsel ve endüstriyel uygulamalar için yüksek kalitede uygun bir besleme olarak göz önüne alınmaktadır. Odunun yoğunlaştırılmasının (pelet formda) amacı hacimsel enerji yoğunluğunu artırmak, kolay depolanma ve taşıma kolaylığı sağlamak, nem içeriğini azaltmak ve taşıma maliyetini düşürmektir (Li vd., 2012; Kumar vd., 2017). Ancak odun peletleri kömürün aksine suya maruz kaldığı zaman hızla parçalanır ve açık çevrede depolanamaz (Ghiasi vd., 2014). Odun peletinin enerji yoğunluğu (8-11 GJ/m³) odun talaşından (2-3GJ/m³) yüksek olmasına karşın 18-24 GJ/m³ enerji yoğunluğuna sahip kömürden hala çok düşüktür (Van der Stelt vd., 2011; Adams, 2015).

Odun peletlerinin torrefaksiyonunun incelenmesi aşağıda belirtilen yararları sağlayabilir:

- Torrefaksiyon işleminin uygulanması ile biyokütlenin yakıt olarak kullanımındaki zorluklar azaltılabilir.
- Peletleme işlemi ile hacimsel enerji yoğunluğu düşük biyokütlenin enerji yoğunluğunun artmasının yanı sıra depolama ve taşıma kolaylığı sağlanabilir.

- Torrefaksiyon işlemi öncesi peletleme yapılması ile torrefiye ürünün peletlenmesindeki zorluklar azaltılabilir.

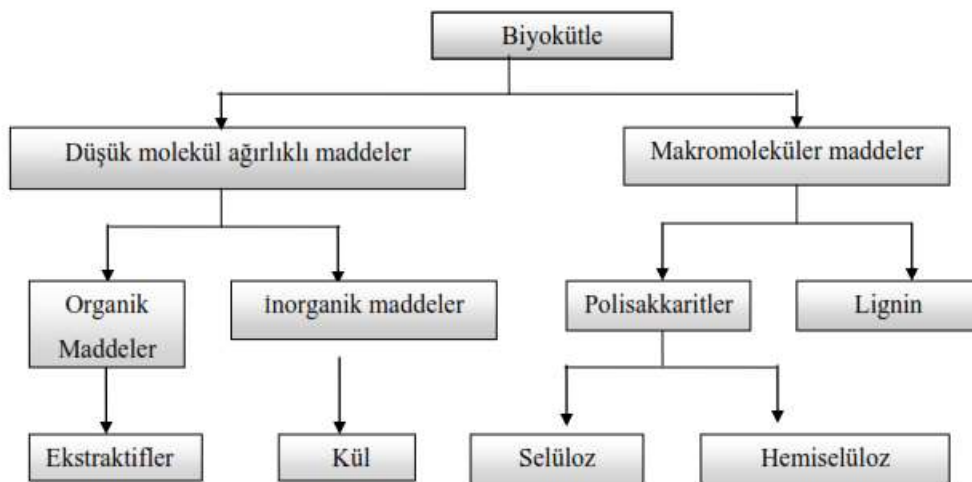
Böylece büyük potansiyele sahip yenilenebilir biyokütle atıkların özelliklerinin torrefaksiyon işlemi ile iyileştirilmesi Türkiye'nin enerji gereksinimini karşılarken dışa bağımlılığını azaltmada katkı sağlayacak bir yöntem olarak dikkate alınıp alınmayacağı anlaşılabilir.



2. BİYOKÜTLE

Biyokütle, biyolojik olarak üretilen bütün maddeleri tarif etmektedir. Yüz yıllık periyottan daha kısa sürede yenilenebilen, karada ve suda yetişen bitkiler, hayvansal atıklar, gıda endüstrisi ve orman yan ürünleri ile kentsel atıkları içeren, biyolojik kökenli fosil olmayan tüm organik maddeler biyokütle olarak tanımlanır (Demirtaş, 2001). Bitkilerin ve canlı organizmaların kökeni olarak ortaya çıkan biyokütle, güneş enerjisini fotosentez yardımıyla depolayan bitkisel organizmalar olarak bilinir. Biyokütle malzemeleri arasında saman, küspe, kahve ve meyve kabuğu gibi tarımsal atıkların yanında talaş, ahşap, yonga ve ağaç kabuğu gibi orman atıkları yüksek enerji potansiyeline sahiptir (Mohan vd., 2006).

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 toplam biyokütlenin %65-75'ini ve lignin ise %18-35'ini oluşturmaktadır. Bunun yanında düşük molekül kütleli organik ekstraktifler ve anorganikler ise biyokütlerde ağırlıkça %4-10 arasında bulunur. Selüloz, hemiselüloz ve lignin oranları biyokütlenin tipine göre farklılık göstermekle beraber tüm biyokütleler için en temel üç ögeyi oluşturmaktadır (Strehler ve Stuetzle, 1987). Şekil 2.1.'de biyokütlenin temel bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Biyokütlenin temel bileşenleri

2.1. Biyokütlenin Bileşimi

Biyokütle veya yaygın ismi ile lignoselülozik maddeler genellikle karmaşık kimyasal yapılı heterojen ham maddelerdir. Yapıları ve bileşimi bitkilerin türlerine ve farklı kısımlarına göre değişir. Örneğin yeşil yaprakların protoplazmalarında kayda değer miktarlarda proteinler ve çok miktarda özütlenabilir maddeler bulunur. Buna karşılık odunsu bitki dokuları mikroskobik olarak bakıldığında hücre duvarlarını oluşturan selüloz (%30-40), hemiselüloz (%25-35) ve lignin (%12-30) gibi ana kimyasal yapılardan oluşur. Belirtilen miktar oranları genel olup, bu aralıklar yumuşak ve sert odunlarda biraz farklıdır (Prins vd., 2006).

Tablo 2.1. Saman ve odundaki hemiselüloz, selüloz ve lignin miktarları (Knudsen vd., 2004)

	% Bileşim (ağırlıkça)		
	Saman	Yumuşak odun	Sert odun
Selüloz	33-45	35-50	45-50
Hemiselüloz	20-25	25-30	20-25
Lignin	15-20	27-30	20-25

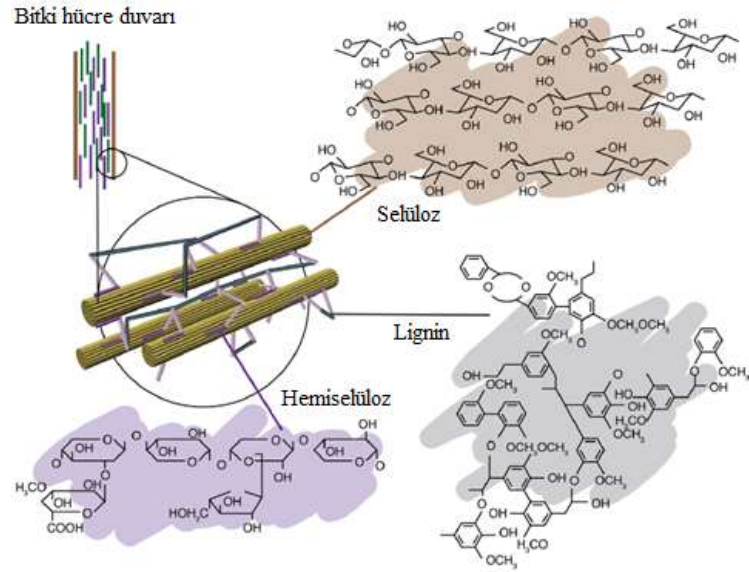
Tablo 2.1'de saman ve odunun bitki hücre duvarındaki selüloz, hemiselüloz ve lignin miktarları verilmiştir. Yumuşak odun, sert odun ve samana göre yüksek lignin içeriğine sahiptir. Sert ve yumuşak odun arasındaki ana fark hemiselüloz fraksiyonudur. Yumuşak odun hemiselülozları %60-70 glikomannan ve %15-30 arabinogalaktan, buna karşılık sert odun hemiselülozları %80-90 4-O-metil glukoronoksilan (ksilan) bulundurulur.

Şekil 2.2'de bitki hücre duvarı ve lignoselülozik biyokütlenin bileşenleri gösterilmiştir. Hemiselüloz, gösterildiği gibi, selülozda gözlemlenen dallanmamış polimer başına 7000-15000 glikoz molekülünün aksine, daha kısa zincirlerden (500-3000 şeker birimi) oluşan dallı bir polimerdir (aynı zamanda bir polisakarittir). Lignin; selüloz, hemiselüloz ve pektin bileşenleri arasında hücre duvarındaki boşlukları doldurur. Hemiselüloza kovalent olarak bağlıdır ve böylece hücre duvarına mekanik mukavemet kazandırır.

2.1.1. Selüloz

Selüloz, yüksek molekül ağırlığına sahip (300000 ile 500000 arasında) lineer bir polimerdir. $(C_6H_{10}O_5)_n$ formülü ile gösterilmektedir. Burada n polarizasyon derecesidir. Bitkilerde en fazla bulunan ve en basit yapıya sahip olan, aynı zamanda hücre duvarı yapısında yer alan yapısal polisakkaritlerin en önemlilerinden birisidir. Bitkilerin hücre yapısında bulunan selüloz, bitkilerin sert ve kuvvetli olmasını sağlar.

Selüloz, glikoz ünitelerinin β -1,4 glikosidik oksijen köprüleri ile bağlanması sonucu oluşmuş bir homopolimerdir. Selülozdaki hidroksil gruplar ham biyokütlenin higroskopik davranışını etkileyen hidrojen bağlarının oluşumunu etkilemektedir. Selülozun higroskopik yapısı selüloz zincirleri arasındaki boşluğun artırması nedeni ile biyokütle şişmektedir (Nhuchhen vd., 2014). Selülozun termal dayanımı hemiselülozdan daha yüksektir ve 240-350 °C arasında termal olarak parçalandığı belirtilmektedir (Saleh, 2013). Pirolizi endotermiktir (Peng, 2012a).



Şekil 2.2. Bitki hücre duvarı ve lignoselülozik biyokütlenin bileşenleri (Tumulu vd., 2011)

2.1.2. Hemiselüloz

Lignoselülozik maddelerin selülozdan sonraki en önemli bileşenleri hemiselülozdur. Temel yapısı $(C_5H_8O_4)_n$ dir. Hemiselüloz, bitki hücrelerinin duvar yapısını selüloz ve pektinlerle birlikte oluşturan bir polisakkarittir. Odunların ağırlıkça %25-35'i hemiselülozdan oluşur.

Selülozdan daha düşük molekül ağırlığına sahiptir. Selüloz gibi kristalin bir yapıya sahip değildir. Hemiselüloz başlıca glikoz, mannoz ve galaktoz gibi heksozlar ile ksiloz ve arabinoz gibi pentozlardan oluşmaktadır. Odunun üç ana bileşeni arasında ısıya en duyarlı olanı hemiselülozdur. Hemiselülozun termal parçalanması 130-260 °C arasında meydana geldiği ana ağırlık kaydının 180 °C' nin üzerinde olduğu belirtilmektedir (Saleh, 2013). Termal davranışı ekzotermiktir (Yang vd., 2007). Hemiselüloz, selülozdan bazı özellikleri ile ayrılır. Odunun diğer elemanlarından ayrıldıktan sonra seyreltik alkali çözeltisinde ve kaynayan suda çözünebilirler (Peng, 2013).

2.1.3. Lignin

Lignin; aromatik, amorf ve dallanmış yapıya sahip odun bileşenidir. Lignin selüloz, hemiselüloz ve pektin arasındaki hücre duvarındaki boşlukları doldurmaktadır. Ağaca sertlik özelliği kazandıran lignin biyokütlenin ağırlıkça %18-33'ünü oluşturur. Ligninin kimyasal yapısı benzen halkaları, metoksi-, hidroksi- ve propil grupları gibi dallanmış aromatik polimerlerden oluşmaktadır. Ligninin yapısı karmaşıktır ancak genel olarak p-kumar alkol, sinapil alkol ve koniferil alkol üç fenil propan monomerinin kopolimeridir. Ligninin bozunması 280-500 °C aralığındadır (Saleh, 2013). Termal davranışı ekzotermiktir (Yang vd., 2007).

Bazı lignoselülozik maddelerin selüloz, hemiselüloz ve lignin içerikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Bazı lignoselülozik materyallerin kimyasal bileşimleri (Demirbaş, 1996)

Lignoselülozik Materyal	Selüloz (%)	Hemiselüloz (%)	Lignin (%)
Çay atığı	30,2	19,9	40,0
Buğday sapı	28,8	39,1	18,6
Fındık kabuğu	25,9	29,9	42,5
Çiğit kabuğu	59,0	17,0	24,0
Fıstık sapı	36,0	43,0	21,0
Mısır koçanı	52,0	32,0	15,0
Kayın ağacı	45,8	31,8	21,9
Ladin ağacı	50,8	21,2	27,5
Tütün sapı	42,4	28,2	27,0
Soya sapı	33,0	53,0	14,0
Tütün yaprağı	36,3	34,4	12,1
Zeytin kabuğu	24,0	23,6	48,4

2.2. Biyokütle Enerjisinin Kaynakları

Biyokütleden sağlanan enerjinin % 65’lik kısmını orman atıkları, %33’lük kısmını ise tarımsal atıklar oluşturmaktadır (Orman Genel Müdürlüğü, 2012). Biyokütle enerjisi üretimi için kullanılan biyokütle kaynaklarını dört başlık altında incelemek mümkündür. Bunlar (Encinar vd., 1998):

- Odunsu ve otsu bitkilerden oluşan odun endüstrisi artıkları ile ormansal artıklar,
- Tarım alanlarında üretilen yağlı tohum bitkileri, şekerli bitkiler (yüksek nem içerikli bitkiler) ve nişastalı bitkiler ile hayvansal atıklar,
- Deniz ve göllerde bulunan, yüksek nem içeriğine ve büyüme hızına sahip olan deniz otları, yosunlar, algler, saz bitkileri ve bazı mikro organizmalardan oluşan enerji bitkileri,
- Endüstriyel kaynaklı ham madde atıkları ve şehirsal atıklardır.

2.2.1. Bitkisel Kaynaklar

Bitkisel kaynaklar; orman ürünleri, çok hızlı bir şekilde büyüyen bazı ağaç türleri, suda yetişen yosun benzeri otlar, algler ve enerji bitkilerini kapsamaktadır. Enerji bitkileri, enerji üretimi için yetiştirilen bitkilerdir. En önemlileri söğüt, kavak gibi kısa sürede yetiştirilebilen mahsuller; mısır, buğday ve arpa gibi nişasta mahsulleri; şeker kamışı ve pancar gibi şeker mahsulleridir. Tarımsal atıklar, besin eldesi amacıyla tarımsal yolla üretilen bitkilerin hasat sonrası ekim alanlarında ya da işlendikleri tesislerde kalan endüstriyel potansiyele sahip kök, kabuk, sap ve yapraklarını kapsar. Buğday ve pirinç sapları, tahıllardan elde edilen saman, mısır sapı ve koçanları örnek olarak verilebilir. Ayrıca, yemişlerin sert kabukları ve meyve çekirdekleri de bu grupta incelenebilir.

Bitkisel kaynaklı biyokütleden etil alkol ve metil alkol üretimi gerçekleştirilmektedir. Enerji bitkileri, diğer bitkilere göre CO₂’yi daha iyi emmekte ve suyu daha iyi kullanmakta, kuraklığa karşı daha dayanıklı olmaktadır. Karbonhidratlardan (şeker kamışı, melas ve sorgum), nişastalardan (mısır ve patates) ve selülozlu bitkilerden (odun ve zirai artıklar) etanol elde edilmektedir(Ann, 2008).

2.2.2. Hayvansal Kaynaklar

Biyokütle enerjisi elde etmek için kullanılan temel hayvansal kaynaklar, büyük ve küçükbaş hayvanlarla kümes hayvanlarının atıklarından oluşmaktadır. Teorik olarak

domuz ve sığır ile kümes hayvanlarının en yüksek biyokütle enerjisi üretme kapasitesine sahip olduğu kabul edilmektedir. Genel olarak hayvansal atıkların samanla karıştırılıp kurutularak yakıt ve tarımsal gübre olarak kullanıldığı görülmektedir.

Hayvansal gübrenin oksijensiz ortamda fermentasyonu ile üretilen biyogazın da dünyada kullanımı oldukça yaygındır. Biyogaz % 55-70 metan, %30-45 karbondioksit, çok az miktarda da hidrojen sülfür (20-4000 ppm) ve su içermektedir. Biyogazın ısı değeri karışım içerisindeki metan miktarına bağlı olarak 1900 - 27500 kJ/m³ arasında değişmektedir (Uskan, 2009).

2.2.3. Şehir ve Endüstriyel Kaynaklar

Belediye atıkları olarak da adlandırılan şehir ve endüstri atıkları; her türlü evsel organik atıkları ve sanayide fabrikasyona uğramış organik atıkları kapsamaktadır. Bu atıkların elde edilmesi kolaydır ve neredeyse sınırsız arza sahiptir. Geçmişte büyük oranda ihmal edilen bu atıklar büyük miktarlara ulaşabilmekte ve önemli çevresel problemlere yol açabilmektedir. Bu atıklardan biyoenerji üretimi sayesinde hem çevresel sorunlar giderilebilmekte hem de ekonomik faydalar elde edilebilmektedir.

Çöp depolanan yerlerde ve evsel atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurları önceden stabilize edilmemiş ve biyokimyasal aktiviteleri durdurulmamışsa, aerobik organizmalar tarafından ayrıştırılarak metan gazına dönüştürülür. Metan gazından faydalanmak için, çöp toplama alanlarında oluşan gazları toplayacak sondaj borularının inşa edilmesi gerekmektedir. Sondaj boruları belirli bir düzene göre yerleştirilirse bu alanlarda oluşan gazlar toplanarak biyoenerji üretilebilmektedir (Rosillo-Calle vd.,2009). Gaz içerisinde % 35-60 metan, %35-55 karbondioksit, % 0-20 oranında azot bulunur. Gazın 1 m³ ünün ısı değeri 18-27 MJ/Nm³ arasında değişmektedir. Gazın bileşimi ve ısı değeri toplanan çöpün bileşimine bağlıdır. Çöp ve katı atıkların yüksek sıcaklıklarda yakılması ile elde edilen enerji, ısı enerjisinde veya elektrik üretiminde kullanılmaktadır (Uskan, 2009).

Ana bileşenleri karbonhidrat bileşikler olan biyokütle, değişik fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerden geçirilerek, ticari özelliğe sahip, temel ve belirli özellikleri standartlaştırılmış olan katı, sıvı ve gaz haldeki biyokütle enerjisine dönüşmektedir. Biyokütle enerjisi; metanol, etanol, butanol ve biyodizel olarak sıvı; metan ve hidrojen

olarak gaz; odun ve tezek olarak katı halde kullanılabilen ve tribün kazanlarında, mikrobiyal yakıt hücrelerinde yakılarak kullanılan bir enerjidir (Mark vd., 2006).

Günümüzde biyokütle enerjisini klasik ve modern olarak iki sınıfa ayırabiliriz. Ağaç kesiminden elde edilen odun ve hayvan atıklarından oluşan tezeğin basit şekilde yakılması klasik biyokütle enerjisi olarak tanımlanırken; enerji bitkileri, enerji ormanları ve ağaç endüstrisi atıklarından elde edilen biyo-dizel, etanol gibi çeşitli yakıtlar, modern biyokütle enerjisinin kaynağı olarak tanımlanır.

Biyokütle enerjisinin kendine has bir takım özellikleri bulunmaktadır. Ladanai ve Vinterbäck'e göre bunlar aşağıdaki gibidir:

- Kömür, petrol ve doğal gazdan sonra dördüncü büyük enerji kaynağı olması,
- Dünyadaki en büyük ve en önemli yenilenebilir enerji seçeneği olması,
- Diğer yenilenebilir kaynaklarla birlikte kullanılması ve farklı enerji biçimlerine dönüşebilmesi,
- Diğer yenilenebilir kaynaklara göre kesikli olmaması ve kolay depolanabilir olması,
- Temiz, yenilenebilir ve çevre dostu olması,
- Üretim ve çevrim teknolojilerinin iyi bilinmesi, enerji verimi için uygun olması şeklinde sıralanabilir.

2.3. Biyokütle Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biyokütle enerjisinin kendine has özelliklerinden dolayı bir takım avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Biyokütle enerjisinin hemen her yerde yetiştirilebilme, üretim ve çevrim teknolojilerinin iyi bilinmesi, her ölçekte enerji üretimi için uygunluk, düşük ısı şiddetlerinin yeterliği, depolanabilirliği, 5-35 °C arasındaki sıcaklıkların yeterliliği, sosyoekonomik gelişmelerde önemli olması, çevre kirliliği oluşturmaması (NO_x ve SO₂ salınımlarının çok düşük olması), diğer enerji kaynaklarına göre sera etkisi oluşumuna daha az sebep olması, atmosferde CO₂ dengesinin sağlanması ve asit yağmurlarına yol açmaması gibi ve özellikleriyle de diğer enerji türlerine göre ön plana çıkmaktadır (Batı Karadeniz Kalkınma Ajansı BAKA , 2012). Günümüzdeki sürdürülebilir enerji arayışında önemli bir seçenek haline gelen biyokütle enerjisinin ekonomik avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz (Schmidhuber, 2011):

- Yenilenemez enerji kaynaklarının alternatifidir, fosil enerji bağımlılığının azalmasına katkı sağlar.
- Biyokütle enerjisi üretimi sayesinde tarımsal ve hayvansal atıkların oluşturduğu çevresel sorunlar ve hastalıklar bertaraf edilebilmektedir. Böylece biyokütle enerjisi karbondioksit salınımının düşürülerek iklim değişikliğinin azaltılmasına, biyoçeşitliliğin artırılmasına, hava-su-toprak kullanımı ve kalitesinin artırılmasına katkıda bulunur.
- Biyokütle enerjisi üretim tesisleri kuruldukları bölgede gelir ve istihdam düzeyinin artmasına ve göçlerin azalmasına yardımcı olur. Aynı zamanda enerjide dışa bağımlılığı azaltma, üretim maliyetlerini düşürme gibi etkilere de sahiptir.

Biyokütle enerjisinin önemli olan avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar (Cristy vd., 2012):

- Biyokütle enerjisi yenilenemez enerjiye göre daha düşük enerji içeriğine sahiptir ve enerji dönüşümü için genellikle yüksek yatırım maliyeti gerekmektedir.
- Biyokütle enerjisinin yoğunluğu düşüktür, nem içeriği yüksektir ve yapısı heterojendir. Bu nedenle taşınması, depolanması ve muhafaza edilmesi için daha yüksek maliyetler gerekmektedir.

2.4. Biyokütle Dönüşüm Teknolojileri

Biyokütle materyalleri biyokütle dönüşüm teknikleriyle işlenerek katı, sıvı ve gaz yakıtlara çevrilir. Çevrim sonunda biyodizel, biyogaz, biyoetanol, pirolitik gaz gibi ana ürün olan yakıtların yanı sıra, gübre, hidrojen gibi yan ürünler de elde edilmektedir. Biyokütleden enerjinin yanı sıra mobilya, kağıt, yalıtım malzemesi yapımı alanlarında da yararlanılmaktadır. Biyokütlenin termokimyasal dönüşümü süreçleri piroliz, gazlaştırma ve torrefaksiyon olarak örneklendirilebilir. Termal dönüşüm sonucunda ortalama 28 kJ/kg enerji yoğunluklu biyochar elde edilmektedir (Lima vd., 2010).

Biyokütleyle uygulanan dönüşüm teknikleri ve elde edilen ürünlerin uygulama alanları Tablo 2.3'de verilmiştir. Çeşitli termokimyasal dönüşüm yöntemlerinin parametre aralıkları ve biyochar verimleri ise Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Biyokütle çevrim yöntemleri, elde edilen yakıtlar ve uygulama alanları (Uskan, 2009)

Biyokütle	Çevirim yöntemleri	Yakıtlar	Uygulama alanları
Orman artıkları	Havasız çürütme	Biyogaz	Elektrik üretimi, ısınma
Tarım artıkları	Piroliz	Etanol	Isınma, ulaşım araçları
Enerji bitkileri	Doğrudan yakma	Hidrojen	Isınma
Hayvansal atıklar	Fermantasyon, havasız çürütme	Metan	Isınma, ulaşım araçları
Organik çöpler	Gazlaştırma	Metanol	Uçaklar
Algler	Hidroliz		Sentetik yağ, Roketler
Enerji ormanları	Biyofotoliz	Motorin	Ürün kurutma
Bitkisel ve hayvansal yağlar	Esterleşme reaksiyonları	Motorin	Ulaşım araçları, ısınma,

Tablo 2.4. Biyochar üretilen termokimyasal proseslerin parametre aralıkları (Mohan vd.,2006)

Süreç	Sıcaklık (°C)	Isıtma Hızı (°C/dk)	Basınç	Bekleme süresi	% Char	% C
Yavaş piroliz	350-800	Yavaş, <10	Atmosferik	10 dk-2 gün	30	95
Torrefaksiyon	200-300	Yavaş, <10	Atmosferik	10-60 dk	61-84	51-55
Hızlı Piroliz	400-600	Çok hızlı, ~1000	Vakum - Atmosferik	~ 1 s	12-26	74
Gazlaştırma	700-1500	Orta-Çok hızlı	Atmosferik /Yüksek	10-20 dk	10	-

Piroliz: Oksijensiz ortamda ya da önemsenmeyecek kadar az oksijen bulundurulmuş ortamda hammaddenin termal bozundurulmasıdır. Piroliz prosesinin yavaş veya hızlı olması ısıtma hızı, sıcaklık, buharın reaktörde kalma süresi gibi işlem koşullarına göre tanımlanmaktadır. Piroliz işlemi kendi içinde temel olarak ikiye ayrılmaktadır. Geleneksel piroliz yavaş ısıtma hızına sahiptir. Piroliz sisteminin yavaş ya da hızlı olması birçok kaynakta farklı tanımlanabilmektedir. Piroliz sırasında açığa çıkan buhar ve aerosol bileşenlerin reaktörden ayrılma hızı piroliz türünü belirler. Reaktörden hızla ayrılan buhar, sıvı oluşumunun daha kaliteli olmasını sağlar, bu piroliz prosesi hızlı piroliz olarak tanımlanmaktadır. Yavaş ısıtma hızlarında ise buhar ve aerosol bileşenler katı faz ile temas halinde kalarak, ikincil reaksiyonlar gerçekleştirmektedir (Brewer vd., 2009).

Gazlaştırma: Biyokütlenin buhar ya da hava ile reaksiyona girmesi ile pirolizden ayrılmaktadır. Gazlaştırmada biyokütle oksijen miktarı kontrol edilen baca gazına dönüşmektedir. Gazlaştırma ile doğrudan elektrik veya ısı üretimi için kullanılabilecek

gaz yakıt elde edilmektedir. Ürün karışımı (katı, sıvı, gaz) sıcaklık, parçacık boyutu, reaktörde kalma süresi, basınç ve biyokütle ile temas eden gaz kompozisyonu değiştirilerek kontrol edilmektedir. Literatürde gazlaştırma ve piroliz sistemleri karşılaştırıldığında, yavaş pirolizde daha yüksek char aromatikliği elde edildiği görülmüştür. Hızlı ve yavaş pirolizde halkalı bileşiklerin boyutu (7-8 halka/bileşik) birbirine benzerken; gazlaştırmada daha yüksek bir yoğunluk (~17 halka/bileşik) gözlemlenmiştir (International Energy Agency, 2009).

Tıpkı torrafaksiyon gibi gazlaştırma da biyokütle dönüşüm teknikleri için bir ön işlem olarak kullanılmaktadır. Biyokütle gazlaştırılması hem yaş biyokütle (melas, gübre, meyve atıkları) hem de kuru biyokütle (odun, zirai atıklar) için uygulanan bir termokimyasal teknolojidir. Kuru biyokütle genelde piroliz edilir. Elde edilen kondensat aşırı ısıtılır. Sıcak yağa su püskürtülmesi ile de gazlaştırma gerçekleştirir. Yaş biyokütle ise yüksek basıçta (>220 atm) ve yüksek sıcaklıkta (>300 °C) ısıtılınca gazlaşır. Elde edilen gaz CH₄, H₂, CO, CO₂ içerir. Bileşen yüzdesi ise kullanılan biyokütleyle göre farklılık gösterir (Tolay vd.,2008).

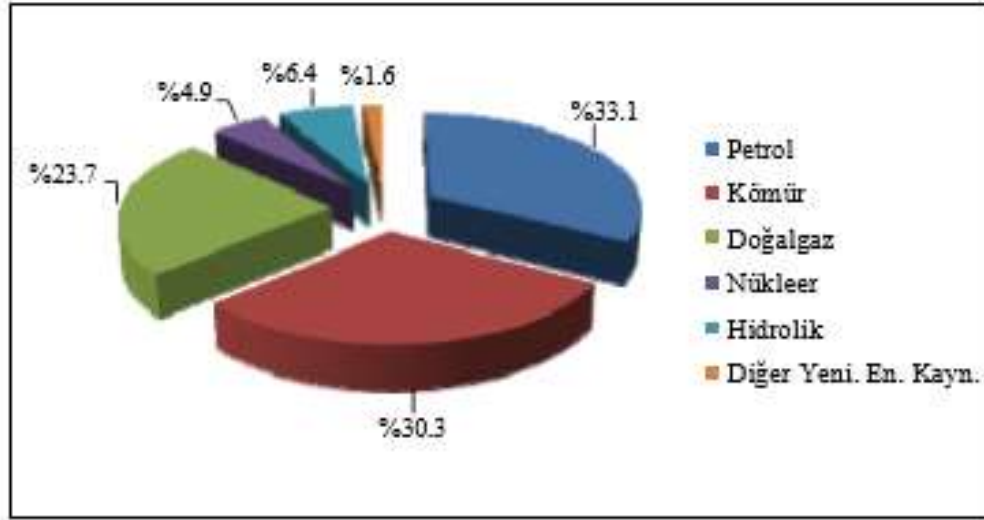
Nispeten düşük nem içeriği, iyi öğütülebilirlik ve çekici C / H / O oranları, torrefaksiyonu gazlaştırma için ilginç bir ön işleme teknolojisi haline getirir. Biyokütle kullanan bir gazlaştırma işleminde partikül büyüklüğü ve nem içeriği iyi işlem için kritik faktörlerdir. Gazlaştırma işleminde torrefiye biyokütle kullanarak işlem sırasında oluşan sentez gazındaki artan H₂ ve CO seviyelerinden ve genel işlem verimliliğinin artırılmasından potansiyel olarak faydalanabilir.

2.5. Türkiye ve Dünyada Biyokütle Enerjisi

Dünya nüfusunun hızla artması ve buna bağlı olarak teknolojik gelişmelerin artmasıyla beraber mevcut enerji kaynakları ihtiyacı tam olarak karşılayamamaktadır. The World Energy Outlook projesinin sonuçlarına göre 2030 yılına kadar dünyada enerji ihtiyacının %40 artacağı, 2050 yılına kadar da petrol, doğal gaz ve kömür kaynaklarının ihtiyacı karşılamakta yetersiz kalacağı düşünülmektedir (Antal , Gronli, 2003).

Dünyada kullanılmakta olan enerjinin çoğu birincil enerji kaynaklarından elde edilmektedir. 2011 yılı verilerine göre dünyada birincil enerji kullanımı miktarı 12274,6 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olarak gerçekleşmiştir. Şekil 2.3.'de birincil enerji kullanımında en büyük paya sahip olan kaynaklar sırasıyla; petrol (%33,1), kömür

(%30,3) ve doğal gaz (%23,7) şeklindedir. Burada diğer yenilenebilir enerji kaynakları olarak bahsedilenler; rüzgar, biyoyakıt ve jeotermal enerji kaynaklarıdır. Şekil 2.3.'de dünyada 2011 yılına ait birincil enerji kullanımı payının yüzde oranları verilmiştir.



Şekil 2.3. Dünyada 2011 yılı birincil enerji kullanımı (Koç, E., Şenel, M. C., 2013)

Biyokütle enerjisi Türkiye’de daha çok ticari olmayan yakıt biçiminde kullanılmakta ve yerli enerji üretiminin dörtte birini karşılamaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde yaklaşık 2,3 milyar insan enerji ihtiyacını biyokütleden (yakacak odun ve odun kömürü) karşılamaktadır (Keles vd., 2017). Gelişmekte olan ülkelerde enerji ihtiyacını biyokütleden sağlayan insan sayısı Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.5. Gelişmekte olan ülkelerde pişirme ve ısınma için biyoyakıt kullanan insan sayısı (Milyon) (Keles vd., 2017)

Ülke/Bölge	2010	2020	2030
Çin	701	689	645
Endonezya	152	138	124
Asya'nın geri kalanı	131	136	145
Hindistan	582	597	632
Güney Amerika'nın geri kalanı	124	165	187
Latin Amerika	92	86	72
Afrika	579	806	823
Toplam	2361	2617	2628

Türkiye’de enerji ihtiyacının yarısından fazlası ithalatla sağlanmaktadır. Petrolün toplam birincil enerji tüketimi içindeki payı en büyüktür. Türkiye’ de başta linyit olmak üzere geniş kömür rezervleri bulunmaktadır. Belirlenmiş linyit rezervleri 16 milyar ton olmakla beraber tahmini toplam olası rezerv miktarı 30 milyar ton olarak belirtilmektedir. Afşin-Elbistan, Soma ve Tunçbilek’ de bulunan linyitlerin çoğunun kül içeriği % 14 - 42, nem içeriği % 15- 50 ve uçucu madde içeriği % 16-38 arasında değişmektedir (Kaygusuz ve Kaygusuz, 2002).

Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları bakımından büyük bir potansiyele sahiptir. Son zamanlarda odun, fındık kabuğu, atık kağıt, çay atıkları, tarımsal atıklar, saman gibi biyokütle atıkların kullanımı için girişimlerde bulunulmuştur. Bu tarımsal atıklar gazlaştırma işlemi ile hidrojen zengin gaz ürünlere dönüştürülebilir. Türkiye'deki toplam enerji miktarı ile karşılaştırıldığında biyokütle tüketimi %22'den %14'e düşmektedir. Biyokütle kullanımındaki bu azalma sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) kullanımından kaynaklanmaktadır. Yerli enerji tüketimi toplam enerji tüketiminin % 27'sini oluşturur ve yaklaşık % 35'i biyokütle bazlı yakıtlardır. Türkiye'nin 2013 yılı için geri kazanılabilir biyoenerji potansiyeli Tablo 2.6'de görüldüğü gibi yaklaşık 33 Mtoe olarak tahmin edilmektedir. Türkiye'deki biyogaz üretim potansiyeli yaklaşık 1,5-2,0 Mtoe olduğu tahmin edilmektedir. Yenilenebilir enerji üretiminde biyogaz üretim miktarı çok düşük olması nedeni ile ihmal edilebilir (Keles vd., 2017). Türkiye’de yapımı tamamlanan biyokütle ve atık yakıt kaynaklı elektrik üretim tesisleri Tablo 2.8'de verilmiştir. Türkiye'nin mevcut ve planlanmış biyokütle miktarı Tablo 2.7'da verilmiştir.

Tablo 2.6. Türkiye'nin 2013 yılındaki yıllık biyokütle enerjisi (Keles vd., 2017)

Biyokütle	Yıllık potansiyel (Milyon ton)	Enerji değeri (Mtoe)
Bitkiler	60	20,0
Orman atıkları	20	5,4
Tarımsal sanayi kalıntıları	10	3,0
Odun endüstri kalıntıları	5	1,6
Hayvansal atıklar	6	1,4
Diğer	9	1,6

Tablo 2.7. Türkiye'de mevcut ve planlanmış biyokütle enerji potansiyeli

Yıllar	Modern biyokütle (ktoe)	Klasik biyokütle (ktoe)	Toplam (ktoe)
2012	2121	5364	7485
2014	2543	5082	7625
2016	2854	4856	7710
2018	3284	4568	7852
2020	3598	4234	7832
2022	3860	3976	7836
2024	4086	3785	7871
2026	4472	3556	8028
2028	4732	3322	8054
2030	4940	3300	8240
Toplam	39840	53773	93613

Tablo 2.8. Türkiye’de yapımı tamamlanan biyokütle ve atık yakıt kaynaklı elektrik üretim tesisleri
(Uskan, 2009)

Kurum Adı	Bölgesi	Yeri	Kapasite (MW)	Yakıt tipi
Aksa Enerji	Bursa	Bursa	1,2	Çöp
Belka	Ankara	Ankara	3,2	Biyogaz
İstaç	İstanbul	Kemerburgaz	5	Çöp

3. TORREFAKSİYON

Torrefaksiyon, biyokütleden daha yüksek kaliteli yakıt üretilmesini sağlayan termal bir ön işlemdir. Torrefaksiyon işlemi ile biyokütleden yakıt olarak faydalanmak mümkündür. Çalışmaların çoğunda tarif edildiği gibi, torrefaksiyon biyokütlenin 200-300 °C sıcaklıkları arasında düşük ısıtma hızında ve inert gaz atmosferi altında uygulanan termal bir işlemdir. Elde edilen katı ürün kahverengi/siyah renkte ve sağlam bir yapıdadır. Torrefaksiyon işlemi yapılmış olan biyokütle yaklaşık %67-84 arasında bir verime sahiptir. Odunun torrefaksiyonu sonrası elde edilen verim ise %77-90 arasındadır (Mohan vd., 2006).

Bu işlem ile biyokütle gazlaştırma ve kömür ile birlikte yakma sistemlerinde kullanılabilecek uygun bir yakıt haline gelmektedir. Temel amacı; biyokütledeki oksijeni uzaklaştırarak içeriğindeki karbon oranını arttırmaktır. Torrefaksiyon ile biyokütle enerji yoğunluğu artarken madde ağırlığı düşmektedir. Kısaca bu işlemle doğrudan adsorban olarak kullanılan biyochar elde edilememektedir ancak biyocharın geliştirilmesi için uygulanan bazı işlemlerde yapı kararlılığını sağlamak amacıyla yararlanılmaktadır (Chen ve Kuo, 2011).

Torrefaksiyonun ilk aşaması, hemiselülozun ayrışması ile karakterize edilir ve bu işlem genellikle yaklaşık 250-260 °C 'lik bir sıcaklıkta gerçekleşir. Hemiselülozun parçalanma süreci iki basamağa bölünmüştür. İlk aşamada monosakaritler, polisakaritler ve susuz şeker oluşumu gözlemlenirken son adımda, bu şekerlerin mineral cevher ile katalize edilen CO ve CO₂'ye ayrışması gözlemlenir. Karboksilik grupların karbon bağları, asit oluşumuna yol açan termal bölünme geçirirler. Bu asitler, termal bölünme reaksiyonlarında katalizör olarak kullanılırlar ve karbondioksit ve hidroksil aseton, metanol ve propanol gibi karbonillerin oluşumuna yol açarlar. Bunların çoğu yapılarında 1-3 karbon atomu ve 1-2 oksijen atomu içerir. Lignin ve selüloz, hemiselülozdan farklıdır, çünkü ayrışma bu kadar düşük sıcaklıklarda gerçekleşmez, dolayısıyla genel kayıp oldukça azdır (Rousset vd., 2011).

235–275 ve 275–300°C sıcaklıklarında gerçekleşen torrefaksiyon işlemleri sırasıyla hafif ve şiddetli torrefaksiyon olarak adlandırılabilir (Peng vd., 2012). Hafif torrefaksiyon ile biyokütleden içeriğindeki nem ve düşük molekül ağırlıklı uçucular ayrılmaktadır. Biyokütledeki en aktif olan bileşen olan hemiselüloz hafif torrefaksiyon esnasında termal olarak bir miktar ayrışır. Selüloz ve lignin miktarında ise belirli bir

değişme gözlenmez. Bu nedenle, biyokütlerdeki ağırlık kaybı oldukça yavaştır. Enerji yoğunluğu ve kalorifik değerinde yalnızca hafif bir artış görülür (Nurminen, 2012). Hafif torrefaksiyon sonunda hemiselüloz büyük ölçüde azalır ve selülozda bir dereceye kadar tükenir. Ligninin termal bozunması zor olduğundan, hafif torrefaksiyon sıcaklığı ligninin etkilenmesi için oldukça düşüktür. Şiddetli torrefaksiyon esnasında ise hemiselüloz neredeyse tamamen tükenmiş olur ve selüloz da büyük ölçüde parçalanır. Hemiselüloz ve selüloz biyokütlenin ana bileşenleridir. Şiddetli torrefaksiyon ile biyokütleden hemiselüloz ve selülozun büyük ölçüde uzaklaştırılması sayesinde, yakıt enerji yoğunluğunun büyük ölçüde artmasına karşın biyokütle ağırlığı ve enerji verimi genellikle önemli ölçüde düşer. Sıcaklığa ek olarak, torrefaksiyon veriminin belirlenmesinde torrefaksiyon zamanı veya süresi önemli bir faktördür (Sarvaramini vd., 2013).

Torrefaksiyon işlemi, biyokütlenin bazı özelliklerini geliştirdiği için termal işlemler arasında giderek önemi artmaktadır. Elde edilen ürünün sabit karbon oranının artması, daha yüksek ısıl değere sahip ürün elde edilmesi, hidrofilik özelliğinin azalması, göreceli olarak daha homojen karakterli yakıt olması, oksijen ve uçucu bileşen içeriklerinin azalmasından dolayı yakma işlemi sırasında daha az emisyon üretmesi, daha kolay öğütülebilmesi ve düşük nem içeriğinden dolayı biyo bozunmaya uğramaması gibi özellikler yer almaktadır.

Torrefaksiyon çalışmaları ilk olarak 1930'lerde Fransa'da çalışılmaya başlanmıştır. Çalışmalar nispeten az fakat artarak devam etmektedir. Farklı biyokütlelerin torrefaksiyonu hakkında literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Çam, kestane, meşe, huş, bambu, briket odun, küspe gibi biyokütlelerin torrefaksiyonu ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Tablo 3.1' de iki farklı deneysel koşulda odundan elde edilen katı ürünün elementel analizi görülmektedir. Tabloda ham odun ile karşılaştırıldığında torrefaksiyon işleminin yürütüldüğü sıcaklığa bağlı olarak karbon içeriği ve kalori değerinin arttığı, oksijen içeriğinin ise azaldığı görülmektedir.

Tablo 3.1. Odun ve torrefiye odunun elementel analizi (Baxter, 1998)

	Odun	Torrefiye odun (250 °C, 30 dk)	Torrefiye odun (300 °C, 10 dk)
Karbon	47,2	51,3	55,8
Hidrojen	6,1	5,9	5,6
Oksijen	45,1	40,9	36,3
Azot	0,3	0,4	0,5
Kül	1,3	1,5	1,9
Alt ısı değeri (MJ/kg)	17,6	19,4	21,0

3.1. Genel Proses Tarifi

Torrefaksiyon; biyokütleden yüksek kalitede yakıt elde etmek amacı ile düşük sıcaklık aralığında ve inert gaz ortamında uygulanan, kurutma ve tamamlanmamış piroliz arasındaki etkileşimi içeren termokimyasal bir prosestir. Bu işlem oksijen yokluğunda atmosferik koşullar altında gerçekleştirilir. Torrefaksiyon işlemi için çeşitli adlandırmalar kullanılabilir. Kavurma, yavaş-hafif piroliz, oksijensiz ortamda ılımlı piroliz gibi.

Yakın tarihte torrefaksiyon sadece odunsu biyokütle üzerine uygulanmıştır. Odun biyokütlesinin pirolizi dört karakteristik bölgeye ayrılır. Birinci bölge 200 °C'ye kadar olan sıcaklık bölgesi olup burada su, CO₂, formik asit ve asetik asit açığa çıkar. İkinci bölge 200-280 °C arası sıcaklık bölgesi olup su buharı, formik asit, asetik asit ve bir miktar CO ve glikoz açığa çıkar. 280-500 °C arası üçüncü bölgedir ve yoğun ekzotermik reaksiyonlar başlar. 500 °C üzeri ise dördüncü bölgedir ve yoğun ekzotermik reaksiyonlar devam eder. Burada torrefaksiyon bölgesi ikinci bölgedir. Sadece uçucu bazı organik maddeler uzaklaştırılır ve reaktif hemiselüloz fraksiyonunun bozunmasını içerir. Biyokütlenin karbon içeriği ve kalori değeri artar, kuruma işlemi gerçekleşir. Odun bileşenlerinin farklı termal bozunumu nedeni ile torrefaksiyon işlemi sırasında hemiselüloz bozunması gerçekleşir. 200 °C' nin altında yapılan ısı işlemler odunu uzun süre muhafaza etmek için kullanılırken torrefaksiyon işlemi biyokütlesel hammaddenin enerji verimini artırmak için kullanılmaktadır.

3.1.1. Proses Aşamaları

Genel torrefaksiyon işlemi kurutma, ısıtma, soğutma gibi adımlardan oluştuğu Şekil 3.1.'de görülmektedir.

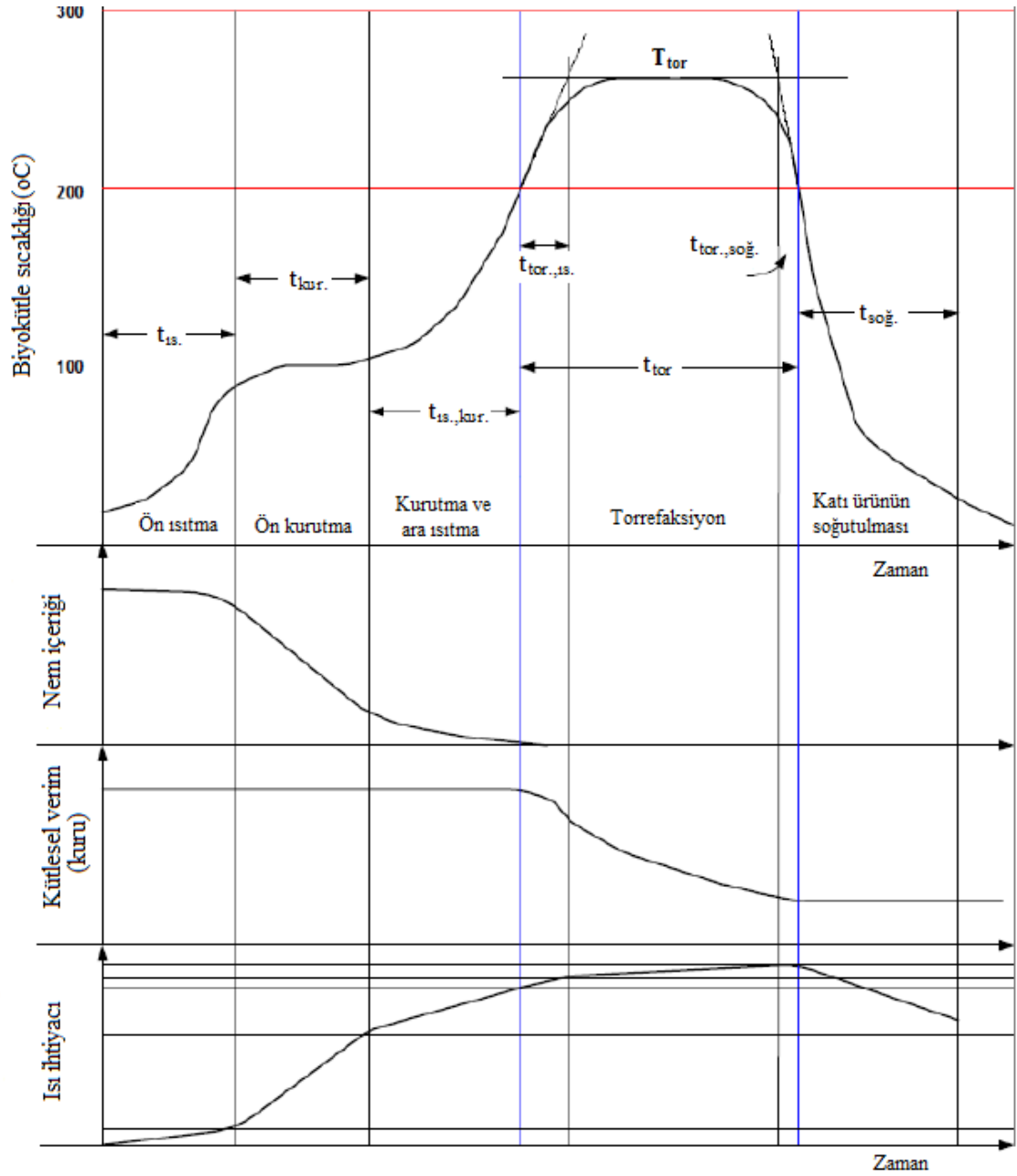


Şekil 3.1. Torrefaksiyon işlemi(Bergeman, 2005)

Toplam torrefaksiyon sürecindeki beş ana aşama ise Şekil 3.2 'de verilmiştir. Bunlar;

- *Ön Isıtma:* Başlangıçta biyokütle kurutma aşamasına gelene kadar ısıtılır. Bu aşamanın sonuna kadar sıcaklık artar. Nemin buharlaşması sağlanır.
- *Ön Kurutma:* 100°C de sıcaklık sabit tutulduğunda biyokütlenin içerdiği serbest su buharlaşmaktadır.
- *Kurutma Sonrası Ara Isıtma:* Bu aşamada ortam sıcaklığı 200°C' ye ulaştığında hafif fraksiyonların buharlaşması sonucu biyokütlerde kütle kaybı gözlenmektedir.
- *Torrefaksiyon:* Genel süreç bu aşamada başlar. Maksimum sabit sıcaklık olarak da tanımlanan torrefaksiyon sıcaklığı 200 °C' ye ulaşıncaya kadar proses başlamış olur. Biyokütlenin içerdiği selüloz, hemiselüloz ve lignin bileşenlerinin reaktifliğine göre iki farklı torrefaksiyon bölgesi söz konusudur. 240 °C'nin altındaki sıcaklıklarda selüloz ve lignin az etkilenir. Fakat hemiselüloz büyük oranda bozunduğundan ılımlı torrefaksiyon gerçekleşir. 270 °C' nin üzerinde ise selüloz ve lignin önemli ölçüde bozunur ve şiddetli torrefaksiyon prosesi gerçekleşir.
- *Katı Ürün Soğutulması:* Torrefaksiyon işleminden sonra oluşan katı ürün istenilen sıcaklık olan oda sıcaklığına kadar soğutulur.

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi torrefaksiyon işlemi süresince toplam süre ön ısıtma (t_{is}), kurutma (t_{kur}), ara ısıtma ($t_{is., kur.}$), torrefaksiyon zamanı (t_{tor}) ve ortam sıcaklığına katı numunenin soğutulduğu toplam zamanı ($t_{soğ.}$) göstermektedir. Reaksiyon süresi ise sıcaklığın 200 °C' den torrefaksiyon sıcaklığına ısıtıldığı zaman , torrefaksiyon süresi ve torrefaksiyon sıcaklığından 200 °C'ye soğutma süresi olmak üzere üç kısımdan ibarettir. Bu nokta, torrefaksiyon işleminin bittiği ve nihai soğutma aşamasının başladığı nokta olarak kabul edilir. Aşağıdaki diyagrama bakılarak ilk üç aşama sonunda nem içeriği sıfır olur, daha sonra hava basıncında buhar üretildikten ve uçucu bileşikler atıldıktan sonra, kütle verimi daha düşük olur. Torrefaksiyon gazlarının % 60'ı, yaklaşık % 50 su ve % 10 CO₂'den oluşan ateşe dayanıklı maddelerdir. Proses özellikleri ve hammaddenin nemi gerçek miktarı belirler. Kolayca işlenebilen ve taşınabilen son ürün yüksek miktarda enerji içeren yakıttır (Nurminen vd., 2012).



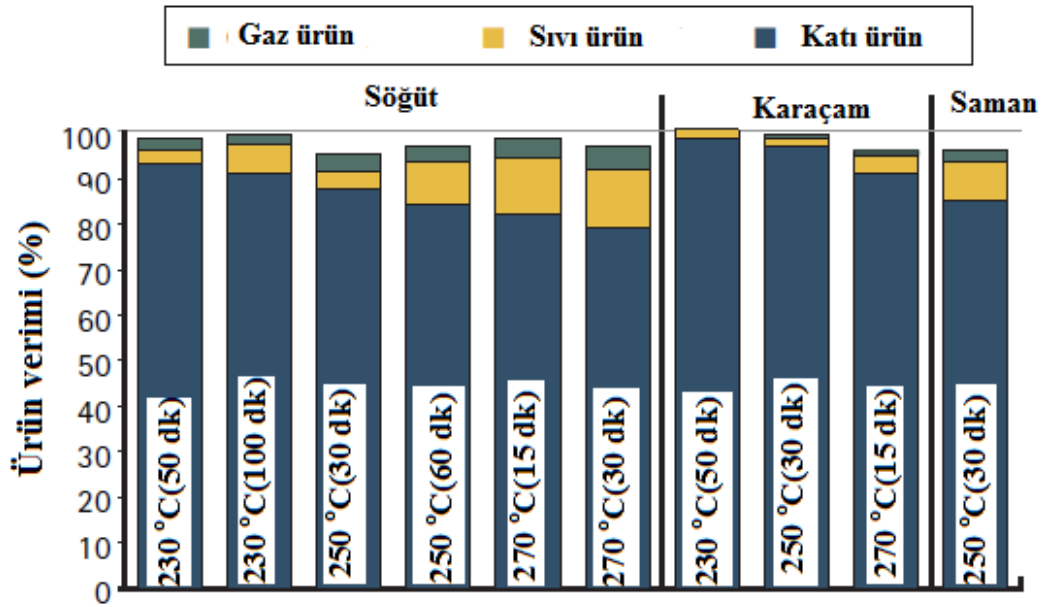
Şekil 3.2. Torrefaksiyon basamakları (Uslu, 2005)

Hollanda Enerji Araştırma Merkezi (ECN) 2002' den bu yana torrefaksiyon ile ilgili çeşitli raporlar yayınlamıştır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar odunsu biyokütle ve saman, ot gibi otsu türler üzerine yapılan işlemlere yoğunlaştırılmıştır. Torrefaksiyonda enerji verimi için reaksiyon süresi, sıcaklık, parçacık boyutu, biyokütle kaynağı gibi değişkenlerin etkisi araştırılmıştır. Torrefaksiyon işlemi henüz ticari olarak uygulanmadığı için yürütülen çalışmaların teknolojinin kurulmasında yardımcı olacağı açıktır.

Polimerik yapıdaki hemiselüloz, selüloz ve lignin farklı torrefaksiyon sıcaklıklarında ağırlık kayıpları Tablo 3.2'de verilmektedir. Hemiselüloz, torrefaksiyonun dar sıcaklık bölgesindeki değişimlere daha duyarlıdır. Bu nedenle biyokütlenin hemiselüloz içeriği biyokütlenin parçalanma hızını etkiler. Hemiselülozun ksilan ve mannan içeriğine bağlıdır. Selüloz ise kristal yapısı nedeni ile sıcaklığa hemiselülozdan daha karardır. Lignin torrefaksiyon sıcaklığındaki değişimlere daha az duyarlı olduğu tablodan görülmektedir.

Tablo 3.2. Sıcaklık ile polimerik yapıdaki ağırlık kaybı (Chen, 2010)

Torrefaksiyon Sıcaklığı (°C)	Hemiselüloz (%)	Selüloz (%)	Lignin (%)
230	2,74	1,05	1,45
260	37,98	4,43	3,12
290	58,33	44,82	6,97

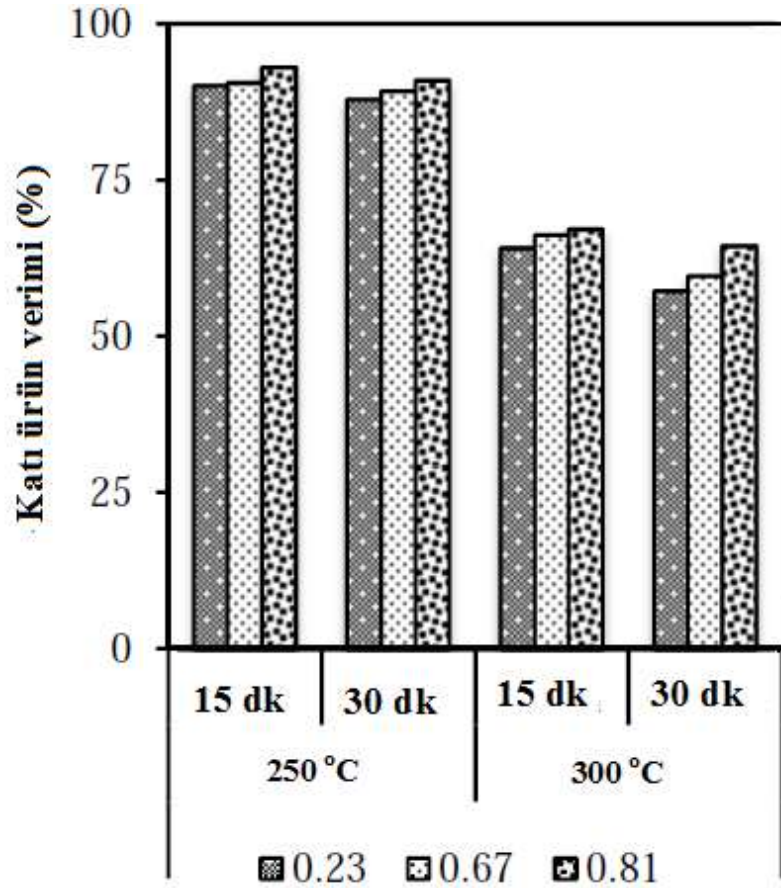


Şekil 3.3. Biyokütlenin torrefaksiyonu ile elde edilen ürün verimleri (Prins vd., 2006)

Prins ve diğ.(2006) yürüttüğü çalışmada elde edilen ürün verimleri Şekil 3.3'de görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi ürün verimleri arasında kullanılan biyokütleyle göre önemli farklar bulunmaktadır. Karaçam odunununda katı ürün veriminin yüksek, gaz ve sıvı ürün veriminin düşük olduğu; saman kullanımında ise gaz ve sıvı ürünün odunsu biyokütlelerden daha yüksek olduğu ve söğüt ağacından elde edilen ürün verimlerinin ise saman ve karaçam arasında olduğu görülmektedir. Aynı zamanda

torrefaksiyon sıcaklığındaki artış ile katı ürün veriminde azalma, gaz ve sıvı ürünü içeren uçucu bileşen miktarında artış olduğu görülmektedir.

Biyokütlenin tane boyutunun katı ürün verimi üzerine etkisi Şekil 3.4 'de görülmektedir. Küçük tane boyutlu biyokütledeki kütle kaybının daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. Biyokütlenin tane boyutunun katı ürün verimi üzerine etkisi (tane boyutu mm)(Peng vd.,2012)

3.2. Torrefiye Ürün Özellikleri

Tablo 3.3'de görüldüğü gibi torrefaksiyon işlemi sonunda kömürle uyumlu özelliklere sahip yüksek kalitede bir yakıt elde etmektir. Kalorifik değerdeki artışın nedeni nemin ve bazı organik bileşiklerin orijinal biyokütleden uzaklaştırılmasından kaynaklanır. Torrefiye katı ürün ile kömür arasındaki fark uçucu madde miktarıdır. İşlemden amaç uçucu maddeyi (ve dolayısıyla enerjiyi) yakıtta mümkün olduğunca korumaktır. Torrefaksiyon işlemi sırasında kükürt ve klorür bileşenleri giderilemediğinden geriye kalan katı içerisinde kalır ve kül miktarı azda olsa artar.

Tablo 3.3. Torrefiye katının diğer yakıtlar ile karşılaştırılması (IEA, 2012)

	Odun	Odun peleti	Torrefiye Pelet	Odun kömürü	Kömür
Nem içeriği (% ağırlıkça)	30-45	7-10	1-5	1-5	10-15
Alt ısı değeri (MJ/kg)	9-12	15-18	20-24	30-32	23-28
Uçucu madde (% kuru temel)	70-75	70-75	55-65	10-12	15-30
Sabit karbon (%kuru temel)	20-25	20-25	28-35	85-87	50-55
Yığın yoğunluğu (kg/l)	0,2-0,25	0,55- 0,75	0,75-0,85	~0,20	0,8-0,85
Enerji yoğunluğu (GJ/m ³)	0,2-3,0	7,5-10,4	15,0-18,7	6-6,4	18,4-23,8
Tozlanma	ortalama	sınırlı	sınırlı	yüksek	sınırlı
Biyolojik parçalanma	+	+	-	-	-
Öğütülebilirlik	Zayıf	Zayıf	İyi	İyi	İyi
Muhafaza	Özel	Özel	İyi	İyi	İyi

3.2.1. Alternatif Hammadde

Çoğu biyokütle türü hemiselülozik ve selülozik polimerleri içerir. Bu nedenle, torrefaksiyon hemen hemen herhangi bir lignoselülozik tip biyokütle üzerinde gerçekleştirilebilir ve teoride, daha homojen bir ürün üretmek için daha geniş bir hammadde çeşitliliği için torrefaksiyon tesisi tasarlamak mümkündür. Torrefaksiyon işleminde herhangi bir lignoselülozik biyokütle hammadde olarak kullanılabilir. Homojen bir ürün elde etmek için çok çeşitli biyokütle besleme olarak seçilebilir. Doğru tanımlanmış beslemenin torrefaksiyon işlemi ile doğru tanımlanmış bir ürüne

dönüşmesi ile ilgili deneyimler hala sınırlı olduğundan besleme olarak çoklu materyallerin kullanılacağı torrefaksiyon tesislerinin kurulması zaman alacaktır.

3.2.2. Peletleme

Torrefiye biyokütleyi peletleyerek taşıma ve depolamada çeşitli avantajlar elde edilebilir. Torrefiye biyokütle yongalarının hacimsel enerji yoğunluğu (m^3 başına GJ cinsinden) orijinal maddeye göre (odun yongaları) hemen hemen eşit olsa da, sıkıştırma aşaması bunu 4-8 kat artırarak, nakliye sırasında önemli maliyet tasarrufuna yol açar.

Pelet haline getirilmiş ürün daha az toz emisyonuna neden olur, ara depolara, kömür öğütücülerine veya çekiçli değirmenlere pnömatik olarak taşınabilir ve talaş veya öğütülmüş yakıtlarla karşılaştırıldığında bozulmaya (nemlenme) karşı daha az hassastır. Torrefiye ürünün pelet haline getirilmesi beyaz odun peletine göre oldukça yüksektir (yaklaşık 150 kWh / ton 50-60 kWh / ton). Pelet değirmeninin pres kanallarındaki yüksek sürtünme, ısı oluşumuna ve dolayısıyla yangın / toz patlaması riskine yol açmaktadır.

Torrefiye peletlerin mekanik mukavemeti bazı durumlarda odun peletlerine benzer olabilir. Peletin bağlayıcılık özelliği üzerinde ligninin önemli bir rol vardır. Torrefaksiyon işlemi sırasında lignin, işlem koşullarına bağlı olarak kısmen bozulur. Bu nedenle, dayanıklı bir peletin hazırlanması, yüksek peletleme sıcaklığı ya da yüksek basınçlar uygulamak gibi şartları gerektirir. Ayrıca torrefaksiyon sırasındaki işlem koşullarının optimizasyonunu gerektirir. Torrefaksiyon işlemi ile uğraşan bazı şirketler gliserin, parafin, lignin, biyoplastikler veya torrefaksiyon gazının yoğunlaştırılabilir fraksiyonu gibi bağlayıcıları kullanmayı düşünmektedir. Pelet haline getirilmeden önce işlenmiş malzemeye su enjekte edilmesinin ayrıca bağlanma özelliklerini de iyileştirdiği görülmektedir. Bu alan şu anda yoğun araştırmalara tabidir.

3.2.3. Taşıma

Torrefaksiyon sırasında, yığın yoğunluğu orijinal hacmi neredeyse korunmasına rağmen azalır. Yoğunlaştırılmamış (pelet) formda, torrefiye malzemenin düşük enerji yoğunluğu (3 ila 3,3 GJ / m^3) ve yüksek toz emisyon riski nedeniyle kullanımı ve taşınması nispeten zordur. Peletleme işlemi torrefiye biyokütledeki bu sorunları azaltır ve uzun mesafeli taşıma için ürünü önemli ölçüde daha iyi hale getirir. Torrefiye

peletler için tam olarak yoğunluk verisi olmamasına rağmen, torrefiye peletlerin enerji yoğunluğunun, normal odun peletlerden ($8 - 10 \text{ GJ} / \text{m}^3$) önemli ölçüde daha yüksek olduğu ve yaklaşık $15 - 18 \text{ GJ/m}^3$ 'e yükseldiği düşünülmektedir. Ayrıca torrefiye biyokütle peletleri odun peletlerine göre bozulmaya karşı daha az hassastır ve kendiliğinden ısınma / kendiliğinden tutuşma riski azalmıştır. Ancak donma ve çözülme durumları ürünü önemli ölçüde bozabilir.

Odun peletleri ticaretinin şu andaki ekonomisine dayanarak, ilave peletleme maliyetleri nakliye maliyetlerindeki düşüşle (örneğin Doğu Avrupa veya Kuzey Amerika'dan Batı Avrupa'ya) telafi edilmektedir. Kullanıldığı santralin yakınında biyokütle bulunması durumunda, santralin pelet haline getirilmemiş malzemeyi işleyebilmesi şartıyla maliyet daha da düşebilir. Bu nedenle nakliye mesafeleri, torrefaksiyon işleminin yapılacağı tesisin tasarımı ve iş durumu için önemli bir faktördür.

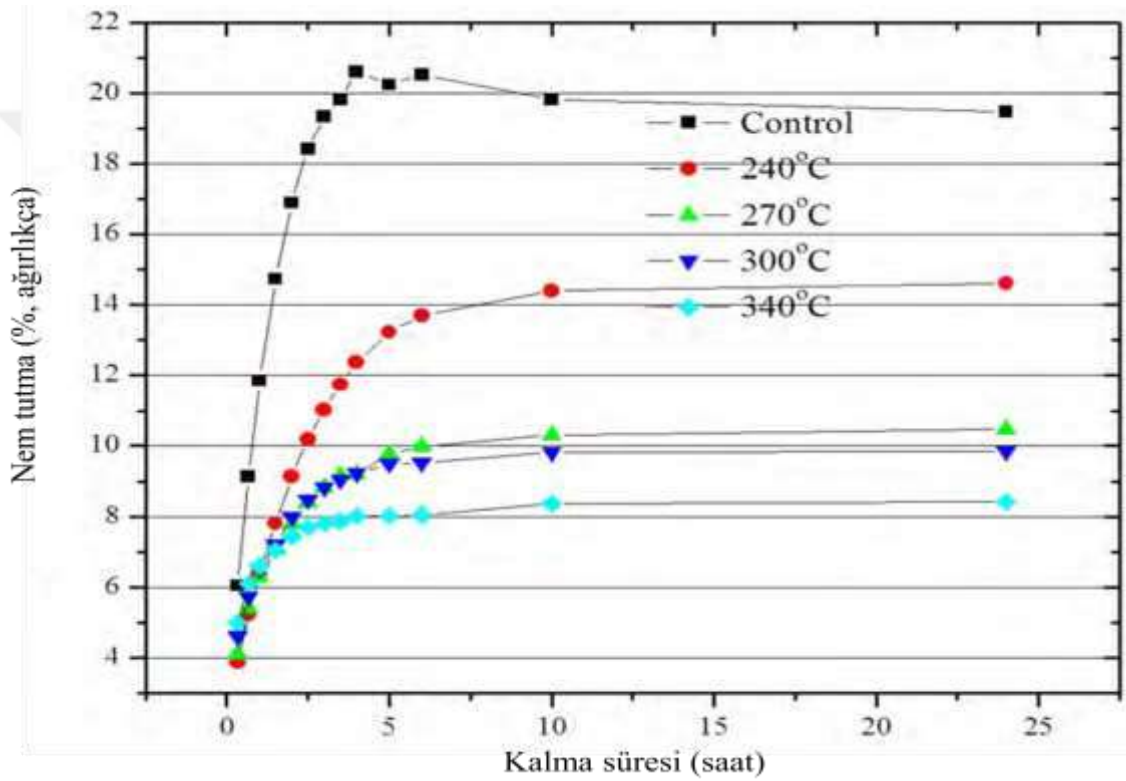
Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından güvenlik kodu onaylanıncaya kadar, pelet haline getirilmiş veya getirilmemiş torrefiye edilmiş malzemenin okyanusta gemilerde taşınmasına izin verilmez.

3.2.4. Taşıma ve Depolama Özellikleri

Peletlenmiş ve torrefiye edilmiş malzemenin hacmi önemli ölçüde azalmıştır. Ayrıca, torrefiye peletlerin daha yüksek enerji yoğunluğundan dolayı odun peletlerine nazaran aynı enerji üretimi için daha az miktar gerekir. Bu, özellikle hava koşullarına karşı korumalı saklama gerekmiyorsa, elektrik santralinde taşıma ve depolamada önemli tasarruflar sağlar.

Diğer bir önemli faktör, torrefiye malzemenin hidrofobik karakteridir. Torrefaksiyon işlemi sırasında, OH grupları doymamış polar olmayan gruplarla değiştirilir, bu da su tutma kapasitesinde büyük bir kayıpla sonuçlanır. Torrefiye ürünün hidrofobik özellikleri, yakıtın bozulma (çürüme), kendiliğinden ısınma ve nem alımı için daha az hassas olmasını sağlar. İşlenme sonrası, nem ve suyun adsorpsiyonu, işlenme derecesinin bir fonksiyonu olarak azalacaktır. Şekil 3.5 'de belirli bir ortam sıcaklığında zamanın ve bağıl nemin bir fonksiyonu olarak bir tür torrefiye peletin higroskopik özelliklerini göstermektedir. Bağlayıcı veya katkı maddesi ve diğer hammadde türleri, biraz farklı sonuçlar gösterebilir.

ISO Teknik Komitesi higroskopikliğin (havadaki bağıl nemin emilmesi), suyun emiciliğinin ve donma özelliklerinin belirlenmesi için test standartları geliştirmektedir. Büyük enerji santralleri için en önemli endişe hidroforik özellikler değil, tozun oldukça patlayıcı olması nedeniyle depolama ve taşıma sırasında toz oluşma riskidir. Kendiliğinden ısınma riski ile ilgili bilgiler torrefiye biyokütlenin miktarının yetersizliği nedeniyle henüz iyi bir şekilde ele alınmamıştır. Küçük ölçekli araştırmalardan elde edilen sonuçlar, torrefiye peletlerin depolama sırasında daha yavaş bir gaz salınımı olduğunu göstermektedir.

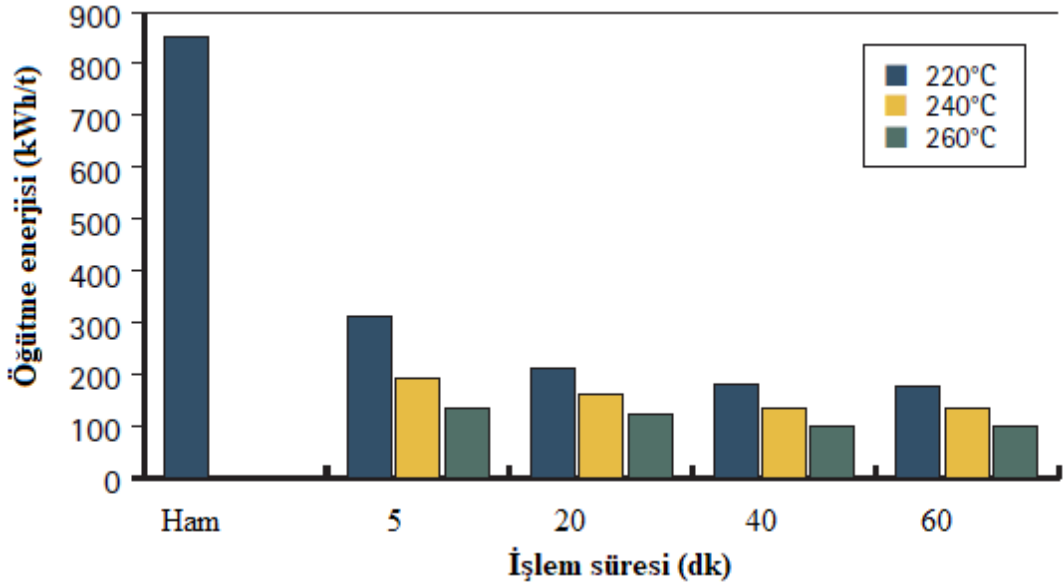


Şekil 3.5. 240-340° C sıcaklıkta torrefaksiyonu yapılmış ağaçtan yapılan 6 mm peletlerin higroskopikliği. Kontrol beyaz peletlerdir. Testler 30 ° C ve % 90 bağıl nemde (RH) yapılmıştır. (UBC / CHBE, Şubat, 2011).

3.2.5. Öğütülebilirlik

Torrefiye ürün hemiselüloz ve daha az oranda lignin ve selülozun parçalanmasından dolayı kırılgandır. Biyokütlerdeki bu bileşenler lif yapısına sahip olmalarından dolayı kömür öğütücülerinde öğütölmelerini sınırlar. Biyokütle 260-300 °C'de 20 dakika torrefiye edildiğinde sert lif yapısı büyük ölçüde tahrip olur. Ham biyokütle ile

karşılaştırıldığında çekiçli değirmende öğütüldüğünde yaklaşık % 50-85 daha az enerji tüketimi gerektirir.



Şekil 3.6. Kayın ağacının torrefaksiyon süresine bağlı olarak öğütme enerjisi (500 mm elek ile Retsch ZM1 ultrasantrifüj öğütücü ile elde edilen sonuçlar) (Tumuluru ve diğ., 2011)

Öğütülebilirlik aynı zamanda torrefaksiyon teknolojisine, değirmen tipine, öğütme koşullarına, biyokütle özelliklerine ve beslemeye bağlıdır.

3.2.6. Yanma özelliği

Yakıtı yakarken yanma kalitesini ısı değeri, nem içeriği, kül içeriği, reaktivite ve partikül büyüklüğü gibi birçok farklı faktör belirler. Torrefiye biyokütlenin kalorifik değeri kömürün kalorifik değerine ulaşabilir Kömürden daha az kül ve yüksek miktarda uçucu madde (% 10 - 12'ye kıyasla % 55 - 65) nedeniyle daha yüksek bir reaktiviteye sahiptir. Torrefiye malzemenin birlikte yakılması nedeniyle, kazan içindeki sıcaklık profili hafifçe kayar ve kazan çıkış sıcaklığının artmasına neden olur. Yanma özelliklerine ilişkin bir husus, büyük ölçüde, uçucu maddenin çıkışından dolayı yakıt parçacıklarının iç yüzey alanlarının önemli ölçüde artmasından kaynaklanan yakıtın reaktivitesinin artmasıdır. Bu, toz haline getirilmiş kömür ocaklarında daha kısa, daha yoğun alevlere neden olabilir.

4. TORREFAKSİYON İŞLEMİNDE KULLANILAN REAKTÖR TÜRLERİ

4.1. Döner Silindir Reaktör

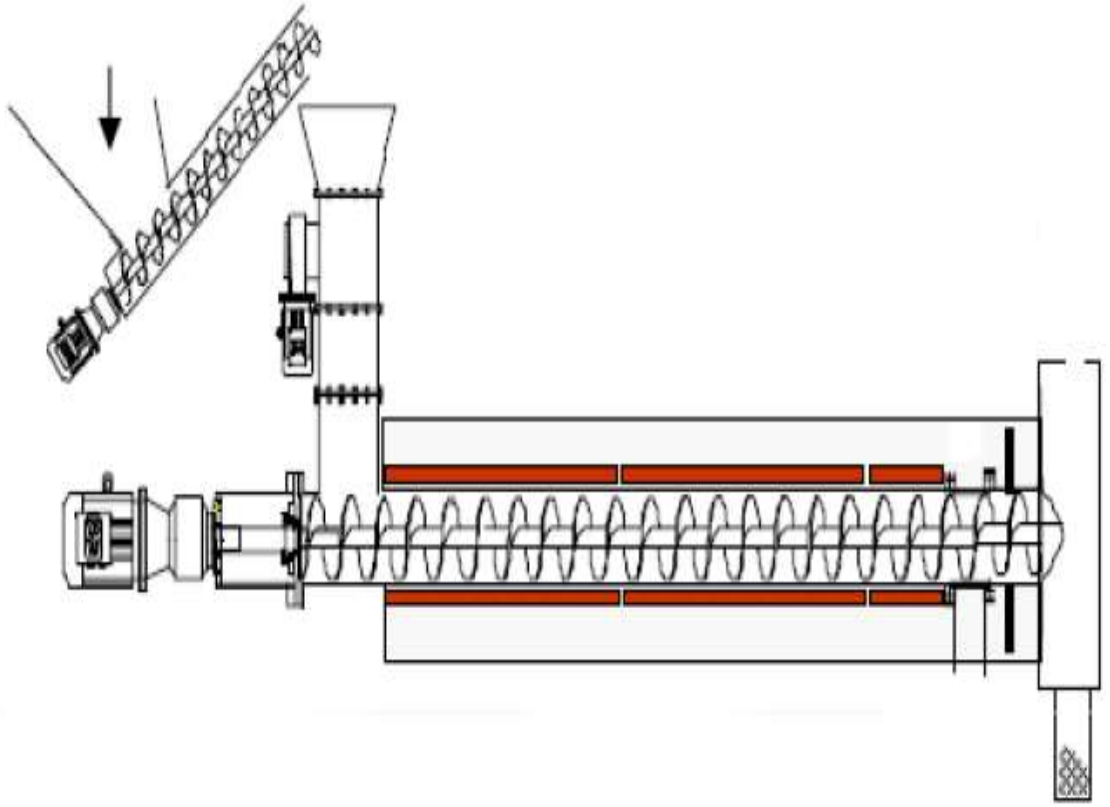


Şekil 4.1. Döner Silindirik Reaktör (Eseyin vd., 2012)

Torrefaksiyon sırasında, biyokütle su buharı yoluyla doğrudan veya dolaylı olarak ısıtılır. İşlem piroliz sıcaklığı, dönüş hızı, uzunluk ve silindirin açısı değiştirilerek kontrol edilebilir. Silindirin dönmesi, reaktördeki biyokütle parçacıklarının iyi bir ısı aktarımı ile uygun şekilde karıştırılmasını sağlar. Ayrıca, bu işlemin avantajı, çok çeşitli biyokütle parçacık boyutlarının işlenmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. Dezavantajları şunlardır: sıcaklığın yetersiz kontrolü, sınırlı kapasite, yüksek maliyetler.

4.2. Helezon Reaktör

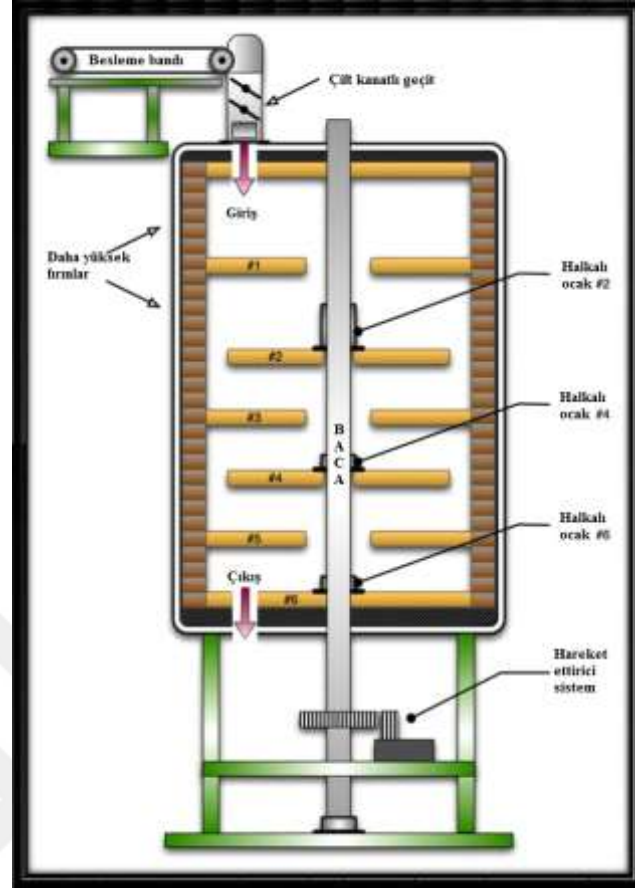
Helezon reaktör, reaktör boyunca biyokütle aktarımı için kullanılan bir veya daha fazla spiral içerebilir. Bu tip bir reaktör, hem dikey hem de yatay olarak kullanılabilir. Bir spiralin içi boş duvarından ısıtılmış ortamdan geçer. Yöntemin avantajları: daha iyi biyokütle akışı, yüksek hacimdeki biyokütle parçacıkları alma kapasitesi ve oldukça ucuz reaktör olmasıdır. Helezon reaktör, Şekil 4.2’ de gösterilmiştir. Bu teknolojiler yatay veya dikey formatta kullanılabilir. Spiralin içi boştur ve biyokütlenin ısınmasını sağlayan sıcak ortama gider. Reaktörün dezavantajları şunlardır: Biyokütleyi düzensiz torrefiye eder ve ısı değişimini düşüktür .



Şekil 4.2. Helezon Reaktör (IEA, 2012)

4.3. Herreshoff Fırın veya Çoklu Ocak Fırın Reaktörü

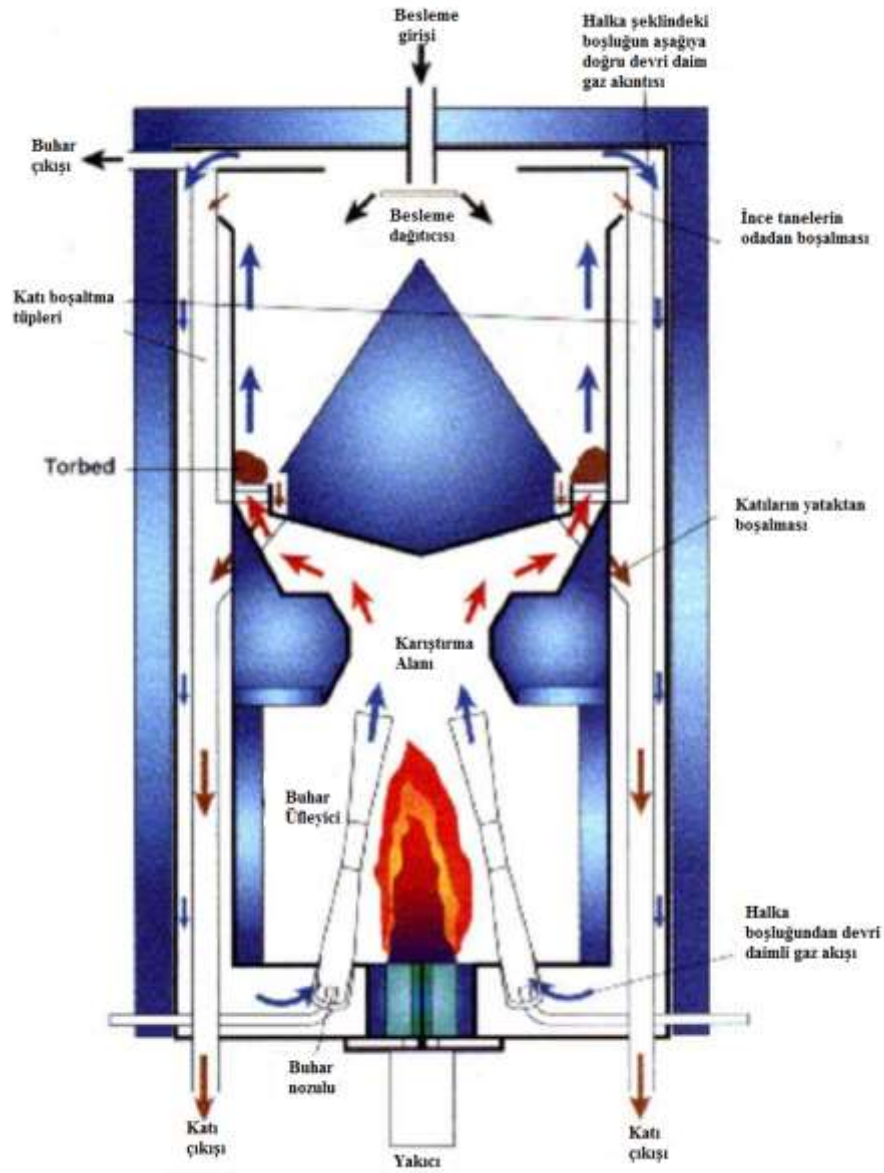
Çoklu ocak fırını reaktörü (Herreshoff fırın) birbirine bindirilmiş birkaç dairesel ocak veya fırından oluşur ve yüksek hacimde biyokütle parçacıklarının kullanılmasını sağlar. Reaktördeki sıcaklık kademeli olarak 220 °C'den 300 °C'ye yükselir. Herreshoff fırını veya çoklu ocak fırını reaktörü Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Biyokütle, reaktörün üst tarafından birinci ocak içerisine beslenir ve daha sonra ikinci ocağa ve sonraki ocakta döner kolların döndürülmesiyle reaktör içinde aşağı doğru hareket eder. Bu esnada biyokütle parçacıkları karıştırılır ve kademeli olarak ısıtılır. Süreç yaklaşık otuz (30) dakika sürer. Sürecin avantajları şunlardır: ısıyı iyi transfer etme, yüksek hacimde biyokütle parçacıklarını alma kapasitesi, sıcaklığın iyi kontrolü. Dezavantajlar ise; Reaktörün büyük boyutta olması ve ısıtma için büyük gaz tüketimine sahip olmasıdır.



Şekil 4.3. Herreshoff fırın veya çoklu ocak fırın reaktörü (IEA, 2012)

4.4. Torbed Reaktör

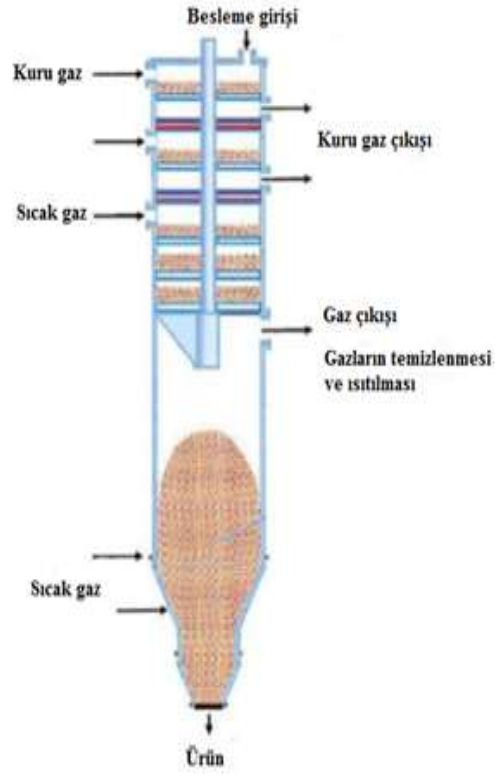
Torbed torrefaksiyon reaktörü, reaktörün tabanından (50 m/s ila 80 m/s) yüksek hızda gazın enjeksiyonu ile ısı transferini kullanır, sabit açılı bıçak sayesinde gaz kütlesini kaldırır ve biyokütle yatağını dikey olarak yatay olarak hareket ettirir ve parçacıkları hızla ısıtır. Torbed reaktörü Şekil 4.4’ de gösterilmiştir. Yoğun ısı transferi, reaktörün çok yüksek sıcaklıklarda (380 °C’ ye kadar) çalışmasını sağlar. Yöntemin avantajları alıkonma süresinin kısa (<100 s) ve hızlı ısı transferi olması nedeniyle akışın büyük olması, reaktörde hareketli parçalar olmadığı için düşük enerji tüketimi oranına sahip olması ve ürünün rahat bir şekilde izlenebilmesidir. Dezavantajları ise sınırlı kapasiteye sahip olması ve yüksek sıcaklıkta uçucuların kaybına neden olmasıdır.



Şekil 4.4. Torbed Reaktörü (IEA,2012)

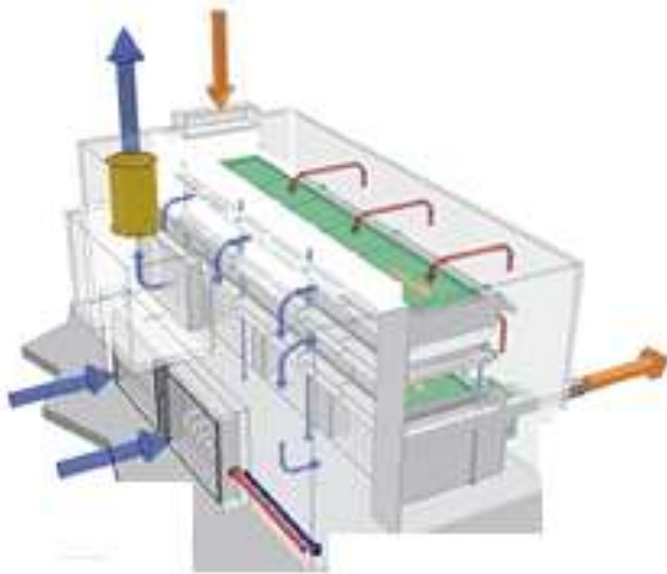
4.5. Hareketli Yataklı Reaktör

Hareketli yatak torrefaksiyon reaktörü, biyokütlenin tepeden girdiği ve işlem sırasında yavaşça aşağı doğru hareket ettiği ve sıcaklığın alt kısımdan geldiği kapalı bir reaktörden oluşur. Bu reaktörde, biyokütle parçacıklarının karışması için bir mekanizma yoktur. Bu nedenle, ısı transferi sonucunda dengesiz torrefiye edilmiş ürünler ortaya çıkar. Reaktördeki biyokütle doluluğunun oranı, reaktörün tümü işlemde kullanılabildiğinden, torbed yöntemine kıyasla yüksektir. Yöntemin avantajları nispeten basit ve ucuz bir yöntem oluşudur. Reaktör yüksek kapasitelidir ve hiçbir hareketli parçası yoktur. Dezavantajları ise ısı transferi kötüdür ve sıcaklık kontrolü zayıftır.



Şekil 4.5. Hareketli Yatak Reaktörü (IEA,2012)

4.6. Bant Konveyör Reaktörü

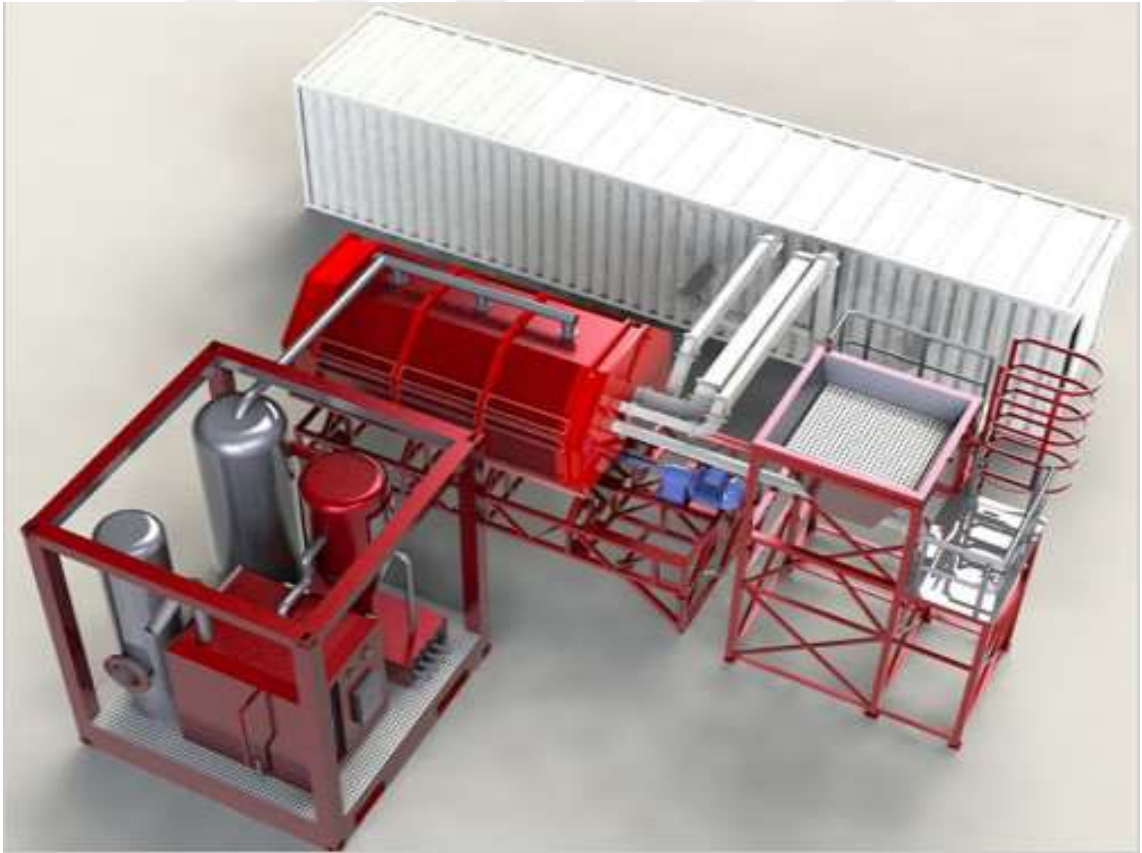


Şekil 4.6. Bant konveyör (IEA, 2012)

Bant konveyör reaktöründe ham biyokütle, delikli bantlı konveyör üzerine reaksiyona sokulur ve sıcak hava enjeksiyonu ile ısıtma sağlanır. Birkaç bant konveyörü salınım yapar, bu da termal dağılımın ve biyokütle parçacıklarının birinden diğerine düşmesine neden olur. Bantların hızı kontrol edilebilir. Avantajları; sıcaklığın daha iyi kontrol edilmesi, nispeten düşük yatırım maliyetine sahip olmasıdır. Dezavantajı ise küçük parçaların neden olduğu tıkanmalardan dolayı sistemin içerdiği çok sayıdaki mekanik parçaların bakım maliyetlerini artırmasıdır.

4.7. Mikrodalga Reaktörü

Biyokütlenin torrefaksiyon işlemi için alternatif seçeneklerden biri de mikrodalga reaktördür. Bu teknolojinin uygulanmasına yönelik ana engel, elektrik gücüne erişim ihtiyacıdır. Avantajları: Yüksek ısı transferine, hızlı torrefaksiyon işlemine sahip olması ve sıcaklık kontrolünün rahat olmasıdır. Dezavantajı ise fazla elektrik tüketimi gerektirmesidir.



Şekil 4.7. Rotawave mikrodalga reaktör(Thamer, 2013)

5. PELETLEME

Peletleme işlemi, biyokütlenin sıkıştırılması veya preslenmesi ile maksimum 25 mm çaplı silindirik şekillerin elde edilmesi için yüksek basınç altında biyokütlenin kurutulması ve şekillendirilmesi olarak tarif edilmektedir. Genellikle 6 -12 mm çapında, 10-30 mm arasında uzunluğu olan peletler sıkıştırılmış talaş, odun yongaları, ağaç kabuğu, zirai ürünler, ekinlerin sapları, fındık, badem, ceviz kabukları, hatta atık kağıt gibi maddelerden yapılmaktadır. Peletleme ile yalnızca kararlı ve üniform bir yakıt elde edilmez aynı zamanda tozlanmada engellenmiş olur.

Peletler kimyasal bağlayıcı maddeler eklenerek ya da eklenmeden yüksek basınçla oluşturulmaktadır. Peletleme işlemi ile; biyokütle karakteristikleri iyileştirilmekte, hacimsel ısı değeri artmakta, yanma karakteristikleri düzelmekte, taşıma maliyetleri düşmekte, depolama masrafları azalmakta, sobalarda kolaylıkla yakılabilmekte, atmosfere salınan partikül emisyonları azalmakta ve aynı boyut ve şekilde iyi bir yakıt elde edilmektedir. Örneğin odun peleti aynı ağırlıktaki yakacak oduna göre daha fazla ısı vermekte, daha temiz ve daha uzun süre yanma özelliği kazanmaktadır (Öztürk 2012).

Pelet yakıtlı sistemlerin pek çok avantajı vardır. Odun pelet yakıtlar fosil yakıtlara göre çok daha ucuzdur. Yenilenebilir bir kaynaktır, kendi öz kaynaklarımızdan beslenir. Odun pelet ısıtma sistemleri, ozon dostudur ve Kyoto Protokolüne göre kabul edilebilir. CO salınımı eşik değerlerinin altındadır. Katı yakıtlı sistemler içinde en temiz yanma sistemi pelet yakma sistemleridir. Odun peletlerinin nakliyesi çok kolaydır, ferdi sistemler için paket halinde satın alınabilir veya merkezi ısıtma sistemleri için, tıpkı mazot tankerleri ile kalorifer yakıtlarının binanın deposuna bir hortum ve pompa sistemi ile nakledildiği gibi, nakledilerek depolanabilir. Odun peletleri dünyanın her yerinde temin edilebilecek rafine bir biyokütledir. Ticari pelet üretimi için ağaç kesilmesi gerekmez. Pelet ormanın atığını değerlendirir. Bu yönü ile, kolayca tutuşabilir orman atıklarının toplanması sonucu, ormanların yangına karşı da korunmasına katkı sağlar. Yeni teknoloji pelet yakma sistemleri otomatik yakıt beslemelidir; bu, daha düşük işletme giderleri ve konfor demektir. Odun peletlerinin maliyeti kolaylıkla artış göstermez. Zira ithal değildir, dış ekonomi ve döviz dalgalanmalarından etkilenmez. Odun peletleri çok yüksek sıcaklıkta yanar. Bu nedenle katı veya gaz atık

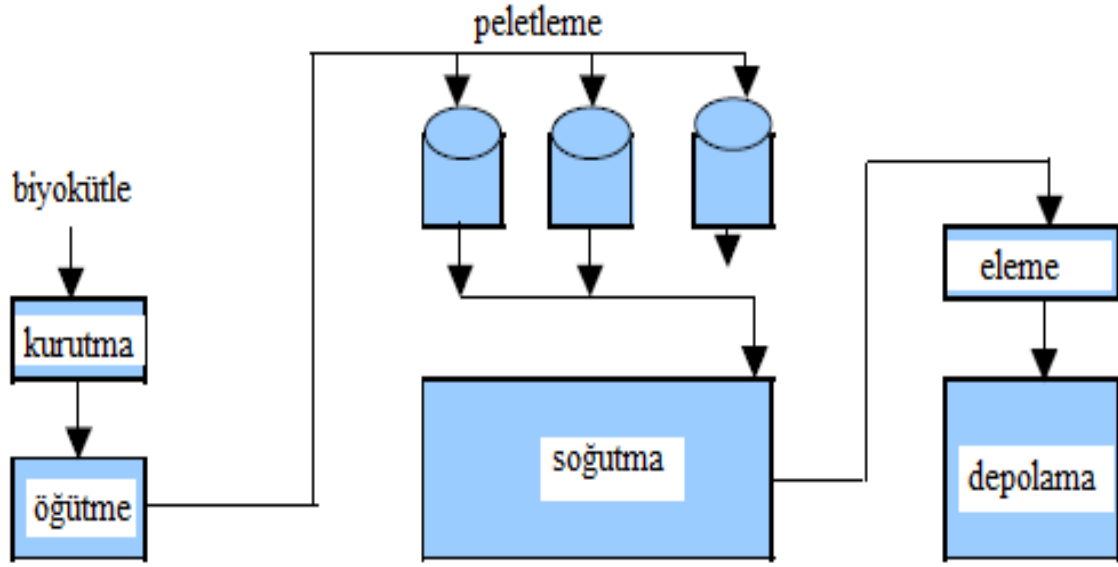
ürün oluşumu çok düşüktür. 18 kiloluk bir torba pelletin külü sadece 85 gramdır. Oduna oranla depolanması için çok daha az yer gerektirir. İçerdiği nem oranı % 10'un altındadır. Düşük nem oranı yanma veriminin yüksek olmasının dayanaklarından biridir. Klasik katı yakıtı sistemlerde, bacalarda önemli oranda kreozot (katran ruhu) oluşur. Pelet sistemlerde ise kreozot hemen hemen hiç yoktur. Bu nedenle bir baca olmaksızın da dışarı egzost edilebilir (hermetik kombilerde olduğu gibi).

Odunun yoğunlaştırılması odun veya odun atıklarını pelet, briket veya kütük gibi üniform şekil vermek amacı ile sıkıştırmak için mekaniksel bir kuvvetin uygulandığı işlemdir. Odunun yoğunlaştırılmasının amacı hacimsel enerji yoğunluğunu artırmak, kolay depolanma ve taşıma kolaylığı sağlamak, nem içeriğini azaltmak ve taşıma maliyetini düşürmektir. Yoğunlaştırma işlemi için ilk patent 1880 yılında ABD'de gündeme gelmiştir. Talaş ve diğer odun atıkları 150°F ısıtılmış ve daha sonra sıkıştırılmıştır. Bu işlem ilk olarak hayvan yemlerinin üretiminde kullanılmış ve daha sonra sıkılaştırılmış yakıt üretimi için enerji marketlerinde uygulanmaya başlanmıştır. Yoğunlaştırma işlemi ile biyokütle partiküllerinin yığın yoğunluğu 40-200 kg/m³'den 600-1200 kg/m³'e yükseltilebilir. Tipik olarak, odun peletlerin yığın yoğunluğu 500-650 kg/m³ arasında olup %7-10 nem içeriğine sahiptir. Son zamanlarda odun peleti evlerin ısıtılması ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Briketler genel olarak 50-100 mm çaplı ve 20-50 mm uzunluğunda olup yığın yoğunluğu 320-650 kg/m³ arasında değişir. Briketlerin nem içeriği ise ağırlıkça %10-12 arasındadır. Briketler gibi aynı makinalarda üretilen kütükler silindirik şekilde olup 50-100 çaplı 300-400 mm uzunluğundadır. Kütükler şömine ve sobalarda kullanılır.

Peletleme işleminde yoğunlaştırma ticarileşmiştir. Örneğin, Oregon'da 1976 yılından bu yana pelet üreten bir işletme mevcuttur (120 ton/gün). Pelet üretimi için kullanılacak biyokütlenin tane boyutunun maksimum 3-20 mm ve nem içeriği %10-15 'in altında olmalıdır. Piston basıncı ancak %20 nem içeriğini telafi edebilir. Günümüzde peletleme teknolojisi tamamen ticarileşmiştir. Pelet odun kullanımı daha önce Kuzey Amerika'da 1990 yıllarında İsveç, Finlandiya, Danimarka ve Avusturya'da kullanıldı. 2014 yılında üretilen 13,5 milyon ton ahşap pellet ile AB, dünyanın en büyük üreticisi ve küresel dünya üretiminin yaklaşık % 50'sini oluşturmaktadır. AB üretimi yıllar içinde 2010'dan 2014'e % 35, 2013'ten 2014'e % 11 2014'ten 2015'e %4,7 oranında sürekli bir genişleme göstermiştir ve 2015 yılında üretilen 14,1 milyon ton ahşap peleti olduğu saptanmıştır. Almanya, 2014 yılında üretilen 2,1 milyon tonla en büyük üretici olmayı

sürdürürken, İsveç yaklaşık 1,6 milyon ton ve Letonya 1,3 milyondan fazla ton pelet üretimi ile Almanya'yı takip etmektedir.

Pelet üretim süreci Şekil 5.1'de görülmektedir. Pelet üretimi kurutma, öğütme, peletleme ve soğutma olmak üzere en az dört temel adımdan oluşmaktadır.



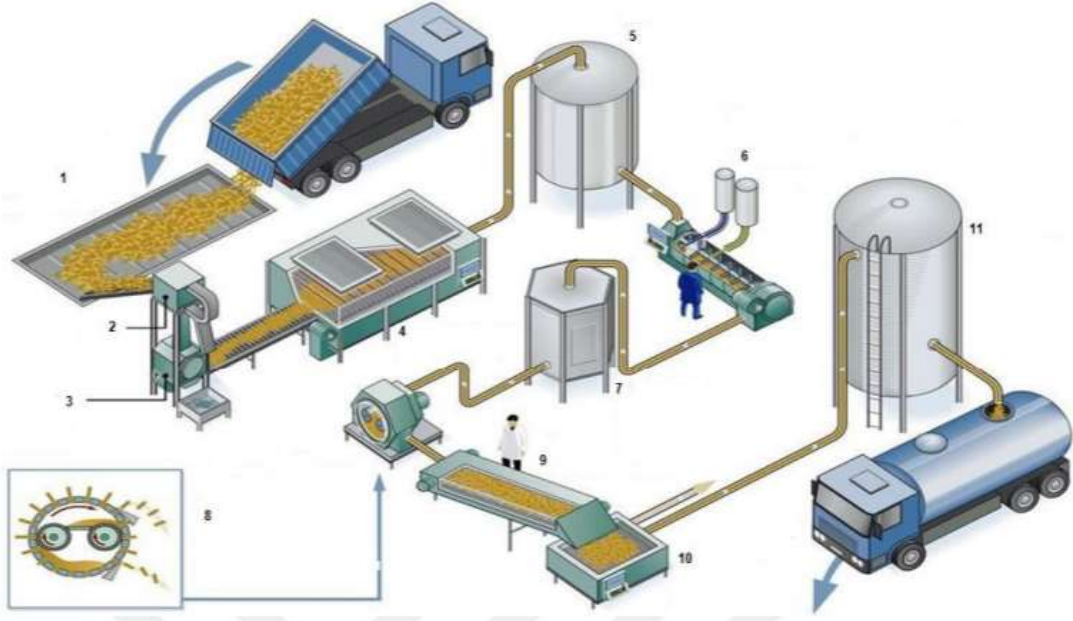
Şekil 5.1. Pelet üretim aşamaları (Uslu, 2005)

Kurutma: Taze biyokütle yaklaşık %50 nem içermektedir. Peletleme işleminde biyokütle %10-15 nem içeriğine ulaşıncaya kadar kurutulur. Bu yalnızca biyokütlenin enerji yoğunluğunu artırmak için değil aynı zamanda biyokütlenin ağırlığı azaldığı için taşıma kolaylığı da sağlayacaktır. Kurutmanın diğer bir avantajı biyokütleyi depolama sırasında mikroorganizmaların etkisine karşı daha dayanıklı hale getirmektir.

Öğütme: Öğütme işlemi peletleme için beslemeyi daha üniform hale getirmek için yapılır. Biyokütle 3 mm'den daha büyük olmayacak şekilde öğütülür.

Peletleme: Düz ve silindirik olmak üzere iki tip peletleme kalıbı mevcuttur. Gevşek malzeme peletleme boşluğuna beslenir. Kalıp rotasyonu ve silindir basıncı malzemeyi kalıp içerisine sıkıştırır. Aşınma direncini artırmak ve biyokütleyi bağlamak için bağlayıcılar bu aşamada ilave edilir. Bu ilave maddeler pelet ağırlığının %1 kadardır. Ayarlanabilir bıçak yardımı ile peletler istenen boyutta kesilir.

Soğutma: Peletleme süresince uygulanan basınç peletleri parçalayabilir. Bu nedenle soğutma işlemi peletlerin sertleşmesi ve stabilizasyonu için kullanılmaktadır.



Şekil 5.2. Pelet yakıtı fabrika üretim şeması (1:Hammadde Deposu, 2:Ayırıştırıcı, 3:Değirmen, 4:Fırın, 5:Ara depo, 6:Karıştırıcı, 7:Ara depo, 8:Pelet pres, 9:Soğutucu, 10:Elek, 11:Silo (Severoğlu 2010))

Yeni teknolojilerde ham maddenin kurutulmasına (% 35 rutubete kadar) ve peletin soğutulmasına gerek görülmemektedir (Saraçoğlu 2008).

Odun peletlerinin özellikleri Tablo 5.1'de görülmektedir.

Tablo 5.1. Talaş ve odun tozundan hazırlanmış peletlerin özellikleri(Uslu, 2002)

Pelet çapı	mm	6-10
Pelet uzunluğu	mm	10-13
Enerji içeriği	MJ/kg	16.9-18.0
Nem içeriği	%	7-12
Kül içeriği	%	2
Yığın yoğunluğu	Kg/m ³	650-700

Yakma sistemlerinin tasarımı için peletlerin uzunluk ve çapı oldukça önemlidir. İnce peletler özellikle küçük kapasiteli yakma sistemlerinde daha iyi bir yanma oranı sağlarken, pelet uzunluğu yakıtın otomatik olarak yakma sistemine beslenmesi açısından önem arz etmektedir. Daha kısa peletler daha rahat bir akış sağlamaktadırlar

(Lehtikangas, 2001). Pelet yoğunluğu nakliye masraflarını, taşıma ve depolama etkinliğini etkilemektedir. Daha yoğun olan peletler nakliye masraflarını azaltıp taşıma ve depolama etkinliğini artırmaktadır (Lehtikangas 2001, Sokhansanj ve Turhollow 2004, Tumuluru vd., 2011).

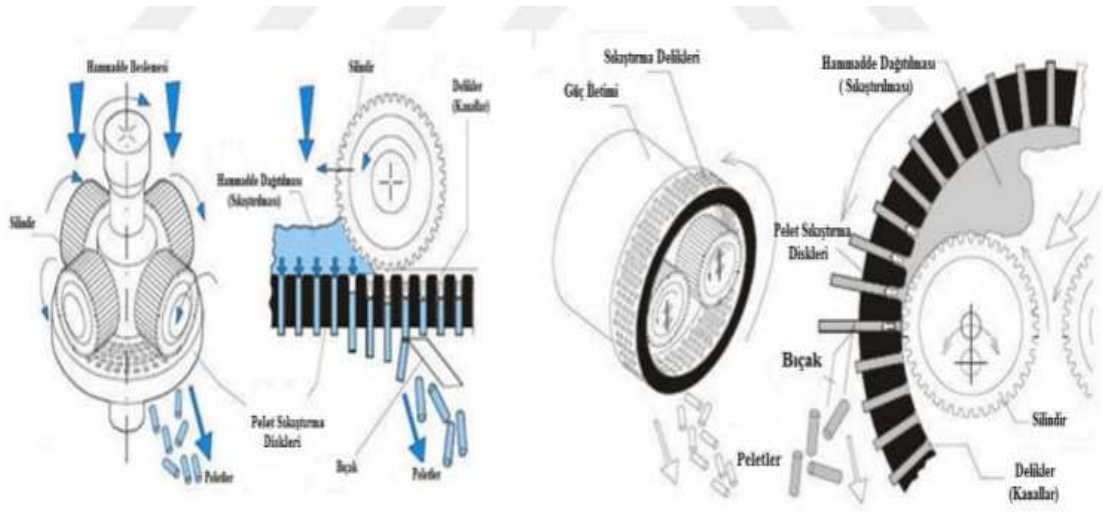
Peletlerin son kullanıcıya gelinceye kadar dayanıklı kalması oldukça önemlidir. Yüksek dayanıklılığa sahip peletler özellikle nakliyyede, taşınma ve depolamada avantajlar sağlamaktadır. Pelet dayanıklılığı değerlerinin %80 ve yukarı olması yüksek kaliteli, %70-80 arasında olması orta kaliteli ve %70'in altında olması ise düşük kaliteli olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.2. Bazı tarımsal atıkların ısı değerleri ve kül içerikleri (Karaca 2009).

Tarımsal Atıklar	Isıl Değerleri (kcal/kg)	Kül İçerikleri (%)
Yerfıstığı Kabuğu	4524	3,80
Küspe	4380	1,80
Hint tohumu kabuğu	3862	8,00
Pamuk sapları	4252	3,00
Bambu tozu	4160	8,00
Bambu odunu	4707	0,90
Kahve kabukları	4045	5,30
Tütün atığı	2910	31,50
Çay atığı	4237	3,80
Çeltik samanı	3469	15,50
Hardal sapları	4200	3,40
Hardal kabukları	4300	3,70
Buğday samanı	4100	8,00
Ayçiçeği sapları	4300	4,30
Hint keneviri atığı	4428	3,00
Soya f. kabuğu	4170	4,10
Şeker kamışı	3996	10,00
Ağaç kabukları	1270	4,40
Orman atıkları	3000	7,00
Hindistan c. lifleri	4146	9,10
Çeltik kabukları	3200	19,20
Odun yongaları	4785	1,20

Enerji düzeyi ve kül içeriği dikkate alınarak peletleme işlemi için kullanılan bazı önemli tarımsal atıklar tabloda verilmiştir. Tarımsal ve diğer biyokütle atıklarından en verimli şekilde yararlanmak için bu değerler göz önüne alınmalıdır.

Günümüzde peletleme teknolojisi olarak düz ve çember kalıplı presler kullanılmaktadır. Şekil 5.3’de gösterildiği gibi düz kalıp preste sıralı delikli disk üzerinde bir, iki ya da daha fazla sıkıştırma silindiri (genellikle 2 silindir) yaklaşık olarak 2-3 m/s hızla dönmektedir. Diskler vasıtasıyla kullanılan biyokütle kalıp deliklerinde sıkıştırılmakta ve kalıbın şeklini alarak peletlenmiş olarak çıkmaktadır. Çember kalıplı preslerde ise, dönen delikli çemberin iç çevresine bastıran sıkıştırma silindirleri (normalde 2 veya 3 adet) sürekli olarak dönmektedir. Biyokütle kalıp deliklerinde sürekli olarak sıkışarak peletlenmiş olarak kalıptan çıkmaktadır (Öztürk 2012).



a)Düz kalıplı pelet oluşumu

b) Çember kalıplı pelet oluşumu

Şekil 5.3. Pelet oluşumu türleri (a)düz kalıplı ve (b) çember kalıplı görünümü (Öztürk 2012).

Pelet kalitesi ve yoğunluğu sıkıştırma basıncı, ön ısıtma sıcaklığı ve basıncın uygulanma süresine bağlıdır. Literatürde oda sıcaklığında talaştan dayanıklı peletler üretmek için uygulanan basıncın en az 100 MPa olması gerektiği belirtilmiştir. Pelet teknolojisinde uygulanan basınç 125 MPa ve uygulanma süresi bir dakikadır. İlave basınç peletin kalitesini artırır ancak enerji sarfiyatını da artırır. Ön ısıtmanın amacı lignini camsı geçiş sıcaklığına ulaşmasını sağlamaktır. Ligninin camsı geçiş sıcaklığı 100-140 °C'dir. Odundaki lignin doğal bir bağlayıcıdır ve yüksek lignin içerikli odun atıkları odun peletlerinin dayanıklılığını artırabilir. Aynı zamanda buhar besleme biyokütlenin ön şartlandırılması için kullanılır. İlave nem ve ısı ligninin yumuşamasına

ve beslemenin lubrikasyon özelliği kazanmasını sağlar. Kalıp sıcaklığı 70 °C'de tutulur. Kalıbın yüksek sıcaklığı pelet kalitesini artırır ancak kalıbın yıpranmasına neden olur. Endüstride kalıp sıcaklığı 110 °C'dir.

Tablo 5.3. Peletlerin fiziksel ve kimyasal parametrelerinin üretim ve yakma üzerindeki etkileri (Viak A. 2000).

Parametreler	Etkileri
Fiziksel Özellikler	
Kütle Yoğunluğu	Taşıma ve depolama masrafları ile lojistik planlamayı etkiler
Birim Yoğunluğu	Yanma özelliklerini etkiler
Tane Boyutunun Dağılımı	Kurutma özelliği, toz oluşumu, dökülebilirlik, yakıtın taşınma güvenliği etkiler
Tozlama Eğilimi	Kütle yoğunluğunu, taşıma kayıplarını ve toz oluşumunu etkiler
Dayanıklılık	Aktarma sırasında kalite değişimleri, parçalanma, yakıt kayıplarını etkiler
Kimyasal Özellikler	
Su İçeriği	Depolanabilirlik, kalorifik değer, kayıplar ve kendinden alev almayı etkiler
Isıl Değer	Yakıt kullanımı ve Yakma kazanı dizaynını etkiler
Element İçeriği	
Cl - Klor	Emisyon, kazanlarda korozyonu etkiler
N - Azot	NO _x , HCN ve N ₂ O emisyonlarını etkiler
S - Kükürt	SO _x emisyonu etkiler ve korozyonu azaltır
K - Potasyum	Kazanlarda korozyona sebep olur, kül ergime ve aerosol oluşumunu düşürür
Mg - Magnezyum	Kül ergime noktasını yükseltir, külü bitki besini olarak kullanılabilir
P - Fosfor	Külü bitki besini olarak kullanılabilir
Ağır Metaller	Emisyon kirliliği yapar, aerosol oluştururlar ve kül içinde kullanılır veya atık olur
Kül İçeriği	Emisyonda partikül oluşturur, kül olarak kullanımı veya atık olarak maliyettir
Külün Yumuşatma Etkisi	Operasyonel güvenlik ve kirlenici emisyonların seviyesini etkiler
Mantar Sporları	Ham maddelere bulaşır, yakıtın üretimi ve kullanımında sağlık riski yaratabilir

6. PELETTLEME İLE TOREFAKSİYONUN BİRLİKTE UYGULANMASI

Pelet odun endüstrisi, biyokütlenin büyük miktarda taşınması ve dağıtımı konusunda sorunları çözmektedir. Ancak enerji üretiminde pelet odunun etkin bir şekilde kullanılması ile ilgili pek çok zorluklar bulunmaktadır. Tablo 6.1'de torrefiye odun, kömür, beyaz odun ve talaşın özellikleri karşılaştırılmaktadır.

Odun peletinin enerji yoğunluğu ($8-11 \text{ GJ/m}^3$) odun talaşından ($2-3 \text{ GJ/m}^3$) yüksek olmasına karşın $18-24 \text{ GJ/m}^3$ enerji yoğunluğuna sahip kömürden hala çok düşüktür. Torrefaksiyon işlemi ile biyokütlenin enerji içeriği artırılabilir. Torrefaksiyon sonrası elde edilen odunun enerji içeriği odun peletinkinden düşüktür. Peletleme ile torefaksiyonun birlikte yürütülmesi ile biyokütlenin enerji yoğunluğu ($15-18 \text{ GJ/m}^3$) düşük ranklı kömür ile karşılaştırılabilir. Torrefaksiyon işlemi biyokütle, depolama ve kararlılık özelliklerinin iyileştiren higroskopik özelliği verir. Nem absorpsiyonu depolama ve taşıma süresince mikrobial aktiviteyi ve gaz emisyonunu teşvik eder. Kömürün aksine odun peletleri suya maruz kaldığı zaman hızla parçalanır ve açık çevrede depolanamaz. Biyokütlenin torefaksiyonu açık çevrede depolama kolaylığı sağlayan hidrofobik özellik kazandırır.

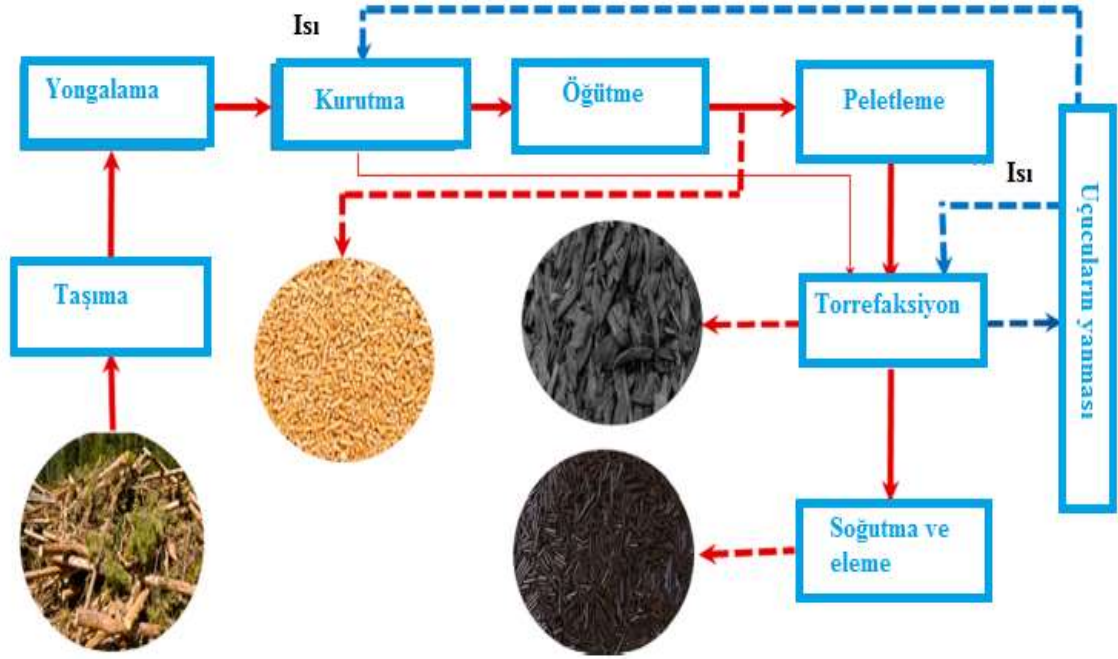
Tablo 6.1. Odun talaşı, odun peleti, torrefiye pelet, torrefiye talaş ve kömürün özellikleri (Zulfiqar, 2006)

	Odun talaşı	Odun peleti	Torrefiye odun talaşı	Torrefiye pelet	Kömür
Nem içeriği (%)	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 içeriği (%)	70-75	70-75	50-60	50-60	15-30
Yığın yoğunluğu (kg/m^3)	100-200	550-750	450-850	450-850	800-850
Enerji yoğunluğu (GJ/m^3)	2-3	8-11	4-5	15-18	18-24
Higroskopik öz.	Hidrofolik	Hidrofolik	Hidrofobik	Hidrofobik	Hidrofobik
Biyolojik parçalanma	var	var	yok	yok	yok
Ürün kararlılığı	heterojen	iyi	yüksek	yüksek	yüksek

ve yangın tehlikesine neden olur. Bu işlemdeki diğer bir zorluk torrefiye odunun peletlenmesindeki zorluktur. Torrefiye odunda parçacıklar arası bağlanma zayıfladığından pelet halinde kalıptan çıkarmak zor olacağından zayıf peletler üretilcektir. Torrefiye biyokütle kemik kadar kurudur ve kararlı hale getirmek için %15 nem içeriğine kadar su ilave etmek gerekir. Yüksek kalıp ve besleme sıcaklığı su ile birlikte uygulanırsa torrefiye ürünün sıkıştırılarak pelet haline getirilmesine yardımcı olabilir. Yüksek peletleme sıcaklıklarında lignin yumuşayacağından dolayı doğal bir bağlayıcı görevini görür. Ancak biyokütle yüksek sıcaklıklarda torrefaksiyona maruz kalmışsa bu durum geçerli değildir. Şiddetli torrefaksiyon işlemlerinde hemiselüloz miktarındaki azalma lignin dehidroksilasyonu sıkıştırma sırasında hidrojen bağlanmayı azaltacaktır. Aynı zamanda yüksek torrefaksiyon şiddeti biyokütlenin fibroz yapısını azaltacaktır. Bu durum torrefiye biyokütlenin yoğunlaştırılmasındaki zorluk torrefaksiyon şiddetine bağlıdır. Ayrıca sürtünme kuvveti nedeni ile sıcaklığın artması ile beraber hava ile temas edince yanma olayı gerçekleşir. Bu nedenle peletleme işleminin inert ortamda yürütülmesi gerekir. Bağlayıcı ve lubrikant kullanımı peletlemeyi kolaylaştırır ancak hem maliyeti artırır hem de peletin oksijen içeriğini artırır ki bu torrefiye odunun kalori değerini düşürür.

Odunun pelet haline getirildikten sonra torrefaksiyonu işleminin akım şaması Şekil 6.2'de görülmektedir. Odunun pelet halinde torrefaksiyonu hem beyaz pelet hem de siyah pelet üretimi yönünden esnek bir yaklaşımdır. Aynı alt yapıyı kullanmak işletme maliyetini azaltacaktır. Öğütme ve peletleme sırasındaki tozlanma ortadan kalkacaktır. Torrefaksiyon işleminin yürütüleceği reaktörde 3 kat daha fazla biyokütlenin torrefaksiyonun olması en önemli avantajlardan biridir. Örneğin saatte 5 ton odun talaşını torrefiye eden bir reaktörde 15 ton odun peleti torrefaksiyona uğratılabilir.

Bu avantajlarına rağmen peletlemeden sonra torrefaksiyon işleminde önünde bir takım zorluklar bulunmaktadır. Torrefaksiyonun yapılacağı reaktörlerin yatay yada düşey hareketli reaktörler olması peletlerin kırılması veya tozlanma etkisini ortadan kaldıracaktır. Bir diğer sorun torrefaksiyon işlemi sırasında bütün peletlerde kütle ve ısı transferinin aynı olup olmayacağıdır. Bir diğer muhtemel sorun peletin soğutulmasıdır.



Şekil 6.2. Peletlemeden sonra torrefaksiyonun uygulandığı işlem (Kumar vd.,2016)

6.1. Torrefiye Peletlerin Özellikleri

Laboratuar çalışmalarından elde edilen sonuçlar Tablo 6.2'de görülmektedir. Torrefaksiyon işlemi ile beyaz peletlerden karbon içeriği ve kalorifik değeri yüksek siyah peletler üretileceğini göstermektedir. Aynı zamanda torrefaksiyon ardından peletleme işleminin uygulandığı işlemde elde edilen peletlerin diğer peletlerden yani peletin torrefaksiyonundan elde edilenden daha az hidrofobik olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni torrefaksiyonun en son işlem olması ve bu nedenle bu üründe %2'den daha az nem kalmasıdır.

Torrefiye peletlerin yapılması sırasında bağlayıcıların kullanımı peletleme sırasındaki enerji sarfiyatının fazla olması yönünden karşılaştırılabilir. Bağlayıcı kullanıldığı durumda elde edilen torrefiye peletlerin yoğunluğu ve dayanıklılığı beyaz peletlerin torrefaksiyonu ile elde edilenlerden daha yüksek olması taşıma ve dağıtım kolaylığı sağlamaktadır. Ancak nişasta veya kireç (lime) gibi bağlayıcılar peletin ısı değerini düşürmekte ve hidrofobik özelliğini azaltmaktadır. NaOH ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gibi bağlayıcılarda kül içeriğini ve alkaliniteyi artıracığından yanma sırasında brülörde curüf oluşumuna neden olacaktır.

Tablo 6.2. Biyokütlenin peletlemeden önce ve sonra torrefaksiyonu sonucu elde edilen torrefiye peletlerin özellikleri (Bergman,2005)

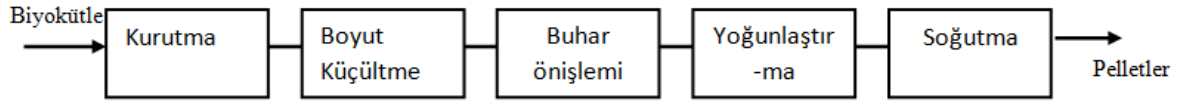
	Torrefaksiyon peletleri		
	Torrefiye pelet*	Torrefiye pelet**	Beyaz peletin torrefaksiyonu
Isı değeri (MJ/kg)	19-22	20-24	20-24
Nem içeriği (%)	5-10	5-10	<2
Yığın yoğunluğu (kg/m3)	550-650	750-850	
Dayanıklılık (%)	99	>90	<90
Hidrofobik özellik	Az	Çok	Çok

*: Bağlayıcı kullanılarak yapılan pelet

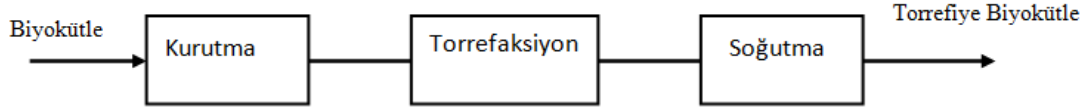
** : Bağlayıcı kullanılmadan yapılan pelet

6.2. Temel TOP Prosesi Kavramı

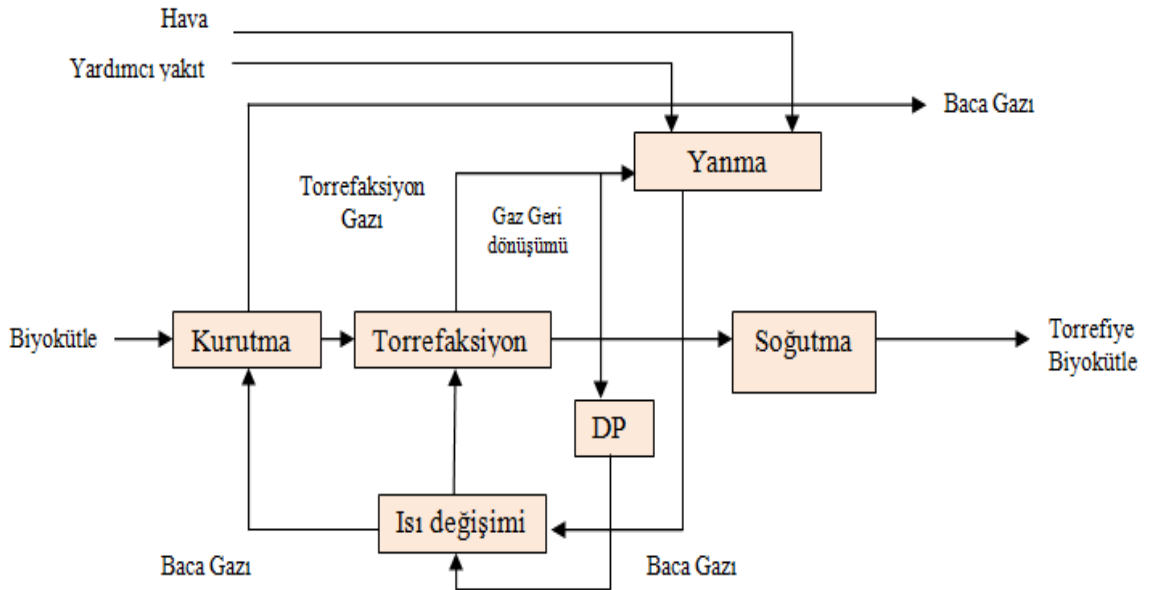
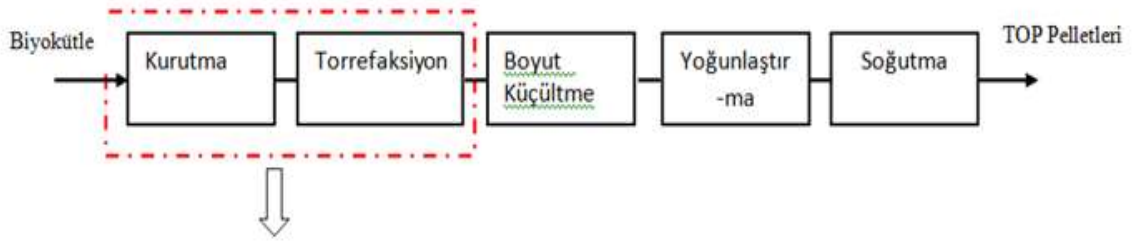
Enerji Araştırma Merkezi ECN, daha düşük toplam maliyetlerle üstün bir ürün elde etmek için çeşitli biyokütle hammaddelerinden biyopelet üretimi için alternatif bir süreç başlatmıştır. Süreç, torrefaksiyon ve peletleme kombinasyonuna dayanır ve TOP prosesi olarak adlandırılır. TOP prosesi; her iki prosesin avantajlarını, biyopeletin yakıt kalitesine göre birleştirir. Geleneksel peletleme sistemine torrefaksiyon teknolojisinin eklenmesi ek yatırımlara yol açar, ancak aynı zamanda peletleme ile ilgili birim operasyonların yatırım maliyetlerini azaltır. Sertleşmemiş pelletlerle karşılaştırıldığında, TOP pelletleri daha iyi hidrofobik davranış, kuvvet ve daha yüksek yoğunluk gösterir.Şekil 6.3’ de bu işlem aşamalı olarak gösterilmiştir.



B.Torrefaksiyon



C.TOP Proses



Şekil 6.3. Peletleme, torrefaksiyon ve TOP sürecinin temel süreç yapıları. (Bergman vd. 2005). Alt kısım, biyokütlenin önceden kurutulması dahil olmak üzere, torrefaksiyon işleminin öngörülen kavramsal yapısını göstermektedir. (DP: basınç düşüşü geri kazanımı)

Torrefaksiyon kurutmadan sonra ve boyut küçültmeden önce fonksiyonel bir işlem olarak tanıtlır (Reed vd. 1978; Koukios, 1993).

Şekil 6.3' ün alt kısmı, torrefaksiyonun kavramsal süreç yapısını temsil etmektedir. Tasvir edilen işlem planı, geri kazanılan sıcak gaz vasıtasıyla torrefaksiyon sırasında biyokütlenin doğrudan ısıtılmasına dayanmaktadır. Sıcak gaz, torrefaksiyon gazının kendisinden oluşur ve her bir döngüden sonra yeniden basınçlandırılır ve ısıtılır. Torrefaksiyon ve ön-kurutma için gerekli ısı, serbest bırakılmış torrefaksiyon gazının yanmasıyla üretilir. Muhtemelen bir yardımcı yakıt, torrefiltrasyon gazının enerji içeriği, torrefaction işlemini termal olarak dengelemek için yetersiz olduğunda kullanılır (Bergman vd. 2005). Kullanım, hareketli yatak prensiplerine dayanan özel bir torrefaksiyon reaktöründen yapılmıştır, ancak en düşük basınç düşüşü ile optimal ısıtma ve sıcaklık kontrolü için benzersiz özelliklere sahiptir. Isı entegrasyonuna göre optimize edilmiştir ve serbest olmayan akan biyokütle ve atık için uygundur. Şu anda, bu torrefaksiyon reaktörü ECN'de geliştirilmektedir. Şekil 6.3'e (alt kısım) göre, torrefaksiyon işleminin ısı verimliliği tipik olarak LHV (alt ısı değer) bazında % 96'dır (net proses verimliliği tipik olarak % 92). Biyokütlenin önceden kurutulması verimlilik kaybına neden olur.

7. LİTERATÜR TARAMASI

Miranda ve ark. (2011) ve Miranda ve ark. (2012) pelet nem içeriğinin artmasının pelet dayanıklılık direncini düşürdüğünü ve denemelerde kullanılan materyal çeşitlerine, karışım oranlarına ve pelet nem içeriğine bağlı olarak dayanıklılık oranının %85.83-%97.08 arasında değiştiğini bildirmişlerdir.

Hsu vd. (2011) çalışmalarında kereste odunu kullanmışlardır. Torrefaksiyon sıcaklığı olarak 220-250-280 °C, çalışma süresi olarak 0.5-1-1.5-2 saat belirlenmiştir. Kullanılan reaktör silindirik yapıdaki bir çelikten oluşmuştur. İnert ortam olarak azot gazı kullanılmış ve akış hızı olarak 50 ml/dk belirlenmiştir. Her bir deney için kullanılan numune miktarı 9 gramdır. Deneyler sonucunda 220 °C sıcaklıktaki ağırlık kaybının %21'den az olduğu ve ağırlık kaybının sıcaklıkla doğru orantılı değiştiği görülmüş. Ayrıca sıcaklık 220 °C' deyen numunenin yaklaşık %11'inin, 250 °C' deyen numunenin yaklaşık %24-30'unun, 280 °C' deyen de %28-35'inin sıvı ürüne dönüştüğü gözlemlenmiştir.

Peng vd. (2012) çam partiküllerini kullanarak torrefaksiyon işlemi üzerindeki sıcaklık ve tane boyutunun etkisini araştırmışlardır. Deney sistemi boru şeklindeki bir reaktör, sıcaklık kontrolörü, güç kaynağı, fırın soğutucu, ürün toplama kabı ve sisteme bağlı bir bilgisayardan oluşmaktadır. Kullanılan reaktör paslanmaz çelikten yapılmış olup iç çapı 27 mm, uzunluğu ise 575 mm'dir. Reaktör elektrikle ısıtılmış bir fırının içerisine yerleştirilmiştir. Deneye başlamadan önce sistem ısıtılmış aynı zamanda içinden sıcak azot gazı geçirilmiştir. Azot akış hızı 0.5 lt/dk, deney sıcaklıkları 523 ve 573 K, reaksiyon süresi olarak da 15 ve 30 dk belirlenmiş. Reaktör sıcaklığı sıcaklık kontrolörü yardımıyla kontrol edilmiş, sıcaklık ölçümü için de sistemin içerisine dört tane termoçift yerleştirilmiştir. İşlem görmemiş numune reaktöre koyulmuş ve deney sonrasında torrefiye olmuş ürün sistemden alınmış. Deneyler sonucunda sıcaklığın artmasıyla ağırlık kaybının ve karbon içeriğinin arttığı; yığın yoğunluğu, oksijen içeriği ve enerji veriminin azaldığı gözlemlenmiştir. Farklı boyuttaki partiküllerden de küçük olanların daha hızlı ağırlık kaybettiği ve oluşan farkın yüksek sıcaklıklarda daha belirgin olduğu görülmüş.

Liu ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada bambu ve çeltik sapları, parçacık boyutları 2mm ve daha düşük boyutta olacak şekilde öğütülmüştür. Öğütüldükten sonra %8.15 olan nem içeriği, önceden miktarı belirlenmiş saf su 5 kg materyale eklenerek 2

gün boyunca ağzı kapalı torbalarda bekletilmiştir. 2.günün sonunda nem içerikleri, bambuda %15,97, çeltik sapında %15,56 olarak tespit edilmiştir. Peletleme işlemi sonunda bambu ve C'de 1 saat°çeltik sapı peletlerinin bir kısmı dijital sıcaklık kontrollü sobada 220 bekletildikten sonra karbonize olmuş bambu ve çeltik sapı peletleri elde edilmiştir. Bambu, çeltik sapı, karbonize olmuş bambu ve karbonize olmuş çeltik sapı peletlerine pelet fiziksel testleri uygulanmış olup pelet hacim yoğunlukları sırasıyla 540kg/m³ , 640kg/m³ , 490kg/m³ , 590kg/m³ , pelet yoğunlukları sırasıyla 1250kg/m³ , 1350kg/m³ , 1160kg/m³ ve 1280kg/m³ olarak bulunmuştur. Çeltik sapı peletlerinin pelet yoğunluğu ve pelet yığın yoğunluğu her iki durumda da yüksek bulunmuştur. Pelet dayanıklılık dirençleri de sırasıyla, %94,21, %98,73, %97,80 ve %99,17 değerlerinde tespit edilmiş, çeltik sapının pelet kalitesinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Kambo vd. (2014) bu çalışmada miscanthus hammaddesini kullanmışlardır. Numuneler 20 ile 25 mm arasında değişen uzunluklarda kesilmişlerdir. 1.25 kw kapasiteli dört elektrikli ısıtıcı ile ısıtılan paslanmaz çelik bir tüpten oluşan reaktör kullanılmıştır. Her reaksiyon için yaklaşık 5 g miscanthus reaktör içine yerleştirilmiştir. Reaktör daha sonra 10°C/dakika ısıtma oranı ile 260°C'ye ısıtılmış ve işlem 30 dakika boyunca sürdürülmüştür. Reaksiyon sonrası ham ve işlenmiş numuneler karşılaştırıldığında; katı veriminin arttığı, uçucu madde miktarının azaldığı, üst ısı değerinin ve enerji yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir.

Peng vd.(2013) numune olarak çam ve ladin yapraklarını kullanmışlardır. Numuneler etüvde 105 °C'de bir gün boyunca kurutulup değirmende öğütülmüştür. Sıcaklık ve sürenin torrefaksiyona olan etkisini gözlemlmek için 4mm boyutlarında üretilen ladin, çam ve köknar talaşları karışımı kullanılmıştır. Öğütülmüş numuneler boru şeklindeki reaktörde 240- 270- 300- 340 °C' de inert azot ortamında 60 dk torrefaksiyon işlemine tabi tutulmuştur. Temogravimetrik analizle uçucu madde, sabit karbon ve kül içerikleri belirlenmiştir. Buna göre kütle kaybının, üst ısı değerinin, karbon içeriğinin sıcaklıkla arttığı; yığın yoğunluğunun, enerji veriminin, oksijen-hidrojen içeriğinin sıcaklıkla azaldığı gözlemlenmiştir.

Saleh vd. (2013) hammadde olarak çam ve ladini seçmişlerdir. Kullanılan reaktör dış çapı 70mm, uzunluğu 200 mm olan silindirik şekilli bir reaktördür. Torrefaksiyon sıcaklıkları 200-350 °C arasında, deney süresi 30 ve 90 dk' dır. İnert ortam olarak 1 lt/dk akış hızında azot ortamı kullanılmıştır. 90 dk' lık torrefaksiyon süresinde çam için %27-60 arasında bir ağırlık kaybı ve %59-90 oranında boyut küçülmesi görülmüştür.

Ladin için %10-56 arasında ağırlık kaybı, % 20-60 arasında boyut küçülmesi görülmüştür. Bu iki biyokütle hemiselüloz yapısı ve kül içeriği bakımından farklı olduğu için kayıp oranları da farklılık göstermiştir. Ayrıca sıcaklık ve sürenin artmasıyla biyokütlenin yapısı fark etmeksizin her iki numunede de kütle ve enerji kayıpları gözlemlenmiştir. Partikül boyutu, deney süresi ve sıcaklık artırılınca katı ürün veriminin azaldığı görülmüştür.

Cubero-Abraca ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, endüstriyel kahve posaları kurutularak 16 mm elek çapına sahip değirmende öğütülüp, 3 silindirli pelet makinasında peletlenerek 6,12 mm çapında peletler elde edilmiştir. Peletleme işlemi sonunda peletlerin %10,1 nem içeriğine sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen peletler hacmi belirli bir kaba konularak tartılmış ve 600 kg/m^3 pelet yığın yoğunluğu değeri bulunmuştur. Pelet yoğunluğu 1300 kg/m^3 olarak tespit edilmiştir. Peletlerin nem alma direnci belirlenirken, potasyum nitrat solüsyonu içeren %21 bağıl neme sahip desikatör içine 30 adet pelet rastgele düzenle yerleştirilerek 14 gün bekletilmiştir. Test öncesi ve test sonrası ağırlıklar kaydedilerek nem alma direnci %8.10 olarak belirlenmiştir. Kırılma direnci testinde; 100 peletin her biri 1 m yükseklikten seramik yüzeye atılmış, “1/kırılan parça sayısı” formülüyle kırılma direnci 0.95 olarak hesaplanmıştır. Basınç dayanımı testinde 60 ton kapasiteli basınç dayanım test cihazı kullanılmış ve dayanım $26,86 \text{ kg/cm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Pelet dayanıklılık direnci %75,54 değerinde bulunmuştur. ASAE 269,4 standardına göre dayanıklılık direncinin kabul edilebilir sınırların altında olduğu görülmüştür.

Bach vd. (2016) çalışmalarında numune olarak ladin parçalarını kullanmışlardır. Torrefaksiyon sıcaklığı olarak 220-240-260-280-300 °C, deney süresi olarak da 2 saat seçilmiştir. Her deneyde 10 gr numune kullanılmıştır. İnert ortam olarak da 100 ml/dk akış hızında azot gazı beslemesi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre sıcaklık arttıkça katı ürün veriminin, oksijen-hidrojen içeriğinin azaldığı, karbon değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Gong vd. (2016) numune olarak çam talaşını seçmişleridir. Bilyeli öğütücüde ve çekiçle öğütülmüş çam talaşlarını 230-260-290 °C’ de 30 ve 60 dk boyunca torrefaksiyona tabi tutmuşlardır. İnert ortam olarak 0.4 lt/dk akış hızında azot gazı kullanılmıştır. 290 °C’de 60 dakikalık torrefaksiyon işleminde çekiçle öğütülmüş numunenin atomik O/C oranı 0.62’den 0.42’ye, H/C oranı 1.49’dan 1.16’ya düşmüştür. Aynı şartlardaki deney sistemi bilyeyle öğütülmüş numunenin O/C oranını 0.61’den

0.27'ye, H/C oranını 1.49'dan 0.91'e düşürmüştür. Yani bilyeli öğütücüde öğütülmüş numunenin torrefiye halinin, aynı şartlarda çekiçle öğütülmüş numunenin torrefiye halinden daha düşük H/C ve O/C oranına sahip olduğu görülmüştür.



8. MATERYAL VE METOD

8.1. Pelet Hazırlama

Çalışmada yumuşak ve sert ağaç türlerinin kullanılması amaçlandı. Bu amaçla sert ağaç olarak meşe ağacı odunu (MAO) yumuşak ağaç olarak çam ağacı odunu (ÇAO) seçildi. Ağaç türleri talaş olarak Malatya ili kereste doğrama atölyesinden temin edildi. Talaş örnekleri pelet hazırlama, kısa analiz (proximate), elementel, TGA ve DTG analizleri için elendi ve -100 mesh tane boyutu alındı. Biyokütlenin nem içeriği Mettler LJ16 nem tayin cihazında belirlendi. Uçucu madde ve kül analizleri ise kül fırınında ASTM standartlarına göre belirlendi.

MAO ve ÇAO tozları hidrolik pres (Şekil 8.1) kullanılarak 30 saniye süre ile 5 ton basınç altında 13 mm çap ve yaklaşık 6-7 mm yükseklikte silindirik peletler (Şekil 8.2) elde edildi. Deneyde kullanılacak bütün peletler benzer şekilde hazırlandı. Hazırlanan peletler torrefaksiyon deneylerinde kullanılıncaya kadar plastik poşetlerde muhafaza edildi.



Şekil 8.1. Hidrolik Pres

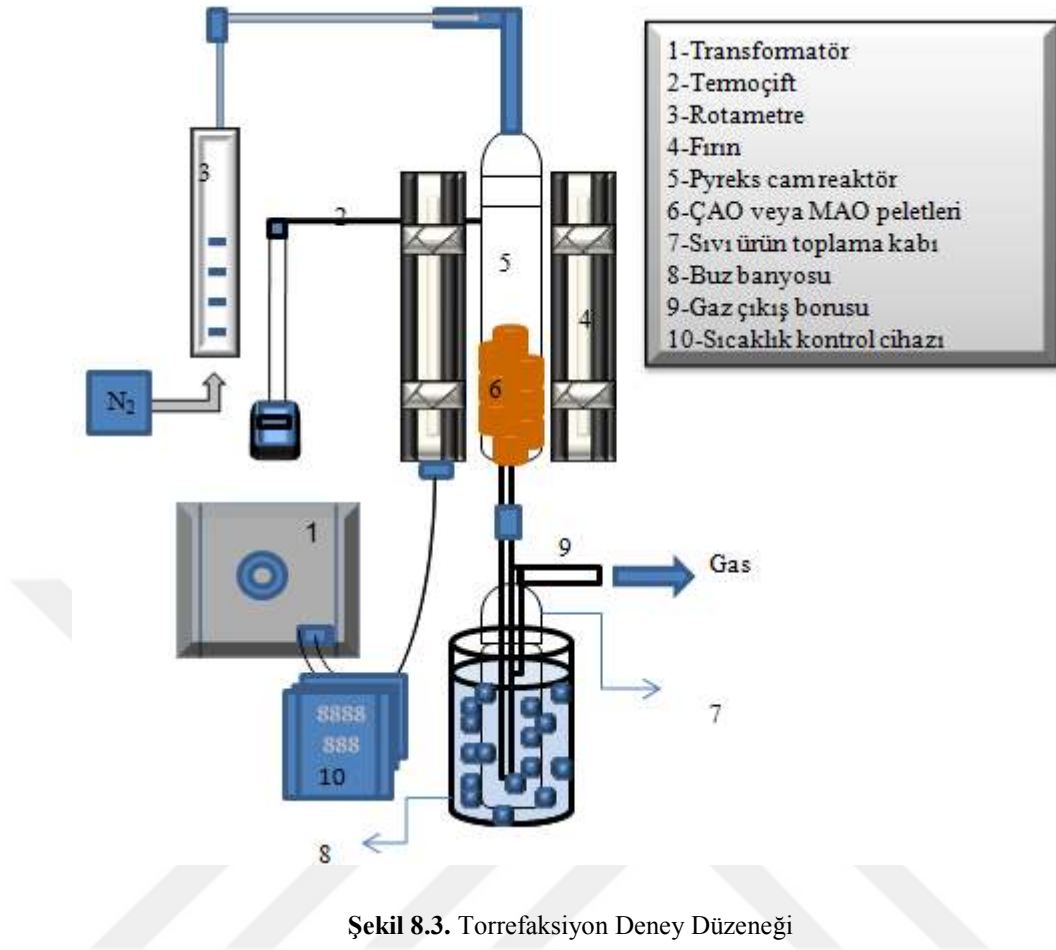


Şekil 8.2. Meşe ve çam ağacı odun tozundan hazırlanan peletler

8.2. Torrefaksiyon Deneyi

Torrefaksiyon deneyleri 105 mm çapında ve 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. Fırın değişik voltaj transformatörü ile ısıtıldı. Çalışma sıcaklığının sabit kalması için fırın ile transformatör arasına OGDEN ETR-9090 model PID sıcaklık kontrol cihazı yerleştirildi. Çalışma sıcaklığı fırın içerisinden geçirilen ve pyrex reaktör ile temas halinde bir termočift (NiCr) ile takip edildi. Deney setine torrefaksiyon sırasında oluşan sıvı ürünün toplanması için buz banyosuna yerleştirilmiş sıvı ürün toplama kabı eklendi. İnert ortam N₂ gazı ile sağlandı. Torrefaksiyon işleminin yapıldığı deney sistemi Şekil 8.3’de görülmektedir.

Torrefaksiyon deneylerinde fırın içerisindeki reaktöre her biri yaklaşık 1 g olan peletlerden 8 adet başlangıç ağırlığı belirlenerek yerleştirildi. Reaktör ısıtılmadan önce sistemden 100 ml/dk akış hızında azot gazı (5 dk) geçirildi. Fırın daha sonra sıcaklık kontrol cihazı ile belirlenen çalışma sıcaklığına ısıtıldı. Fırın çalışma sıcaklığına ulaştığı süre 0. dk olarak kabul edildi ve belirlenen işlem sürelerinde torrefaksiyon işlemi yürütüldü. Çalışma süresi sonunda sistemin ısıtılması durduruldu ve reaktör hemen fırından çıkarılarak azot atmosferi altında soğutuldu. Soğuma işleminden sonra reaktör içerisindeki peletler çıkarılarak hassas terazide (hassasiyet $\pm 0,001$ g) tartıldı. Aynı zamanda peletlerin deney öncesi ve sonrası boyutları dijital kumpas ile belirlendi. Ağırlığı deney öncesi bilinen sıvı ürün toplama kabı deney sonunda buz banyosundan çıkarılarak dış kısmı kurutulduktan sonra tartıldı ve ağırlık farkından sıvı ürün miktarı belirlendi. Gaz ürün ise farktan belirlendi. Cam set (reaktör ve sıvı ürün toplama kabı) bir sonraki deney için tetrahidrofuran ile yıkanarak etüvde kurutuldu.



Şekil 8.3. Torrefaksiyon Deney Düzeneği

Torrefaksiyon işlemi düşük (230°C), orta (260 °C) ve yüksek (300 °C) şiddette olmak üzere üç farklı sıcaklıkta yürütüldü. Her bir sıcaklıkta işlem süreleri 10 dk, 20 dk, 40dk ve 60 dk olarak belirlendi. Fırının çalışma sıcaklığına ulaşması için her üç sıcaklıkta da ön ısıtma süresi 7-8 dk olacak şekilde ayarlandı.

Torrefaksiyon işlemi sonunda torrefiye olan peletler çalışma sıcaklıklarına göre adlandırıldı. Meşe ağacı odununun 230 °C, 260 °C ve 300 °C 'de torrefaksiyonundan elde edilen torrefiye katılar sırasıyla TMAO-230, TMAO-260 ve TMAO-300 olarak adlandırıldı. Çam ağacı odununun 230 °C, 260 °C ve 300 °C 'de torrefaksiyonundan elde edilen torrefiye katıları ise sırasıyla TÇAO-230, TÇAO-260 ve TÇAO-300 olarak adlandırıldı.

8.3. Kısa (Proximate) analiz

İşlem görmemiş MAO ve ÇAO (-100 mesh) ile torrefaksiyon işlemi sonucu elde edilen torrefiye peletlerin uçucu madde ve kül içerikleri belirlendi. Bu amaçla torrefiye

peletler agat havanda öğütülerek toz haline getirildi. Uçucu madde ve kül oranları ASTM standartlarına göre kül fırınında yapıldı. Yapılan proximate analiz sonuçları, 2 paralel çalışmanın ortalaması olarak verildi.

İşlem görmemiş meşe ve çam ağacı odunların nem içeriği Mettler LJ16 nem tayin cihazında, 105°C sıcaklıkta yaklaşık 20-30 dk sabit değeri gösterinceye kadar bekletilerek belirlendi.

Uçucu Madde Tayini

900±50°C’ de sabit tartıma getirilmiş kroze içine, uçucu madde tayini için hazırlanan numuneden yaklaşık 1,5 g konulup krozenin kapağı kapatılarak kül fırınına ağzı kapalı halde konuldu. Kroze fırında tam olarak 7 dk. bekletildikten sonra fırından çıkarıldı ve desikatörde soğutularak tartıldı. Ağırlık kaybından uçucu madde miktarı tespit edildi. Örnekteki uçucu madde miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplandı.

Uçucu madde (%)

$$= (m_{(2)} - m_{(3)}) / (m_{(2)} - m_{(1)}) \times 100 - \%Nem \quad (8.1)$$

m_1 = Kroze ağırlığı, g

m_2 = Kroze+numune ağırlığı , g

m_3 = 900°C işlem sonundaki kroze+numune ağırlığı, g

Kül Miktarı Tayini

Uçucu madde analizi sonrasında krozede kalan karbon içeriği yüksek ve kül ihtiva eden kısım krozede ağzı açık olarak 750°C’ye ısıtılan fırında yakılarak sabit tartıma getirildi. Kül miktarı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} & \text{Kül (\%)} \\ &= \frac{m_4 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \end{aligned} \quad (8.2)$$

m_4 = Kroze+kül ağırlığı, g

Sabit Karbon Miktarı Tayini

Sabit karbon miktarı aşağıdaki eşitlik ile hesaplandı.

$$\% \text{Sabit karbon} = 100 - (\% \text{Uçucu madde miktarı} + \% \text{Nem miktarı} + \% \text{Kül}) \quad (8.3)$$

8.4. Elementel Analiz

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

8.5. Termogravimetrik Analiz (TGA)

MAO, CAO ve her bir sıcaklıkta 20 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.



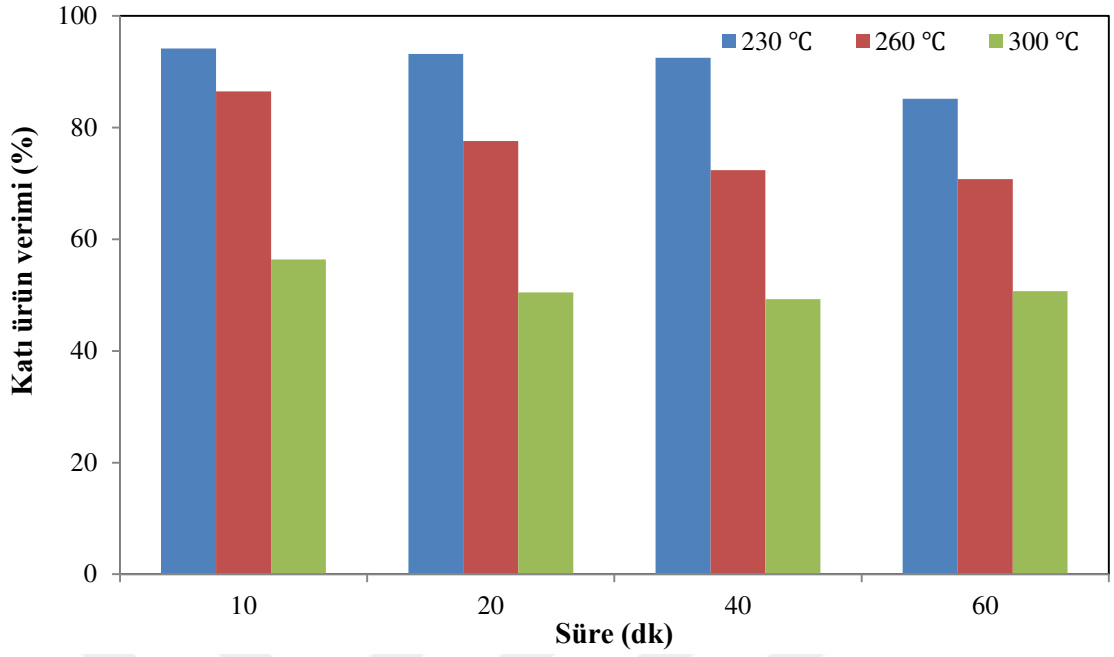
9. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

9.1. Meşe Ağacı Odunun Torrefaksiyonunda İşlem Şartlarının Ürün Verimine Etkisi

Meşe ağacı odun peletlerinin düşük (230 °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.

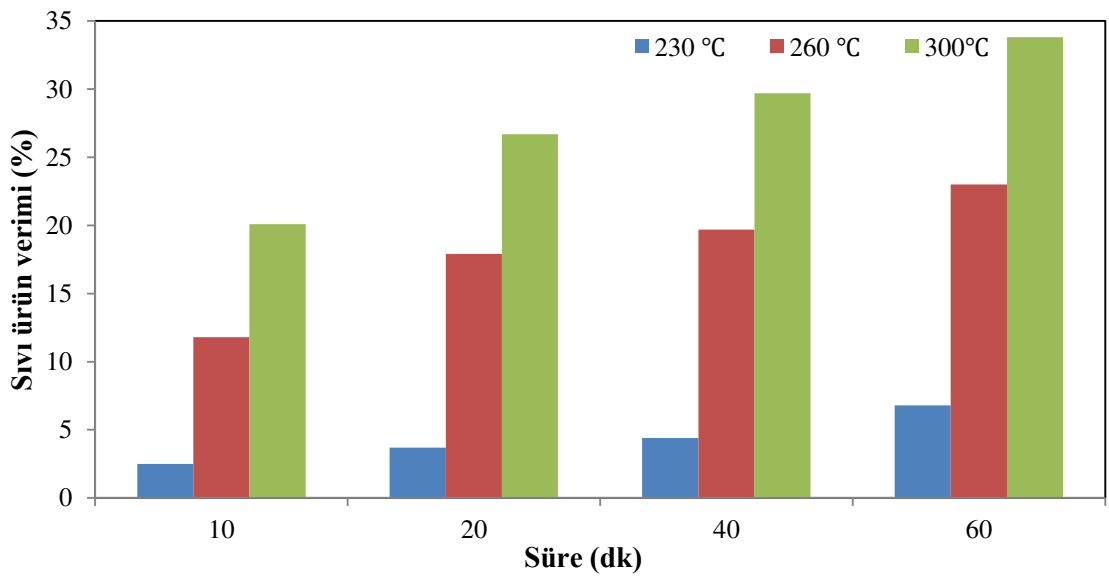
Şekil 9.1’de görüldüğü gibi katı ürün verimi torrefaksiyon şiddeti ve işlem süresinin uzamasına bağlı olarak azalmaktadır. Ancak katı ürün verimi üzerinde torrefaksiyon sıcaklığının daha belirgin olduğu açıktır. Örneğin 10 dakikalık işlem süresi sonunda torrefaksiyon sıcaklığı 230 °C’ den 300 °C’ ye yükseldiği zaman katı ürün verimi %94,2’den %56,4’e düşmektedir. 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.

Torrefaksiyon işlem süresinin katı ürün verimi üzerindeki etkisi göz önüne alındığında işlem süresinin torrefaksiyon sıcaklığı kadar etkili olmadığı görülmüştür. Katı ürün veriminin her bir işlem sıcaklığında 10 dakika süre ile yürütüldüğü deneylerde belirgin olarak azalması ve 300 °C’de 20, 40 ve 60 dakikalık işlem sürlerinde katı ürün verimindeki düşük miktardaki azalma sıcaklığın katı ürün verimi üzerinde işlem süresinden daha etkili olduğunu göstermektedir.

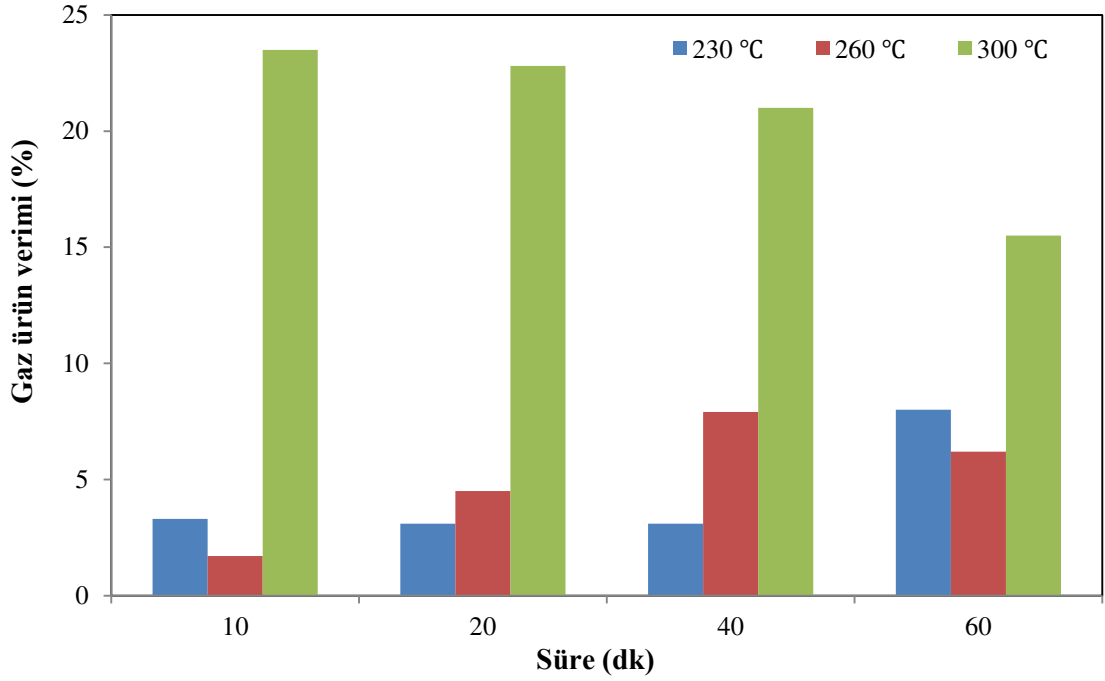


Şekil 9.1. Meşe ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen katı ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi

Şekil 9.2’de sıvı ürün veriminin işlem sıcaklığı ve kalma süresi ile değişimi görülmektedir. Sıvı ürün verimi hem işlem sıcaklığı hem de işlem süresi ile belirgin olarak artmıştır. Katı ve sıvı ürünün deneysel olarak belirlenmesinden sonra farktan belirlenen gaz ürün veriminin ise düzenli bir değişim sergilemediği Şekil 9.3’ de görülmektedir.



Şekil 9.2. Meşe ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen sıvı ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi

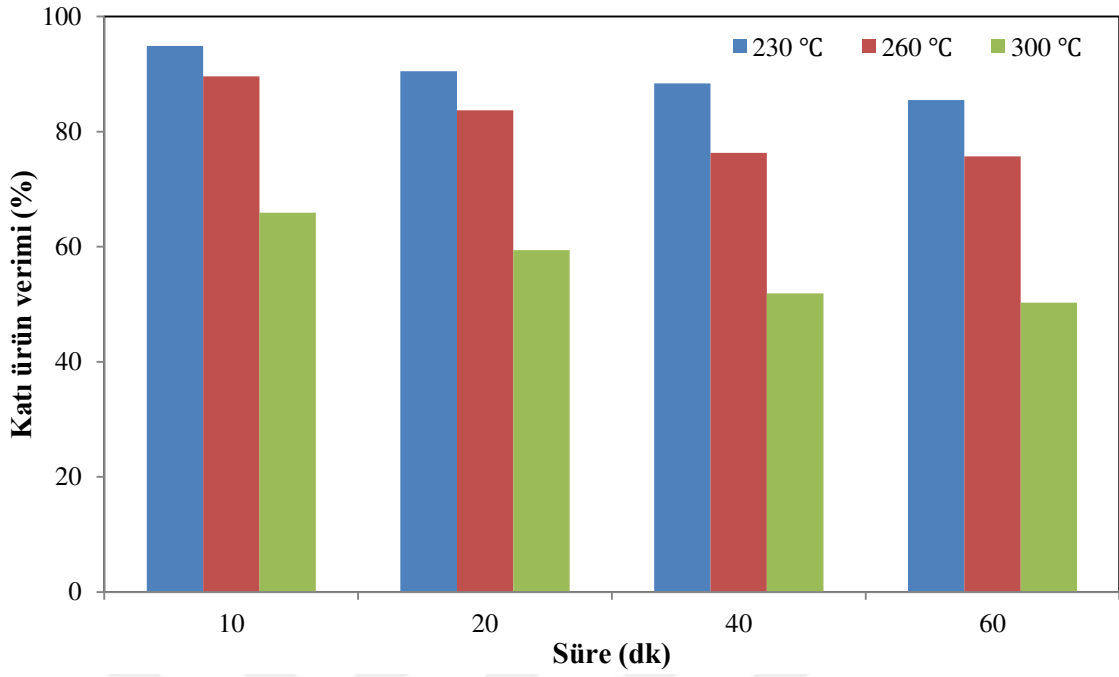


Şekil 9.3. Meşe ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen gaz ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi

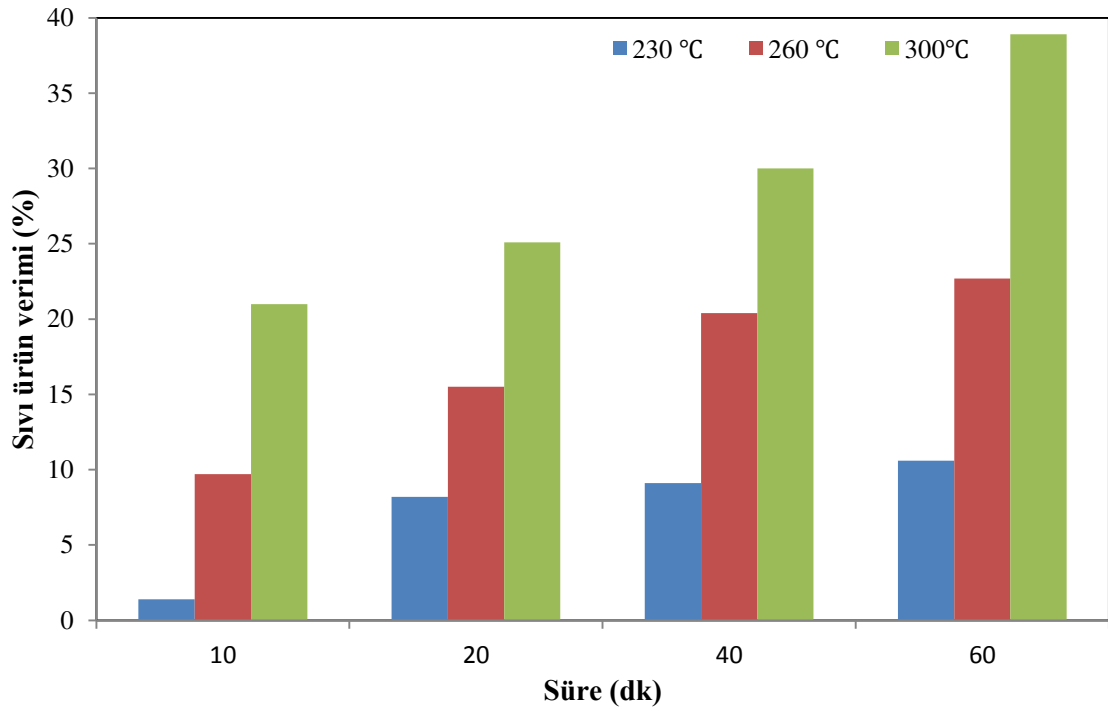
9.2. Çam Ağacı Odunun Torrefaksiyonunda İşlem Şartlarının Ürün Verimine Etkisi

Çam ağacı odun peletlerinin düşük (230 °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 9.4, Şekil 9.5 ve Şekil 9.6’da görülmektedir.

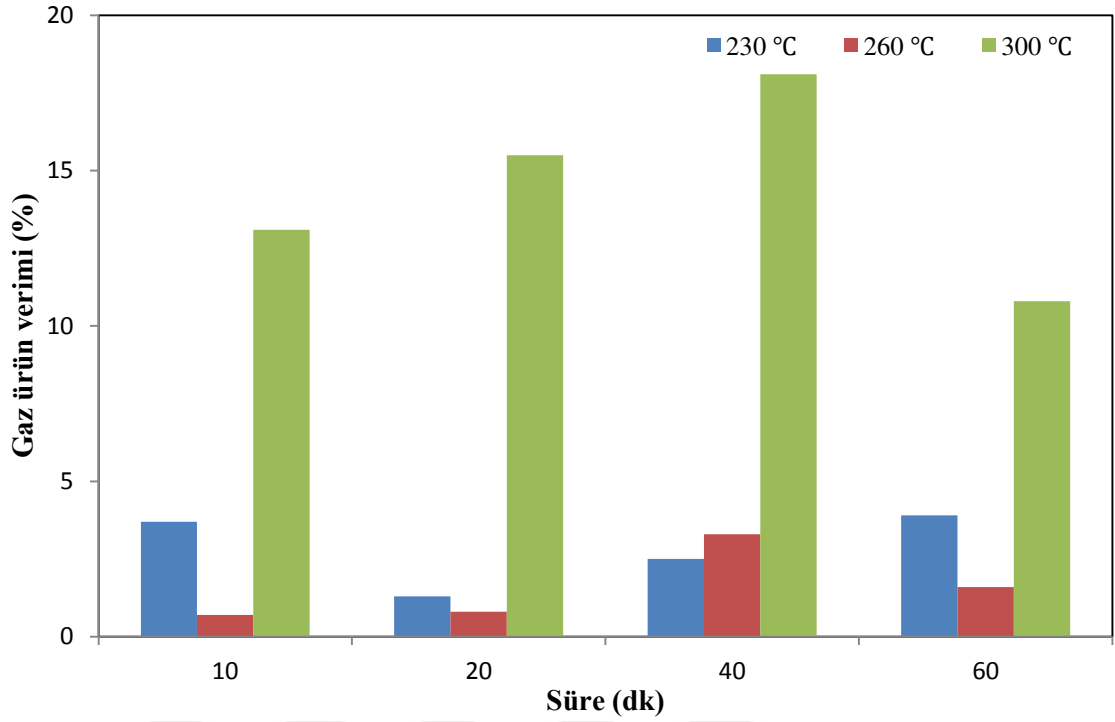
Şekil 9.4’ de görüldüğü gibi çam ağacı odunun torrefaksiyonundan elde edilen katı ürün veriminin torrefaksiyon şiddeti ve işlem süresine bağlı olarak değişimi meşe ağacı odununun torrefaksiyonundan elde edilen katı ürün verimindeki değişimine benzer durum sergilemiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi sıcaklığın ürün verimi üzerinde etkisinin işlem süresinden daha etkili olduğunu göstermiştir. Şekil 9.5’de sıvı ürün verimi işlem sıcaklığı ve kalma süresi ile artarken gaz ürün verimi (Şekil 9.6) işlem şartlarına bağlı olarak düzenli bir değişim göstermemiştir.



Şekil 9.4. Çam ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen katı ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi



Şekil 9.5. Çam ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen sıvı ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi



Şekil 9.6. Çam ağacı odun peletlerinin torrefaksiyonu sonucu elde edilen gaz ürün veriminin çalışma sıcaklığı ve işlem süresi ile değişimi

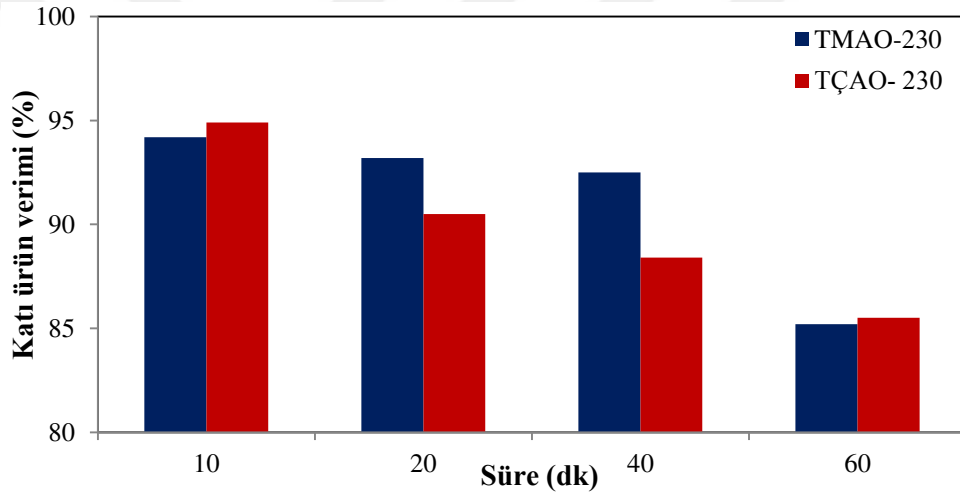
9.3. Çam ve Meşe Ağacı Odunlarının Torrefaksiyonundan Elde Edilen Katı Ürün Verimlerinin Karşılaştırılması

Meşe ve çam ağacı odun peletlerinin 230 °C'de farklı sürelerde torrefaksiyonundan elde edilen katı ürün verimleri Şekil 9.7' de karşılaştırılmıştır. Meşe ağacı odun peletlerinin 230 °C' de torrefaksiyonundan elde edilen katı ürün verimlerinin 40 dakikalık işlem süresine kadar çam ağacı odununun bu sıcaklıktaki katı ürün veriminden düşük olduğu tespit edildi. Bu durum düşük torrefaksiyonda çam ağacı odununun reçineli yapısının parçalanmasından kaynaklanabilir. Ancak 60 dakikalık işlem süresinde her iki odun türünden elde edilen katı ürün verimlerinin biri birine yakın olması reaktör içindeki çoklu tanelerin çalışma sıcaklığına ulaşması için ilave bir zamanın gerekli olduğunu gösterebilir.

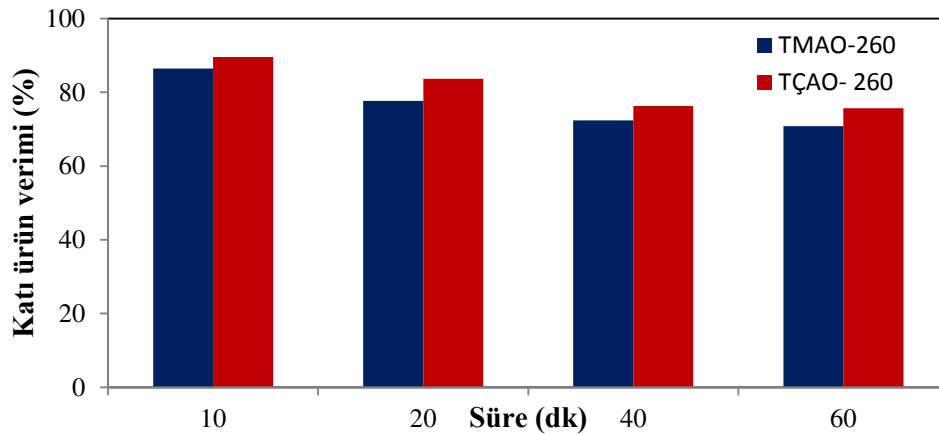
Meşe ve çam ağacı odun peletlerinin 260 °C' de torrefaksiyonundan elde edilen katı ürün verimleri Şekil 9.8' de gösterilmiştir. Bu sıcaklıkta her bir reaksiyon süresinde meşe ağacı odunundan elde edilen katı ürün verimi çam ağacı odunundan düşüktür. Her iki odun türü ile 300 °C' de yürütülen deneylerde torrefaksiyon şiddetinin yüksek olması nedeni ile işlem süresi uzadıkça katı ürün verimlerinin biri birine yaklaştığı

görüldü. Meşe ağacı sert odun çam ağacı ise yumuşak odundur. Literatürde yumuşak odunda yüksek sıcaklıkta parçalanmış lig-C oranının yüksek olduğu düşük sıcaklıkta parçalanmış lig-O ve lig-H bileşenlerin düşük olduğu ve lig-C'nin katı ürün (char) miktarını arttırdığı belirtilmiştir (Anca-Couce ve Obernberger, 2016). Huş ağacı ve çam ağacının torrefaksiyonunda da benzer sonuçlar bulunmuştur (Puskhin vd., 2015)

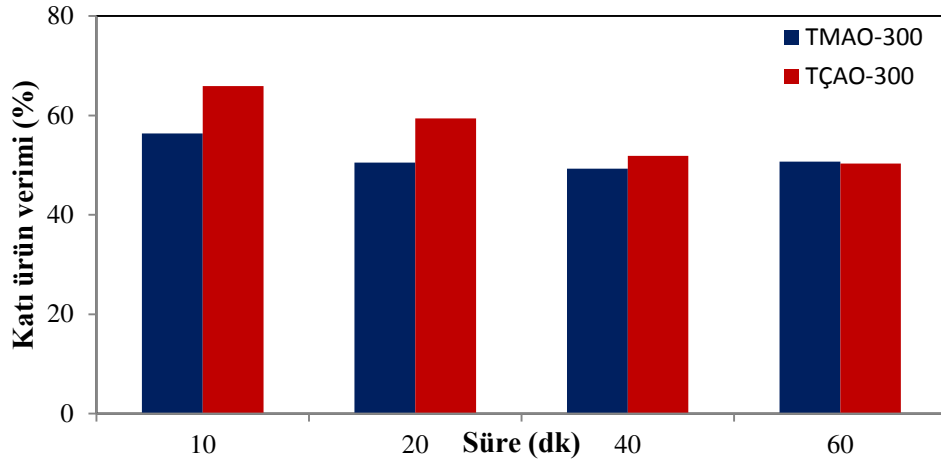
Meşe ağacı odununun şiddetli torrefaksiyonunda 10 ve 20 dakikalık işlem sürelerinde elde edilen katı ürün verimlerinin belirgin olarak düşük olması sert odun türündeki yapılarda hemiselüloz bileşeni içindeki ksilandan kaynaklanmaktadır. Sert odunda hemiselüloz bileşeni içinde oldukça reaktif olan ksilan oranının daha yüksek olduğu belirtilmektedir. Ksilanın 200 °C' de parçalandığı vurgulanmıştır (Prins vd, 2006b).



Şekil 9.7. Meşe ve çam ağacı odun pelletlerinin 230 °C' de farklı sürelerde torrefaksiyonundan elde edilen katı ürün verimleri



Şekil 9.8. Meşe ve çam ağacı odun pelletlerinin 260 °C'de farklı sürelerde torrefaksiyonundan elde edilen katı ürün verimleri

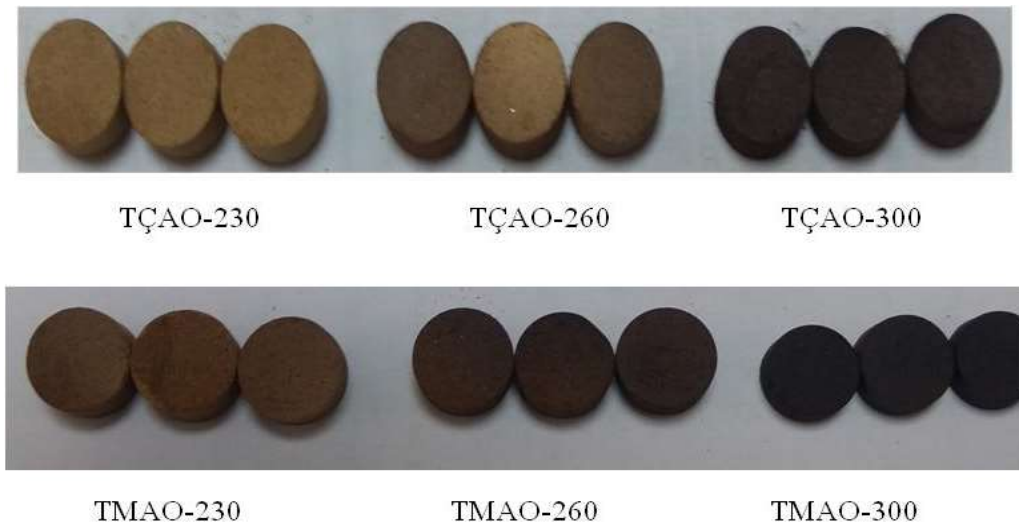


Şekil 9.9. Meşe ve çam ağacı odun pelletlerinin 300 °C'de farklı sürelerde torrefaksiyonundan elde edilen katı ürün verimleri

9.4. Katı Ürünün Karakterizasyonu

9.4.1. Katı Ürünün Kısa (Proximate) ve Elementel Analizi

Şekil 9.10'da odun örnekleri ve torrefiye ürünlerindeki renk değişimleri görülmektedir. Torrefaksiyon şiddeti ile pelletlerdeki renk değişimi belirgin olmasına karşın pelletin hafif ve orta torrefaksiyonunda pelletlerdeki renk değişiminin homojen olmaması pelletlerin reaktörde rastgele paketlenmesi veya pelletlerin belirli bölgelerinden azotun geçmesinden kaynaklanabilir. Ancak şiddetli torrefaksiyonda bu durum gözlenmedi.



Şekil 9.10. MAO ve ÇMAO'nun farklı sıcaklıklarda 20 dk torrefaksiyonu sonucu elde edilen torrefiye ürünlerdeki renk değişimi

Tablo 9.1 ve Tablo 9.2 sert (meşe ağacı odunu) ve yumuşak (çam ağacı odunu) odunun farklı sıcaklık ve sürelerde torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün elementel ve kısa analiz sonuçlarını içermektedir.

Tablo 9.1. Meşe ağacı odunu ve torrefiye meşe ağacı odunun kısa ve elementel analizi

Kısa analiz						
Örnek	İşlem süresi (dk)	% Nem	% Uçucu bileşen	% K ül	% Sabit karbon*	ρ (g/cm³)
MAO	-	4,4	74,4	3,3	17,9	1,077
TMAO-230	20	-	71,6	3,7	24,7	0,818
TMAO-260	10	-	71,8	3,9	24,3	0,734
TMAO-260	20	-	70,7	4,2	25,1	0,778
TMAO-260	40	-	65,9	4,4	29,7	0,965
TMAO-260	60	-	69,5	4,8	25,7	0,830
TMAO-300	20	-	52,9	5,1	42,0	0,644

Elementel analiz							
	İşlem süresi (dk)	% C	% H	% N	% O*	Atomik H/C oranı	Atomik O/C oranı
MAO	-	45,5	5,9	0,3	48,3	1,6	0,79
TMAO-230	20	49,0	5,7	0,3	45,0	1,5	0,68
TMAO-260	10	49,7	5,7	0,3	44,3	1,4	0,67
TMAO-260	20	52,1	5,4	0,3	42,2	1,2	0,61
TMAO-260	40	56,1	6,3	0,1	37,5	1,4	0,50
TMAO-260	60	53,3	6,2	0,2	40,3	1,4	0,57
TMAO-300	20	61,0	5,2	0,3	33,5	1,0	0,41

*: Farktan hesaplandı.

Tablo 9.2. Çam ağacı odunu ve torrefiye çam ağacı odununun kısa ve elementel analizi

Kısa analiz						
Örnek	İşlem süresi (dk)	% Nem	% Uçucu bileşen	%Kül	% Sabit karbon*	ρ (g/cm³)
ÇAO	-	5,1	80,8	1,1	13,0	1,204
TÇAO-230	20	-	78,3	1,6	20,1	0,773
TÇAO-260	10	-	78,8	2,1	19,1	0,752
TÇAO-260	20	-	77,1	2,1	20,8	0,863
TÇAO-260	40	-	76,3	2,7	21,0	0,769
TÇAO-260	60	-	78,9	3,1	18,0	0,752
TÇAO-300	20	-	58,3	3,9	37,8	0,648

Elementel Analiz

	İşlem süresi (dk)	% C	% H	%N	% O*	Atomik H/C oranı	Atomik O/C oranı
ÇAO	-	47,4	6,1	-	46,5	1,5	0,74
TÇAO-230	20	50,0	6,4	-	43,6	1,5	0,65
TÇAO-260	10	49,9	6,0	-	44,1	1,4	0,66
TÇAO-260	20	52,0	6,0	-	42,0	1,4	0,60
TÇAO-260	40	53,8	5,9	-	40,3	1,3	0,56
TÇAO-260	60	53,5	5,9	-	40,6	1,3	0,57
TÇAO-300	20	58,6	5,5	-	35,9	1,1	0,46

*: Farktan hesaplandı.

Tablolardan her iki ağaç türünün yüksek uçucu madde ve düşük sabit karbon oranına sahip olduğu görülmektedir. Torrefaksiyon işlemi ile elde edilen torrefiye ürünlerin uçucu madde içeriğinde belirgin olarak azalma görüldü. Biyokütlenin termal parçalanması başlıca hafif hidrokarbonlar, CO, CO₂, H₂, nem ve sıvı ürünü içeren uçucu organik bileşenlerin salınması ile sonuçlanmaktadır. Her iki ağaç türünün 20 dk'lık işlem süresinde uçucu madde miktarındaki azalmanın 230 ve 260 °C' de benzer olduğu

ancak 300 °C'de oldukça azaldığı görülmektedir. Bu durum uçucu madde salınımında işlem sıcaklığının etkili olduğunu göstermektedir.

İşlem süresinin uçucu madde üzerindeki etkisi 260 °C' de yürütülen deneylerden elde edilen sonuçlarda görülebilir. Çam ağacı odununun bu sıcaklıktaki uçucu madde miktarındaki azalma düşük olmasına karşın 60 dk' lık işlem süresinde beklenenin aksine artış gösterdiği belirlendi. Meşe ağacı odununun 260 °C' de işlem süresine bağlı olarak katı ürünlerdeki uçucu madde miktarındaki değişim çam ağacı odunun katı ürünlerdeki uçucu madde miktarındaki değişime benzer davranış göstermektedir. Ancak bu odun türünün 40 dk' lık işlem süresinde katı ürünlerdeki uçucu madde miktarındaki azalma dikkat çekicidir. Bu durum biyokütle türünün elde edilen katı ürünün bileşimi üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Meşe ağacı odununda da bu sıcaklıkta 60 dk' lık işlem süresinde elde edilen katı ürünün uçucu madde miktarında artış görüldü. Bu durum işlem süresinin uzamasına bağlı olarak biyokütlenin gözenekleri içinde ağır uçucuların hapsolmasından kaynaklanabilir.

Torrefaksiyon şiddeti ile hem çam hem de meşe ağacı odunundan elde edilen katının yoğunluğunun gözenekli yapısı nedeni ile azaldığı Tablo 9.1 ve Tablo 9.2'de görülmektedir. Torrefaksiyon işlemi sonunda uçucu madde miktarındaki artış meşe ağacı odununda daha yüksektir. Bu durum meşe ağacı odunun bu sıcaklık ve sürede (60 dk) gözenekli yapısının daha yüksek olduğu söylenebilir. Torrefaksiyon şiddeti ile hem çam hem de meşe ağacı odunun yoğunluğu gözenekli yapı oluşması nedeni ile azalmaktadır. TMAO-300 ile TÇAO-300 karşılaştırıldığında yoğunluğun torrefiye meşe ağacı odununda düşük olması gözenekli yapının daha fazla olduğunu göstermektedir.

Meşe ve çam ağacı odunlarından elde edilen katı ürünlerin karbon içeriğinin arttığı oksijen içeriğinin azaldığı ve hidrojen içeriğindeki değişimin daha az olduğu Tablo 9.1 ve Tablo 9.2'de görülmektedir. H/C ve O/C oranları genel olarak işlem sıcaklığı ve süre ile azalmaktadır. Tablodaki bu değerler literatür ile uyumludur. Bambu ve mısır samanı ile yürütülen çalışmada bambunun 250-275 °C'de torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün H/C ve O/C oranları sırasıyla 1,43 ve 0,65 olarak mısır samanının torrefaksiyonu ile bu oranların sırasıyla 1,42 ve 0,72 olarak belirlenmiştir (Wen, 2014).

İşlem görmemiş meşenin H/C ve O/C oranı ile (1,6 ve 0,8) ile 260 °C' de 20 dk' lık işlem süresinde elde edilen torrefiye katının oranları (1,2 ve 0,6) karşılaştırıldığında önemli bir şekilde düştüğü görülmektedir. Benzer durum çam ağacı odunun torrefaksiyonunda da görülmektedir. Bu durum torrefaksiyon sırasındaki

dekarboksilasyon reaksiyonları nedeni ile oksijenli karbonhidratlı yapıların parçalanmasından kaynaklanmaktadır. Meşe ağacı odunun torrefaksiyonunda katı ürünlerdeki karbon içeriğindeki artış çam ağacı odununa göre daha yüksektir. Bu durum torrefaksiyon süresince sert odunda karbonizasyon reaksiyonunun baskın olduğunu gösterebilir (Arshanitsa vd., 2016).

Biyokütlenin torrefaksiyon süresince nispeten karbondan daha fazla oksijen ve hidrojen kaybı ürünün kalorifik değerinde artışa neden olmaktadır.

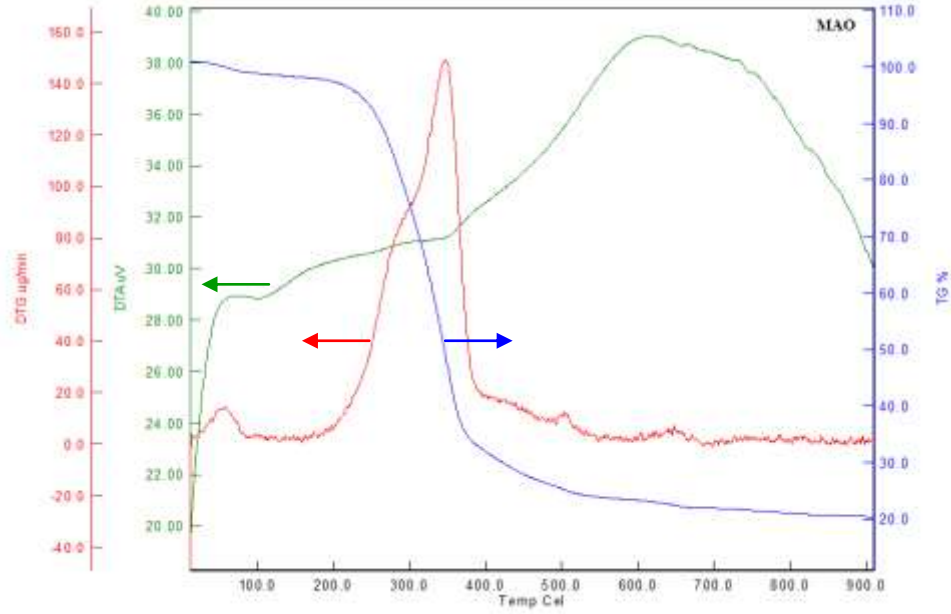
9.4.2. Katı Ürünün TGA Analizi

Biyokütlenin belli başlı üç bileşeni selüloz, hemiselüloz ve lignindir. Bu bileşenlerin 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.

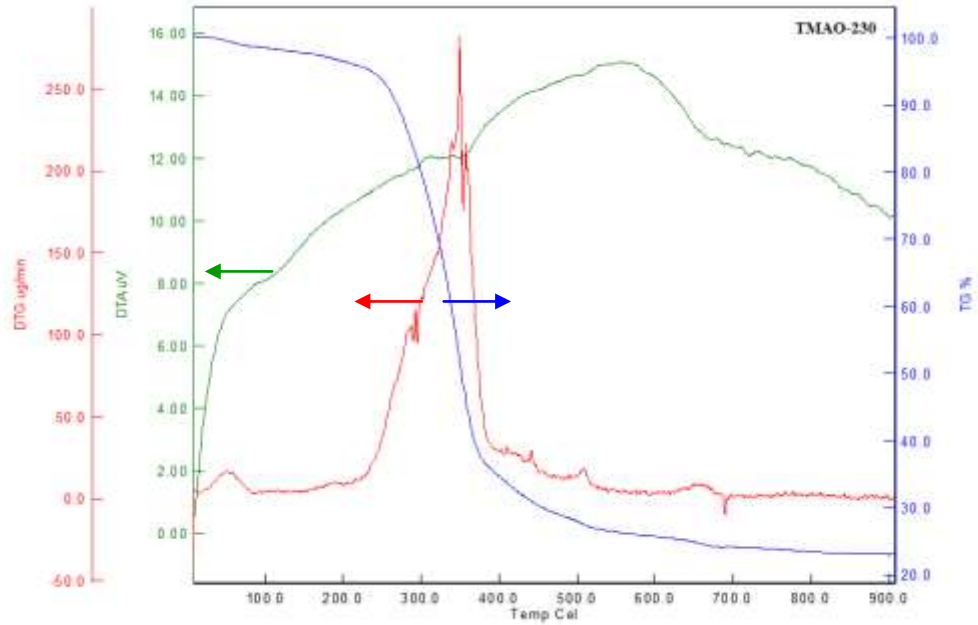
MAO ve ÇAO örneklerinin 230 °C, 260 °C ve 300 °C'de 20 dk'lık işlem süresi sonunda elde edilen katı ürünlerin TGA, DTG ve DTA analizleri Şekil 9.11-Şekil 9.18'de verilmiştir. DTG eğrilerinde 110 °C'den düşük sıcaklıkta görülen küçük pik nem ve uçucu bileşenleri göstermektedir. Eğrilerden ağırlık kaybının 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 parçalanmasını işaret etmektedir (Abedi vd., 2017).

Meşe ağacının torrefaksiyonundan elde edilen torrefiye katı ürünlerin DTG eğrileri işlem sıcaklığı arttıkça selüloz pikinin yoğunluğunun azaldığını hemiselüloza ait pikin kaybolduğunu göstermektedir. TMAO-300 katıya ait DTG eğrisi bu sıcaklıkta torrefiye üründe büyük oranda ligninin kaldığını yapıdan büyük oranda selülozun parçalandığını hemiselülozun tamamen parçalandığını gösterebilir. Bu odun türüne ait torrefiye ürünlerde 50-200 °C aralığında pikler mevcuttur. Bu durum torrefaksiyon sonrası elde edilen katı ürünün gözenekli yapısı nedeni ile ortamdaki nemin tutulmasından kaynaklanmaktadır. TMAO-300 üründe 50-200 °C'deki piklerin şiddetindeki torrefaksiyon şiddetinin yüksek olması nedeni ile torrefiye buharın gözeneklere haps

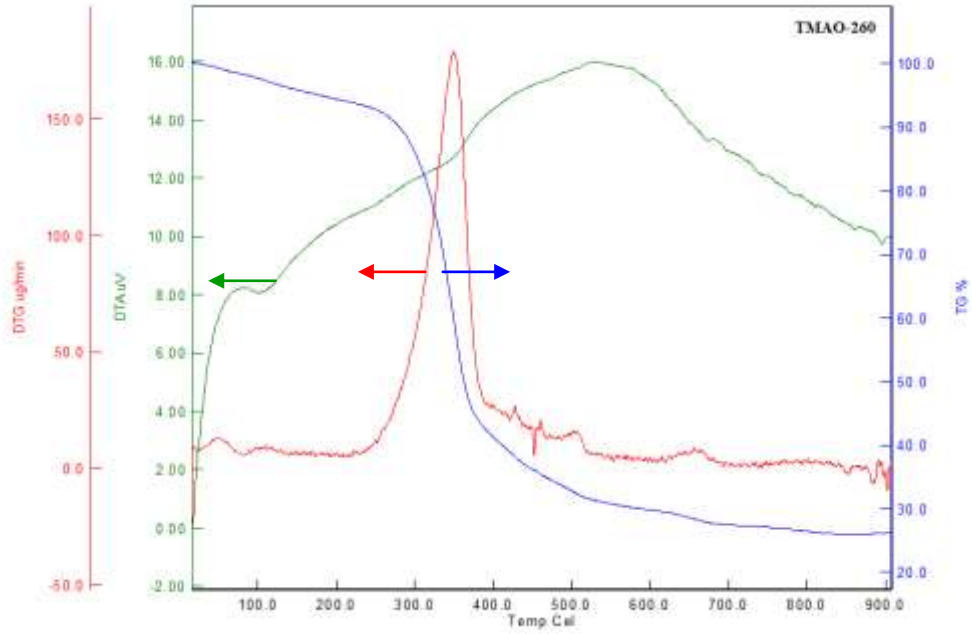
olmasından kaynaklanabilir. Bu durumu işlem süresinin 60 dk olduğu TMAO-260 katı üründe oksijen içeriğindeki artış ve karbon içeriğindeki azalma ile açıklanabilir.



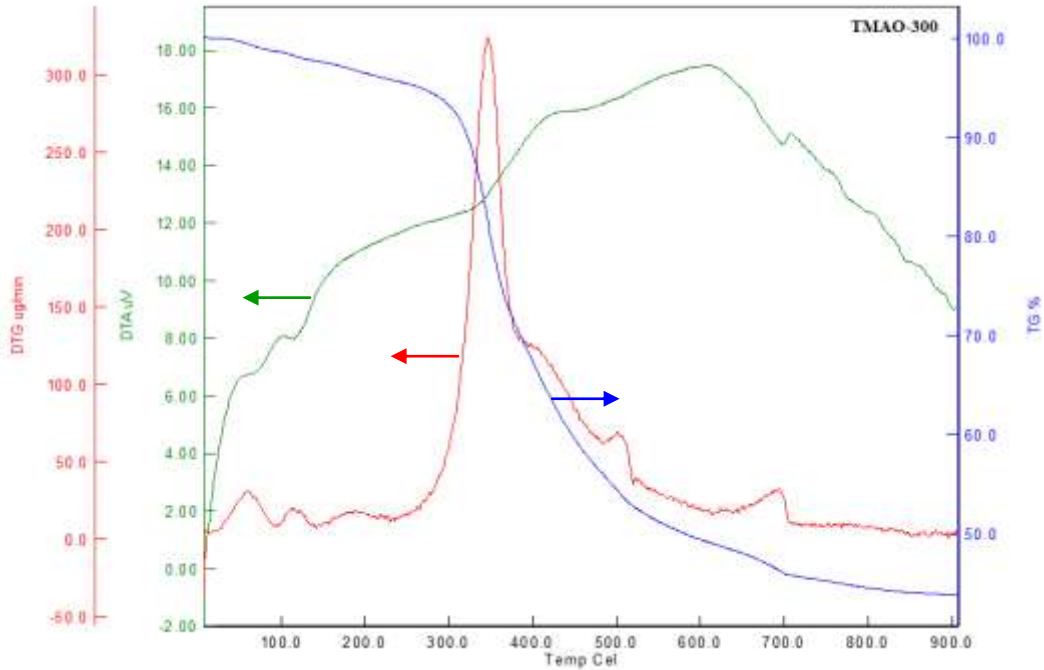
Şekil 9.11. Meşe ağacı odununun TGA, DTG ve DTA analizi



Şekil 9.12. Meşe ağacı odununun 230 °C'de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi



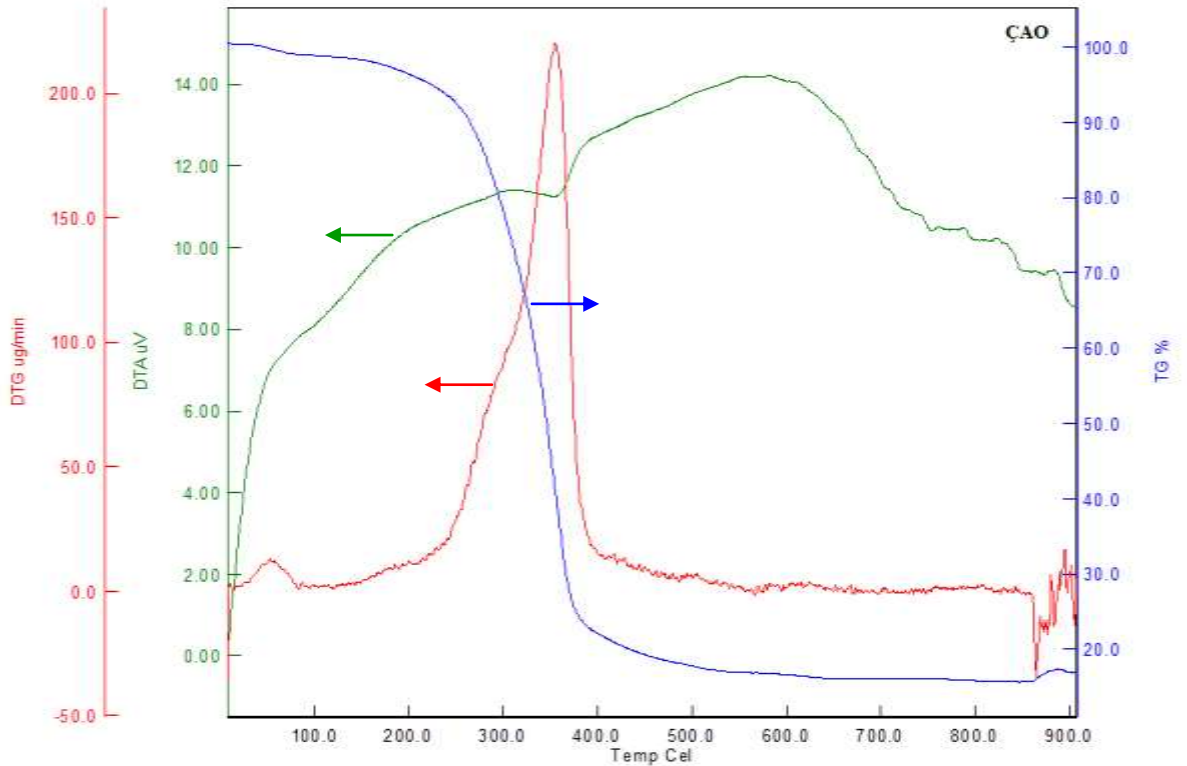
Şekil 9.13. Meşe ağacı odununun 260 °C'de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi



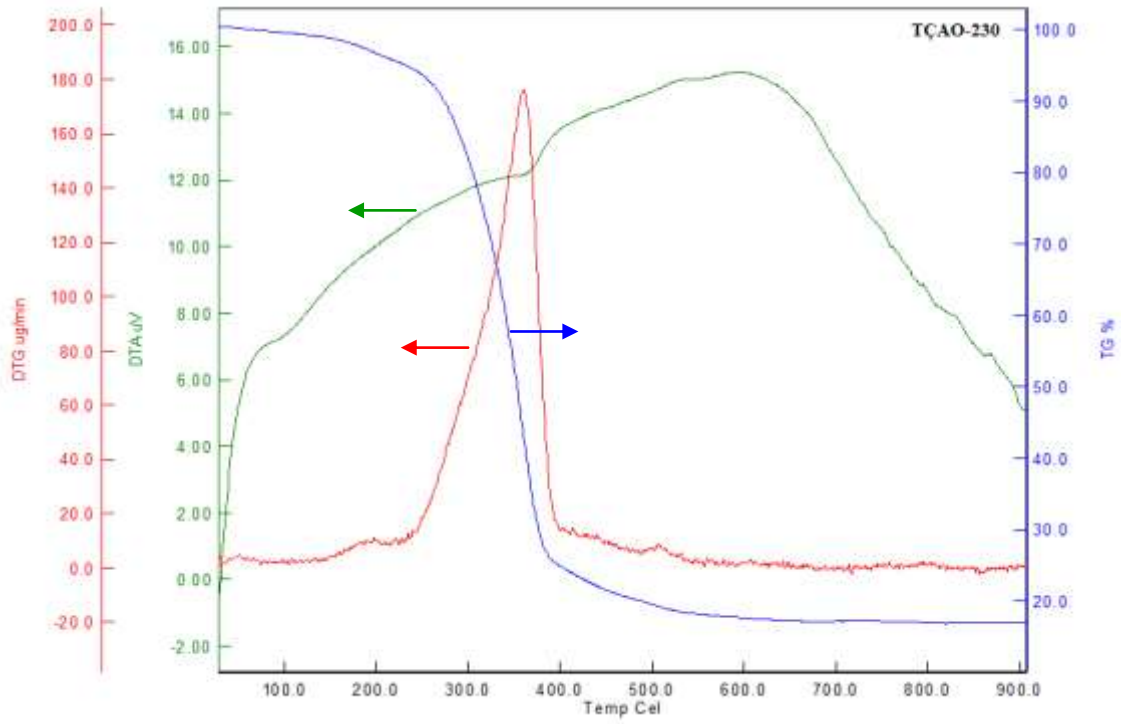
Şekil 9.14. Meşe ağacı odununun 300 °C'de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi

MAO ve ÇAO ile bunlara ait torrefiye ürünlerin DTG eğrilerinde bazı farklılıklar tespit edildi. Şekil 9.11 ve Şekil 9.15'de yumuşak odundaki (ÇAO) ağırlık kaybının sert oduna göre (MAO) daha fazla olduğu görüldü. Literatürde sert odundaki ağırlık kaybının yumuşak oduna göre daha yüksek olduğu vurgulanmaktadır (Anca-Couce ve

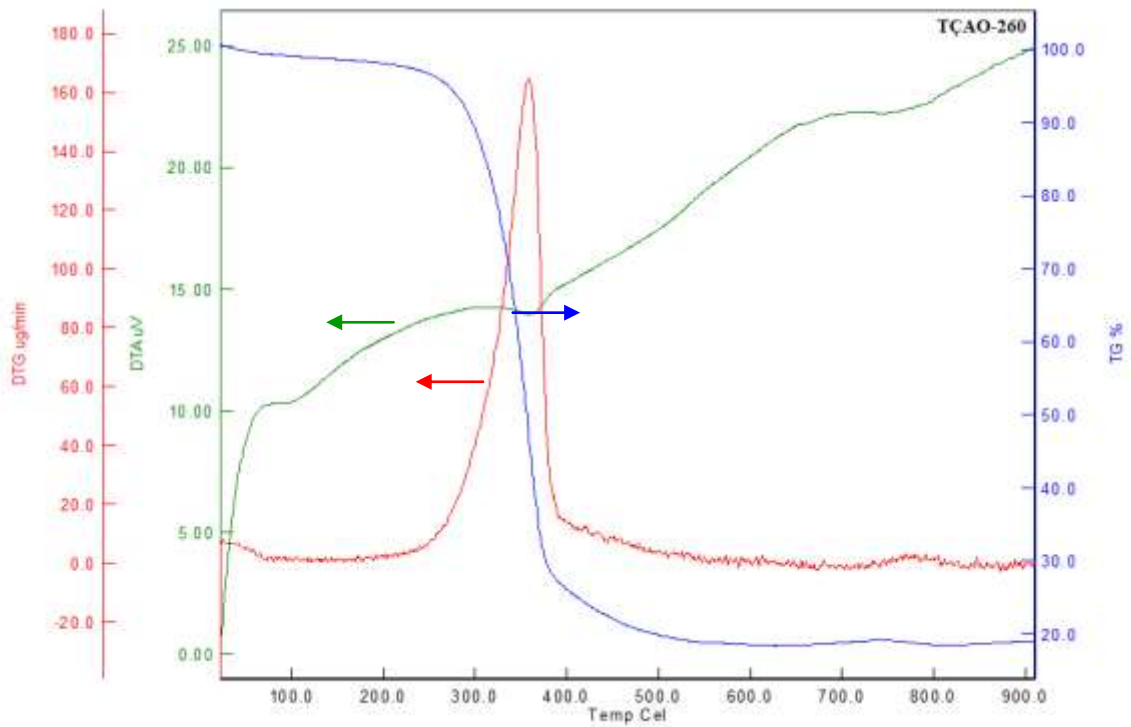
Obernberger, 2016). Bu durum ÇAO'nunda eksreaktif maddelerin daha yüksek olması nedeni ağırlık kaybının yüksek olduğunu gösterebilir. Meşe ağacı odununda hemiselüloz içeriğine ait pikin (300 °C'de) çam ağacı odununa ait DTG eğrisinde görülen pikten daha belirgin olduğu görüldü. Her iki ağaç türünde 300 °C'de torrefaksiyondan elde edilen TÇAO-300 ve TMAO-300 örneklerinde 300 °C'nin altında görülen DTG pikleri torrefaksiyon ürünün gözenekliliği nedeni ile torrefaksiyon süresince sıvı ürünün bir kısmının bu gözeneklerde hapsoldüğü ve deney sonrası ortamdaki nemin gözenekli yapı tarafından tutulduğunu gösterebilir. Her iki ağacın 300 °C'de elde edilen katı üründe 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda görülen pikler meşe ağacı odunundan elde edilen katıda daha belirgindir. Literatürde yumuşak odunda yüksek sıcaklıkta parçalanmış lig-C'nin yüksek olduğu ve düşük sıcaklıkta parçalanmış lig-H ve lig-O oranının düşük olduğu vurgulanmıştır (Anca-Couce ve Obernberger, 2016). Bu durum çam ağacının yumuşak odun olması nedeni ile torrefaksiyon sonucu geriye kalan üründe lig-C oranının yüksek olduğunu gösterebilir. .



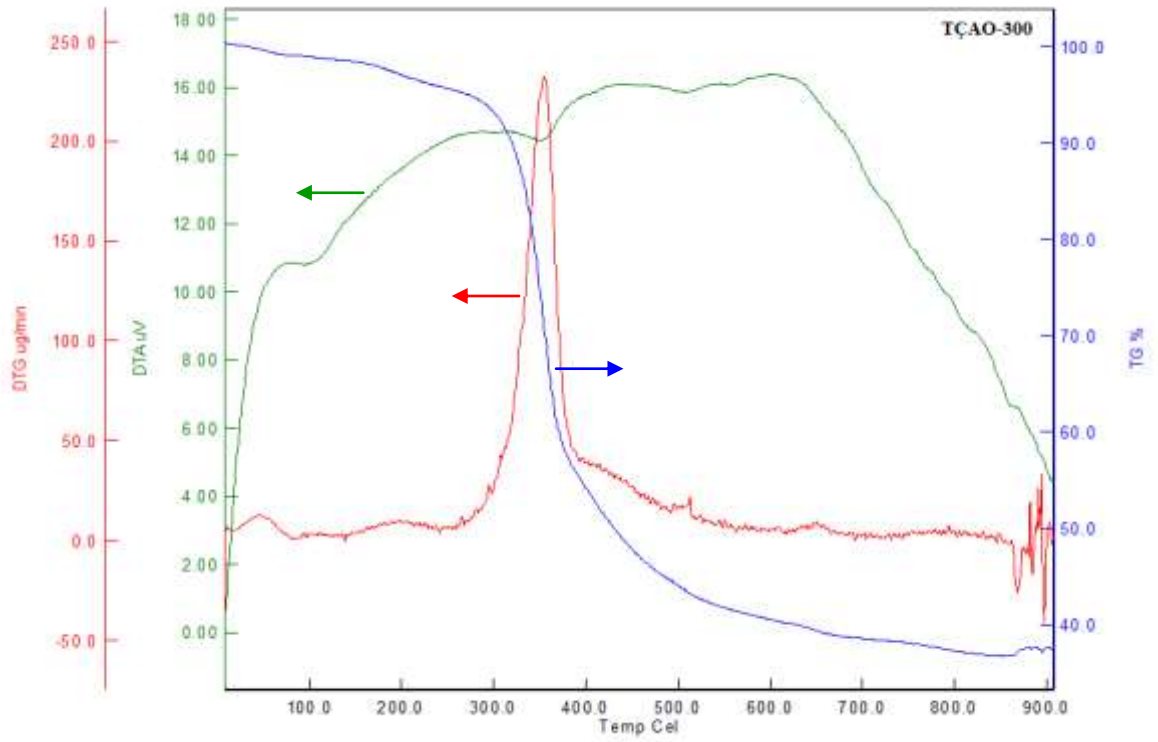
Şekil 9.15. Çam ağacı odununun TGA, DTG ve DTA analizi



Şekil 9.16. Çam ağacı odununun 230 °C'de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi



Şekil 9.17. Çam ağacı odununun 260 °C'de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi



Şekil 9.18. Çam ağacı odununun 300 °C'de 20 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi

SONUÇLAR

Yumuşak (çam ağacı) ve sert ağaç (meşe ağacı) odunlarının pelet halinde torrefaksiyonu ile kullanılabilir bir katı yakıta dönüştürülmesinin amaçlandığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- ✓ Her iki ağaç türünde artan torrefaksiyon sıcaklığıyla katı ürün veriminin azaldığı ve sıvı ürün veriminin arttığı tespit edildi.
- ✓ İşlem süresinin her iki odunda da düşük ve orta şiddette torrefaksiyonda etkili olduğu yüksek sıcaklıkta etkisinin belirgin olmadığı görüldü.
- ✓ Sıvı ürün verimi üzerinde işlem sıcaklığının ve işlem süresinin etkin olduğu belirlendi. Gaz ürün verimindeki değişimin belirgin olmadığı sonucuna varıldı.
- ✓ Biyokütle türünün ürün verimi üzerinde etkili olduğu sonucuna varıldı.
- ✓ Meşe ağacı odunundan elde edilen katı ürün verimlerinin çam ağacı odunundan elde edilen katı ürün verimlerinden düşük olduğu belirlendi.
- ✓ Artan işlem sıcaklığı ile torrefaksiyon biyokütlenin uçucu madde oranı azalırken kül ve sabit karbon oranının arttığı belirlendi.
- ✓ Torrefaksiyon süresinin katı ürünün bileşimi üzerinde düşük ve orta şiddetteki torrefaksiyonda etkili olduğu görüldü.
- ✓ Katı ürünün torrefaksiyon sıcaklığının oksijen içeriği ve karbon içeriğinde etkili olduğu hidrojen içeriğindeki değişimin belirgin olmadığı görüldü.
- ✓ Meşe ağacı odunundan elde edilen katı ürünün karbon içeriğinin çam ağacı odunundan daha yüksek olduğu belirlendi.
- ✓ Torrefaksiyon şiddetindeki artışın pelet yoğunluğunun azalmasına neden olduğu tespit edildi.
- ✓ Meşe ağacı ve çam ağacı odununun 300 °C'de 20 dk torrefaksiyon işlemi sonrası elde edilen katı üründe lignin oranının torrefaksiyon meşe ağacı odununda belirgin olarak görüldü.
- ✓ TGA ve DTG eğrileri torrefaksiyon işlemi sırasında gözenekli katı içerisine sıvı ürünün hapsediğini gösterdi.

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
- Adams, P., Shirley, J., Mc Manus, M.** (2015). Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of wood pellet production with torrefaction. *Applied Energy* ;**138**:367–380.
- Agbor, E. Zhang, X., Kumar, A.** (2014). A review of biomass co-firing in North America. *Renewable Sustainable Energy Rev*; **40**: 930–43.
- Ann D. Christy**, (2008). Bioenergy From Agricultural Wastes [Tarımsal Atıklardan Biyoenerji], Dept of Food, Agricultural, and Biological Engineering USAIN April 2008, The Ohio State University, **21**.
- Antal. M.J., Gronli, M.** (2003). The art, science and technology of charcoal prduction. *Industrial & Engineering Chemistry Research*; **42(8)**:1619-1640.
- Anca-Couce, A., Obernberger, I.** (2016). Application of a detailed biomass pyrolysis kinetic scheme to hardwood and softwood torrefaction. *Fuel*; **167**:158-167.
- Bach, Q. Chen, W.** (2016). Predictions of biochar yield and elemental composition during torrefaction of forest residueues, *Bioresource technology* ;**215**: 239-246.
- Baxter, L.L., Miles, T. R., Miles, T. R., Jr., Jenkins, B. M.,Milne, M., Dayton, D., Bryers, R.W., Oden, L.L.** (1998) The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences. *Fuel Process. Technol*; **54**: 47–78.
- Bergman, P.C.A., Boersma A.R., Zwart, R.W.H., Kiel J.H.A.** (2005) Torrefaction for biomass co firing in existing coal-fired power stations. *Report ECN-C--05-013*, ECN, Petten.
- Bergman, P.C.; Kiel, J.H.** (2005) In Proc. 14th European Biomass Conference, Paris, France 17–21.

- Bergman, P.C.A.** (2005). Combined torrefaction and pelletization. The TOP process.
- Bourgeois, J. P.; Doat, J.** (1984). Torrefied Wood from Temperate and Tropical Species. *Bioenergy*; **3**:153-159.
- Brewer, C. E. Schmidt- Rohr, K. Satrio, J. A. , Brown, R.C.** (2009). Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environmental Progress & Sustainable Energy* , **28(3)**:386-396.
- Batı Akdeniz Kalkınma Ajansı**, “Biyokütle sektör raporu” , Antalya, Eylül, 2012.
- Chen, W.H. and Kuo, P.C.A.** (2010). Study on Torrefaction of Various BiomassMaterials and its Impact on Lignocellulosic Structure Simulated by a Thermogravimetry. *Energy*; **35**:2580-2586.
- Chen, W.H. and Kuo, P.C.A.** (2011).Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy*; **36**:803–11.
- Chen, W.H.; Cheng W.Y.; Lu K.M.; Huang Y.P.** (2011). An evaluation on improvement of pulverized biomass property for solid fuel through torrefaction. *Appl Energy*; **88**:3636–44.
- Chen, W.H.; Peng, J.; Bi, X.T.** (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ; **44**:847–866.
- Chen, W.H; Ye, S.C; Sheng, H.K.** (2012). Hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse via wet torrefaction in association with microwave heating. *Bioresource Technology* ;**118**: 195–203.
- Cristy. ; Gülay. ; Anonim**, “Biyokütle Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları” Erişim Tarihi:26.11.2012,<http://enerjiuretimsistemleri.blogspot.com/2011/10/biyokut-le-enerjisinin-avantaj-ve.html>; Coelho, s.7; Daugherty, s.7.

- Cubero-Abraca, R. , Moya, R. , Valaret , J., Filho, M.T.** (2014). Use of Coffee (Coffea Arabica) Pulp for the Production of Briquettes and Pellets for Heat Generation. *Ciênc. Agrotec. Lavras*; **38(5)**: 461-470.
- Demirbas, A.** (1996). Yields of oil products from thermochemical biomass conversion processes. *Energ. Convers. Manage.*, **39**:685-690.
- Demirtaş, A.** (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals, *Energy Conversion and Management*, 1357-1378
- Deng J., Wang G.J., Kuang J.H., Zhang Y.L., Luo Y.H.** (2009). Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction. *J Anal Appl Pyrol.*; **86(2)**:331–337.
- Dudyn'ski, M., Van Dyk, J.C., Kwiatkowski, K., Sosnowska, M.** (2015) Biomass gasification: influence of torrefaction on syngas production and tar formation. *Fuel Processing Technology* ;**131**:203–212
- Eseyin, A.E., Steele, P.H., Jr, C.U.P.** (2015). Current Trends in the Production and Applications of Torrefied Wood/Biomass - A Review. *BioResources*, **10**: 8812-8858.
- Encinar, J.M. Beltrán, F.J. Ramiro, A., González, J.F.** (1998). Pyrolysis/Gasification of Agricultural Residues by Carbon Dioxide in the Presence of Different Additives: Influence of Variables. *Fuel Processing Technology*; **55(3)**:219-233.
- Felfri, F.F., Luengo, C.A., Suarez, J.A., Beaton, P.A.** (2005). Wood briquette torrefaction. *Energy Sustain Dev*, **9**:19–22.
- Ghiasi, B., Kumar, L., Furubayashi, T., Lim, C. J., Bi, X., Kim, C. S., Sokhansanj, S.** (2014). Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torrefaction before or after densification. *Appl. Energy* , **134**: 133– 142.
- Gong, C. Huang, J., Feng, C., Wang, G. Tabil, L., Wang, D.** (2016). Effects and mechanism of ball milling on torrefaction of pine sawdust. *Bioresource Technology*, **214**:242-247.
- 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 biomass. *Energy*, **36**:3012-3021.

- IEA Bioenergy Task 32 report** (2012). Status overview of torrefaction technologies, December
- Kaliyan, N., Morey, R. V.** (2010). Natural Binders and Solid Bridge Type Binding Mechanisms in Briquettes and Pellets Made from Corn Stover and Switchgrass. *Bioresource Technology*; **101**:1082-1090.
- Karaca, C.,** (2009). Çukurova Bölgesinde Tarıma Dayalı Sanayi Atıklarının Enerjiye Dönüşüm Olanaklarının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, **117s**, Adana.
- Kaygusuz, K., Kaygusuz, A.** (2002). Renewable energy and sustainable development in Turkey, *Renew Energ*; **25**:431–453.
- Keles, S., Bilgen, S., Kaygusuz, K.** (2017). Biomass energy source in developing countries. *J. Eng. Appl. Sci.*, **6**,566-576.
- Knudsen, J.N., Jensen, P.A., Dam-Johansen, K.** (2004). Transformation and release to the gas phase of Cl, K, and S during combustion of annual biomass. *Energy Fuels*, **18**:1385–1399.
- Koç, E., Şenol, M.C.** (2013). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu – Genel Değerlendirme . *Mühendis ve Makine*, **54(639)**:32-44.
- Koukios, E. G.,** (1993). Progress in thermochemical, solid-state refining of biofuels- From research to commercialization. In: Advances in Thermochemical Biomass Conversion, Proceedings of the International Conference, 11-15 May 1992. Interlaken, Switzerland. Edited by AV Bridgwater, Blackie Academic & Professional, London, **2**: 1678-1693.
- Kumar, L., Koukoulas, A.A., Mani, S.** (2017). Satyavolu J. Integrating Torrefaction in the Wood Pellet Industry: A Critical Review. *Energy & Fuels* ;**31**:37–54.
- Miranda, M.T., Arranz, J.I., Román, S., Rojas, S., Montero, I., López, M., Cruz, J.A.** (2011). *Characterization Of Grape Pomace And Pyrenean Oak Pellets. Fuel Processing Technology*, **92**: 278-283.

- Ladanai, S., Vinterbäck, J.** (2009). Global Potential of Sustainable Biomass for Energy, [Enerji İçin Sürdürülebilir Biyokütlenin Global Potansiyeli], Swedish University of Agricultural Sciences Department of Energy and Technology.
- Li,H., Liu, X., Legros, R., Bi, X.T., Lim, C.J., Sokhansanj, S.** (2012). Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets. *Applied Energy*,**93**:680–685.
- Lima, I. M., Boateng, A. A., Klasson, K. T.** (2010). Physicochemical and adsorptive properties of fast- pyrolysis bio- chars and their steam activated counterparts. *Journal of chemical technology and biotechnology*, **85(11)**: 1515- 1521.
- Liu, Z., Jiang, Z., Cai, Z., Fei, B., Yu, Y., Liu, X.** (2013). Effects of Carbonization Conditions On Properties Of Bamboo Pellets. *Renewable Energy*, **51**: 1-6.
- Prins, M.J., Ptasinski, K.J., Janssen, F.J.J.G.** (2006). Torrefaction of wood (Part 2. Analysis of products. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **77**, 35–40.
- 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.
- Mudge, L.K.** (1985). “Fundamentals of Biomass Thermochemical Conversion, *Elsevier*, London”, 183-217.
- Nhuchhen, D.R., Basu, P., Acharya, B.,** (2014) " A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. *Int J Renew Energy Biofuels*: **2014**:1-56.
- Nurminen, F.** (2012). “Batchelor thesis in Environmental impacts of torrefied wood pellet production. Miktech Oy, Mikkeli.
- Öztürk, H.H.,** (2012). Enerji Bitkileri ve Biyoyakıt Üretimi, Hasad Yayıncılık Ltd. Şti. İstanbul.
- Park, S.W.; Jang, C.H.; Baek, K.R.; Yang, J.K.** (2012). “Torrefaction and low-temperature carbonization of woody biomass: evaluation of fuel characteristics of the products. *Energy*” , **45**, 676– 85.

- Peng, J.H.**, (2012a). A study of soft wood torrefaction and densification for the production of high quality wood pellets. *Doktora Tezi*, Univ. Br. Columbia
- Peng, J. H., Bi, H. T., Sokhansanj, S., Lim, J. C. A** (2012). Study of Particle Size Effect on Biomass Torrefaction and Densification. *Energy and Fuels*; **26**: 3826-3839.
- Peng, J.H., Bi, X.T., Sokhansanj, S., Lim, C.J.** (2013). Torrefaction and densification of different species of soft wood residuees. *Fuel*; **111**:411-421.
- Prins, M. J., Ptasninski, K. J., Janssen, F. J. J. G.** (2006a). More Efficient Biomass Gasification via Torrefaction. *Energy*; **31 (15)**; 3458-347.
- Prins, M. J., Ptasinski, K. J., Janssen, F. J. J. G.** (2006b). Torrefaction of Wood Part 1. Weight Loss Kinetics. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*; **77**:28-34.
- Pushkin, S.A., Kozlova, L.V., Makarov, A.A. Grachev, A.N., Tatyana, A., Gorshkova, T.A.** (2015). Cell wall components in torrefied softwood and hardwood samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. **116**:102-113.
- Prochnow, A., Heiermann, M., Plöchl, M., Amon, T., Hobbs P.J.** (2009). Bioenergy from Permanent Grassland – A Review: 2. Combustion. *Bioresource Technology*, **100**: 4945-4954.
- Reed, T., Bryant, B.**, (1978). Densified biomass: a new form of solid fuel. Solar energy research institute. *United States: Colorado*.
- Ren, X., Sun, R., Meng, X., Vorobiev, N., Schiemann, M., Levendis, Y.A.** (2017). Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass. *Fuel* ;**188**:310-323.
- Rousset, P., Aguiar, C., Labbe, N., Commandre, J.M.** (2011). Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. *Bioresour Technol.*;**102**: 8225–31.

- Roknia, E., Ren, X., Panahi, A., Levendis, Y.A.** (2018). Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. *Fuel*; **21**: 363–374.
- Rosillo - Calle, F.**, Bioenergy for A Sustainable Environment [Sürdürülebilir Bir Çevre İçin Biyoenerji], *IEA Energy Outlook 2000-2030*, IEA, Paris 2007.
- Sami, M., Annamalai, K., Wooldridge, M.** (2001). Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Progress in Energy and Combustion Science*; **27**: 171–214.
- Saraçoğlu, N.** (2008). Biyokütleden Enerji Üretiminde Enerji Ormancılığının Önemi VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, *UTES*, 265-278.
- Sarvaramini, A., Gravel, O., Larachi, F.** (2013). Torrefaction of ionic-liquid impregnated lignocellulosic biomass and its comparison to dry torrefaction, *Fuel* ;**103**.814–826.
- Severoğlu, A.**, (2010). Katı Biyoyakıt Üretimi Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Saleh, S., Hansen, B., Jensen, P., Johansen, K.** (2015). Efficient Fuel Pretreatment: Simultaneous Torrefaction and Grinding of Biomass; *Energy Fuels* ;**27**: 7531-7540.
- Saleh, S.B.**, (2013). Torrefaction of biomass for power production, *Doktora Tezi*, Technical University of Denmark
- Schmidhuber**, (2011). Batı Akdeniz Kalkınma Ajansı (BAKA), “Biyokütle Sektör Raporu”, Eylül 2012, s.8., IEA, “Technology Roadmap Biofuels for Transport”, **18**, Anonim, “Biomass Sustainability Analysis”
- Shafizadeh, F.** (1985). “Pyrolytic Reactions and Products of Biomass, in: R.P. Overend, T.A. Milne”
- Sierra R., Smith A., Granda C., Holtzapple M.T.** Producing fuels and chemicals from lignocellulosic biomass. Chemical Engineering Process, Society of Biological Engineering Special Section: Biofuels; **104**, 10-18.
- Strehler, A.; Stuetzle, W.; Hall, D.O.** (1987). Biomass residuees. N.Y. Willey,;75-97.

- Tolay, M., Yamankaradeniz, H., Daradimos, G., Hirschfelder, H., Vostan, P.** (2008), Temiz Enerji Üretimi İçin Gazlaştırma Teknolojisi, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu. İstanbul.
- Thamer, D.** (2013). New challenges in torrefaction of biomass ,ACB **Torrefaction**.
- Tumuluru, J.S., Sokhansanj, S., Hess, R.J., Wright, C.T., Boardman, R.D.** (2011). Review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology* ; **7(5)** :384-404.
- Uris, M., Linares, J.I., Arenas, E.**(2014). Techno-economic feasibility assessment of a biomass cogeneration plant based on an Organic Rankine Cycle. *Renewable Energy* ;**66**:707–713.
- Uslu, A.** (2005). A. Pre-Treatment Technologies and Their Effects on The International Bioenergy Supply Chain Logistic .
- Uskan , B.** (2009). Odun Talaşının Hidrotermal Dönüşümünden Elde Edilen Kimyasalların Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, A.Ü.,Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Van der Stelt, M., Gerhauser, H., Kiel, J., Ptasinski, K.** (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review. *Biomass and Bioenergy* ;**35**:3748–3762.
- Viak, A.,** (2000). Co-ordinator of Thermie B Project “Industrial Network on Wood pellets”, **3- 74**.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H., Zheng, C.,** (2007) Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*; **86(8)** :1781.
- Yaman, S.** (2004). Prolysis of Biomass to Produce Fuels and Chemical Feedstocks, *Energy Conversion and Management* ;**45**: 651–671.
- Yoshida, T., Nomura, T., Gensai, H., Watada, H., Sano, T., Ohara, S.** (2015). Upgraded Pellet Making by Torrefaction of Japanese Wood Pellets. *J. Sustainable Bioenergy Systems*; **5**:82.

Zulfiqar, M., Moghtaderi, B., Wall, T.F. (2006). Flow properties of biomass and coal blends. *Fuel Process. Technol.*; **87**:281–288.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Elvan ÇATAK

Doğum Yeri : MALATYA

Eğitim Durumu

Lise : 2005-Korgeneral Hulusi Sayın Lisesi

Lisans : 2013-Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya
Mühendisliği

Yüksek Lisans : 2019-Fırat Üniversitesi Kimyasal Teknolojiler Anabilim Dalı