



**AMİNO REÇİNELERİ İÇEREN ODUN ESASLI
KOMPOZİT ATIKLARIN MİKRODALGA
DESTEKLİ KATALİTİK PİROLİZİ**

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ**

Narin Tuğçe GEDİK

**Tez Danışmanı
Prof. Dr.Hamiyet ŞAHİN KOL**

**AMİNO REÇİNELERİ İÇEREN ODUN ESASLI KOMPOZİT
ATIKLARININ MİKRODALGA DESTEKLİ KATALİTİK PİROLİZİ**

Narin Tuğçe GEDİK

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ağustos 2023**

Narin Tuğçe GEDİK tarafından hazırlanan “AMİNO REÇİNELERİ İÇEREN ODUN ESASLI KOMPOZİT ATIKLARININ MİKRODALGA DESTEKLİ KATALİTİK PİROLİZİ” başlıklı bu tezin Programı Seçin olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL
Tez Danışmanı, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği/Oy Çokluğu Seçiniz ile Anabilim Dalınız Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 24/08/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Mehmet Kuddusi AKALIN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Kaan IŞIKARALAR (KÜ) ONLINE

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Narin Tuğçe GEDİK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AMİNO REÇİNELERİ İÇEREN ODUN ESASLI KOMPOZİT ATIKLARININ MİKRODALGA DESTEKLİ KATALİTİK PİROLİZİ

Narin Tuğçe GEDİK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof.Dr.Hamiyet ŞAHİN KOL

Ağustos 2023, 63 sayfa

Bu çalışmada ,büyük bir küresel üretime sahip tipik endüstriyel biyoatık olarak kabul edilen yonga levha atıklarının (YLA) mikrodalga pirolizi gerçekleştirilmiştir. Bu atıkların küresel büyümesi ile bağlantılı olarak potansiyel toksisiteleri ve bertaraf edilmeleri esnasında oluşan problemler ve ayrıca düşük değerli uygulamaları daha etkin yöntemlerle değerlendirilmelerini zorunlu kılmıştır. Çalışmada , YLA 'nin mikrodalga destekli pirolizi (MDP), absorbent olarak silisyum karbür (SiC) ve katalizör olarak magnezyum klorür ($MgCl_2$) kullanılarak nitrojen gazı akışı altında 1800 W mikrodalga gücünde 30 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. $MgCl_2$ deneylerde hem absorbent hem de katalizör olarak kullanılmıştır. Atık-absorbent oranı ve SiC- $MgCl_2$ oranının biyo-yağların verimi ve bileşimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, farklı absorbent oranları ve türleri, biyoyağ ve biyoçar verimlerini önemli ölçüde etkilemiştir. Tek başına absorbent kullanımda $MgCl_2$ kullanılan deneyde, biyoyağ verimi SiC kullanan deneyden daha yüksek bulunmuştur.

Tüm deneyler göz önüne alındığında maksimum biyoyağ verimi (%27,55) %40 absorbent karışımı yüklemesinde ve 4:4 oranında SiC:MgCl₂ kullanılmasıyla elde edilmiştir. SiC'nin MgCl₂'ye oranı, biyo-yağların bileşimi ve daha yüksek ısıtma değeri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Biyoyağların elementel içerikleri ve üst ısı değerlerine göre MgCl₂' nin uygun oranlarda kullanılması biyoyağ kalitesini arttırmıştır. Bu sonuçlar, biyoyağ üretiminde uygun absorbent seçiminin ve oranının önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Sözcükler : Yonga Levha , Odun Esaslı Kompozitler , Piroliz , Mikrodalga , Biyoyağ

Bilim Kodu : 90322

ABSTRACT

Master Thesis

MICROWAVE ASSISTED CATALYTIC PYROLYSIS OF WOOD COMPOSITE WASTES CONTAINING AMINO RESINS

Narin Tuğçe GEDİK

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Environmental Engineer**

Thesis Advisor:

Prof.Dr.Hamiyet ŞAHİN KOL

August 2023, 63 pages

In this study, microwave pyrolysis of chipboard waste, which is considered a typical industrial biowaste with a significant global production, was conducted. The potential toxicities of these wastes, associated with their global growth, as well as the problems arising during their disposal, have necessitated their evaluation through more efficient methods rather than low-value applications. In the study, microwave-assisted pyrolysis (MAP) of chipboard waste was performed under a nitrogen gas flow for 30 minutes at 1800 W microwave power, using silicon carbide (SiC) as an absorbent and magnesium chloride (MgCl₂) as a catalyst. MgCl₂ was used as both an absorbent and a catalyst in the experiments. The effects of waste-absorbent ratio and SiC-MgCl₂ ratio on the yield and composition of bio-oils were investigated. According to the experimental results, different absorbent ratios and types significantly affected the yields of bio-oil and biochar. In the experiment using MgCl₂ alone as an absorbent, the bio-oil yield was found to be higher than the experiment using SiC. Considering all experiments, the

maximum bio-oil yield (27.55%) was obtained with a 40% absorbent loading and a SiC:MgCl₂ ratio of 4:4. The ratio of SiC to MgCl₂ had a significant impact on the composition of bio-oils and their higher heating value. The appropriate use of MgCl₂ in certain ratios improved the quality of bio-oils based on their elemental content and higher heating values. These results emphasize the importance of selecting the appropriate absorbent and ratio in bio-oil production.

Key Word: Particleboard , Wood Based Composites , Pyrolysis , Microwave , Biooil
Science Code : 90322

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Hamiyet ŞAHİN KOL'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım. Deneylerin yapılması esnasında ve tezin yazımı sırasında yönlendirme ve bilgilendirmelerinden yararlandığım sayın hocalarım Prof. Dr. Mehmet Kuddusi AKALIN' a ve Doç. Dr. Kaan IŞIKARALAR' a teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme ve eőime maddi manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu alıőmayı KBÜBAP-21-YL-027 proje Numarası ile destekleyen Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimine teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. BİYOKÜTLE	5
2.2. BİYOKÜTLENİN TERMOKİMYASAL DÖNÜŞÜMÜ	5
2.2.1. YAKMA	5
2.2.2. HİDROTERMAL PROSES	6
2.2.3. GAZLAŞTIRMA.....	7
2.2.4. PİROLİZ	8
2.5. BİYOKÜTLENİN MİKRODALGA DESTEKLİ PİROLİZİ	10
2.5.1. MİKRODALGA ISITMA PRENSİBİ	10
2.5.2. MİKRODALGA DESTEKLİ PİROLİZİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER	12
2.6. BİYOKÜTLE KAYNAĞI: ODUN ESASLI KOMPOZİTLER	14
2.6.1. BİYOKÜTLE OLARAK ODUN	16
2.6.2. ODUNUN TERMAL DÖNÜŞÜMÜ ÜZERİNE AMİNO REÇİNELERİNİN ETKİSİ	17
BÖLÜM 3	19
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	19

3.1. ODUN ESASLI KOMPOZİTLERİN PİROLİZİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR	19
BÖLÜM 4	31
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
4.1. DENEYLERDE KULLANILAN HAMMADDE.....	31
4.2. DENEYLERDE KULLANILAN MİKRODALGA ABSORBENT VE KATALİZÖR	31
4.3.DENEY SİSTEMİ VE HAMMADDE PİROLİZİ	32
4.4. PİROLİZ ÜRÜNLERİNE YAPILAN ANALİZLER	35
4.1.1. BİYOYAĞLARIN ELEMENTEL ANALİZLERİ	35
4.1.2. BİYOYAĞLARIN GAZ KROMATOĞRAFİSİ KÜTLE SPEKTROMETRESİ (GC-MS) ANALİZLERİ	35
BÖLÜM 5	36
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	36
5.1. PİROLİZ ÜRÜNLERİNİN VERİMLERİ.....	36
5.2. BİYOYAĞLARIN ELEMENTEL İÇERİKLERİ VE ÜST ISIL DEĞERLERİ	40
TARTIŞMA	48
KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1 . Deney düzeneği ve deneyin yapılışı	35
Şekil 2. 1800 W gücünde 30 dakikalık sürede ağırlıkça %50 oranında absorbent kullanılarak yonga levha atıklarının mikrodalga destekli pirolizinden elde edilen ürün verimleri.....	37
Şekil 3. 1800 W gücünde 30 dakikalık sürede ağırlıkça %40 oranında absorbent kullanılarak yonga levha atıklarının mikrodalga destekli pirolizinden elde edilen ürün verimleri	38
Şekil 4. 1800 W gücünde 30 dakikalık sürede ağırlıkça %30 oranında absorbent kullanılarak yonga levha atıklarının mikrodalga destekli pirolizinden elde edilen ürün verimleri.....	39
Şekil 5. %50 absorbent oranındaki deneylerden elde edilen biyoyağların elementel içerikleri ve üst ısıl değerleri.....	40
Şekil 6. %40 absorbent oranındaki deneylerden elde edilen biyoyağların elementel içerikleri ve üst ısıl değerleri.....	41
Şekil 7. %30 absorbent oranındaki deneylerden elde edilen biyoyağların elementel içerikleri ve üst ısıl değerleri.....	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1. Deney deseni	34
Tablo 2. %50 oranında absorbent ve absorbent karışımları kullanılarak mikrodalga destekli piroliz sonrasında elde edilen biyoyağların içeriğindeki tespit edilebilen bileşikler.....	42
Tablo 3.%40 oranında absorbent ve absorbent karışımları kullanılarak mikrodalga destekli piroliz sonrasında elde edilen biyoyağların içeriğindeki tespit edilebilen bileşikler	44
Tablo 4. %30 oranında absorbent ve absorbent karışımları kullanılarak mikrodalga destekli piroliz sonrasında elde edilen biyoyağların içeriğindeki tespit edilebilen bileşikler	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

SiC	: Silisyum Karbür
MgCl ₂	: Magnezyum Klorür
CaO	: Kalsiyum Oksit
Na ₂ CO ₃	: Sodyum Karbonat
K ₂ CO ₃	: Potasyum Karbonat
KHCO ₃	: Potasyum Bikarbonat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
KOH	: Potasyum Hidroksit
HNCO	: İzosiyanik Asit
NH ₃	: Amonyak
CH ₄	: Metan
CO ₂	: Karbondioksit
CO	: Karbonmonoksit
NO ₂	: Nitrojendioksit
H ₂	: Hidrojen
O ₂	: Oksijen
N ₂	: Azot
AC	: Aktif Karbon
BTX	: Benzen , toluen , ksilen
Ca	: Kalsiyum
K	: Potasyum
Mg	: Magnezyum
P	: Fosfor

KISALTMALAR

OEK	: Odun Esaslı Kompozit
MDP	: Mikrodalga Destekli Piroliz
GPS	: Geleneksel Piroliz Sistemi
MDA	: Mikrodalga Absorbent
OBP	: Odun Bazlı Paneller
AOBP	: Atık Odun Bazlı Paneller
ÜF	: Üre-formaldehit
FF	: Fenol-formaldehit
MF	: Melamin-formaldehit
YL	: Yonga Levha
YLA	: Yonga Levha Atıkları
MDF	: Orta Yoğunluklu Lif Levha
OSB	: Yönlendirilmiş Lif Levha
TGA	: Termogravimetrik Analiz
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
XPS	: X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
DMHF	: 2,5-dimetil-4-hidroksi-3(2H)-furanon
MAH	: Monoaromatik Hidrokarbonlar
GC-MS	: Gaz Kromatografisi Kütle Spektrometresi
SEM-EDS	: Taramalı Elektron Mikroskobu / Elektron Dağılım Spektroskopisi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Modern toplumda enerji gereksinimleri esas olarak fosil kaynaklarla sağlanmaktadır. Ancak azalan fosil kaynakları ve bunların sürekli kullanımının çevremiz üzerindeki olumsuz etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarını keşfetmeyi ve etkin kullanmayı zorunlu hale getirmiştir (Özdenkçi vd, 2017) Ayrıca kimyasal yapı taşlarının (platform kimyasalları) üretimi için yenilenebilir biyokütle arama motivasyonu da, fosil yakıt tabanlı bir ekonomiden yenilenebilir kaynaklı ekonomiye geçişle birlikte hızlanmıştır (Tuck vd, 2012).

Biyokütle, en umut verici yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir ve küresel birincil enerjinin yaklaşık %14'ünü oluşturur (Mamaeva vd, 2016). Hızlı kentleşmeyle paralel olarak kullanımı hızla artan, odun esaslı kompozit (OEK) atıkları, yenilenebilir yakıtların ve kimyasal hammaddelerin üretimi için hammadde sağlama konusunda biyokütle kaynağı olarak büyük potansiyel göstermektedir. Bu nedenle atık OEK'lerin verimli kullanımı büyük önem taşımaktadır (Zhang vd, 2019).

Biyokütle termo-kimyasal ve biyokimyasal / biyolojik işlemlerle faydalı enerji formlarına dönüştürülebilir (Zhang vd, 2010). Dönüştürme işlemi seçiminde, biyokütle tipi ve miktarı, enerjinin istenen formu, çevresel standartlar ve ekonomik koşullar temel kriterlerdir (McKendry vd, 2002). Termokimyasal dönüşüm proseslerinden şimdiye kadar en çok çalışılan ve tartışılan teknik pirolizdir. Piroliz, oksijensiz ortamda biyokütlenin termal bozunmasıyla katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüşümüdür (Basu vd, 2010). Bu dönüşüm süreçleri biyokütleyi oluşturan bileşenlerin termokimyasal stabilitesine bağlıdır. Odun biyokütlesinin ana bileşenlerinin termal kararlılıklarının kısmen örtüşmesi nedeniyle reaksiyon sıcaklıkları, ısıtma oranları ve reaksiyon zamanının seçimi, hedeflenen ürünün

seçiciliği için kritik role sahiptir. Farklı proses koşulları sonucu bu ürünlerin dağılımları değişiklik gösterir. Odun biyokütlesinin pirolizi, hedeflenen ürüne bağlı olarak değişmekle birlikte genel olarak 350 ile 700°C sıcaklıklar arasında gerçekleştirilir [(Goyal vd, 2008);(Mohan vd, 2006)]. Ancak OEK lerin pirolizi içerdikleri önemli miktarda (yaklaşık %10) amino reçineleri nedeniyle odun biyokütlesinin pirolizinden farklılık gösterir ve dolayısıyla oluşan ürünlerin karakteri ve verimi de değişkenlik gösterir (Nakai vd, 2007). Bu nedenle, OEK hammaddesinin termal ayrışma mekanizmasının ve ürün dağılımının iyi anlaşılması gerekir.

Son zamanlarda mikrodalga destekli piroliz (MDP), hızlı, ekonomik ve ürün seçiciliğine ulaşma şansı bakımından geleneksel pirolize alternatif umut verici bir teknik olarak oldukça gündemdedir. Geleneksel pirolizde, endotermik piroliz reaksiyonlarının ihtiyaç duyduğu ısı genellikle doğrudan ısıtma veya sıcak gazlardan, sıcak katılardan, sıvı ısı transfer ortamından, oksidasyon ve kısmi oksidasyon reaksiyonlarından, dolaylı ısıtma ile sağlanır. Başka bir ifadeyle, geleneksel pirolizde ısı kaynağı dışardan sağlanmakta olup, ısı transferi dışardan içeriye olmaktadır. Ancak MDP süreci, dielektrik ısıtma prensibiyle işlemekte ve malzemenin dielektrik özelliklerine bağlı olarak gelişmektedir. Yani MDP prosesinde ısıtma, malzeme içindeki dipol grupların elektrik alanına ayak uydurmak için oluşturduğu polarizasyon sonucunda oluşmakta ve böylece ısı transferi içten dışa doğru gerçekleşmektedir. Bu farklı ısı oluşum ve transferi mekanizması gereği, geleneksel pirolize kıyasla her bir hammaddeden üretilen biyoürünlerin kimyasal bileşimi değişkenlik gösterir [(Umeki vd, 2016);(Asomaning vd, 2018)]. Her bir farklı hammadde ve proses kombinasyonu ürün seçiciliği için yeni bir veri oluşturur. Bu durum hiçbir iyileştirme yapılmadan kullanılmak istenen biyo-ürün eldesi söz konusu olduğunda hiç bitmeyen çeşitli olasılıklar doğurmaktadır. Ancak hedeflenen biyo-ürünlerin üretim sürecinin sınırlamaları vardır ve bilim insanları bu karmaşıklık üzerinde yoğunlaşmışlardır.

MDP teknolojisi, sahip olduğu çok çeşitli proses parametreleri nedeniyle süreçten elde etmek istenilen bileşikler yani fenol ve ya hidrokarbon açısından zengin biyo-yagın eldesine elverişlidir. Endüstride piroliz ile elde edilen biyo-yagın

değerlendirilme alanları, karakterine göre farklılık göstermektedir [(Jeong vd, 2016);(Norouzi vd, 2016);(Wang vd, 2016)]. Ayrıca MDP ile nispeten daha düşük sıcaklıklarda daha homojen ve seçici bir ısıtma ile daha yüksek kaliteli bir biyoçar üretilir [(Li vd, 2016);(Tripathi vd, 2016)]. Ayrıca, MDP biyoçarı, sorpsiyon uygulamalarında veya aktif karbon üretimi için bir öncü olarak kullanılabilen daha gözenekli yapıya sahiptir. MDP biyoçarının mikro gözeneklerinin tek tip, oldukça temiz ve yüzey alanının oldukça iyileştirildiği tespit edilmiştir [(Miura vd, 2004);(Yagmur vd, 2008);(Luque vd, 2012);(Menéndez vd, 2007)].

Yukarıda bahsedildiği üzere, MDP prosesinde biyokütlenin fraksiyonlarına ayrılması için gerekli ısı, hammaddenin mikrodalgaları absorplama yeteneğine, mikrodalga gücüne ve uygulanma süresine bağlıdır. Biyokütle kendi başına zayıf bir mikrodalga emicidir. Mikrodalga destekli pirolizde düşük güçlerde çalışıldığında sistemin verimliliğini artırmak için mikrodalga absorbentlerin (MDA) sisteme eklenmesi gerekir (Li vd, 2016). Absorbent olarak aktif karbon, biyoçar, silisyum karbür (SiC) ve kalsiyum oksit (CaO) oldukça yaygın olarak kullanılmıştır. Biyokütleyle eklenen MDA türü ve miktarı da mikrodalga destekli piroliz sırasında ürün bileşimi ve verimi üzerinde etkisi olan diğer bir faktör olarak karşımızda durmaktadır.

Ayrıca katalitik MDP, biyo-ürünlerin seçiciliğini ve verimini iyileştirmeyi amaçlayan birçok yeni araştırmanın merkezinde yer almaktadır. Piroliz çalışmalarında kullanılan katalizör yelpazesi oldukça geniş olmakla birlikte, MDP çalışmalarında genelde zeolit kullanılmış ve son zamanlarda metal oksitler, tuzlar ve asitler de çalışmalara konu olmuştur. Daha ucuz olmasına rağmen metal oksitlerin ve tuzlarının işlem esnasında katalizör olarak kullanımının, geleneksel zeolit katalizörü kadar iyi sonuç verdiği belirtilmektedir [(Kuan vd, 2013);(Huang vd, 2016);(Wan vd, 2009)].

Bundan yola çıkarak çalışmamız da, OEK atıklarının biyokütle olarak kullanılması halinde katalitik MDP sonucu elde edilen biyoürünlerin verim ve bileşimi araştırılmıştır. Biyoürün olarak özellikle biyoyağ üzerinde yoğunlaşmıştır. OEK'lerden, üre formaldehit (ÜF) amino reçinesi kullanılarak üretilen yonga levha kullanılmıştır. Katalizör olarak Magnezyum Klorür (MgCl₂) ve absorbent olarak

silisyum karbür (SiC) farklı oranlarda biyokütleyle eklenerek mikrodalga piroliz sürecindeki işlevsellikleri ve ürünlerin karakterleri üzerine etkileri araştırılmıştır.

BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER

2.1. BİYOKÜTLE

AB Direktifi 2003/30 / EC'ye göre "biyokütle" terimi, tarım ve ormancılıktan gelen ürünlerin, atıkların ve kalıntıların biyolojik olarak parçalanabilen fraksiyonu ile endüstriyel ve belediye atıklarının biyolojik olarak parçalanabilen fraksiyonunu ifade eder. Global tahminlere göre biyokütle kaynağı yılda 146 milyar tonu aşmaktadır (Mattila vd, 2017). Tipik bir biyoenerji formu olarak lignoselüloz biyokütle ise, orman atıkları, endüstri odun talaşı, mobilya levhaları atıkları, tarımsal atıklar ve enerji bitkileri dahil olmak üzere yaygın bir yelpazede değerlendirilmektedir (Mattila vd, 2017). Biyokütlenin %10'u (orman hasadı, ağaç işleme ve tarım sektöründen kaynaklanan kalıntılar dikkate alındığında) %50'lik bir dönüşüm verimliliğinde enerji için kullanılırsa, 3,1 trilyon ton petrol eşdeğeri enerji üretilebileceği belirtilmektedir. Alternatif olarak, organik kimyasalların üretimi için biyokütle kullanılırsa %10'luk bir dönüşüm oranında, 1,6 milyar ton platform kimyasalı üretilebilmesinin de mümkün olduğu belirtilmiştir (Pang, 2019).

2.2. BİYOKÜTLENİN TERMOKİMYASAL DÖNÜŞÜMÜ

2.2.1. Yakma

Yakma, biyokütlenin hava varlığında gerçekleştirilen en basit termokimyasal dönüşüm teknolojisidir. Yakma, biyokütlenin değerlendirilmesi için en yaygın kullanılan termokimyasal süreçtir. Isı, güç veya birleşik ısı ve güç, biyokütlenin doğrudan yanmasının ana ürünleridir. Yanma, bir yakıt ile ısı ve ışık şeklinde enerji üreten oksitleyici bir madde arasındaki oldukça karmaşık işlemlerden oluşur (Wright vd, 2010). Bu şekilde, biyokütlenin ayrışması, ekzotermik reaksiyonların hakim

olduğu tam bir reaksiyon mekanizmasını içerir. Bu süreç ardışık heterojen ve homojen reaksiyonlardan oluşur. Biyokütle yanması temel olarak partikül boyutuna ve besleme stoğunun özelliklerine, sıcaklığa ve yanma atmosferine bağlıdır (Kumar vd, 2003). Biyokütlenin yanması, hammaddenin kimyasal karakterizasyonuna yani kimyasal yapı, elementer yapı ve yakıt özelliklerine bağlı olarak değişir. Yanma işleminin reaksiyon ısı ve performansı, yakıt olarak kullanılan biyokütlenin türüne göre değişir. Biyokütle yakma işlemi sırasında üç aşama vardır: kurutma, piroliz ve indirgeme ve uçucu gazların ve katı kömürün yanması. Yanma işleminde açığa çıkan ısının %70'inden fazlası dördüncü aşamada (yani uçucu gazların yanması) verilir. Yüksek NO_x, CO₂ ve partikül madde emisyonlarının yanı sıra kül, bu süreci çevresel açıdan oldukça zorlayıcı hale getirir [(Kumar vd, 2003);(Patel vd, 2016)] .

2.2.2. Hidrotermal Proses

Hidrotermal proseste su termokimyasal dönüşümde önemli bir rol oynar. Yüksek sıcaklıklarda su, bir reaktan ve hidrokarbonlara hidrojen iyonları ekleyerek organik malzemenin parçalanmasına ve yeniden oluşmasına neden olan bir katalizör görevi görür. Hidrotermal prosesin piroliz ve gazlaştırmaya göre avantajı, ilk hammadde olarak kurutulmuş biyokütle gerektirmemesi (kurutma enerji tüketen bir süreçtir) (Zhang vd, 2008) ve biyokütlenin sıvı yakıtlara dönüştürülmesinde gerekli olan birim işlem sayısını azaltmasıdır. Bu süreç, biyokütlenin doğrudan sıvı yakıtlara dönüştürülmesidir (Patel vd, 2016).

Biyokütle sıvılaştırma reaksiyonları sıvı bir ortamda ve çoğu durumda basınç altında meydana gelir. Bu şekilde, sıvılaştırma işlemi yüksek nem içeriğine sahip biyokütleyi işleyebilirken piroliz, biyo-yagdaki su içeriğini azaltmak için biyokütlenin nem içeriğinin %10'un altında olmasına ihtiyaç duyar. Biyokütle sıvılaştırma teknolojileri üç gruba ayrılabilir: (1) Hidrotermal sıvılaştırma; (2) Çözücülerle sıvılaştırma ve (3) Çözücü ve katalizörlerle sıvılaştırma. Sıvılaştırmadan elde edilen sıvı ürün, daha düşük oksijen ve su içeriğine sahiptir ve daha az karmaşıktır. Bununla birlikte, sıvılaştırma işlemi, yüksek basınçlarda çalıştığı ve/veya çözücüler ve katalizörler kullandığı için daha karmaşıktır.

Hidrotermal proses , genel olarak 240 ile 400 °C arasındaki sıcaklıklarda ve 5–25 MPa basınçta gerçekleştirilir [(Dimitriadis & Bezergianni, 2016);(Kumar vd, 2018);(Gollakota vd, 2018)]. Su 373 °C kritik sıcaklığa ve 22,1 MPa kritik basınca sahiptir , bu nedenle sıvılaştırma prosesi kritik altı koşullarda (örn. 250 °C ve 5 MPa) veya süper kritik koşullarda (örn. 400 °C ve 25 MPa) gerçekleştirilebilir.

Biyokütle sıvılaştırmada çözücülerin (alkol, dekalin, gliserol ve tetralin vb) uygulanmasının, çoğu durumda reaktan olarak hareket etmenin yanı sıra ısı transferini ve biyokütle ayrışmasını arttırdığı bulunmuştur. Biyokütle sıvılaştırma için uygun çözücülerin seçimi, yalnızca biyo-yağ verimini değil, aynı zamanda kimyasal bileşimi de etkileyen önemli bir faktördür [(Liu & Zhang, 2008 ; Biller vd, 2016 ;Durak & Aysu, 2014 ;Cheng vd, 2017)].

Biyokütle sıvılaştırmada, biyo-yağ verimini daha da artırmak ve biyo-yağ kalitesini iyileştirmek için katalizörler de uygulanır (Kumar vd, 2018). Homojen katalizörler başlıca Na₂CO₃, K₂CO₃, KHCO₃, NaOH ve KOH gibi alkali tuzlardır. Bu katalizörler katran/kömür oluşumunu azaltır ve su-gaz geçiş reaksiyonunu teşvik eder, böylece ortamdaki hidrojeni zenginleştirerek biyo-yağ kalitesini artırır (Pang, 2019).

2.2.3. Gazlaştırma

Biyokütle gazlaştırma, lignoselülozik biyokütleyi büyük oranda hidrojen (H₂), karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂) ve metan (CH₄) içeren gazlı ürünlere dönüştüren bir termokimyasal süreçtir. Bu dönüşüm, hassas şekilde kontrol edilen hava, karbondioksit CO₂, oksijen O₂ ve/veya buhar ortamları altında yüksek sıcaklıklarda (700 ila 1200 °C) gerçekleştirilebilir. Gazlaştırma, sıvıya kıyasla gaz verimini artırmak için optimize edilmiş pirolizin uzantısı olarak da bilinir. Gazlaştırma maddesi olarak O₂ veya hava kullanıldığında, diğer endotermik reaksiyonlar için gerekli ısıyı sağlayan kısmi yanma reaksiyonları meydana gelir (Lee vd, 2023). Bir seyreltici olarak nitrojeni ortadan kaldıran bir gazlaştırma maddesi olarak hava yerine oksijenin kullanılması, nihai ürün olarak yüksek kalori değeri olan gazlar üretir. Öte yandan, gazlaştırma maddesi olarak buhar kullanıldığında, genel gazlaştırma reaksiyonları endotermiktir, bu nedenle gazlaştırma reaktörüne harici ısı

beslemesi gerekir. Ortaya çıkan gaz karışımı (gaz halindeki ürünler) dönüşümü, sentez gazı veya üretici gaz olarak adlandırılır ve örneğin H₂ ve CO gibi yanıcı içerikler içerdiğinden, sentez gazının kendisi bir yakıt olarak kullanılabilir. Özellikle, lignoselülozik biyokütlenin gazlaştırılmasının yüksek bir kombine bir ısı ve güç sisteminin ekserji verimliliğini artırma potansiyeli yüksektir (Amigun vd, 2010). Isıtma hızı, reaktör tasarımı ve gazların sonradan işlenmesi, gazlaştırmadan temiz, yüksek kaliteli gazlı ürünler üretmek için ana kontrol faktörleridir (Patel vd, 2016). Ayrıca, lignoselülozik biyokütle gazlaştırmaya dayalı ısı ve elektrik üretimi, biyokütlenin doğrudan yakılmasına dayalı olandan daha çevre dostu olabilir [(Pang, 2019); (Lee vd, 2023)].

2.2.4. Piroliz

Piroliz, biyokütlenin oksitleyici olmayan koşullarda yüksek sıcaklıkta (300–900°C) termo kimyasal bozunmasıdır (Bridgwater, 2012). Bu proses, biyokütleden bir dizi katı, sıvı ve gaz ürün meydana getirme esnekliği nedeniyle günümüzde oldukça ilgi çeken bir yöntemdir. Piroliz, ısıtma hızı, sıcaklık ve bekletme süresi gibi proses parametresine dayalı olarak yavaş piroliz, hızlı piroliz ve flaş piroliz olarak sınıflandırılmıştır (Mohan vd, 2006);(Papari & Hawboldt, 2015). Yavaş piroliz, nispeten düşük sıcaklıkta (< 500 °C) uzun kalma süresiyle gerçekleşir ve genellikle karbonizasyon olarak adlandırılır ve yaygın olarak biyo-çar üretimi için kullanılır. Hızlı piroliz, yüksek biyo-yağ verimi (%50-70) ile daha yüksek bir ısıtma hızında (10-200°C/s) ve azaltılmış kalma süresinde (<2 s) gerçekleşir. Flaş piroliz daha da yüksek bir ısıtma hız oranında (103–104°C/s) gerçekleşir ve kısa bir bekletme süresiyle (<0,5 s) yüksek biyo-yağ verimine (%75–80) yol açar (Kan vd, 2016).

Biyokütle pirolizinde yüksek enerji verimliliği elde etmek için, biyokütle tipi, partikül boyutu, reaksiyon koşulları, reaktör tipi ve reaktör içindeki taşıma olaylarını ve ayrıca katalizör ilavesi ve mekanizması gibi diğer değişkenleri içeren çok çeşitli piroliz parametreleri dikkate alınmalıdır. Çalışmalarda kullanılan farklı piroliz reaktörleri, sabit yataklı reaktörler, kesikli veya yarı kesikli reaktörler, döner fırınlar, akışkan yataklı reaktörler, mikrodalga destekli reaktörler ve plazma veya güneş reaktörleri gibi birkaç çağdaş tip reaktör bulunmaktadır (Bridgwater, 2012).

Piroliz sırasında biyokütle bileşenlerinin davranışı, belirli bir elementin farklı reaksiyon hızı ve kararlılığı, biyokütle bileşenleri arasındaki ara bağlantı ve reaktör konfigürasyonunu büyük ölçüde etkileyen piroliz yan ürünlerinin alıcılığı gibi parametreler tarafından denetlenir. Geleneksel olarak a) mevcut nemin buharlaştırılması b) birincil biyokütle bozunması ve c) ikincil reaksiyonlar olmak üzere üç adımda yoğunlaştırılan piroliz sırasında çok sayıda reaksiyon meydana gelir. Birincil aşamada maksimum biyokütle ayrışması 200-400°C'de gerçekleşir ve bu da katı biyo-çar oluşumuyla sonuçlanırken, biyokütlenin iç yüzeyinde meydana gelen ikincil reaksiyonlar sıcaklığı daha da hızlandırır (Yaashikaa vd, 2019). Genellikle ksilan ile karakterize edilen hemiselüloz ayrışması 250 ila 350°C arasında gerçekleşirken, selüloz bazlı piroliz yan ürünü levoglukozan ve en kararlı ürün olan ligninin bozunması 325 ila 400°C arasında gerçekleşir ve 300–550°C'yi aşan sıcaklıklarda bozunur.

Pirolitik gaz, H₂, CO ve CO₂ gibi kalıcı gazların ve metan (CH₄), etan(C₂H₆), etilen(C₂H₄), propan(C₃H₈)propilen(C₃H₆),bütan(C₄H₁₀) ve butilen(C₄H₈) gibi hafif hidrokarbonların bir karışımıdır (Kim vd, 2022). Biyo-yağ (pirolitik sıvı, katran veya biocrude olarak da adlandırılır), su, organik bileşenler (esas olarak organik asitler, alkol, aldehytler, fenoller ve furanlardan oluşur) ve az miktarda külden oluşan karmaşık bir karışımıdır (Banks & Bridgwater, 2016). Son olarak biyo-çar tipik olarak katı bir yakıt (kömüre yenilenebilir bir alternatif) olarak kullanılan lignoselülozik biyokütle pirolizinden sonra kalan katı bir kalıntıdır (Lee vd, 2017). Tüm bu pirolitik ürünler, güç üretmek için yakılabildikleri için yenilenebilir enerji kaynakları olarak kabul edilir. Her bir pirolitik ürünün verimi ve özellikleri, sıcaklık, ısıtma hızı ve pirolizin hammadde kalma süresi gibi pirolitik koşullarla yüksek oranda ilişkilidir (Kwon vd, 2019) (Lee vd, 2023).

Arıca piroliz işleminde, optimum koşullar altında belirli katalizörlerin veya diğer katkı maddelerinin eklenmesi, seçici piroliz sırasında belirli kimyasalların verimini artırabilir[(Casoni vd, 2016);(Kan vd, 2016);(Leng vd, 2014);(Yu vd, 2020) (Widayatno vd, 2016)]. Katalitik pirolizin potansiyel avantajları arasında, yüksek yağ verimleri, düşük kalite biyo-yağların kalitesini arttırmak, piroliz sıcaklığı ve süresinde

tasarruf etmek ve yan ürünlerin azaltılması sayılabilir. Ancak, katalitik piroliz de katalitik materyallerin istikrarlılığı ve etkinliği, malzeme ve katalizörün uyumluluğu ve katalitik materyallerin geri dönüşülebilirliği gibi bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Mevcut katalitik materyaller arasında, zeolitler, metal oksitler, biyokarbonlar ve hidrojenleştirilmiş katı yağ asitleri gibi materyaller yer alır. Bu materyallerin performansı, biyokütlenin özelliklerine, piroliz şartlarına ve materyallerin özelliklerine bağlıdır. Örneğin, zeolitler yüksek seçicilik ve istikrarlılık ile karakterize edilirken, metal oksitler daha yüksek etkinliğe sahip olabilir (Wang vd, 2022)

2.5. BİYOKÜTLENİN MİKRODALGA DESTEKLİ PİROLİZİ

2.5.1. Mikrodalga Isıtma Prensibi

Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumda kızılötesi ve radyo dalgası bölgeleri arasında yer alır ve dalga boyları 0,01 ile 1 m olup karşılık gelen frekans 0,3 ila 300 GHz arasındadır. Endüstride mikrodalga işlemlerinde en yaygın kullanılan iki mikrodalga frekans 915 MHz ve 2.45 GHz'dir. 2.45 GHz için mikrodalga enerjisi, elektrik enerjisinden %50 dönüşüm verimliliği ile elde edilir (Huang vd, 2016)

Mikrodalga ısıtma, elektromanyetik enerjiyi belirli frekanslarda termal enerjiye dönüştüren, hızlı ısıtma anlamına gelen, elektromanyetik enerjinin, mikrodalga ışıması altındaki malzemeler tarafından etkili bir şekilde emildiği, temassız bir enerji aktarım işlemidir. Mikrodalga alanına maruz bırakılan bir malzeme içindeki iyonlar ve dipoller elektrik alanı ile indüklenerek hizalanmaya çalışır. Bu hizalanma sırasında moleküler arasında sürtünmesi ve çarpışmalar dolayısıyla ısı meydana gelir. (Huang vd, 2016)

Konvansiyonel termal ısıtma, bir malzemenin yüzeyinden merkezine iletim, konveksiyon ve radyasyon yoluyla ısı transferinin olduğu geleneksel bir ısıtma modeli olarak bilinir. Oldukça yaygın olarak kullanılmasına rağmen, eşit olmayan ısı dağılımı, yüksek ısıtma maliyeti ve genellikle uzun işlem süresi gibi dezavantajlara sahip olduğu da bilinmektedir. Bunun aksine mikrodalga ısıtma, özgül ısı ve yoğunluk sınırlamaları, yüzeyin heterojen ısınması ve malzemelerin termal iletkenliği

dahil olmak üzere geleneksel ısıtmanın ana sorunlarının üstesinden gelebilecek daha az enerji girdisi gerektiren bir tekniktir (Huang vd, 2016).

Mikrodalga piroliz, farklı ısı transfer mekanizmasının benimsenmesi sayesinde hem geleneksel hem de vakumlu pirolize göre üstündür. Konvansiyonel veya vakumlu piroliz için, elektrik veya yakıt yanmasından gelen enerji ısıya dönüştürülür ve bu ısı konveksiyon ve iletim yoluyla yüzeye ve son olarak hedef malzemenin iç kısımlarına aktarılır. Bu nedenle, ısıtma verimliliği genellikle yüzey sıcaklığı ve hedef malzemenin yoğunluğu, ısı kapasitesi ve termal iletkenliği gibi termofiziksel özellikleri ile sınırlıdır. Öte yandan, mikrodalga piroliz, ısı üretimi için mikrodalga'nın hedef malzemenin dipolleri ile etkileşiminden yararlanır. Harici bir ısıtma kaynağı yerine, ısı, eşit ısı dağılımı ve daha hassas kontrollü ısıtma sayesinde geleneksel yüzey ısıtmasından daha verimli olan hedef malzemenin çekirdeğinde üretilir. Mikrodalga ısıtma, yüksek sıcaklıklara ve ısıtma hızlarına ulaşabildiğinden, mikrodalga piroliz, hem geleneksel hem de vakumlu pirolize kıyasla hızlı, enerji açısından verimli ve zaman kazandıran bir süreç olarak kabul görmektedir [(Lam vd, 2017);(Lam vd, 2015);(Liew&Azwar, vd, 2018);(Liew&Chong, vd, 2018);(Foong vd, 2020)].

Elektromanyetik enerjiyi termal enerjiye dönüştüren mikrodalga ısıtma, ısı transferinden ziyade yalnızca bir enerji dönüşümü olarak görülür. Mikrodalgalar malzeme tarafından nüfuz edilir ve dipol hareketi ve iyonik iletim yoluyla enerji dönüşümü gerçekleşir ve malzemede hacimsel ısıtma sağlanır (Sweyers vd, 2018). Reaksiyon süresini saatlerden dakikalara kısaltır, katma değerli ürünlerin kalitesini artırır ve işleme maliyetlerini düşürür (Motasemi & Afzal, 2013). Mikrodalga enerjisi, malzemelerin seçici ısıtılmasında etkilidir, çünkü besleme stoklarının toplu ısıtılmasında hiçbir enerji boşa harcanmaz, bu da geleneksel yöntemlere göre açık bir avantajdır [(Jones vd, 2002);(Huang vd, 2016)]. Ek olarak, biyokütle dönüşümünün verimliliğini artırmak için biyokütle bileşenleri ve mikrodalga arasındaki sinerji önemlidir. Bu nedenle, mikrodalga işleme, termal enerji üretiminin ötesinde potansiyel olarak reaksiyon mekanizmalarının yönetilmesinde de önemli bir rol oynar[(Yu vd, 2020); (Zhang vd, 2017)].

Mikrodalga ısıtmanın önemli dezavantajı, mikrodalga alanının homojen olmamasından (duran dalgaların oluşumu) veya bir besleme stoğunun (bir karışım) dielektrik özelliğinden kaynaklanan sıcak nokta oluşumu olgusudur, böylece besleme stoğu içindeki bir noktadaki sıcaklık, ölçülen sıcaklıktan çok daha yüksek olabilir [(Jones vd, 2002);(Yin vd, 2012)]. Sıcak noktalar, mikrodalga işleme ürünlerinin verimi ve özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olacaktır. Sıcak nokta fenomenini kontrol etmek için, boşluğun boyutunu artırmak, daha yüksek bir frekansta çalışmak, bir döner tabla donatmak ve bir mod karıştırıcısı kurmak gibi çeşitli teknikler kullanılabilir (Huang vd, 2016).

2.5.2. Mikrodalga Destekli Pirolyz Etkileyen Faktörler

Mikrodalga destekli pirolizin, hızlı ısıtma özelliğinin yanı sıra reaksiyon oranlarını hızlandıran ve enerji verimliliği sunan seçici, hacimsel ve üniform ısıtmasına atfedilebilen geleneksel pirolize umut verici bir alternatif olduğunu doğrulanmıştır. Mikrodalga ısıtma, biyokütlenin termal dönüşümü için son derece umut verici bir yöntem gibi görünmektedir. Mikrodalga pirolizin ısıtma hızı, geleneksel pirolizden %42' ye kadar daha yüksek olabilir. Bu da, belirlenmiş proses sıcaklığına ulaşmak için daha az zaman ve giriş enerjisi gerektiği anlamına gelir. Konvansiyonel pirolize kıyasla mikrodalga pirolizin avantajlı ısıtma mekanizması, sonuçta işlem süresinin kısılmasına, sermaye maliyetlerinin azalmasına ve hatta çoğu zaman gelişmiş malzeme özelliklerine yol açabilir [(Thostenson & Chou, 1999);(Bu vd, 2016);(Asomaning vd, 2018)].

Biyokütlenin mikrodalga destekli termal dönüşümü sürecinde, nihai ürün dağılımını ve kalitesini önemli ölçüde değiştirebileceklerinden, bazı kritik parametrelerin dikkate alınması gerekir. Hammadde özelliklerine ve istenilen ürüne bağlı olarak, proses değişkenlerinin uygun bir aralıkta ayarlanması, katma değerli ürünlerin maksimum verim ve kalite artışı için çok önemlidir.

Biyokütle besleme stoğunun bileşimi, MDP prosesinin performansını yönetebilir. Mikrodalga radyasyonu malzemeyi içten dışa ısıttığı için parçacık boyutu da önemli bir parametredir. Hızlı ısıtma amacıyla, geleneksel pirolize kıyasla mikrodalga

destekli pirolizde parçacık boyutunu küçültme gereksinimlerinde önemli bir azalma bulunabilir. Bunun nedeni, mikrodalga radyasyonunun hızlı, hacimsel ısıtma doğasıdır ve bu da sonunda ham madde boyutunun küçültülmesinde kullanılan enerji tüketimini büyük ölçüde azaltır [(Yin vd, 2012);(Asomaning vd, 2018);(Mutsengerere vd, 2019)].

Besleme stoğunun nem ve su içeriği, mikrodalga ısıtma sırasında ısıtma verimliliğini belirler. Biyokütledeki belirli bir miktardaki nemin mikrodalga destekli piroliz sırasında ısıtma oranlarını artırabileceğini ve genel mikrodalga enerji kullanım verimliliğini iyileştirebileceği belirtilmektedir [(Asomaning vd, 2018);(Mutsengerere vd, 2019)].

Piroliz işlemi, genellikle 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşir ve optimum biyo-yağ verimleri genellikle 450 ile 550°C arasındaki sıcaklıklarda elde edilir. Ancak, piroliz sıcaklığının daha da artırılması, biyo-yağ veriminin belirli bir noktada azalmaya başladığı gözlemlenmiştir. Daha yüksek sıcaklıklar, katran parçalarının oluşumuna neden olan bağ kesme reaksiyonlarına yol açar, ancak daha düşük sıcaklıklar kömürleşme reaksiyonlarını teşvik eder. Bu nedenle, belirli bir sıcaklık aralığında biyo-yağ verimi artar ve daha sonra azalır. Mikrodalga ışıması altındaki pirolizde, biyo-yağ veriminin arttığı gözlenen bir süreçtir. Piroliz sıcaklığındaki artış, biyo-yağ verimini artırmak için önemlidir. Ancak, çok yüksek sıcaklıklarda (optimum değerlerden daha yüksek) verim düşmeye başlar ve yoğunlaşmayan gazların üretimi artar. Piroliz işleminin düşük sıcaklıklarda (örneğin 120°C) da gerçekleştirildiğinde ve belirli katalizörlerin kullanılmasıyla biyo-yağ verimini artırabileceği belirtilmiştir. Bu gibi durumlar, iyonik çözeltiler veya sıvı katalizörlerin kullanımını içerebilir. Bu tür durumlarda, düşük piroliz sıcaklıkları, işlem verimini artırabilir. Sonuç olarak, piroliz işlemi için en uygun sıcaklıklar, 300°C'nin üzerinde olup, 450 ile 550°C arasında değişmektedir. Ancak, biyo-yağ üretiminde farklı parametrelerin ve reaksiyon koşullarının etkisi göz önünde bulundurulmalıdır, çünkü bazı durumlarda düşük sıcaklıklarda da verimli biyo-yağ üretimi sağlanabilir (Mutsengerere vd, 2019).

Tutma süresi, bir kimyasal reaksiyonun gerçekleştiği süredir ve MDP prosesinde biyo-yağ verimi üzerinde önemli etkilere sahiptir ve piroliz reaksiyonlarının tamamlanması ve biyo-yağ veriminin optimum seviyelere ulaşması için kritik bir faktördür (Mutsengerere vd, 2019).

Bir malzemenin dielektrik özellikleri (diğerlerinin yanı sıra) reaksiyon sıcaklığının bir fonksiyonudur (Hossan & Dutta, 2012). Kalma süresi ve ısıtma hızı da biyokütlenin mikrodalga destekli termal dönüşümünün sonucunu etkileyen önemli faktörlerdir. Pirolizden sonra sıvının katı fraksiyona oranı esas olarak kısa veya uzun kalma sürelerine ve düşük veya yüksek ısıtma hızlarının uygulanmasına bağlıdır. Isıtma hızı temel olarak biyokütle pirolizinin tipini tanımlar (yani flaş, hızlı ve yavaş piroliz) .Bu nedenle, ısıtma hızı ve kalma süresinin değişimi, biyo-yağ veya biyokömür verimini etkiler (Kan vd, 2016). Geleneksel olarak, biyoçar üretimi için nispeten düşük sıcaklıkta yavaş piroliz (uzun kalma süresi) uygulanırken, biyo-yağ üretimi için tipik olarak yüksek ısıtma hızlarında ve kısa kalma sürelerinde hızlı piroliz kullanılmıştır [(Kan vd, 2016);(Borosan vd, 1989)]. Biyokütlenin hızlı parçalanmasını kolaylaştırdığından, hızlı ısıtma oranlarıyla daha yüksek gaz verimi ve daha az kömür elde edilir [(Kan vd, 2016);(Asomaning vd, 2018)].

Mikrodalga çıkış gücü, ısıtma hızına ve nihai piroliz sıcaklığına katkıda bulunur, bu sayede düşük güç, yavaş bir ısıtma hızında işlem süresini artırır(Mushtaq vd, 2014). Tersine, daha yüksek bir mikrodalga gücü, daha yüksek bir ısıtma hızı ve daha düşük işlem süresi sağlayabilir (Huang vd, 2010). Bu nedenle, mikrodalga güç kontrolü için proses ve sistem tasarımının optimizasyonu, istenen ısıtma hızını ve proses sıcaklığını sağlamak için hayati önem taşımaktadır(Asomaning vd, 2018).

2.6. BİYOKÜTLE KAYNAĞI: ODUN ESASLI KOMPOZİTLER

Odun esaslı kompozitler (OEK) mobilya ve bina konstrüksiyonlarında oldukça yoğun kullanılan materyallerdir (Hussin vd, 2022). En yaygın kullanılan OEK'lar, yonga levha (YL), lif levha (MDF), yönlendirilmiş lif levha (OSB), kontrplak ve laminat yer döşemeleridir. OEK'lerin üretimi her yıl artarak, 2021'de yaklaşık 380 milyon m³'e ulaşmıştır. Bunlar arasında yaklaşık 167 milyon m³ ile en yüksek üretime kontrplak

sahip olup, onu yaklaşık 110 milyon m³ ile lif levha ve 100 milyon m³ ile yonga levha takip etmektedir. Günümüzde hızlı kentleşme ile birlikte OEK olan küresel talep hala sürekli olarak artmaktadır. Sonuç olarak, bu malzemelerden yapı ürünleri ve mobilya eldesi sırasında çıkan atık miktarı (yıllık toplam panel hacminin yaklaşık% 10'u) da orantılı olarak artmaktadır. Ayrıca ahşap yapılardan kullanım sonrası diskarte edilen odun atıklarının büyük bir miktarını OEK ürünleri oluşturur (Lykidis & Grigoriou, 2008).

OEK'ler özel kökenlerine bağlı olarak esas olarak odun ve yapıştırıcı amino reçinesi içerir. Spesifik olarak, OEK içeriğinde, lignoselülozik biyokütle yaklaşık % 85 -95, ve amino reçine % 3 ila % 15 arasında değişmektedir [(Halvarsson vd, 2008);(Merrild & Christensen, 2009)]. Doğal olarak bu malzeme atıkları da, amino reçinesi ve bağlayıcılar gibi katkı maddelerinden oluşur (Han vd, 2015).

OEK atıklarının, sahip oldukları yapıştırıcı bileşenleri nedeniyle çevre dostu bir şekilde yönetilmesi zordur. Bu atıklar, içerdiği belirli miktarda yapıştırıcı nedeniyle çevre kirliliğine yol açmaktadır. OEK atıklarının içerdiği amino reçineleri, toksik formaldehit ve uçucu organik bileşik emisyonları nedeniyle potansiyel sağlık tehlikeleri oluştururlar ve ayrıca biyolojik olarak parçalanamazlık özellikleri vardır (Kelleci vd. 2022);(Li vd, 2018);(Na vd, 2019);(Peyravi vd, 2017);(Abdolzadeh vd, 2011).]. Atıklardan salınan tehlikeli formaldehit kanserojendir (Dorieh vd, 2021). Öte yandan depolanmaları sırasında atıkların içerdiği yapıştırıcıların depolama sahasına sızması ile sabit alan istifleme bertarafında yeraltı suları ve toprak kirlenmektedir. Genelde bu atıkların değerlendirilmesi için uygulanan en yaygın yöntem yakmadır. Ancak yakma sırasında nitrojen dioksit (NO₂) ve karbon monoksitin (CO) yanı sıra metaller ve dioksinler gibi diğer toksik maddeler çevreye yayılır ve hava kirliliğine neden olurlar (Marco vd, 2010). Amino reçinesi içeren bu atığın, depolanması ve yakılması ile ilgi meydana gelebilecek olası sorunları en aza indirmek için termokimyasal dönüşüm yöntemlerinin kullanılması en uygun seçeneklerden biri olarak kabul edilmektedir.

OEK'ler bol odun lifleri nedeniyle termal olarak biyo-yakıtlara veya yüksek katma değerli kimyasallara dönüştürülebilinen tipik biyokütle kaynakları olarak kabul edilirler. Biyokütle olarak bol olmaları, düşük maliyetleri ve kolay toplanmaları

avantajlı yanlarıdır. (Safarian & Unnthorsson, 2018). Ancak formaldehit bazlı yapıştırıcıların termokimyasal süreçlerdeki rolü çok iyi değerlendirilip, avantaja dönüştürülebilir. (Safarian & Unnthorsson, 2018). Ancak formaldehit bazlı yapıştırıcıların termokimyasal süreçlerdeki rolü çok iyi değerlendirilip, avantaja dönüştürülebilir.

Formaldehit bazlı amino reçineleri, OEK üretiminde kullanılan toplam ahşap reçinelerinin yaklaşık %90-95'ini oluşturmaktadır [(Ghafari vd, 2016);(Frihart, 2011)]. Üre-formaldehit (UF) reçineleri, OEK'lerinin üretiminde kullanılan en yaygın yapıştırıcı türüdür, bunu fenol-formaldehit (FF) ve melamin formaldehit (MF) reçineleri takip eder [(Kristak vd, 2022);(Silva vd, 2015)]. Bunlar ısıyla sertleşen polimerlerdir (Dunky, 1998). UF reçinelerinin küresel hakimiyeti, iyi bağlanma özellikleri, yüksek reaktivite, kısa presleme süreleri, suda çözünürlük, kullanım kolaylığı gibi sayısız avantajlarından kaynaklanmaktadır ve en önemli faktör, nispeten düşük maliyetleridir [(Lubis vd, 2019);(Lubis vd, 2020)]. Ancak, UF yapıştırıcıların dış mekan uygulamalarında kullanımlarını sınırlayan ana dezavantajı kimyasal hidrolize karşı düşük dirençleridir. Daha pahalı fenol-formaldehit veya polimerik 4,4-difenilmetan diizosiyanat bazlı yapıştırıcılar, özellikle ıslak ortamlarda belirli uygulamalar için tercih edilir. (Besserer vd, 2021)

2.6.1. Biyokütle Olarak Odun

Odun biyokütlesi selüloz, hemiselüloz ve lignin doğal polimerlerinden oluşur. Bu bileşikler, yapraklarda fotosentezden kaynaklanan monosakkaritlerin (glikoz, fruktoz ve galaktoz) polimerizasyonundan üretilir. Selüloz, glukozidik bağlar yoluyla en az on binlerce β -d-glukoz biriminden oluşan nispeten basit bir kimyasal yapıya sahiptir. Bu şekilde, selüloz kimyasal formülü $(C_{12}H_{20}O_{10})_n$ ile temsil edilebilir; burada n, β -d-glukoz birimlerinin sayısıdır. Hemiselülozlar, başlıca bileşenleri pentoz şekerleri, heksoz şekerleri, L-arabinoz ve D-ksiloz, d-glukoz, D-mannoz ve D-galaktoz olan dallı hidrokarbonlardır. Lignin, çoğu çözücüde çözünmeyen aromatik moleküllerden oluşan odunda en çok kompanse edilen bileşendir. Lignin, odundaki en kararlı bileşendir ve monomerik birimlere ayrılması zordur. Yumuşak ağaç lignini büyük ölçüde çapraz bağlı guayasilpropan birimlerinden oluşurken, sert ağaç aynı zamanda siringilpropan (%25-50 kütle) ve küçük bir kuruoksifenilpropan fraksiyonu içerir (Pang, 2019).

Odun, yukarıdaki üç ana bileşene ek olarak reçine ve mineral elementleri gibi ekstraktifler de içerir. Odunun ekstraktifleri, odunun kullanımı için önemlidir ve ana bileşenleri arasında yağ asidi, yağ asidi esterleri, reçine asitleri, fenoller ve sabunlaştırılmayan maddeler bulunur. Ekstraktiflerin fraksiyonu, ağaç türüne, ağaç içindeki konumuna ve ağacın büyüme konumuna bağlı olarak odun kütlelerinin %1 ila %20'si arasında değişir (Uprichard & Lloyd, 1980). Ahşaptaki mineral elementler, yanma veya gazlaştırma sonrasında küle neden olur. Bu elementler odun kütlelerinin %0,1-0,7'sine katkıda bulunur ve silis (Si), kalsiyum (Ca), potasyum (K), magnezyum (Mg) ve fosforu (P) içerir (Misra vd, 1993);(Penninckx vd, 2001). Termokimyasal dönüştürme işleminde dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gereken kül içeriği için bazı istisnalar vardır.

Tipik olarak, yumuşak ağaçlarda %42 ± 2 selüloz, %27 ± 2 hemiselüloz, %28 ± 3 lignin ve %3 ± 2 ekstraktif bulunurken sert ağaçlarda sırasıyla %44 ± %2 selüloz, %28 ± %5 hemiselüloz, %24 ± %4 lignin ve %4 ± 3 ekstraktif madde bulunur (Walker, 2006). Ahşabın her bir bileşeni, biyokütlenin termokimyasal dönüşümünü etkiler (Pang, 2019). Biyokütlenin enerjiye dönüşümü için elementer yapısı da oldukça önemlidir. Odunsu biyokütle de yaklaşık % 51-52 Karbon (C), % 5-6 hidrojen (H), %0.4-0.9 Nitrojen (N), %40-43 Oksijen (O) bulunur (Franco vd, 2003).

Bu bileşenler, hücre duvarı boyunca gelişigüzel bir şekilde, sırasıyla element ve sert katıları birleştiren bir iskelet yapısı olarak dağılmıştır (Mettler vd, 2012). Geleneksel olarak selüloz, kuvvetli lifler halinde kümelenir ve hücre duvarı boyunca bir iskelet çerçevesi oluşturur ve iç boşluklar, bağlayıcı bir bileşik görevi gören hemiselülozlar ve lignin ile doldurulur. Hemiselüloz ve lignin elementi, selüloz ile hidrojen bağı yoluyla birleşirken, lignin ve hemiselüloz bileşenleri hem hidrojen hem de kovalent olarak bağlıdır ve biyokütlenin piroliz özelliklerini etkilediği bulunmuştur (Collard & Blin, 2014).

2.6.2. Odunun Termal Dönüşümü Üzerine Amino Reçinelerinin Etkisi

Termogravimetrik teknikle gerçekleştirilen piroliz çalışmalarında UF reçinesinin ağırlık kaybının çoğunun, yaklaşık 180–330°C aralığında aktif bir aşamada gerçekleştiği belirlenmiştir. UF reçinesinin pirolizi, oduna kıyasla daha yüksek verimde uçucu madde üretir. Bu sonuç aralarındaki yapı farklılığından kaynaklanır.

UF reçinesi, esas olarak amino, karbonil ve metilen gruplarından oluşan bir aĐa sahiptir. UF reçinesinin daha dűřuk sıcaklıklarda OEK kimyasal reaksiyonlarını hızlandırma olasılığı daha yűksektir, ancak piroliz işlemi sırasında daha yűksek sıcaklıklarda OEK ların katı kalıntısının bozunmasını engeller. UF reçinesinin termal kararlılığı ahşaptan daha zayıftır; ancak, OEKın ısı kararlılığını arttırır (Mu & Lai, 2017).

Reçinenin varlıĐından dolayı OEK lerin pirolizinin özellikleri ve őrűn daĐılımı farklıdır. UF reçinesinin őr ana biyokűtle bileřini (selűlozű hemiselűloz ve lignin) izerindeki etkisi farklıdır. UF reçinesinin, özellikle piroliz hızının baskılanmasında 200°C'den sonra selűlozun bozunmasını nleme olasılıĐı daha yűksektir. UF reçinesinin neden olduĐu alkali ortamın, selűlozun bozunmasını önlemenin ana nedeni olduĐu varsayılmaktadır. UF reçinesinin hemiselűlozun piroliz davranıřı izerinde çok az etkisi vardır. OEKların piroliz iřlemi sırasında, ahřabın őr ana bileřeni arasında UF reçinesi esas olarak lignini etkiler (Mu & Lai, 2017).

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. ODUN ESASLI KOMPOZİTLERİN PİROLİZİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

(Nakai vd, 2007) çalışmalarında, ahşap ve ahşap temelli atıkların piroliz işlemi, katı malzeme olarak odun kömürü ve değerli kimyasallar içeren sıvıları elde etmek için umut vadeden yöntemlerden biri olarak kabul etmişlerdir. Bu çalışmada, katı odun ve yonga levha, kontrplak ve orta yoğunluklu lif levha (MDF) gibi ahşap tabanlı panellerin pirolizinden elde edilen sıvıların kimyasal bileşenleri karakterize edilmiştir. Ayrıca, bu sıvıların içerdiği biyoaktif bileşenler dikkate alınarak, sıvıların in vitro mantar büyümesini kontrol etme etkinliği incelenmiştir. Sonuçlar, katı odun ve kompozitlerden elde edilen sıvıların kimyasal bileşiminin büyük ölçüde farklı olduğunu göstermiştir. Mantar önleme testleri, katı odun ile kompozitler arasında mantarları kontrol etme etkinliği bakımından önemli farklılıklar olduğunu ve kompozitlerden elde edilen sıvıların test edilen mantarlar üzerinde daha yüksek etkinliğe sahip olduğunu ortaya koymuştur.

(Girods vd, 2008a) çalışmalarında, üre formaldehit ve melamin formaldehit reçineleri içeren ahşap atıkların termal değerlendirme sürecini iki aşamalı olarak incelemişlerdir. İlk aşamada düşük sıcaklıklarda (250-300°C) gerçekleştirilen bir piroliz ile termal olarak azotun uzaklaştırılması hedeflenmiştir. İkinci aşama ise, ilk aşamanın artığı olan malzemenin hızlı piroliziyle yanıcı gaz üretmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın sonuçlarına göre, rafineri aşamasında yaklaşık olarak %68 oranında azot uzaklaştırılabilmekte ve enerji geri kazanımı açısından 250°C işlem en iyi sonuçları vermektedir. Hızlı piroliz aşamasında ise piroliz sıcaklığının, üretilen gaz hacmi ve düşük ısıl değer üzerinde etkisi olduğu gözlemlenmiştir. En iyi sonuçlar, 1000°C piroliz sıcaklığıyla elde edilmiş olup daha yüksek gaz hacmi ve enerji verimliliği sağlamaktadır. Hızlı piroliz adımından sonra kalan artık karbon hala

enerji ve azot içerdiği gözlemlenmiştir. Yanması, sürecin enerji verimliliğini artırabilir, ancak ekonomik verimliliği iyileştirmek için aktive edilmiş bir karbona dönüşüm de dikkate alınmalıdır.

(Girods vd, 2008b) çalışmalarında, Yonga Levha (YL) gibi üre formaldehit (UF reçineleri) içeren atıkların termal değerlendirme için iki aşamalı bir sürecin ilk aşamasını araştırmıştır. Sürecin ilk adımı olan "arıtma", düşük sıcaklıkta (250-300°C) gerçekleştirilen bir piroliz ile katkı maddelerinin seçici desorpsiyonunu ve geri kazanımını hedeflemektedir. İkinci aşama ise, karbon artığının CO₂ veya su buharı ortamında termokimyasal saldırıyla indirgenmesi ve gazlaştırılmasıyla CO/H₂ gazlarının elde edilmesini amaçlamaktadır. İlk deneyler, ahşaptan UF reçinesinin seçici desorpsiyonunun yapılabilirliğini kontrol etmek amacıyla bir termobalans üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler, UF reçinesinin ahşaptan seçici olarak desorbe edilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Yonga Levha pirolizi, Fourier dönüşüm kızılötesi (FTIR) spektrometrisiyle CO, CO₂, CH₄, NH₃ ve H₂CO gibi piroliz ürünlerinin analiz edilebildiği bir cihaz kullanılarak incelenmiştir. Elementel analiz ve kalorimetrik bomba deneyleri, işlem sonrası kalıntıların karakterizasyonunu sağlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre, azot miktarının uzaklaştırılması işlem sıcaklığından etkilenmemektedir: işlem kalitesi, işlem sıcaklığına bağlı değildir. Ancak, karbon, oksijen ve hidrojenin uzaklaştırılmasında bir hızlanma gözlenmiştir, bu da enerji kaybına yol açmıştır. Bu sonuçlar, kalorimetrik bombadaki kalıntıların incelenmesiyle doğrulanmış ve 250-300°C işlem sıcaklığı için yaklaşık %10 enerji kaybına işaret etmektedir. Bu çalışma, UF reçinesi içeren atıkların termal değerlendirme sürecinin ilk aşamasının ayrıntılı bir şekilde incelenmesine katkı sağlamıştır.

(Adachi vd 2009) yaptıkları çalışmada ahşap biyoküttele bulunan yapıştırıcıların ahşabın piroliz özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada yapı malzemelerinden elde edilen sentetik polimerlerle karıştırılan ahşap biyoküttele bulunan yapıştırıcıların piroliz sırasında oluşan gazların bileşimi, termal davranışı ve piroliz verimine etkisi standart basınç altında ve azot atmosferinde 300°C ila 500°C arasındaki sıcaklıklarda piroliz yapılarak incelenmiştir. Bir örnek olarak kompreg alınarak, yapıştırıcı içeren ahşabın piroliz özellikleri, termogravimetrik analiz (TGA) cihazı kullanılarak incelenmiştir. TGA

ölçümlerinde, yapıştırıcı içeren ahşabın ısı ağırlık kaybının pik sıcaklığının, yapıştırıcı içermeyen ahşaba göre daha düşük olduğu bulunmuş bu deneysel sonucun, selülozun çözünme tepkimesinin yapıştırıcılar tarafından etkilendiği durumlarda ortaya çıktığı belirtilmiştir.

(Feng vd, 2010) atık ahşap esaslı kompozitlerin pirolizinden elde edilen değerli ürünlerin kimyasal içeriğini incelemiştir. Azot bileşikleri, bu piroliz ürünlerini genel biyokütleden farklı kılmaktadır. Bu çalışmada Yonga Levha (YL) ve orta yoğunluklu lif levha (MDF) gibi atık ahşap esaslı kompozitlerin piroliz sıvıları ve katı kalıntıları karakterize edilmiştir. Piroliz sıvılarının bileşenleri GC-MS analizi ile incelenirken, katı kalıntılardaki azot bileşiklerinin fonksiyonlarını belirlemek için FTIR analizi kullanılmıştır. Sonuçlar, piroliz sıvılarının üre formaldehit kaynaklı azot bileşiklerinden etkilendiğini göstermektedir. Bu çalışma, atık ahşap esaslı kompozitlerin piroliz ürünlerinin kullanımını yönlendirecek önemli bilgiler sağlamaktadır.

(Chen vd, 2011) yaptıkları çalışmalarında atık ahşap esaslı levhanın piroliz sıvılarının bileşimlerini ve temel özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, piroliz sıvılarının bileşimi gaz kromatografisi kütle spektrometresi (GC-MS) kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca, piroliz sıvılarının nem içeriği, yoğunluk, dioptri, pH ve asitlik gibi temel özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. GC-MS analiz sonuçları, piroliz sıvılarının üre formaldehit (UF) yapıştırıcısından kaynaklanan azot bileşiklerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Ayrıca, piroliz sıvılarının UF yapıştırıcının piroliz bileşiklerinden dolayı zayıf asetikten zayıf alkaliye kadar değişen pH değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, orta yoğunluklu lif levha (MDF) ve Yonga Levha (YL) piroliz sıvıları arasında bazı özellik farklılıklarının olduğu da tespit edilmiştir.

(Feng vd, 2012) çalışmalarında üre formaldehit reçinesinin (UF) atık ahşap esaslı paneller üzerindeki piroliz sürecine olan etkisini incelemiştir. Termobalans deneyleri, TG-FTIR ile ahşap, ahşap esaslı paneller ve UF reçinelerinin ana gaz ürünlerinin evrimini analiz etmek için yapılmıştır. Ayrıca , katı ve sıvı ürünlerin özelliklerini incelemek için elemental ve GC-MS analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, UF reçinesinin ahşap esaslı panellerin düşük sıcaklıklarda bozunma hızını artırdığını,

ancak yüksek sıcaklıklarda bozunmayı engellediğini göstermiştir. UF reçinesinin varlığı, ahşap panellerde nitrik gazların salınımını artırmıştır. UF reçinesi, hidrojen kaybını önemli ölçüde engellemiş ve azotun karbon artığı içinde stabil kalmıştır. UF reçinesinin piroliz sıvıları üzerindeki etkisi, nitrojen bileşikleri ve ketonlar üzerinde odaklanmıştır. Bu etkiler, UF reçinesinin ahşapta bulunan lignin bileşeniyle kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Bu çalışma, atık ahşap esaslı panellerin piroliz ürünlerinin değerlendirilmesine yönelik önemli bilgiler sağlamaktadır.

(Mu vd, 2012) araştırmalarında, atık ahşap tabanlı levhaların pirolizle geri dönüştürülmesi üzerinde çalışmışlardır. Deneylerde, üre formaldehit reçinesi içeriği %6, %9, %12 ve %15 olan yonga levhalar kullanılmıştır. Piroliz sıvılarındaki kimyasal bileşenler gaz kromatografisi kütle spektrometresi ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ; Ahşap tabanlı levhaların piroliz sıvıları, katı ahşaptan farklı olarak daha alkali özelliktedir. Ahşap tabanlı levhaların piroliz sıvıları, katı ahşapların piroliz sıvılarından önemli ölçüde farklı kimyasal bileşenlere sahiptir, özellikle nitrik bileşikler açısından. Piroliz sıvılarında bulunan üre formaldehit reçinesi bileşenleri, termal işlem sırasında mantarların piroliz sıvılarına karşı güçlü bir engelleme etkisine katkıda bulunmuştur. Bu nedenle, piroliz sıvıları, ahşap korumasında kullanılabilir. Sonuç olarak, pirolizle elde edilen ahşap tabanlı levha piroliz sıvıları, ahşap koruma uygulamalarında potansiyel olarak değerlendirilebilecek önemli bir kaynaktır.

(Lemonon vd, 2014) araştırmalarında, ahşap lamine zemin kaplamasının dekontaminasyonunun optimizasyonu için azot içeren malzemedan azotun uzaklaştırılması üzerine odaklanmışlardır. Farklı sıcaklık ve sürelerde N₂ atmosferinde gerçekleştirilen piroliz sonucunda, malzemede bulunan azotun çoğunlukla amonyak (NH₃) ve izosiyanik asit (HNCO) olarak uzaklaştırıldığı belirlenmiştir. Optimizasyon adımı, en iyi sonuç için uygun [sıcaklık, süre] kombinasyonu belirlenmiştir. 548 K'da 11 dakika süren ön işlem, %65 oranında azotun uzaklaştırıldığı ve kütle kaybının %18.7, enerji kaybının ise %8.9 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışma, azot içeren biyokütlenin atık-enerji dönüşüm sürecinin ilk aşamasını ele alarak, ahşap malzemelerden enerji geri kazanımı için önemli bir adım sunmaktadır.

(Chen vd, 2015) çalışmalarında üre formaldehit (UF) yapıştırıcısı ile üretilmiş orta yoğunluklu lif levha (MDF)'nin piroliz davranışının, geleneksel biyokütlelerden farklılığını araştırmıştır. MDF'nin bozunma hızı, ahşaba göre daha yüksek olup bu durum, UF reçinesinin etkisiyle ilişkilendirilebilir. UF reçinesinin MDF piroliz süreci üzerindeki etkisinin öncelikle HNCO'nun toplam salınım miktarı üzerinde olduğu gözlemlenmiş , MDF'nin piroliz sıvıları, UF reçinesinden transfer edilen nitrik bileşiklerden büyük ölçüde etkilenmiştir. Ahşap liflerine kıyasla, MDF daha fazla nitrik bileşiği (özellikle piridin ve pirrol gibi döngüsel bileşikler) katı üründe üretmiştir ve nitrik gazlar ağırlıklı olarak ikinci aşamada olduğundan, bu gazların oluşumunu azaltmak ve uygulama değerlerini iyileştirmek için sıvı veya katı ürünlere daha fazla N transferi yapmak için hedeflenen piroliz koşulları bu aşamada ayarlanması gerektiği bulunmuştur.

(Ferreira vd, 2015) çalışmalarında, orta yoğunluklu lif levha (MDF) atıklarını, piroliz süreciyle termal işleme tabi tutmuşlardır. Piroliz, iki farklı reaksiyon sıcaklığında (450 ve 600 C) ve üç farklı katı kalış süresinde (9 , 15 ve 34 dk) gerçekleştirilmiştir. Piroliz ürünleri karbon (%17.3 - %39.7) , bio-yağ (%23.9 - %40.0) , yakıt gazı(%34.6 - %50.7) aralıklarında karakterize edilmiş ve miktarları belirlenmiştir. Sonuçlar, ürün verimlerinin piroliz sıcaklığı ve kalış süresine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Karbon, bio-yağ ve yakıt gazı verimleri belirlenen aralıklarda bulunmuştur. Ayrıca, MDF pirolizden elde edilen biyoçarın yüzey alanı açısından ticari aktif karbonlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, biyorefineri kavramını destekleyen bir pilot reaktörde vidalı konveyörle MDF pirolizinin detaylı bir şekilde incelendiği bir çalışmanın geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

(Zhang vd, 2016) çalışmalarında, ahşap atıklarında bulunan üre-formaldehit reçine (UF) yapıştırıcısının termal bozunma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmada, yonga levha (ahşap atık ve UF reçinesi karışımı) ve bu levhanın ana bileşenleri olan kavak ağacı ve UF reçinesinin piroliz süreçleri ve ürün özellikleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yonga levhanın, kavak ağacı ve UF reçinesine kıyasla daha fazla kömür ve daha az uçucu madde ürettiğini göstermiştir. Yonga levhanın ana piroliz aşamasındaki aktivasyon enerjisi, kavak ağacınınin altında bulunmuştur. Kavak ağacının ve yonga levhanın aktivasyon enerjileri 140-200 kJ mol⁻¹ aralığında iken, UF reçinesinin aktivasyon enerjisi 150-300 kJ mol⁻¹

arasındadır. Kavak ağacının piroliz sürecinde, CH₄, CO ve CO₂ gibi uçucu gaz ürünleri tespit edilmiştir. UF reçinesinin pirolizinde ise N bileşikleri ana uçucu ürünler olarak belirlenmiştir. Ayrıca, yonga levhanın N bileşenlerinin büyük bir kısmının UF reçinesi tarafından üretildiği görülmüştür. UF reçinesinin yonga levhanın piroliz sıvısındaki etkisi, özellikle azotlu bileşikler üzerindedir. Yonga levhanın piroliz sıvısında daha fazla azotlu bileşik tespit edilmiş ve azotlu bileşiklerin miktarı, kavak ağacının piroliz sıvısına kıyasla %23.40 daha fazla bulunmuştur. Bu sonuçlar, UF yapıştırıcının ahşap atıklarının piroliz sürecine önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, atık ahşap kaynaklarının temiz ve etkin bir şekilde termal kullanımı için önemli bir kılavuz sağlayabilir.

(Mu and Lai vd, 2017) çalışmalarında, içerisinde üre formaldehit (UF) reçinesi bulunan atık ahşap tabanlı levhaların piroliz ürünleri ve dönüşüm mekanizmalarını araştırmışlardır. Araştırmada, termal bozunma reaksiyon kinetiğini incelemek için Termogravimetrik Analiz (TGA) yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, gaz, katı ve sıvı ürünleri incelemek için TGA-FTIR (Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre analizi), XPS (X-ışını fotoelektron spektroskopisi) ve GC-MS (gaz kromatografisi kütle spektrometresi ile eşleştirilmiş analiz) gibi analiz yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen verilere göre ; UF reçinesi, piroliz sürecinde başlangıçta ahşap bileşiklerinin bozunma hızını artırmış, ancak sürecin ilerleyen aşamalarında bu bozunmayı engellemiştir. Ahşap ile karşılaştırıldığında, UF reçinesinin HNCO ve NH₃ salınımı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu belirlenmiştir. UF reçinesi, hidrojen kaybını önemli ölçüde engellemiş ve azot içeriği, karbon miktarı olarak sırasıyla %6.65 ve %7.45 oranında daha stabil hale gelmiştir. UF reçinesinin ahşap bileşiklerin piroliz sıvıları üzerindeki etkisi, özellikle azot bileşikleri ve ketonlar üzerinde etkili olmuş, aldehitler ve esterler üzerindeki etkisi daha az olmuştur. Bu durum, UF reçinesinin ahşaptaki lignin bileşeni ile kimyasal reaksiyonlarından kaynaklanabilir. Sonuç olarak, çalışma, UF reçinesi içeren ahşap tabanlı levhaların piroliz sürecini ve ürünlerini anlamak için çeşitli analiz yöntemlerinin kullanılabilirliğini ve UF reçinesinin piroliz sıvılarındaki bileşenleri ve dönüşüm mekanizmasını etkilediğini ortaya koymuştur.

(Lai vd, 2018) araştırmalarında, ahşap tabanlı levhaların enerji geri kazanımı için kullanabileceği belirtmişlerdir. Levhaların piroliz sürecini incelemek için %10

oranında üre formaldehit (UF) reçinesi ile karıştırılmış ahşap bileşenleri (selüloz , hemiselüloz , lignin) termogravimetrik analiz (TGA) , gaz kromatografisi kütle spektrometresi (GC-MS) ve nihai analiz ile incelenmiştir.Elde edilen sonuçlara göre ;UF reçinesi selülozun ayrışma hızını azaltmış ve ligninin termal ayrışmasını teşvik etmiştir. Ancak ksilan üzerinde pek az etkisi vardır.UF reçinesi, C ve O kaybını etkilemiştir. Ligninde her iki elementin kaybı teşvik edilirken, selülozda yalnızca C kaybı artmıştır. Piroliz sırasında oluşan nitrik gazlar HCN ve NH₃ olarak tespit edilmiş ve UF reçinesinden gelen N maddesi NH₃'e dönüşmüştür.UF reçinesinin piroliz sıvıları üzerindeki etkisi özellikle N bileşikleri üzerinde görülmüştür. UF reçinesi eklenmesiyle, piroliz sıvılarında daha fazla nitrojenli bileşik tespit edilmiştir. Selülozdan elde edilen piroliz sıvılarında nitrojenli bileşiklerin göreceli içeriği %12.8 iken, ligninden elde edilen piroliz sıvılarında bu oran %64.3 olarak belirlenmiştir.

(Martins Mayer vd., 2018) araştırmalarında, dünya genelinde yüksek miktarda üretilen MDF atıklarının düşük değerli uygulamaları, bertarafı ve toksik etkisi nedeniyle bir endişe kaynağı olduğu belirtmişlerdir. MDF atıklarının katalitik ve termal hızlı piroliz yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir.Katalitik pirolizde kullanılan HZSM-5S katalizörü, 5 farklı metal ile emprenye edilmiş olarak kullanılmıştır (Co₅S, Fe₅S, Nb₅S, Ni₅S ve Zn₅S). Tüm katalizörler, piroliz ürünlerindeki monoaromatik hidrokarbonların (MAH) yüzdesini %23.77 ile %47.61 arasında artırmıştır ve poliaromatik hidrokarbonların (PAH) yüzdesini ise %0.66 ile %5.07 arasında artırmıştır. Termal pirolizlerde, 4 farklı MDF atığı kullanılmış ve bu atıklarda monoaromatik hidrokarbonlar ve poliaromatik hidrokarbonlar tespit edilmemiştir. Katalizörlerin performansı incelendiğinde, Ni₅S katalizörünün HZSM-5S'ye kıyasla BTX (benzen, toluen, ksilen) bileşiklerinin seçiciliğini en çok arttırdığı (%26.22-37.90) ve Fe₅S katalizörünün de bu seçiciliği önemli ölçüde artırdığı (%31.40) belirlenmiştir. Co₅S ve Nb₅S katalizörlerinin performansı ise HZSM-5S ile benzer olmuş, Zn₅S katalizörü ise daha düşük MAH içeriği (%23.77) sağlamıştır. Sonuç olarak, katalitik pirolizle yapılan işlemler, biyo-yağın yakıt benzeri bileşimlere dönüştüğünü göstermiştir, ancak termal pirolizlerde elde edilen ürünler genellikle farklı amaçlar için kullanılabilir oksijenli bileşiklerdir.

(Haeldermans vd, 2019) çalışmalarında, MDF'nin mikrodalga destekli piroliz (MDP) ve geleneksel piroliz (GPS) ile elde edilen biyoçarın özelliklerini incelemişlerdir.

Araştırmada, farklı mikrodalga emicilerin aktif karbon (AC) ve Potasyum karbonatın (K_2CO_3) MWP 'de farklı mikrodalga güçleri ve CPS de farklı sıcaklıkların biyoçar özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirilmiştir. Elde edilen biyoçar'ların morfolojisi ve kimyasal özellikleri çeşitli analizlerle incelenmiştir. Yapılan analizler arasında biyoçar verimi, nihai analiz, biyoçar stabilite testi, FTIR spektroskopisi ve katı hal ^{13}C CP/MAS NMR spektroskopisi bulunmaktadır. Sonuçlar, farklı işlem koşullarının biyoçar özellikleri üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Örneğin, artan mikrodalga gücü (MDA kullanılmadan) daha yüksek bir aromatiklik derecesine yol açmıştır. Düşük mikrodalga gücü (300 W) ile artan miktarda AC eklenmesi, daha yüksek piroliz sıcaklıklarına ve daha aromatik biyoçar'ların elde edilmesine neden olmuştur. 400 W'da ise, 300 W'a göre daha açık bir yüzeye sahip daha aromatik bir biyoçar elde edilmiştir. Mikrodalga gücü 400 W'de, artan AC miktarı (MDA olarak kullanılarak) düşük piroliz sıcaklığına, artan biyoçar verimlerine ve azalan aromatiklik derecesine neden olmuştur. K_2CO_3 , AC kullanıldığında daha düşük mikrodalga gücünde daha etkili olmuş ve daha aromatik biyoçar üretimi sağlamıştır. Genel olarak, MDP, CPS'ye göre daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek derecede aromatik bir biyoçar vermiştir. Bu çalışma, MDF'nin değerli bir biyoçar'a dönüştürülmesi için hem CPS hem de MDP'nin uygun seçenekler olduğunu göstermektedir.

(Guo vd, 2022) çalışmalarında, atık odun bazlı paneller gibi azot açısından zengin biyokütlelerin NO_x emisyonunun neden olduğu çevresel zararları azaltmak amacıyla, ko-piroliz yöntemiyle azotun kömürlerde sabitlenmesini araştırmaktadır. Bu amaçla, glukoz, etil maltol ve 2,5-dimetil-4-hidroksi-3(2H)-furanon (DMHF) bileşiklerinin üre-formaldehit reçine yapıştırıcısı (UF) pirolizindeki azot göçü ve dönüşümü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Termal analiz sonuçları, etil maltol ve DMHF'nin daha düşük termal stabiliteye sahip olduğunu ve piroliz sürecinin 90-168°C aralığında gerçekleştiğini göstermiştir. Model bileşiklerin UF ile birlikte pirolizinde azot tutulumu artmış ve farklı N-fonksiyonel gruplarının dağılımı gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, atık odun bazlı panellerden kaynaklanan azot emisyonlarını azaltmaya ve yüksek katma değerli azotlu karbon malzemelerinin hazırlanmasına yönelik temel sağlamaktadır.

(Zhan vd, 2019) çalışmalarında, atık odun bazlı panellerin (AOBP'ler) seçici piroliz yoluyla verimli ve temiz bir şekilde kaynak olarak kullanılması potansiyelini araştırmışlardır. Dünya genelinde ve özellikle Çin'de büyük miktarda üretilen AOBP'ler, tipik endüstriyel biyo-atıklardır. Bu atıkların verimli bir şekilde değerlendirilmesi, çevresel açıdan önemlidir ve kaynakların sürdürülebilir kullanımına katkıda bulunabilir. Çalışma, AOBPL'lerin piroliz süreci ile ilgili mekanizmaları, oluşum karakteristiklerini ve piroliz ürünlerinin özelliklerini kapsamlı bir şekilde inceleyerek bu potansiyeli ortaya koymaktadır. AOBP'ler, lignoselülozik bileşenler ve üre-formaldehit reçinelerinin birleşimiyle özellikle yakıt kalitesi ve yakıt-N içeriği açısından çift karakteristik gösterir. Araştırma, AOBP'lerin piroliz sürecinin, oksijensiz termal koşullar altında lignoselülozik bileşenler ile reçinelerin etkileşimiyle gerçekleştiğini vurgulayarak, özellikle N içeren bileşikler açısından farklı özelliklere sahip piroliz ürünleri oluştuğunu belirtmektedir. Bu süreçte ortaya çıkan pirolitik gazlar çevresel açıdan zararlıdır, ancak piroliz sıcaklığına bağlı olarak seçici olarak oluşurlar. Çalışma aynı zamanda, termal ön işleme AOBP'lerdeki yakıt-N'yi düzenleyerek veya azaltarak bu atıkların temiz termal kullanımını desteklemenin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle, AOBP'lerin piroliz ürünlerindeki N içeren türlerin değerli ve ekonomik kullanım potansiyeli olduğu belirtilmiştir. Bio-yağdaki azot bileşikleri antibakteriyel / fungisidal ve yüksek katma değerli özelliklere sahipken, aktive edilmiş karbondaki azot fonksiyonelliği daha iyi adsorpsiyon ve elektrokimyasal performans sağlayabilir. Bu çalışma, atık ahşap tabanlı panellerin çevresel etkilerini azaltmak ve değerli ürünler elde etmek için seçici pirolizin potansiyelini vurgulayarak, temiz ve verimli kaynak kullanımına yönelik yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

(Mutsengerere vd, 2019) yaptıkları derleme çalışmasında, fosil yakıtların azalması ve çevresel kaygılar nedeniyle alternatif sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı vurgulamaktadırlar. Mikrodalga destekli piroliz (MDP) yöntemi, biyo-yakıt ve değerli kimyasalların üretimi için umut verici bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Araştırma, MDP verimini etkileyen ana parametreleri ve bu parametreleri en yüksek biyo-yakıt üretimi için optimize etme seçeneklerini incelemektedir. Sonuçlar, piroliz sıcaklığı, mikrodalga gücü, mikrodalga emici tipi ve kataliz gibi faktörlerin biyo-yakıt verimini büyük ölçüde etkilediğini

göstermektedir. Diğer faktörler, piroliz süresi, hammaddenin parçacık boyutu, purging gazının türü ve debisi gibi etkileri daha az belirgin olan unsurlardır. MDP yöntemi, büyük ölçekte uygulanabilir ve çeşitli çevresel faydalar sağlamaktadır. Ancak, biyo-yakıt verimini optimize etmek için değişkenler arasındaki etkileşimleri daha detaylı olarak anlamak önemlidir. Bu derlemede, gelecekte pilot ölçekli MDP reaktörlerinin tasarımı, simülasyonu, üretimi ve işletilmesi ile ilgili araştırmalara rehberlik edebilecek önemli bilgiler sunmaktadır. Biyo-yakıt üretimi için teknolojinin ekonomik uygulanabilirliğini belirlemek için optimize edilmiş pilot ölçekli MDP sisteminin geliştirilmesi önerilmektedir.

(Yaman & Sinoplugil, 2019) çalışmaları, atık emprenye kağıdının piroliz sürecini inceleyen bir ön çalışmadır. Çalışmanın amacı, atık emprenye kağıdının piroliz yöntemiyle işlenip, ürünlerin miktarını ve enerji potansiyelini anlamak veya öngörmek için ilk adımları atmak ve bu konudaki sorulara cevaplar bulmaktır. Çalışma kapsamında yapılan deneyler, atık emprenye kağıdının pirolizinin mümkün olduğunu göstermiştir. Piroliz süreci sonucunda katı, sıvı ve gaz ürünleri elde edilmiştir. Sıvı ürünlerin elde edildiği sıcaklıklarda önemli ısısız değerlere ulaşılmıştır. Ayrıca, yapılan analizler sonucunda piroliz sıvılarında izosiyanat vb. bileşiklere rastlanmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, piroliz sıvılarının çevresel etkiler açısından daha kullanılabilir olabileceğini göstermektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla sıvı ürün verimi ve daha yüksek ısısız yakıt değerleri beklenirken, UF-MF reçineli kağıdın pirolizinde alkali ortamda oluşan glikozil gruplarının yüksek sıcaklıklarda küçük yapıların parçalanmasını engelleyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Sonuç olarak, atık emprenye kağıdının piroliz sonuçları, gelecekte enerji ve çevresel güvenlik açısından uygun koşulların araştırılması ile verimli sonuçlar sunabilecek potansiyeli olduğunu göstermektedir.

(Rasstegaev vd, 2020) çalışmasında formaldehit içeren katı atıkların orta sıcaklıkta, oksidasyon olmaksızın piroliz teknolojisini yonga levha atığı örneği kullanılarak incelemiştir. Çalışma sürecinde, yonga levha atığının nem içeriği ve piroliz odasının ön ısıtma sıcaklığı sırasıyla %5 ila %35 ve 400 ila 700°C aralıklarında değiştirilmiştir. Piroliz odasının en uygun ön ısıtma sıcaklığının 550°C ile 600 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. 600°C'nin üzerindeki sıcaklıkların, formaldehit içeren yonga levha atığının piroliz sürecinin süresinde önemli bir azalmaya neden

olmadığı ve 550°C'nin altındaki sıcaklıkların ise piroliz sürecinin süresini önemli ölçüde artırdığı bulunmuştur. Ayrıca, yonga levha atığının nem içeriğinin piroliz süresi üzerinde büyük bir etkisi olduğu gösterilmiştir; atık nem içeriği %15'ten fazla olduğunda, toplam piroliz süresi önemli ölçüde artmaktadır.

(Zazycki vd, 2020) çalışmalarında, orta yoğunluklu lif levha (MDF) atıkları, renkli atık sularından Food Red 17 (FR17) boyasını gidermeye yetenekli verimli bir kömür haline dönüştürmeyi amaçlamışlardır. Piroliz sürecinin verimi, kömür açısından %29 olarak gerçekleşmiştir. Üretilen kömür mikro ve mezo gözenekli yapıdadır, yüzey alanı 218.8 m²/g ve toplam gözenek hacmi 0.122 cm³/g olarak belirlenmiştir. FR17 adsorpsiyonu ile ilgili olarak, pH 2 ve 0.5 g/L kömür kullanımında %90'luk giderim oranları bulunmuştur. Pseudo-first ve pseudo-second order modelleri, adsorpsiyon kinetik profili için uygun bulunmuş, denge 20 dakika içinde sağlanmıştır. Denge verilerini temsil etmek için Freundlich modeli seçilmiştir. Maksimum adsorpsiyon kapasitesi 210 mg/g olarak belirlenmiştir. FR17'nin kömür üzerindeki adsorpsiyonu, endotermik ve fiziksel niteliktedir. Kömür, 8 adsorpsiyon-deadsorpsiyon döngüsü için etkili olmuş ve aynı adsorpsiyon kapasitesini korumuştur. Özetle, bu çalışma, daha temiz bir üretim açısından faydalı bir uygulama göstermiştir. MDF atıklarına değer eklemek ve FR17 boyasını içeren renkli atık suları tedavi etmek için etkili ve tekrar kullanılabilir bir adsorban elde etmek mümkün olmuştur.

(Xu vd, 2021) çalışmalarında odun bazlı panellerin (OBP'ler) pirolizi sırasında nitrojenin göç ve dönüşümünü anlamak, potansiyel olarak N içeren bileşikleri değerli malzeme tabanlı ürünlere dönüştürme açısından temel öneme sahip olduğunu vurgulamışlardır. Bu araştırmada öncelikle OBP pirolizi sırasında N evrimini incelemek için yaygın olarak kullanılan yöntemleri özetlemekte ve ardından odun ve yapıştırıcılar arasındaki ilişkiye odaklanmıştır. Odun-yapıştırıcı etkileşiminin piroliz süreci üzerindeki potansiyel etkileri daha sonra analiz edilmektedir. Ayrıca, yapıştırıcıların odun piroliz davranışı üzerindeki etkisine dair literatürdeki tartışmalı ifadeler ele alınmakta ve son zamanlarda yapılan çalışmalarda OBP pirolizi sırasında gaz, sıvı ve kömürdeki N içeren bileşiklerin dağılımı ve evrimi detaylı bir şekilde incelenmektedir. Isıtma kaynaklarından (örneğin elektrikli ısıtma ve mikrodalga ısıtma) kaynaklanan N türündeki farklılıklar özellikle karşılaştırılmaktadır. Son olarak, aşamalı piroliz, ko-piroliz ve katalitik piroliz özelliklerine dayanarak OBP'ler

için dönüşüm yolları, değerli kimyasalların ve karbon malzemelerin üretimi ve aynı zamanda NOx emisyonlarının azaltılmasına vurgu yaparak önerilmektedir.

(Yong vd, 2022) araştırmalarında odun bazlı panellerin (OBP), izosiyanat yapıştırıcı ile bağlanmış olanlarının mikrodalga destekli pirolizi (MDP) işlemini tekrar kullanım için teorik bir temel sağlamak amacıyla incelemişlerdir. İzosiyanat gibi bağlama maddeleri içeren ahşap tabanlı paneller genellikle geri dönüşümü zor olan malzemelerdir ve çevresel açıdan atık sorununa neden olabilirler. OBP'lerin pirolizi, inert bir atmosfer altında 600 °C'de 1000 W mikrodalga gücü ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, izosiyanat yapıştırıcı ve odunun ayrı ayrı pirolizinden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Hem termogravimetrik çalışma hem de piroliz deneyinde, iki ham madde arasında önemli sinerjistik etkiler bulunmuş ve biyoyakıt (%54 ağırlık) ve biyokömür (%27 ağırlık) üretimi teşvik edilmiştir. Gaz kromatografi / kütle spektrometresi (GC-MS) ve taramalı elektron mikroskobu / elektron dağılım spektroskopisi (SEM-EDS) sonuçları, izosiyanat yapıştırıcı eklenerek, OBP 'lerin piroliz ürünlerine dışsal azot kaynağının tanıtıldığını ve böylece N ile zenginleştirilmiş biyoyakıt ve N ile döşenmiş biyokömür elde edildiğini göstermiştir. OBP'lerin MDP ile elde edilen biyoyakıtı, oksijen içeren bileşikler (%69.61, fenoller ana ürünler olarak bulunmuştur) ve azot içeren bileşikler (%30.01, amin-N ana bileşeni oluşturmuştur) açısından zengindir, bu da antibakteriyel ajan ve toprak gübrelenmesi gibi yüksek katma değerli uygulamalarda büyük potansiyele sahiptir. OBP'lerden elde edilen biyokömür, gözenekli bir yapıya ve yüzeyde bol miktarda nitrojen fonksiyonelliğine sahiptir, bu da daha kolay aktive edilebilen bir süreçle daha iyi adsorpsiyon kapasitesi ve elektrokimyasal performans sunması beklenmektedir. Çalışmanın sonuçlarına göre, MDP'nin OBP'lerin pirolizi için avantajlı olduğu ve biyoyakıt ve biyokömür üretimini teşvik ettiği görülmüştür. Ayrıca, izosiyanat yapıştırıcının eklenmesiyle elde edilen piroliz ürünlerinin nitrojen içeriğinin arttığı belirlenmiştir. Bu da elde edilen biyoyakıt ve biyokömürün potansiyel uygulamalarında çeşitlilik sağlayabileceği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, OBP'lerin ve izosiyanat yapıştırıcının mikrodalga destekli piroliz ile geri dönüşüm potansiyelinin ortaya konulmasına ve bu tür atıkların yeniden kullanımı için bir teorik temel oluşturmaya yönelik bir araştırma olarak değerlendirilebilir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. DENEYLERDE KULLANILAN HAMMADDE

Bu çalışmada biyokütle olarak OEK'lerin önemli bir sınıfı olan Yonga levha (YL) kullanılmıştır. Kullanılan yonga levha Kastamonu Entegre A.Ş. Türkiye'den temin edilmiştir. Test yonga levhalar, farklı oranlarda çam, meşe ve kavak odun türlerinin karışımından oluşmaktadır. Bu karışım, malzemenin dayanıklılığı ve şekillendirilebilirliğini arttırmak için dengeli bir oranda gerçekleştirilmiştir. Malzeme de kullanılan yapıştırıcı amino reçinesi Üre formaldehittir (ÜF). Yapıştırıcı oranı %11 dir. Yonga levhanın yoğunluğu 700 kg / cm^3 tür.

Temin edilen 2 cm kalınlığında 50x50cm boyutundaki yonga levha örnekleri 1mm boyutunda öğütülmüş ve ardından tam kuru nem içeriğine getirilmesi amacıyla $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ de etüvde kurutulmuştur. Ardından bu biyokütle deney anına kadar rutubdmasını önlemek amacıyla desikatörde bekletilmiştir.

4.2. DENEYLERDE KULLANILAN MİKRODALGA ABSORBENT VE KATALİZÖR

Bu çalışmada, piroliz için gereken yüksek sıcaklığa ulaşmak için mikrodalga absorbent (MDA) olarak Silisyum Karbür (SiC) kullanılmıştır. Kullanılan SiC 'ün özellikleri şu şekildedir: partikül boyutu: 400 mesh, CAS number :409-21-2 , moleküler ağırlığı: 40.1 g/mol dür.

Çalışmada katalizör olarak Magnezyum Klorür (MgCl_2) kullanılmıştır ve özellikleri şu şekildedir: anhydrous (su içermeyen) $\geq 98\%$ saflıkta, partikül boyutu: $\leq 0.5\text{mm}$, CAS number : 7786-30-3 , molekül ağırlığı: 95.21 g/mol dür.

4.3.DENEY SİSTEMİ VE HAMMADDE PİROLİZİ

MDP deney sistemi modifiye mikrodalga fırın, kuvars reaktör, N₂ kaynağı ve buzlu su karışımı ile soğutulan piroliz yağı toplayıcılarından oluşmaktadır. Modifiye deney sistemi Şekil 1 de verilmiştir. Bu sistemde, 2.45 GHz'de çalışan, maksimum mikrodalga çıkış gücü 1800 W olan modifiye edilmiş bir mikrodalga fırın, 500 ml hacime sahip kuvars reaktör ve kuvars adaptör kullanılmıştır. Reaktör, biyokütlenin yerleştirildiği ve yüksek sıcaklıklarda bozundurulduğu; kuvars adaptör, oluşan gazların mikrodalga sistemden yoğunlaştırıcı sisteme aktarılmasını sağlayan sistemin önemli parçalarıdır. Sistemin diğer unsurları özel tasarlanmış borosilikat cam malzemelerdir. Reaktör içindeki gazlar aynı çapa sahip bu borosilikat borular ile sistem içerisinden alınmıştır. Cihazın içerisindeki oksijenin giderilmesi ve oluşan gazın taşınması için azot gazı kullanılmıştır.

Biyokütle ağırlığı tüm deneylerde 20 g olarak kullanılmıştır. Atık biyokütle, piroliz için gerekli olan yüksek sıcaklığa ulaşmak için bir mikrodalga absorbent (burada SiC veya MgCl₂ veya SiC + MgCl₂) ile karıştırılmıştır. Atık biyokütle (20 g) ağırlıkça %30, %40 ve %50 MDA ilave edilmiştir. SiC ve MgCl₂ arasındaki sinerjistik etkileri araştırmak için farklı SiC / MgCl₂ kombinasyonları atık biyokütle ile karıştırılmıştır. Deneyler sırasında N₂ gazı kullanılarak inert bir ortam sağlanmıştır. Tez deney deseni tablo 1 de verilmiştir.

Deneyin başlangıcında, yuvarlak tabanlı bir kuvars reaktöre konulan önceden karıştırılmış her bir kombinasyon numunesi, mikrodalga sistemine yerleştirilmiştir. Daha sonra mikrodalga fırın çalıştırılmadan önce sisteme 15 dk süre ile 20 ml/dk akış hızında N₂ gazı verilerek kuvars reaktörden geçirilmiştir. Ardından biyokütle ısıtması sırasında salınan uçucu bileşiklerin transferine de yardımcı olması için aynı hızda N₂ gazı akışına devam edilerek mikrodalga fırın çalıştırılmıştır. Kuvars reaktör 1800 W'ta toplam 30 dakika ısıtılmıştır. Aşırı hızlı ısınmayı önlemek için, her 60 saniyede bir mikrodalgaya maruz kalmanın ardından 30 saniye bekletme yapılmıştır. Her deneyin sonunda, mikrodalga fırın kapatıldı ve katı kısım (biyoçar) reaktörden çıkarılmadan önce biyoçar yaklaşık 25 °C'ye soğuyana kadar N₂ akışına devam edilmiştir. Deney sonlarında yoğunlaşabilen buharlar sıvı ürün olarak toplama şişelerinde birikirken

yoğunlaşamayan gaz ürünler ise atmosfere gönderilmiştir. Reaktör içerisinde ise çar adı da verilen katı ürün oluşmuştur. Deneyler 3 kez tekrarlanmıştır.

Ürün verimlerini tahmin etmek için kütle dengesi hesaplamaları yapılmıştır (Formül 1-3).

$$[(\text{Biyocha} - (\text{SiC} + \text{MgCL}_2))] / \text{Biyokütle}] \times 100 = \text{Biyocha verimi (\%)} \quad \text{Formül 1}$$

$$(\text{Biyoyağ} / \text{Biyokütle}) \times 100 = \text{Biyoyağ verimi (\%)} \quad \text{Formül 2}$$

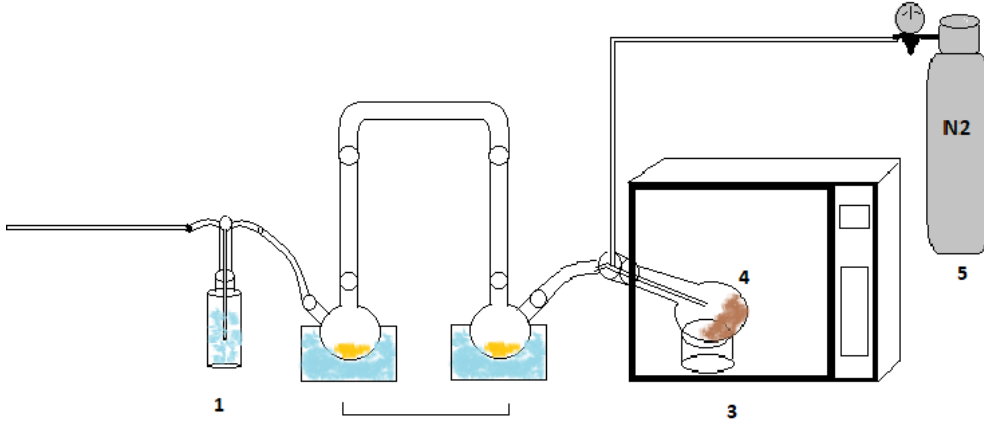
$$\% \text{Biyogaz} = 100 - (\% \text{Biyoyağ} + \% \text{Biyocha}) \quad \text{Formül 3}$$

Formülde,

Biyocha: Reaktörde kalan katı ürün miktarı (g), SiC: Absorbent miktarı (g), MgCl₂: Katalizör miktarı (g), Biyokütle: YL tozu miktarı (g), Biyoyağ: Toplama şişelerindeki sıvı ürün miktarı(g)

Tablo 1. Deney deseni

Örnek Kodu	Biyokütle ağırlığı (g)	SiC ağırlığı (g)	MgCl₂ ağırlığı (g)	MW Gücü (W)	Toplam MW maruz kalma süresi (dk)	MW uygulama Süresi (dk)	MW periyotları arası bekleme süresi (sn)	Deney öncesi N₂ akış süresi (dk)	Deney sonrası N₂ Akış süresi (dk)
SiC:MgCl₂ (10:0)	20	10	0	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (9:1)	20	9	1	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (8:2)	20	8	2	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (7:3)	20	7	3	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (6:4)	20	6	4	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (5:5)	20	5	5	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (2:8)	20	2	8	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (0:10)	20	0	10	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (8:0)	20	8	0	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (7:1)	20	7	1	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (6:2)	20	6	2	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (5:3)	20	5	3	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (4:4)	20	4	4	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (2:6)	20	2	6	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (0:8)	20	0	8	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (6:0)	20	6	0	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (5:1)	20	5	1	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (4:2)	20	4	2	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (3:3)	20	3	3	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (1:5)	20	1	5	1800	30	1	30	15	2
SiC:MgCl₂ (0:6)	20	0	6	1800	30	1	30	15	2



Şekil 1 . Deney düzeneği ve deneyin yapılışı

1: Gaz yıkama şişesi **2:** Soğutma tankı ve biyoyağ birikme balonları ,
3: Mikrodalga Fırın , **4:** Kuvars Reaktör , **5:** N₂ gazı

Deney sonrası reaktörde kalan katı ürün olduğu gibi hiçbir işlem yapılmadan biyoçar olarak adlandırılıp analiz edilmemiştir. Tüm toplama şişeleri ve diğer ünitelerde biriken biyoyağ ise 50 ml dietileter kullanılarak ekstrakte edildikten sonra analiz edilmiştir.

4.4. PİROLİZ ÜRÜNLERİNE YAPILAN ANALİZLER

4.1.1. Biyoyağların Elementel Analizleri

Piroliz sonrası elde edilen biyoyağların elementel (C, H, N) bileşimleri LECO CHNS 932 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

4.1.2. Biyoyağların Gaz Kromatografisi Kütle Spektrometresi (Gc-MS) Analizleri

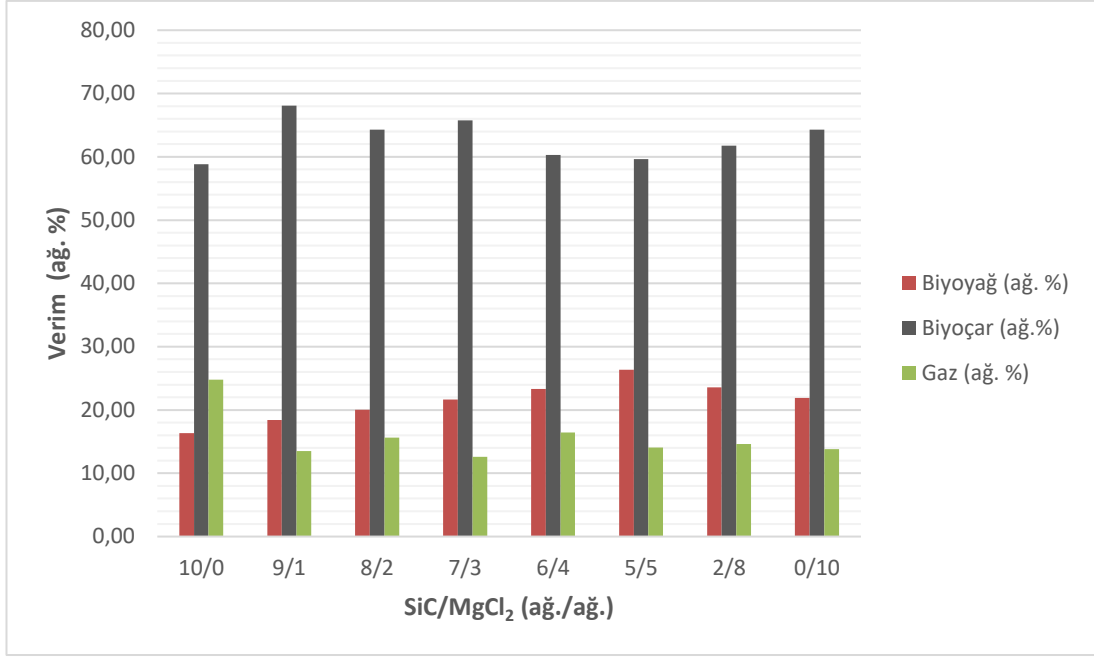
Piroliz işleminden elde edilen biyoyağların içeriğindeki bileşikler tespit edilmesi amacıyla GC-MS analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler Agilent marka GC-MSD-7890B+5977MSD cihaz ve HP5-MS kolonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık programı şu şekildedir: 40°C'de 1 dakika bekledikten sonra 5°C/dk artışla 250°C sıcaklığa çıkarak bu sıcaklıkta 15 dakika beklenmiştir. Daha sonra sıcaklık 5°C/dak artışla 270°C'ye çıkarılarak bu sıcaklıkta 20 dakika beklenmiştir. Analizlerde cihazın NIST (11th ed) +WILEY (9th ed) kütüphanesi kullanılmıştır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. PİROLİZ ÜRÜNLERİNİN VERİMLERİ

Şekil 2’de 1800 W gücünde 30 dakikalık sürede ağırlıkça (ağırlıkça) %50 oranında absorbent kullanılarak yonga levha atıklarının mikrodalga destekli pirolizinden elde edilen ürün verimleri verilmiştir. Tek başına absorbent kullanımından elde edilen biyoyağ verimleri incelendiğinde $MgCl_2$ kullanılan deneydeki biyoyağ veriminin (ağırlıkça %21,90) katalitik etkiye bağlı olarak SiC kullanılan deneyden (ağırlıkça %16,35) fazla olduğu görülmektedir. SiC ile birlikte $MgCl_2$ kullanılan absorbent karışımlarında $MgCl_2$ oranı arttıkça biyoyağ verimlerinde de artış gözlenmiş, en yüksek biyoyağ verimine ise 1:1 oranında kullanımla ulaşılmıştır. Bu noktadan sonraki absorbent karışımlarında $MgCl_2$ oranı yavaş yavaş arttırılmaya devam edildiğinde ancak 2:8 oranında kullanıldığında sonuç alınabilmiştir. Diğer oranlarda ise mikrodalga düzeneğinin aşırı ısınması sonucu deneyler tamamlanamamıştır. SiC: $MgCl_2$ oranı 2:8 olduğunda elde edilen biyoyağ verimi ağırlıkça %23,58’e düşerek test edilen absorbent karışımlarındaki en düşük verim değerine ulaşmıştır.

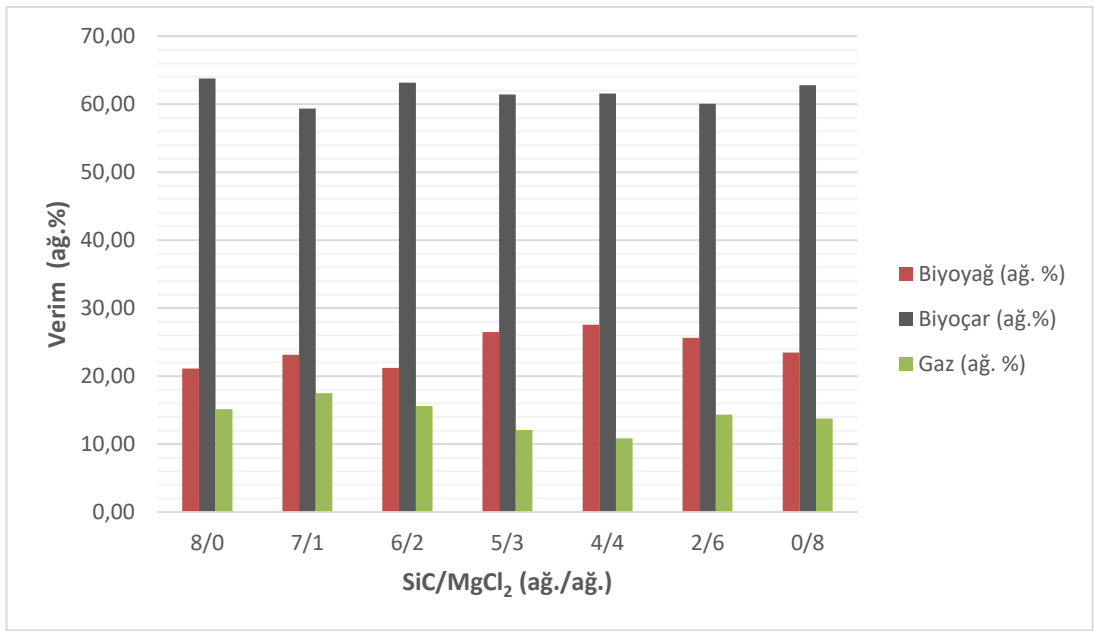


Şekil 2. 1800 W gücünde 30 dakikalık sürede ağırlıkça %50 oranında absorbent kullanılarak yonga levha atıklarının mikrodalga destekli pirolizinden elde edilen ürün verimleri

Deneysel sonuçlarda elde edilen biyoçar verimleri incelendiğinde absorbent karışımı kullanıldığında MgCl₂'ün etkisi, biyoçar veriminin artması yönünde olmuştur. Tek başına MgCl₂ kullanılan deneyden elde edilen biyoçar veriminin (%64,30) tek başına SiC kullanıldığında (%58,85) fazla olması da bu etkiyi destekleyen bir sonuçtur. Absorbent karışımı kullanılan deneylerde ise MgCl₂'ün oranı 9:1'den 5:5'e artırıldığında biyoçar verimi azalmış, buna karşılık daha önce bahsedildiği gibi biyoyağ verimi de artmıştır. Karışımda daha fazla MgCl₂ kullanımı (2:8) biyoçar veriminde 5:5 oranına göre artışa neden olmuştur.

Şekil 3'de 1800 W gücünde 30 dakikalık sürede ağırlıkça %40 oranında absorbent kullanılarak yonga levha atıklarının mikrodalga destekli pirolizinden elde edilen ürün verimleri verilmiştir. Biyoyağ verimlerinde genel olarak %50 oranındakine benzer bir eğilim görülürken birlikte, yalnızca 6:2 oranındaki biyoyağ verimi (%21,22) bir önceki oran olan 7:1'dekinden (%23,15) az olmuştur. MgCl₂ oranında 4:4'e kadar artış biyoyağ veriminde artışa neden olarak maksimum değere (%27,55) ulaşmıştır. %50 oranında absorbentten elde edilen sonuçlara benzer eğilimle bu noktadan sonraki MgCl₂ miktarındaki artış biyoyağ miktarında azalmaya neden olmuştur.

Absorbentlerin %40 oranında tek başlarına kullanıldığı deneylerden elde edilen verimlere bakıldığında, %50 absorbent oranındakine benzer şekilde yalnızca $MgCl_2$ 'den elde edilen biyoyağ verimi (%23,45) yalnızca SiC'den elde edilenden (%21,10) yüksek olmuştur. Bu koşuldaki biyoçar verimleri incelendiğinde yalnızca SiC kullanılan deneyde en yüksek biyoçar verimi (%63,78) elde edilmiştir. SiC'e $MgCl_2$ eklenmesiyle birlikte, her iki absorbentin birlikte kullanımının etkisine bağlı olarak biyoçar verimlerinde azalma meydana gelmiştir. İkinci en yüksek biyoçar verimi (%62,78) ise yalnızca $MgCl_2$ kullanılan deneyden elde edilmiştir.

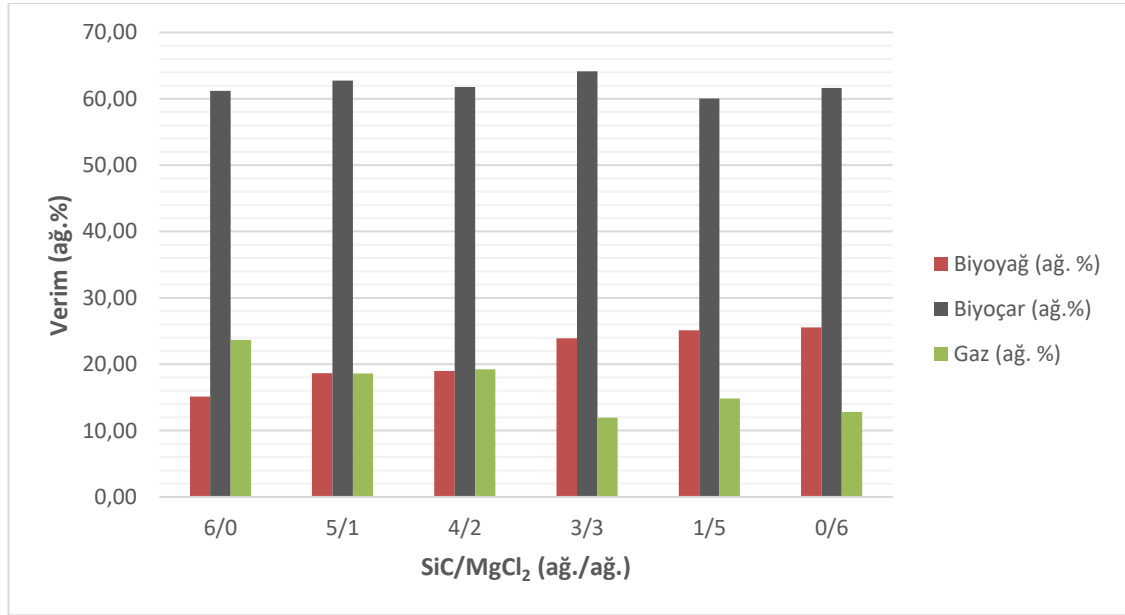


Şekil 3. 1800 W gücünde 30 dakikalık sürede ağırlıkça %40 oranında absorbent kullanılarak yonga levha atıklarının mikrodalga destekli pirolizinden elde edilen ürün verimleri

Mikrodalga destekli pirolizde %40 oranında absorbent ve absorbent karışımları kullanılarak elde edilen biyoçar sonuçları incelendiğinde maksimum biyoçar veriminin yalnızca SiC kullanılan (%63,78) deneyden elde edildiği görülmektedir. SiC'e $MgCl_2$ eklendiğinde ise biyoçar verimlerinde azalma meydana gelmiştir. Absorbent karışımı kullanılması biyoçar oluşumunu azaltıcı etki göstermiştir. Bunun sebebi olarak absorbent karışımının katalitik etki göstererek biyoyağ oluşumuna katkıda bulunarak biyoyağ veriminin artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Absorbent oranı %50 olan deneylerin aksine, %40 oranında absorbent kullanımında

tek başına $MgCl_2$ kullanılmasından elde edilen biyoçar verimi (%62,78) tek başına SiC kullanılan deneyden (%63,78) az olmuştur.

Şekil 4’de 1800 W gücünde 30 dakikalık sürede ağırlıkça %30 oranında absorbent kullanılarak yonga levha atıklarının mikrodalga destekli pirolizinden elde edilen ürün verimleri verilmiştir. Tek başına $MgCl_2$ kullanılan deneyden elde edilen biyoyağ verimi (%25,55) tek başına SiC kullanımından elde edilenden (%15,13) önemli ölçüde yüksek olmuştur. Ayrıca absorbent karışımlarında $MgCl_2$ oranı arttıkça elde edilen biyoyağ verimlerinde düzenli bir artış meydana gelmiştir. Bu artış önceki diğer absorbent oranlarının aksine 3:3 oranından daha yüksek $MgCl_2$ miktarlarında da devam etmiştir. Absorbent karışımlarında maksimum biyoyağ verimi (%25,13) 1:5 oranında SiC: $MgCl_2$ ’ün kullanımından elde edilmiştir. Biyoçar verimlerinin %60,03-64,13 aralığında değiştiği ve en yüksek biyoçar veriminin SiC: $MgCl_2$ oranının 3:3 olduğu deneyden elde edildiği görülmüştür.



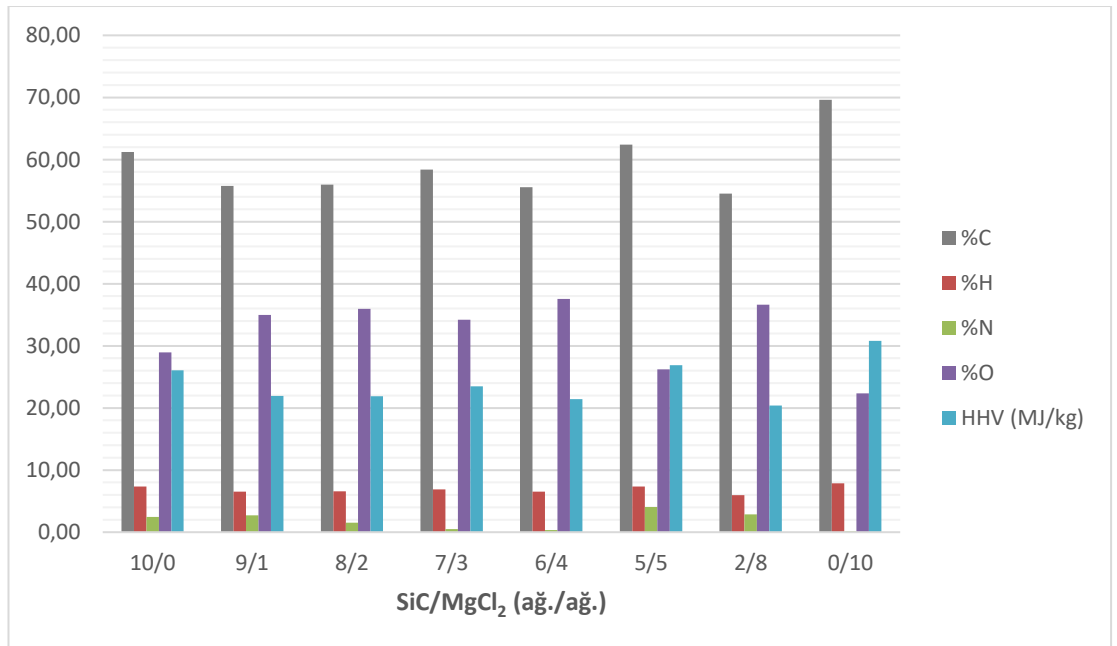
Şekil 4. 1800 W gücünde 30 dakikalık sürede ağırlıkça %30 oranında absorbent kullanılarak yonga levha atıklarının mikrodalga destekli pirolizinden elde edilen ürün verimleri

Farklı absorbent oranlarının (%50-30) kullanılmasından elde edilen verimler karşılaştırıldığında genel olarak %40 oranında absorbent ve absorbent karışımı kullanılan deneylerden elde biyoyağ verimleri diğer oranlardakinden yüksek, biyoçar

verimleri de düşük olmuştur. Tüm deneyler göz önüne alındığında maksimum biyoyağ verimi (%27,55) %40 absorbent karışımı yüklemesinde ve 4:4 oranında SiC:MgCl₂ kullanılmasıyla elde edilirken, bunu takiben aynı koşulda 5:3 oranındaki karışımdan elde edilmiştir. Bunları takiben en yüksek biyoyağ verimi (%26,33) için yine eşit oranda SiC:MgCl₂'ün kullanıldığı %50 absorbent oranında elde edilmiştir.

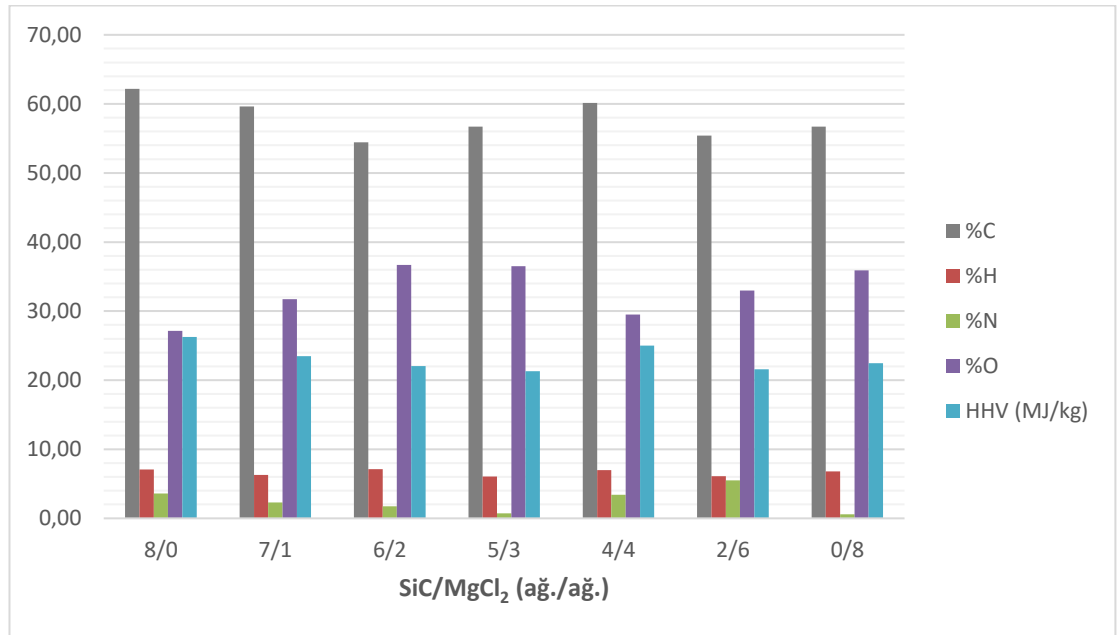
5.2. BİYOYAĞLARIN ELEMENTEL İÇERİKLERİ VE ÜST ISIL DEĞERLERİ

Şekil 5’de %50 absorbent oranındaki deneylerden elde edilen biyoyağların elementel içerikleri ve üst ısıl değerleri verilmiştir. 5:5 Oranına kadar MgCl₂ eklenmesiyle elde edilen biyoyağların üst ısıl değerleri(HHV) , yalnızca SiC kullanılan deneylerden elde edilen üst ısıl değerden önemli ölçüde düşük olmuştur. Ancak SiC:MgCl₂ oranı 5:5 olduğunda üst ısıl değer yalnızca SiC kullanılanıdan daha yüksek olmuştur. Karışımda MgCl₂ oranı daha fazla artırıldıkça üst ısıl değer azalmıştır. Bu absorbent oranında en yüksek ısıl değer (26,89 MJ/kg) yalnızca MgCl₂ kullanılan deneyden elde edilmiştir. Bu da biyoyağ kalitesi bakımından mikrodalga destekli pirolizde MgCl₂ kullanılmasının pozitif katalitik etkisinin bir göstergesidir.



Şekil 5. %50 absorbent oranındaki deneylerden elde edilen biyoyağların elementel içerikleri ve üst ısıl değerleri

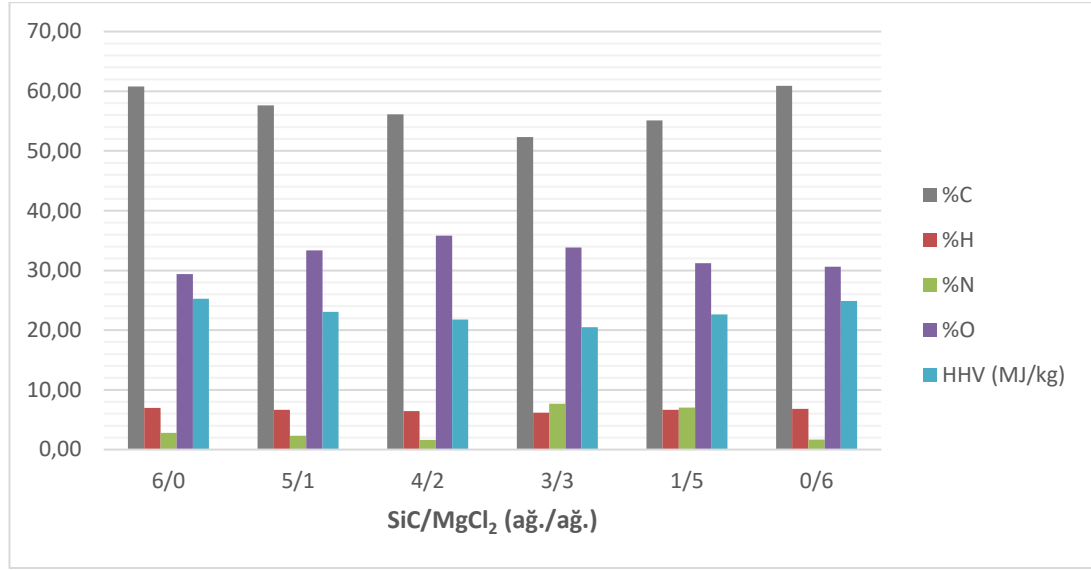
Şekil 6'da %40 absorbent oranındaki deneylerden elde edilen biyoyağların elementel içerikleri ve üst ısıl değerleri verilmiştir. %50 absorbent kullanıldığında sonuçlara benzer şekilde, burada da absorbent karışımındaki biyoyağların üst ısıl değeri SiC:MgCl₂ oranı 4:4 kullanıldığında tek başına SiC kullanılan deneyden elde edilen biyoyağın üst ısıl değerinden düşük olmuştur. Yine %50 oranına benzer şekilde, %40 absorbent oranında da bu noktadan sonra MgCl₂ miktarındaki artış üst ısıl değer nispeten azalmasına neden olmuştur. Tek başına MgCl₂ kullanılan deneydeki biyoyağ üst ısıl değeri 2:6 oranındaki karışımdan nispeten yüksek olsa da, %40 absorbent oranındaki deneyler göz önüne alındığında en yüksek üst ısıl değer 4:4 oranındaki deneyden elde edilmiştir.



Şekil 6. %40 absorbent oranındaki deneylerden elde edilen biyoyağların elementel içerikleri ve üst ısıl değerleri

Şekil 7'de %30 absorbent oranındaki deneylerden elde edilen biyoyağların elementel içerikleri ve üst ısıl değerleri verilmiştir. %30 oranında yalnızca SiC kullanılarak elde edilen biyoyağın karbon içeriği (%60,81) ile yalnızca MgCl₂ kullanılarak elde edilen biyoyağın karbon içeriği (%60,89) birbirine yakın olmuştur; ve bu iki değer de absorbent karışımlarındakinden yüksek değerlerdir. SiC kullanılan biyoyağın üst ısıl değeri (25,26 MJ/kg) ise yalnızca MgCl₂ kullanılmadan elde edilen

biyoyağinkinden (24,87 MJ/kg) bir miktar fazla olmuştur. Absorbent karışımlarında SiC'e MgCl₂ eklenmesiyle MgCl₂ oranının 3:3'e kadar artışıyla beraber biyoyağların hem karbon içeriği hem de üst ısıl değerinde azalma gözlenmiştir. Ancak, bu noktadan sonraki MgCl₂ oranındaki artış üst ısıl değer ve karbon içeriğinde artış eğilimine neden olmuştur.



Şekil 7. %30 absorbent oranındaki deneylerden elde edilen biyoyağların elementel içerikleri ve üst ısıl değerleri

Tablo 2,3 ve 4 'de sırasıyla %50, %40 ve %30 oranında absorbent ve absorbent karışımları kullanılarak mikrodalga destekli piroliz sonrasında elde edilen biyoyağların içeriğindeki tespit edilebilen bileşikler verilmiştir.

Tablo 2. %50 oranında absorbent ve absorbent karışımları kullanılarak mikrodalga destekli piroliz sonrasında elde edilen biyoyağların içeriğindeki tespit edilebilen bileşikler

Alınma süresi	Kalite	Bileşik Adı	ALAN								
			SiC: MgCl ₂ (10:0)	SiC: MgCl ₂ (9:1)	SiC: MgCl ₂ (8:2)	SiC: MgCl ₂ (7:3)	SiC: MgCl ₂ (7:3)	SiC: MgCl ₂ (6:4)	SiC: MgCl ₂ (5:5)	SiC: MgCl ₂ (2:8)	SiC: MgCl ₂ (0:10)
13.752	93	2-Furancarboxaldeh yde, 5-methyl-							3,29		
15.272	93	Phenol (CAS)							2,77		
20.166	95	Phenol, 2-methoxy- (CAS)	1,92					0,18	2,56		

21.686	90	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	0,32									
25.255	97	Creosol	1,17	0,19	0,22	0,22		0,18	1,8			
29.260	94	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	0,99	0,17		0,16						
29.290	94	Benzeneethanol, 2-methoxy-(CAS)		0,17	0,16	0,16		0,15	0,79			
30.871	96	2-Methoxy-4-vinylphenol	0,72									
32.557	97	Phenol, 2,6-dimethoxy-	0,35	0,12				0,13	0,49			
32.768	98	Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)-	0,51	0,12				0,15	0,65			
36.712	98	trans-Isoeugenol	1,74									
39.197	98	Phenol, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-						0,12	0,50			
39.829	90	2,3,5-Trimethoxytoluene	0,56	0,10								
40.025	87	Methyldopa-M					0,24		3,79			
41.365	87	4 - vinyl - syringol	0,42									
42.042	91	propano 3-methoxy-4-hydroxyphenone						0,25	1,08			
46.454	94	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	1,28									
52.807	92	1,4a.beta.-Dimethyl-7-isopropyl-1,2,3,4,4a,9,10,10a.alpha.-octahydrophenanthrene					0,13	0,17	0,64			
53.289	90	5-Methyl-2-phenyl-4,6-diisopropylpyrimidine						0,11				
56.195	99	n-Hexadecanoic acid						0,24	1,24			
56.963	90	Ethylene, 1-[2,3,4-methoxyphenyl]-2-nitro-										0,60
56.978	94	1,4a.beta.-Dimethyl-7-isopropyl-2,3,4,4a,9,10-hexahydrophenanthrene						0,39				
60.606	95	Simonellite					0,12	0,19	0,70			
66.192	98	6-Octadecenoic acid						0,18				
66.328	91	9-Octadecenoic acid, (E)-						0,12	1,38			
66.629	83	2-(5-tert-Butyl-2-hydroxyphenyl)-1,4-benzoquinone						0,10	0,35			

73.735	99	1-Phenanthrenecarboxylic acid, 1,2,3,4,4a,10a-hexahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-methyl)	0,10					0,11	0,44		
73.961	99	1-Phenanthrenecarboxylic acid, 1,2,3,4,4a,9,10,10a-octahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-	0,27					0,14	0,50		0,17

Tablo 3. %40 oranında absorbant ve absorbant karışımları kullanılarak mikrodalga destekli piroliz sonrasında elde edilen biyoyağların içeriğindeki tespit edilebilen bileşikler

Alıkonma Süresi	Kalite	Bileşik Adı	Alan							
			SiC: MgCl ₂ (8:0)	SiC: MgCl ₂ (7:1)	SiC: MgCl ₂ (6:2)	SiC: MgCl ₂ (5:3)	SiC: MgCl ₂ (4:4)	SiC: MgCl ₂ (2:6)	SiC: MgCl ₂ (0:8)	
7.684	90	2-Furancarboxaldehyde				17,07	19.14			
13.767	93	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-			2.05	4.67	10.10			
15.363	93	Phenol			1.00		2,81			
15.513	94	Phenol			0.81	3.12				
20.151	95	Phenol, 2-methoxy-		0.68	1,27	4.58	4.5			
25.255	93	Creosol	0.15	0,41	0,93	2.66	2.18			
29.260	94	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-(CAS)	0.23	0,36	0,60	1.29	0.94			
30.871	96	2-Methoxy-4-vinylphenol	0.20	0.27	0.33					
32.557	95	Phenol, 2,6-dimethoxy-	0.13	0.15	0.55	1,04	0,46			
32.768	95	Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)-	0.18	0.17	0.44	1.06	0.59			
36.682	98	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	0.58	0.96	1.14					
39.197	96	Phenol, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-			0.10	0.17	0.22			
39.814	90	2,3,5-Trimethoxytoluene	0.24	0.14	0.22	0.17				
40.055	91	Methyldopa-M			0.82	2.37	2.69			
41.380	90	2,6-Dimethyl-3-(methoxymethyl)-p-benzoquinone		0.11	0.25					
42.810	96	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	0.10							
46.454	92	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)	0.15	0.18	0.40					
47.703	92	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-			0.12					
52.822	90	8-Isopropyl-6-methoxy-2,5-dimethylnaphthalene-1,4-dione			0.23					
52.807	95	1,4a.beta.-Dimethyl-7-isopropyl-1,2,3,4,4a,9,10,10a.alpha.-octahydrophenanthrene					0,56			
52.822	90	4-Bromo-2,6-diisopropylphenol				0.50				
56.255	99	n-Hexadecanoic acid			0.35	0.65	1.00			

56.466	90	1,4a.beta.-Dimethyl-7-isopropyl-1,2,3,4,4a,9,10,10a.alpha.-octahydrophenanthrene				0,29			
57.490	90	1-[2-(Trimethylsilyl)ethynyl]-3-phenylcyclohexene				0,21			
60.621	90	simonellite			0.20	0.50	0.60		
62.804	97	10,18-Bisnorabieta-5,7,9(10),11,13-pentaene					0,21		
66.282	99	9-Octadecenoic acid, (E)-			0.48	0.68	1,11		
66.614	90	2-Ethyl-3-methylnaphtho[2,3-b]thiophene-4,9-dione			0.11	0.19	0,28		
69.896	95	Benzene, 1,3-dimethoxy-5-[(1E)-2-phenylethenyl]-			0.11				
73.946	95	1-Phenanthrenecarboxylic acid, 1,2,3,4,4a,9,10,10a-octahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-	0.14		0.20	0.53	0.97		
80.465	91	Octadecane, 1-chloro-					0,19		

Tablo 4. %30 oranında absorbent ve absorbent karışımları kullanılarak mikrodalga destekli piroliz sonrasında elde edilen biyoyağların içeriğindeki tespit edilebilen bileşikler

Alkonma Süresi	Kalite	Bileşik Adı	Alan (%)					
			SiC: MgCl ₂ (6:0)	SiC: MgCl ₂ (5:1)	SiC: MgCl ₂ (4:2)	SiC: MgCl ₂ (3:3)	SiC: MgCl ₂ (1:5)	SiC: MgCl ₂ (0:6)
7.699	91	2-Furancarboxaldehyde			9,45	20.87	20.76	
12.999	92	2,5-Furandione, 3-methyl-					0,33	
13.812	93	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-			3,97	3.77	5.05	
15.318	90	Phenol	0,54	0.54	2.37	2.43	3.03	1.75
15.679	74	Ethanone, 1-(1H-pyrrol-2-yl)-	0.49					
17.501	93	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-			1,65		1.76	
17.516	91	dichloroacetaldehyde	0,51					
19.036	90	Phenol, 2-methyl-			0.21			
20.151	95	Phenol, 2-methoxy-	0.90	0.82	2.77	2.39		0.82
20.316	97	Phenol, 2-methoxy-			2,88	1.38	4.46	
21.325	94	Levogluosenone			0,37			
21.536	91	4H-PYRAN-4-ONE, 3-HYDROXY-2-METHYL-			1.20			
25.240	97	2-Methoxy-4-methylphenol	0.49	0.4	3.47	1.42	1.52	0.58
29.260	93	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	0.44	0.35	2.22	0.89	0.34	0.29
30.856	96	2-Methoxy-4-vinylphenol	0.39	0.30	0.92			
32.542	97	Phenol, 2,6-dimethoxy-	0.23	0.17	1.85	0.73	0.53	
32.768	98	Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)-	0.25	0.17	1.14	0.64	0.+69	0.18
34.951	96	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-,(E)-	0.12		0.71	0.11		
36.667	92	4 - methyl - syringol				0,38		
36.697	98	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-,(Z)-	0.82	0.49	2.58			

38.323	90	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-			0,66	0,15		
39.212	94	Phenol, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-			0,40	0,22	0,23	
39.814	90	2,3,5-Trimethoxytoluene	0,25	0,13	0,66	0,11		
40.145	91	Methyldopa-M			2,60	1,52	3,01	0,91
41.350	90	2,6-Dimethyl-3-(methoxymethyl)-p-benzoquinone	0,20		0,46			
42.072	91	propano 3-methoxy-4-hydroxyphenone				0,52	0,96	
42.795	98	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	0,12					
44.662	90	dihydro - coniferyl alcohol			1,18		0,37	
46.439	94	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)	0,36	0,19	0,91			
52.822	93	1,4a.beta.-Dimethyl-7-isopropyl-1,2,3,4,4a,9,10,10a.alpha.-octahydrophenanthrene			0,41	0,31	0,61	0,25
53.289	90	3-ethyl-2-methyl-2H-naphtho[2,3-b]pyran-5,10-dione			0,31	0,24		0,21
53.741	91	1-[2-(Trimethylsilyl)ethynyl]-3-phenylcyclohexene			0,21	0,17	0,40	0,18
56.255	99	n-Hexadecanoic acid			0,67	0,79	1,62	0,38
57.505	90	3-Ethyl-2,4-bis(methylthio)cyclopenta[b]thiopyrane					0,27	
60.621	90	bis[(Trimethylsilyl)ethynyl]-dimethylsilane			0,28	0,31	0,52	0,25
60.305	90	Silane, [1,4-phenylenebis(oxy)]bis(trimethyl-			0,20	0,21		0,19
62.789	91	terpenoid acid methyl ester like 1,2,3,4-tetrahydro-1-methyl-1-phenanthrene			0,15	0,13	0,21	
63.828	91	4-Hydrazono-5-hydroxyimino-4,5,6,7-tetrahydrobenzofuroxane					0,19	
64.762	90	4-[2-(Trimethylsilyl)-1-ethynyl]-2,2-bipyridine					0,10	
66.162	98	6-Octadecenoic acid						0,42
66.267	99	9-Octadecenoic acid, (E)-			0,87	0,82	1,47	
66.614	90	2-Ethyl-3-methylnaphtho[2,3-b]thiophene-4,9-dione			0,18	0,26	0,37	0,16
67.487	92	Octadecanoic acid					0,21	
68.646	98	Phenanthrene, 1-methyl-7-(1-methylethyl)-			0,14	0,11	0,19	
73.374	90	4-tert-Butyl-2,6-diphenylphenol					0,27	
73.720	99	1-Phenanthrenecarboxylic acid, 1,2,3,4,4a,10a-hexahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-methy			0,25	0,21	0,43	0,13
73.946	96	1-Phenanthrenecarboxylic acid, 1,2,3,4,4a,10a-	0,16		0,28	0,23	0,42	0,16

		hexahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-methy						
77.605	97	1-Phenanthrenecarboxylic acid, 1,2,3,4,4a,9,10,10a-octahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-			0,19	0,19	0,54	
80.465	93	Octadecane, 1-chloro-				0,10	0,18	
90.417	78	Octadecane					0,13	

Tablo 2,3 ve 4 incelendiğinde biyoyağların içeriğindeki tespit edilebilen bileşiklerin sayısı beklenilenden az olmuştur. Bunun sebebi olarak, mikrodalga destekli pirolizde bozunma işleminin beklenilenden daha az oranda olması sebebiyle biyoyağların ekstraksiyonla alımındaki zorluklar ve biyoyağın GC-MS analizindeki zorluklar olarak düşünülmektedir. %30 absorbent kullanımındaki 4:2, 3:3 ve 1:5 oranlarındaki SiC:MgCl₂ karışımındaki biyoyağlarda en yüksek bağıl bolluğa sahip bileşik 2-furankarboksaldehit olmuştur. Ancak bu bileşik diğer oranlardaki analizlerde tespit edilememiştir. Benzer şekilde %40 absorbent oranında bu bileşik yalnızca 5:3 ve 4:4 oranındaki SiC:MgCl₂ karışımlarında tespit edilirken, %50 oranında ise bu bileşiğe rastlanmamıştır. Tespit edilemese de bu bileşiğin diğer oranlarda da en yüksek bağıl bolluğa sahip olacağı düşünülebilir. Genel olarak tüm absorbent miktarlarında biyoyağların içeriğinde fenolik bileşikler yaygın olarak bulunmuştur.

TARTIŞMA

Bu çalışmada atık yonga levhaların mikrodalga destekli pirolizinde farklı oranlarda (%50, %40 ve %30) SiC ve MgCl₂ iki farklı absorbent ve her ikisinin farklı oranlarda karışımlarının kullanılarak katma değeri yüksek biyoyağ elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada öncelikle iki farklı absorbent tek başlarına ve farklı oranlarda (%50, %40 ve %30) mikrodalga destekli piroliz işleminde kullanılmıştır. Buna ek olarak mikrodalga destekli piroliz işleminde aynı oranlarda her iki absorbent karışımları farklı oranlarda kullanılmıştır.

Tüm deneyler göz önüne alındığında maksimum biyoyağ verimi (%27,55) %40 absorbent karışımı yüklemesinde ve 4:4 oranında SiC:MgCl₂ kullanılmasıyla elde edilirken, bunu takiben aynı koşulda 5:3 oranındaki karışımdan elde edilmiştir. Bunları takiben en yüksek biyoyağ verimi (%26,33) için yine eşit oranda (5:5) SiC:MgCl₂'ün kullanıldığı %50 absorbent oranında elde edilmiştir.

Farklı absorbent oranlarının (%50-30) kullanılmasından elde edilen verimler karşılaştırıldığında genel olarak %40 oranında absorbent ve absorbent karışımı kullanılan deneylerden elde biyoyağ verimleri diğer oranlardakinden yüksek, biyoçar verimleri de düşük olmuştur.

Mikrodalga destekli pirolizden elde edilen biyoyağların elementel bileşimleri incelenmiş ve yakıt olarak kullanılabilme potansiyelini incelemek amacıyla üst ısıl değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre %50 absorbent kullanımında en yüksek üst ısıl değere (30,79 MJ/kg) sahip biyoyağ tek başına MgCl₂ kullanılan deneyden elde edilirken bunun ardından en yüksek değer (26,89 MJ/kg) 5:5 oranında SiC:MgCl₂ kullanılmasından elde edilmiştir. %40 absorbent kullanımındaki verilere bakıldığında ise en yüksek üst ısıl değer (26,27 MJ/kg) tek başına SiC kullanılmasından elde edilirken, bunu takiben en yüksek üst ısıl değer (25,03 MJ/kg) %50'deki absorbent oranına benzer şekilde 4:4 oranındaki absorbent karışımından

elde edilmiştir. %30 oranındaki absorbent kullanımında ise yine %40'dakine benzer şekilde en yüksek üst ısı değer (25,26 MJ/kg) tek başına MgCl₂ kullanılmasından elde edilmiş olup, bunu tek başına MgCl₂ kullanılan deneyden elde edilen biyoyağın üst ısı değeri (24,87 MJ/kg) takip etmiştir.

Mikrodalga destekli pirolizden elde edilen biyoyağların içeriğindeki bileşiklerin tayininde ise beklenilenden daha az bileşik aydınlatılabilmektedir. Bunun sebebinin mikrodalga destekli piroliz işleminde beklenen sıcaklıklara ulaşamamasına bağlı olarak bozunmanın tam olarak gerçekleşmemesi sebebiyle elde edilen ürünlerin GC-MS analizinin istenilen şekilde gerçekleştirilememesi olduğu düşünülmektedir. Ancak yine de elde edilen biyoyağların içeriğinde talaşın geleneksel pirolizinden elde edilen biyoyağlardaki gibi fenolik bileşiklerin yoğunlukta olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, ekonomik değeri düşük olan ve nispeten atık olarak düşünülen yonga levhalardan son yıllarda yaygınlaşan mikrodalga destekli piroliz yöntemiyle katma değeri ve enerji içeriği yüksek biyoyağların elde edilmesi mümkün olmuştur. Ayrıca iki farklı tipteki absorbentin (SiC ve MgCl₂) ve bunların karışımlarının farklı oranlarda kullanılmasının elde edilen ürün verim ve biyoyağ içeriklerine etkisi belirlenmiştir. Ek olarak, biyoyağların içeriğindeki aydınlatılabilen bileşiklere göre, elde edilen biyoyağların fenolik bileşik kaynağı olarak kullanılabilme olanağı olduğu da ifade edilebilir.

KAYNAKLAR

Adachi, M., Suzuki, S., Hlaing, Z., Nagase, M., & Nakagome, H. (2009) *INFLUENCE OF CONTAINED ADHESIVES ON THE PYROLYSIS CHARACTERISTICS OF WOOD BIOMASS*.

Amigun, B., Gorgens, J., & Knoetze, H. (2010). Biomethanol production from gasification of non-woody plant in South Africa: Optimum scale and economic performance. *Energy Policy*, 38(1), 312–322. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2009.09.020>

Asomaning, J., Haupt, S., Chae, M., Bressler, D. C., Asomaning, J., Haupt, S., Chae, M., & Bressler, D. C. (2018). Recent developments in microwave-assisted thermal conversion of biomass for fuels and chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(C), 642–657. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.04.084>

Banks, S. W., & Bridgwater, A. V. (2016). Catalytic fast pyrolysis for improved liquid quality. *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies: Second Edition*, 391–429. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00014-X>

Basu, P. (2010). Chapter 8 - Biomass Handling. *Biomass Gasification and Pyrolysis*, 1, 269–299.

Besserer, A., Troilo, S., Girods, P., Rogaume, Y., & Brosse, N. (2021). Cascading Recycling of Wood Waste: A Review. *Polymers 2021*, Vol. 13, Page 1752, 13(11), 1752. <https://doi.org/10.3390/POLYM13111752>

Biller, P., Madsen, R. B., Klemmer, M., Becker, J., Iversen, B. B., & Glasius, M. (2016). *Effect of hydrothermal liquefaction aqueous phase recycling on bio-crude yields and composition*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.053>

Boroson, M. L., Howard, J. B., Longwell, J. P., & Peters, W. A. (1989). Product yields and kinetics from the vapor phase cracking of wood pyrolysis tars. *AIChE Journal*, 35(1), 120–128. <https://doi.org/10.1002/AIC.690350113>

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2011.01.048>

Bu, Q., Morgan, H. M., Liang, J., Lei, H., & Ruan, R. (2016). Catalytic Microwave Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass for Fuels and Chemicals. *Advances in Bioenergy*, 1, 69–123. <https://doi.org/10.1016/BS.AIBE.2016.09.002>

Casoni, A. I., Nievas, M. L., Moyano, E. L., Álvarez, M., Diez, A., Dennehy, M., & Volpe, M. A. (2016). Catalytic pyrolysis of cellulose using MCM-41 type catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 514, 235–240. <https://doi.org/10.1016/J.APCATA.2016.01.017>

Chen, S. H., Feng, Y. S., & Mu, J. (2011). Characterization of Pyrolysis Liquids of Waste Wood-Based Board. *Advanced Materials Research*, 236–238, 229–232. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.236-238.229>

Chen, S., Li, S., Mu, J., & Feng, Y. (n.d.). *INFLUENCE OF UREA FORMALDEHYDE RESIN ON THE PYROLYSIS CHARACTERISTICS AND GAS EVOLUTION OF WASTE MDF*.

Cheng, S., Wei, L., Julson, J., Kharel, P. R., Cao, Y., & Gu, Z. (2017). *Catalytic liquefaction of pine sawdust for biofuel development on bifunctional Zn/HZSM-5 catalyst in supercritical ethanol*. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.06.001>

Collard, F. X., & Blin, J. (2014). A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 594–608. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.06.013>

de Marco, R., Marcon, A., Rava, M., Cazzoletti, L., Pironi, V., Silocchi, C., & Ricci, P. (2010). Proximity to chipboard industries increases the risk of respiratory and irritation symptoms in children: The Viadana study. *Science of The Total Environment*, 408(3), 511–517. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2009.10.024>

Dimitriadis, A., & Bezergianni, S. (2016). *Hydrothermal liquefaction of various biomass and waste feedstocks for biocrude production: A state of the art review*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.120>

Dorieh, A., Khan, A., Selakjani, P. P., Pizzi, A., Hasankhah, A., Meraj, M., Pirouzram, O., Abatari, M. N., & Movahed, S. G. (2021). Influence of wood leachate industrial waste as a novel catalyst for the synthesis of UF resins and MDF bonded with them. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 111, 102985. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2021.102985>

- Dunky, M. (1998). Urea–formaldehyde (UF) adhesive resins for wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18(2), 95–107. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(97\)00054-7](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(97)00054-7)
- Durak, H., & Aysu, T. (2014). *Effects of catalysts and solvents on liquefaction of Onopordum heteracanthum for production of bio-oils*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.051>
- Feng, Y., Chen, S., & Mu, J. (2010). Characterization of products from pyrolysis of waste wood-based composites containing urea-formaldehyde resins. *Advanced Materials Research*, 139–141, 185–189. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.139-141.185>
- Feng, Y., Mu, J., Chen, S., Huang, Z., & Yu, Z. (2012). The influence of urea formaldehyde resins on pyrolysis characteristics and products of wood-based panels. *BioResources*, 7(4), 4600–4613. <https://doi.org/10.15376/BIORES.7.4.4600-4613>
- Ferreira, S. D., Altafini, C. R., Perondi, D., & Godinho, M. (2015). Pyrolysis of Medium Density Fiberboard (MDF) wastes in a screw reactor. *Energy Conversion and Management*, 92, 223–233. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.12.032>
- Foong, S. Y., Liew, R. K., Yang, Y., Cheng, Y. W., Yek, P. N. Y., Wan Mahari, W. A., Lee, X. Y., Han, C. S., Vo, D. V. N., Van Le, Q., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Sonne, C., Peng, W., & Lam, S. S. (2020). Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions. *Chemical Engineering Journal*, 389, 124401. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.124401>
- Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2003). The study of reactions influencing the biomass steam gasification process☆. *Fuel*, 82(7), 835–842. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00313-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00313-7)
- Ghafari, R., DoostHosseini, K., Abdulkhani, A., & Mirshokraie, S. A. (2016). Replacing formaldehyde by furfural in urea formaldehyde resin: effect on formaldehyde emission and physical–mechanical properties of particleboards. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(4), 609–616. <https://doi.org/10.1007/S00107-016-1005-6/TABLES/3>
- Girods, P., Rogaume, Y., Dufour, A., Rogaume, C., & Zoulalian, A. (2008a). Low-temperature pyrolysis of wood waste containing urea–formaldehyde resin. *Renewable Energy*, 33(4), 648–654. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2007.03.026>
- Girods, P., Rogaume, Y., Dufour, A., Rogaume, C., & Zoulalian, A. (2008b). SFGP 2007 - Two-step process of thermo-chemical conversion of wood waste contaminated

by aminoplast resins. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 6. <https://doi.org/10.2202/1542-6580.1609>

Gollakota, A. R. K., Kishore, N., & Gu, S. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1378–1392. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.178>

Goyal, H. B., Seal, D., & Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 504–517. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2006.07.014>

Guo, M., Yu, S., Zhang, S., Wei, J., Gao, W., Bao, W., Shi, L., Zhang, H., & Xu, D. (2022). Nitrogen Migration and Conversion in Chars from Co-Pyrolysis of Lignocellulose Derived Pyrolysis Model Compounds and Urea-Formaldehyde Resin Adhesive. *Energies*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/EN15197221/S1>

Haeldermans, T., Claesen, J., Maggen, J., Carleer, R., Yperman, J., Adriaensens, P., Samyn, P., Vandamme, D., Cuypers, A., Vanreppelen, K., & Schreurs, S. (2019). Microwave assisted and conventional pyrolysis of MDF – Characterization of the produced biochars. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 138, 218–230. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2018.12.027>

Halvarsson, S., Edlund, H., & Norgren, M. (2008). Properties of medium-density fibreboard (MDF) based on wheat straw and melamine modified urea formaldehyde (UMF) resin. *Industrial Crops and Products*, 28(1), 37–46. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2008.01.005>

Han, T. U., Kim, Y. M., Watanabe, C., Teramae, N., Park, Y. K., Kim, S., & Lee, Y. (2015). Analytical pyrolysis properties of waste medium-density fiberboard and particle board. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 32, 345–352. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2015.09.008>

Hossan, M. R., & Dutta, P. (2012). Effects of temperature dependent properties in electromagnetic heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(13–14), 3412–3422. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2012.02.072>

Huang, Y. F., Chiueh, P. Te, & Lo, S. L. (2016). A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Sustainable Environment Research*, 26(3), 103–109. <https://doi.org/10.1016/J.SERJ.2016.04.012>

Huang, Y. F., Kuan, W. H., Lo, S. L., & Lin, C. F. (2010). Hydrogen-rich fuel gas from rice straw via microwave-induced pyrolysis. *Bioresource Technology*, 101(6), 1968–1973. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2009.09.073>

Hussin, M. H., Abd Latif, N. H., Hamidon, T. S., Idris, N. N., Hashim, R., Appaturi, J. N., Brosse, N., Ziegler-Devin, I., Chrusiel, L., Fatriasari, W., Syamani, F. A., Iswanto, A. H., Hua, L. S., Azry Osman Al Edrus, S. S., Chen, L. W., Antov, P., Savov, V., Rahandi Lubis, M. A., Kristak, L., ... Sedliačik, J. (2022). Latest advancements in high-performance bio-based wood adhesives: A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 3909–3946. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2022.10.156>

Jeong, J. Y., Lee, U. Do, Chang, W. S., & Jeong, S. H. (2016). Production of bio-oil rich in acetic acid and phenol from fast pyrolysis of palm residues using a fluidized bed reactor: Influence of activated carbons. *Bioresource Technology*, 219, 357–364. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.07.107>

Jones, D. A., Lelyveld, T. P., Mavrofidis, S. D., Kingman, S. W., & Miles, N. J. (2002). *Microwave heating applications in environmental engineering-a review*. 34, 75–90. www.elsevier.com/locate/resconrec

Kan, T., Strezov, V., & Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.185>

Kim, S., Byun, J., Park, H., Lee, N., Han, J., & Lee, J. (2022). Energy-efficient thermal waste treatment process with no CO₂ emission: A case study of waste tea bag. *Energy*, 241, 122876. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.122876>

Kristak, L., Antov, P., Bekhta, P., Lubis, M. A. R., Iswanto, A. H., Reh, R., Sedliacik, J., Savov, V., Taghiyari, H. R., Papadopoulos, A. N., Pizzi, A., & Hejna, A. (2022). Recent progress in ultra-low formaldehyde emitting adhesive systems and formaldehyde scavengers in wood-based panels: a review. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2056080>

Kuan, W. H., Huang, Y. F., Chang, C. C., & Lo, S. L. (2013). Catalytic pyrolysis of sugarcane bagasse by using microwave heating. *Bioresource Technology*, 146, 324–329. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2013.07.079>

Kumar, A., Bhattacharya, S. C., & Pham, H. L. (2003). Greenhouse gas mitigation potential of biomass energy technologies in Vietnam using the long range energy alternative planning system model. *Energy*, 28(7), 627–654. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00157-3](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00157-3)

- Kumar, M., Olajire Oyedun, A., & Kumar, A. (2018). A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1742–1770. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.270>
- Kwon, E. E., Kim, S., & Lee, J. (2019). Pyrolysis of waste feedstocks in CO₂ for effective energy recovery and waste treatment. *Journal of CO₂ Utilization*, 31, 173–180. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2019.03.015>
- Lai, Z., Li, S., Zhang, Y., Li, Y., & Mu, J. (2018). Influence of Urea Formaldehyde Resin on the Pyrolysis of Biomass Components: Cellulose, Hemicellulose, and Lignin. *Bioresources*, 13(2), 2218–2232. <https://doi.org/10.15376/BIORES.13.2.2218-2232>
- Lam, S. S., Liew, R. K., Cheng, C. K., & Chase, H. A. (2015). Catalytic microwave pyrolysis of waste engine oil using metallic pyrolysis char. *Applied Catalysis B: Environmental*, 601–617. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.04.014>
- Lam, S. S., Liew, R. K., Wong, Y. M., Nai, P., Yek, Y., Ma, L., Lee, C. L., & Chase, H. A. (2017). *Microwave-assisted pyrolysis with chemical activation, an innovative method to convert orange peel into activated carbon with improved properties as dye adsorbent*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.131>
- Lee, J., Kim, K. H., & Kwon, E. E. (2017). Biochar as a Catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 70–79. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.04.002>
- Lee, J., Kim, S., You, S., & Park, Y. K. (2023). Bioenergy generation from thermochemical conversion of lignocellulosic biomass-based integrated renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113240. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.113240>
- Lemonon, J., Girods, P., Rogaume, C., Perrin, D., & Rogaume, Y. (2014). Nitrogen removal from wood laminated flooring waste by low-temperature pyrolysis. *Waste and Biomass Valorization*, 5(2), 199–209. <https://doi.org/10.1007/S12649-013-9212-4/METRCS>
- Leng, S., Wang, X., Wang, L., Qiu, H., Zhuang, G., Zhong, X., Wang, J., Ma, F., Liu, J., & Wang, Q. (2014). Additives initiate selective production of chemicals from biomass pyrolysis. *Bioresource Technology*, 156, 376–379. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.01.062>

Li, J., Dai, J., Liu, G., Zhang, H., Gao, Z., Fu, J., He, Y., & Huang, Y. (2016). Biochar from microwave pyrolysis of biomass: A review. *Biomass and Bioenergy*, *94*, 228–244. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2016.09.010>

Li, R. J., Gutierrez, J., Chung, Y. L., Frank, C. W., Billington, S. L., & Sattely, E. S. (2018). A lignin-epoxy resin derived from biomass as an alternative to formaldehyde-based wood adhesives. *Green Chemistry*, *20*(7), 1459–1466. <https://doi.org/10.1039/C7GC03026F>

Liew, R. K., Azwar, E., Yek, P. N. Y., Lim, X. Y., Cheng, C. K., Ng, J. H., Jusoh, A., Lam, W. H., Ibrahim, M. D., Ma, N. L., & Lam, S. S. (2018). Microwave pyrolysis with KOH/NaOH mixture activation: A new approach to produce micro-mesoporous activated carbon for textile dye adsorption. *Bioresource Technology*, *266*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.06.051>

Liew, R. K., Chong, M. Y., Osazuwa, O. U., Nam, W. L., Phang, X. Y., Su, M. H., Cheng, C. K., Chong, C. T., & Lam, S. S. (2018). Production of activated carbon as catalyst support by microwave pyrolysis of palm kernel shell: a comparative study of chemical versus physical activation. *Research on Chemical Intermediates*, *44*(6), 3849–3865. <https://doi.org/10.1007/S11164-018-3388-Y/METRICS>

Liu, Z., & Zhang, F.-S. (2008). Effects of various solvents on the liquefaction of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management*, *49*, 3498–3504. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.08.009>

Lubis, M. A. R., Jeong, B., Park, B. D., Lee, S. M., & Kang, E. C. (2019). Effect of Synthesis Method and Melamine Content of Melamine-Urea-Formaldehyde Resins on Bond-Line Features in Plywood. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, *47*(5), 579–586. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2019.47.5.579>

Lubis, M. A. R., Park, B. D., & Lee, S. M. (2020). Microencapsulation of polymeric isocyanate for the modification of urea-formaldehyde resins. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *100*, 102599. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2020.102599>

Lykidis, C., & Grigoriou, A. (2008). Hydrothermal recycling of waste and performance of the recycled wooden particleboards. *Waste Management*, *28*(1), 57–63. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2006.11.016>

Mamaeva, A., Tahmasebi, A., Tian, L., & Yu, J. (2016). Microwave-assisted catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass for production of phenolic-rich bio-oil. *Bioresource Technology*, *211*, 382–389. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.03.120>

Martins Mayer, F., Teixeira, C. M., Andrade Pacheco, J. G., Telles de Souza, C., de Vila Bauer, D., Bastos Caramão, E., da Silveira Espíndola, J., Trierweiler, J. O., Perez Lopez, O. W., & Alcaraz Zini, C. (2018). Characterization of analytical fast pyrolysis vapors of medium-density fiberboard (mdf) using metal-modified HZSM-5. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 136, 87–95. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2018.10.019>

Mattila, H., Kuuskeri, J., & Lundell, T. (2017). Single-step, single-organism bioethanol production and bioconversion of lignocellulose waste materials by phlebioid fungal species. *Bioresource Technology*, 225, 254–261. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.11.082>

McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)

Merrild, H., & Christensen, T. H. (2009). Recycling of wood for particle board production: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research : The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 27(8), 781–788. <https://doi.org/10.1177/0734242X09349418>

Mettler, M. S., Vlachos, D. G., & Dauenhauer, P. J. (2012). Top ten fundamental challenges of biomass pyrolysis for biofuels. *Energy and Environmental Science*, 5(7), 7797–7809. <https://doi.org/10.1039/C2EE21679E>

Misra, M. K., Ragland, K. W., & Baker, A. J. (1993). Wood ash composition as a function of furnace temperature. *Biomass and Bioenergy*, 4(2), 103–116. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(93\)90032-Y](https://doi.org/10.1016/0961-9534(93)90032-Y)

Miura, M., Kaga, H., Sakurai, A., Kakuchi, T., & Takahashi, K. (2004). Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(1), 187–199. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(03\)00087-1](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(03)00087-1)

Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy and Fuels*, 20(3), 848–889. <https://doi.org/10.1021/EF0502397>

Motasemi, F., & Afzal, M. T. (2013). A review on the microwave-assisted pyrolysis technique. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 317–330. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.08.008>

Mu, J., Feng, Y., Chen, S., & Sijin. (2012). *Influence of UF Resin on Characteristics and Bio-efficiency of Pyrolysis Liquids of Wood-based Panels*.

Mu, J., & Lai, Z. (2017). Pyrolysis Characteristics of Wood-Based Panels and its Products. *Pyrolysis*. <https://doi.org/10.5772/67506>

Mushtaq, F., Mat, R., & Ani, F. N. (2014). A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *39*, 555–574. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.073>

Mutsengerere, S., Chihobo, C. H., Musademba, D., & Nhapi, I. (2019). A review of operating parameters affecting bio-oil yield in microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *104*, 328–336. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.01.030>

Na, C. J., Yoo, M. J., Tsang, D. C. W., Kim, H. W., & Kim, K. H. (2019). High-performance materials for effective sorptive removal of formaldehyde in air. *Journal of Hazardous Materials*, *366*, 452–465. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2018.12.011>

Nakai, T., Kartal, S. N., Hata, T., & Imamura, Y. (2007). Chemical characterization of pyrolysis liquids of wood-based composites and evaluation of their bio-efficiency. *Building and Environment*, *42*(3), 1236–1241. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.11.022>

Norouzi, O., Jafarian, S., Safari, F., Tavasoli, A., & Nejati, B. (2016). Promotion of hydrogen-rich gas and phenolic-rich bio-oil production from green macroalgae *Cladophora glomerata* via pyrolysis over its bio-char. *Bioresource Technology*, *219*, 643–651. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.08.017>

Özdenkçi, K., De Blasio, C., Muddassar, H. R., Melin, K., Oinas, P., Koskinen, J., Sarwar, G., & Järvinen, M. (2017). A novel biorefinery integration concept for lignocellulosic biomass. *Energy Conversion and Management*, *149*, 974–987. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.04.034>

Pang, S. (2019). Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. *Biotechnology Advances*, *37*(4), 589–597. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2018.11.004>

Papari, S., & Hawboldt, K. (2015). A review on the pyrolysis of woody biomass to bio-oil: Focus on kinetic models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *52*, 1580–1595. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.07.191>

Patel, M., Zhang, X., & Kumar, A. (2016). Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1486–1499. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.09.070>

Penninckx, V., Glineur, S., Gruber, W., Herbauts, J., & Meerts, P. (2001). Radial variations in wood mineral element concentrations: A comparison of beech and pedunculate oak from the Belgian Ardennes. *Annals of Forest Science*, 58(3), 253–260. <https://doi.org/10.1051/FOREST:2001124>

Peyravi, M., Selakjani, P. P., Khalili, S., Peyravi, M., Selakjani, P. P., & Khalili, S. (2017). Nanoengineering Superabsorbent Materials: Agricultural Applications. *Nanotechnology: An Agricultural Paradigm*, 99–115. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4573-8_6

Rasstegaev, A. N., Tarantseva, K. R., Golubovskiy, V. V., & Tchufistov, O. E. (2020). Study of technological modes of formaldehyde-containing solid waste pyrolysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 734(1), 012172. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012172>

Safarian, S., & Unnthorsson, R. (2018). An Assessment of the Sustainability of Lignocellulosic Bioethanol Production from Wastes in Iceland. *Energies 2018, Vol. 11, Page 1493*, 11(6), 1493. <https://doi.org/10.3390/EN11061493>

Sweygers, N., Alewaters, N., Dewil, R., & Appels, L. (2018). Microwave effects in the dilute acid hydrolysis of cellulose to 5-hydroxymethylfurfural. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-018-26107-Y>

Thostenson, E. T., & Chou, T. W. (1999). Microwave processing: fundamentals and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30(9), 1055–1071. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(99\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(99)00020-2)

Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.10.122>

Tuck, C. O., Pérez, E., Horváth, I. T., Sheldon, R. A., & Poliakoff, M. (2012). Valorization of biomass: deriving more value from waste. *Science (New York, N.Y.)*, 337(6095), 695–699. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1218930>

Umeki, E. R., de Oliveira, C. F., Torres, R. B., & Santos, R. G. dos. (2016). Full Length Article. *Fuel*, C(185), 236–242. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2016.07.092>

Uprichard, J. M., & Lloyd, J. A. (1980). INFLUENCE OF TREE AGE ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF RADIATA PINE. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 10(3), 551–558.

Walker, J. C. F. (2006). *Primary wood processing : principles and practice*. 596. https://books.google.com/books/about/Primary_Wood_Processing.html?hl=tr&id=wJ-IOLwnyP4C

Wan, Y., Chen, P., Zhang, B., Yang, C., Liu, Y., Lin, X., & Ruan, R. (2009). Microwave-assisted pyrolysis of biomass: Catalysts to improve product selectivity. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(1), 161–167. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2009.05.006>

Wang, Y., Akbarzadeh, A., Chong, L., Du, J., Tahir, N., & Awasthi, M. K. (2022). Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass for bio-oil production: A review. *Chemosphere*, 297, 134181. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134181>

Wang, Y., Dai, L., Wang, R., Fan, L., Liu, Y., Xie, Q., & Ruan, R. (2016). Hydrocarbon fuel production from soapstock through fast microwave-assisted pyrolysis using microwave absorbent. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, C(119), 251–258. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2016.01.008>

Widayatno, W. B., Guan, G., Rizkiana, J., Yang, J., Hao, X., Tsutsumi, A., & Abudula, A. (2016). Upgrading of bio-oil from biomass pyrolysis over Cu-modified β -zeolite catalyst with high selectivity and stability. *Applied Catalysis B: Environmental*, 186, 166–172. <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2016.01.006>

Wright, M. M., Daugaard, D. E., Satrio, J. A., & Brown, R. C. (2010). Techno-economic analysis of biomass fast pyrolysis to transportation fuels. *Fuel*, 89(SUPPL. 1), S2–S10. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2010.07.029>

Xu, D., Yang, L., Zhao, M., Zhang, J., Syed-Hassan, S. S. A., Sun, H., Hu, X., Zhang, H., & Zhang, S. (2021). Conversion and transformation of N species during pyrolysis of wood-based panels: A review. *Environmental Pollution*, 270, 116120. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.116120>

Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Varjani, S. J., & Saravanan, A. (2019). A review on photochemical, biochemical and electrochemical transformation of CO₂ into value-added products. *Journal of CO₂ Utilization*, 33, 131–147. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2019.05.017>

Yagmur, E., Ozmak, M., & Aktas, Z. (2008). A novel method for production of activated carbon from waste tea by chemical activation with microwave energy. *Fuel*, 87(15–16), 3278–3285. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2008.05.005>

Yaman, G., & Sinoplugil, H. (2019). A pilot study for the pyrolysis of the urea formaldehyde-melamine formaldehyde resin paper waste. *Thermal Science*, 23, S253–S266. <https://doi.org/10.2298/TSCI181023039Y>

Yin, C. (2012). Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production. *Bioresource Technology*, 120, 273–284. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.06.016>

Yong, C., Wenliang, W., & Jianmin, C. (2022). Microwave-assisted pyrolysis of wood-based panels for producing N-enriched bio-oil and N-doped biochar. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–12. <https://doi.org/10.1007/S13399-022-02468-3/METRICS>

Yu, I. K. M., Chen, H., Abeln, F., Auta, H., Fan, J., Budarin, V. L., Clark, J. H., Parsons, S., Chuck, C. J., Zhang, S., Luo, G., & Tsang, D. C. W. (2020). Chemicals from lignocellulosic biomass: A critical comparison between biochemical, microwave and thermochemical conversion methods. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1753632>, 51(14), 1479–1532. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1753632>

Zazycki, M. A., Perondi, D., Godinho, M., Oliveira, M. L. S., Collazzo, G. C., & Dotto, G. L. (2020). Conversion of MDF wastes into a char with remarkable potential to remove Food Red 17 dye from aqueous effluents. *Chemosphere*, 250, 126248. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126248>

Zhan, H., Zhuang, X., Song, Y., Liu, J., Li, S., Chang, G., Yin, X., Wu, C., & Wang, X. (2019). A review on evolution of nitrogen-containing species during selective pyrolysis of waste wood-based panels. *Fuel*, 253, 1214–1228. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.05.122>

Zhang, B., Von Keitz, M., & Valentas, K. (2008.). *Thermochemical liquefaction of high-diversity grassland perennials*. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.09.005>

Zhang, F., Jiang, X., Lin, J., Zhao, G., Chang, H. M., & Jameel, H. (2019). Reactivity improvement by phenolation of wheat straw lignin isolated from a biorefinery process. *New Journal of Chemistry*, 43(5), 2238–2246. <https://doi.org/10.1039/C8NJ05016C>

Zhang, L., Xu, C. (Charles), & Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 969–982. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2009.11.038>

Zhang, Y., Chen, P., Liu, S., Fan, L., Zhou, N., Min, M., Cheng, Y., Peng, P., Anderson, E., Wang, Y., Wan, Y., Liu, Y., Li, B., & Ruan, R. (2017). Microwave-Assisted Pyrolysis of Biomass for Bio-Oil Production. *Pyrolysis*. <https://doi.org/10.5772/67442>

Zhang, Y., He, Z. B., Xue, L., Chu, D. M., & Mu, J. (2016). Influence of a urea–formaldehyde resin adhesive on pyrolysis characteristics and volatiles emission of poplar particleboard. *RSC Advances*, 6(16), 12850–12861. <https://doi.org/10.1039/C5RA18068F>

ÖZGEÇMİŞ

Narin Tuğçe GEDİK ilk öğrenimini Kırklareli’nde , Orta ve Lise öğrenimini Amasya da tamamladı.2013 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde öğrenimine başlayıp 2019 yılı Ocak ayında mezun oldu. 2021 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans programına başladı. Şuan da Nadir Metal Rafineri San.Tic. A.Ş. firmasında Çevre Mühendisi olarak görev yapmaktadır.