



**FARKLI TÜRDEN ATIKLARIN PİROLİZİ
SONUCU ELDE EDİLEN PİROLİTİK YAĞIN
YANMA VERİMİNİN VE EMİSYON
DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ**

Ünal ERASLAN

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Rahman ÇALHAN**

**FARKLI TÜRDEEN ATIKLARIN PİROLİZİ SONUCU ELDE EDİLEN
PİROLİTİK YAĞIN YANMA VERİMİNİN VE EMİSYON DEĞERLERİNİN
İNCELENMESİ**

Ünal ERASLAN

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

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Rahman ÇALHAN**

**KARABÜK
Kasım 2021**

Ünal ERASLAN tarafından hazırlanan “FARKLI TÜRDE N ATIKLARIN PİROLİZİ SONUCU ELDE EDİLEN PİROLİTİK YAĞIN YANMA VERİMİNİN VE EMİSYON DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Rahman ÇALHAN

.....

Tez Danışmanı, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 01/11/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Muharrem EYİDOĞAN (KOÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Rahman ÇALHAN (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi M. Kazım YETİK (KBÜ)

.....

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

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.”

Ünal ERASLAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI TÜRDEN ATIKLARIN PİROLİZİ SONUCU ELDE EDİLEN PİROLİTİK YAĞIN YANMA VERİMİNİN VE EMİSYON DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ

Ünal ERASLAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Rahman ÇALHAN

Kasım 2021, 91 sayfa

Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada, farklı türden atıklar (ceviz kabuğu, fındık kabuğu ve plastik şişeler) toplanarak atık türlerinin oranları farklı olacak şekilde iki atık numunesi (1. Numune ve 2. Numune) şeklinde hazırlanmıştır. Hazırlanan bu atık numuneleri mikrodalga destekli piroliz sisteminde 750 W çalışma gücünde 30 dakika bekleme süresinde işleme alınmıştır. Mikrodalga destekli piroliz sisteminde reaksiyon ortamından oksijenin uzaklaştırılması için 0,3 L/dk oranında Azot gazı kullanılmıştır. Mikrodalga destekli piroliz işlemi sonucunda oluşan pirolitik yağların, filtrasyon, ekstraksiyon ve distilasyon işlemlerine tabi tutularak biyodizel kalitesi iyileştirilmeye çalışılmıştır. İyileştirme işlemleri sonrasında iki farklı atık numunesinden elde edilen biyodizel yakıtlar, standart dizel yakıt ile %10, %20 ve %30 oranlarında karıştırılarak N1 ve N2 yakıtları oluşturulmuştur. Daha sonra oluşan biyodizel yakıtlar tek silindirli düşük güçlü dizel motorda, farklı motor yüklerinde (250, 500, 750 ve 1000 W) test

edilmiştir. Motorda kullanılan yakıtların farklı yüklerde motor performansı ve egzoz emisyon değerleri (CO, HC ve CO₂) incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda oluşturulan N1 ve N2 yakıtlarının standart dizel yakıtı göre CO emisyon değerlerinde belli miktarda artış yaşansa da genel anlamda düşüş görülmüştür. HC emisyon değerleri için ise oluşturulan N1 ve N2 yakıtlarının, standart dizel yakıtlara göre HC emisyonlarında önemli bir düşüş sağladığı görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Mikrodalga destekli piroliz, atık, enerji, emisyon

Bilim Kodu : 90322

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF COMBUSTION EFFICIENCY AND EMISSION VALUES OF PYROLYTIC OIL OBTAINED BY PYROLYSIS OF DIFFERENT KINDS OF WASTE

Ünal ERASLAN

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

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Rahman ÇALHAN

November 2021, 91 pages

In the experimental study, different types of waste (walnut shell, hazelnut shell and plastic bottles) were collected, and two waste samples (1st sample and 2nd sample) were prepared with different ratios of waste types. These prepared waste samples were processed in a microwave assisted pyrolysis system at a working power of 750 W for 30 minutes. Nitrogen gas at the rate of 0.3 L/min was used to remove oxygen from the reaction medium in the microwave assisted pyrolysis system. Biodiesel quality was tried to be improved by subjecting the pyrolytic oils formed as a result of microwave assisted pyrolysis process to filtration, extraction and distillation processes. After the remediation processes, biodiesel fuels obtained from two different waste samples were mixed with standard diesel fuel at the rates of 10%, 20% and 30% to form N1 and N2 fuels. Subsequently, biodiesel fuels were used in a single-cylinder low-power diesel engine at different engine loads (250, 500, 750 and 1000 W). Engine performance and

exhaust emission values (CO, HC and CO₂) of the fuels used in the engine at different loads were investigated. Although there is a certain increase in the CO emission values of the N1 and N2 fuels, which were created as a result of the experimental studies, compared to the standard diesel fuel, a decrease was observed in general. For HC emission values, it has been observed that the N1 and N2 fuels created provide a significant decrease in HC emissions compared to standard diesel fuels.

Key Word : Microwave assisted pyrolysis, waste, energy, emission

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 Dr. Öğr. Üyesi Rahman ÇALHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yürütölen alıőma süreci boyunca yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Mühendislik Faköltesi öğretim üyesi Doç. Dr. Samet USLU'ya teşekkür ederim.

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

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
GENEL BİLGİLER	4
2.1. PİROLİZ	4
2.2. PİROLİZ TÜRLERİ	5
2.2.1. Yavaş Piroлиз.....	6
2.2.2. Hızlı Piroлиз.....	6
2.2.2.1. Reaktörler.....	8
2.3. PİROLİZ ÜRÜNLERİ.....	13
2.3.1. Biyoyağ.....	13
2.3.1.1. Su.....	14
2.3.1.2. Oksijen	15
2.3.1.3. Viskozite	16
2.3.1.4. Asitlik.....	16
2.3.1.5. Isıtma Değeri.....	17
2.3.1.6. Kül	17
2.3.2. Biyokömür	17

	<u>Sayfa</u>
2.3.3. Biyogaz.....	19
2.3.3.1. Biyogaz verimini etkileyen parametreler	21
2.4. PİROLİZ TEKNOLOJİSİNİN AVANTAJLARI	24
2.5.1. Partikül Boyutunun Etkisi	26
2.5.2. Sıcaklığın Etkisi	29
2.5.3. Basıncın Etkisi	31
2.5.4. Isıtma Hızının Etkisi	32
2.5.5. Numune Miktarının Etkisi	37
2.6. MİKRODALGA.....	38
2.6.1. Malzemelerin Dielektrik Özellikleri	39
2.6.2. Mikrodalga Isıtma Sistemi.....	41
2.6.3. Mikrodalga Destekli Piroлиз Sistemi	42
2.6.4. Mikrodalga Destekli Piroлиз Sistemlerinde Isıtma	44
2.6.5. Mikrodalga Destekli Piroлиз Sistemlerinin Avantajları	46
BÖLÜM 3	48
LİTERATÜR TARAMASI.....	48
3.1. GELENEKSEL PİROLİZ YÖNTEMİ.....	48
3.2. MİKRODALGA DESTEKLİ PİROLİZ SİSTEMİ.....	50
BÖLÜM 4	54
MATERYAL METOT.....	54
4.1. KULLANILAN MALZEMLER	54
4.1.1. Ceviz-Fındık-Plastik	54
4.2. DENEY DÜZENEGİ.....	56
4.3. DENEYSSEL ÇALIŞMA KOŞULLARI	59
4.4. PİROLİTİK YAĞ İYİLEŞTİRME İŞLEMLERİ.....	60
4.4.1. Filtrasyon İşlemi	61
4.4.2. Distilasyon İşlemleri	62
4.4.3. Analiz Sonuçları.....	64
4.4.4. Maliyet Analizi	65
4.5. MOTOR DENEYLERİ.....	66

	<u>Sayfa</u>
4.5.1. Motor Düzenegi	66
4.5.2. Yükleme Ünitesi	68
4.5.3. Emisyon Ölçümü.....	69
BÖLÜM 5	70
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	70
5.1. MOTOR PERFORMANSI	71
5.1.1. ÖYT Değerleri	71
5.1.2. EGS Değerleri.....	72
5.2. EGZOZ EMİSYONLARI.....	73
5.2.1. HC Emisyon Değerleri	73
5.2.2. CO Emisyon Değerleri	75
5.2.3. CO ₂ Emisyon Değerleri.....	77
5.2.4. O ₂ Emisyon Değerleri	78
5.2.5. İS Emisyon Değerleri.....	80
5.2.5. NO _x Emisyon Değerleri.....	81
BÖLÜM 6	83
SONUÇLAR.....	83
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	91

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Atık hiyerarşisi	1
Şekil 1.2.	Atık işleme ve bertaraf yöntemleri.....	2
Şekil 2.1.	Biyokütle parçacığında piroliz şeması.....	4
Şekil 2.2.	Pirolü ürün dağılımı	8
Şekil 2.3.	Kabarcıklanan akışkan yataklı reaktör.	9
Şekil 2.4.	Vortex ablatif reaktör.	10
Şekil 2.5.	Dolaşan akışkan yataklı reaktör.	11
Şekil 2.6.	Dönen koni piroliz reaktörünün prensibi.....	12
Şekil 2.7.	Partikül boyutunun ürün verimi üzerindeki etkisi.....	28
Şekil 2.8.	Farklı partikül boyutlarında buğday samanının pirolizi	29
Şekil 2.9.	Sıcaklığın oksijen içeriğine etkisi	30
Şekil 2.10.	Sıcaklığın karbon içeriğine etkisi.....	31
Şekil 2.11.	Sıcaklığın hidrojen içeriğine etkisi.....	31
Şekil 2.12.	Farklı ısıtma hızlarında buğday samanının pirolizi.....	33
Şekil 2.13.	Isıtma hızının katı ürün verimi üzerine etkisi	34
Şekil 2.14.	Sıcaklık ve ısıtma hızının ürün verimi üzerindeki etkisi	36
Şekil 2.15.	Farklı numune miktarlarındaki buğday samanının pirolizi	37
Şekil 2.16.	Farklı malzeme tipleri.....	39
Şekil 2.17.	Farklı malzemelere ait dielektrik özellikler.....	40
Şekil 2.18.	(A) Mikrodalga ısıtma sistemi, (B) kesikli tip, (C) sürekli tip.....	41
Şekil 2.19.	Örnek mikrodalga destekli piroliz düzeneği	43
Şekil 2.20.	Geleneksel ısıtma ile mikrodalga ısıtma sistemlerinin farkı.....	45
Şekil 2.21.	Mikrodalga pirolizinde ürün üzerindeki ısı dağılımı.....	45
Şekil 4.1.	Ceviz, fındık malzemeleri ve plastik su şişeler	54
Şekil 4.2.	Kullanılan hammaddelerin öğütülmesi.....	55
Şekil 4.3.	Mikrodalga destekli piroliz sistemi düzeneği.	56
Şekil 4.4.	Sıcaklık ölçümünde kullanılan K tipi termokupl.	57
Şekil 4.5.	Ayar vanalı şamandıralı debimetre.....	57
Şekil 4.6.	Borosilikat cam balonun seramik yün ile kaplanması.	58

Sayfa

Şekil 4.7. Seramik yün ile kaplanmış reaktörün fırın içerisindeki görünümü.....	58
Şekil 4.8. Piroliz sisteminde kullanılan absorban malzeme.	59
Şekil 4.9. Pirolitik yağ.....	61
Şekil 4.10. Filtre işleminde kullanılan vakumlu filtrasyon düzeneği.	61
Şekil 4.11. Distilasyon üniteleri.	62
Şekil 4.12. Distilasyon işlemi öncesi ve sonrası numune görüntüleri.	63
Şekil 4.13. Deneyleerde kullanılan dizel motor.	67
Şekil 4.14. Yükleme ünitesi.	68
Şekil 4.15. Egzoz gazı ölçüm cihazı.	69
Şekil 5.1. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait ÖYT değerleri.	71
Şekil 5.2. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait EGS değerleri.	72
Şekil 5.3. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait HC emisyon değerleri.	75
Şekil 5.4. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait CO emisyon değerleri.	76
Şekil 5.5. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait CO ₂ emisyon değerleri.	78
Şekil 5.6. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait O ₂ emisyon değerleri.	79
Şekil 5.7. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait İ _s emisyon değerleri....	81
Şekil 5.8. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait NO _x emisyon değerleri.	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1.	Ahşabın farklı piroliz yöntemleri ile elde edilen ürün verimleri.....	7
Çizelge 2.2.	Biyoyağ ve Dizel yakıtta ait bazı parametreler	14
Çizelge 2.3.	Piroliz sıvılarının su içeriği ve elementel analizleri	15
Çizelge 2.4.	Biyokütlenin uçucu, sıvı ürün ve odun kömürü verimleri	19
Çizelge 2.5.	Biyokütlelerin pirolizi sonucu gaz ürün bileşimi	20
Çizelge 2.6.	Bekleme sürelerinin verim üzerine etkisi	21
Çizelge 2.7.	Fiziksel ön işlemin gaz verimine etkisi.	23
Çizelge 2.8.	Kimyasal ön işlemin gaz verimine etkisi	23
Çizelge 2.9.	Isı ve kütle transfer kabiliyetinin gaz verimine etkisi.....	24
Çizelge 2.10.	Termokimyasal dönüşüm tekniklerinin karşılaştırılması.....	24
Çizelge 2.11.	Farklı biyokütle kaynaklarında sıcaklığın bioçar üzerine etkisi.....	30
Çizelge 2.12.	Buğday samanı pirolizinin farklı parametrelerde katı ürün verimi	34
Çizelge 2.13.	Farklı sıcaklık ve ısıtma hızında pirolizin ürün verimine etkisi.	35
Çizelge 2.14.	Mikrodalga ve geleneksel ısıtmanın karşılaştırılması.	47
Çizelge 4.1.	Çalışma Koşulları	60
Çizelge 4.2.	Dizel, N1 ve N2 yakıt türlerine ait analiz sonuçları.	64
Çizelge 4.3.	N1-10%, N1-20% ve N1-30% yakıt türlerine ait analiz sonuçları.	64
Çizelge 4.4.	N2-10%, N2-20% ve N3-30% yakıt türlerine ait analiz sonuçları.	64
Çizelge 4.5.	Atık maliyetleri.....	65
Çizelge 4.6.	Deneyde kullanılan cihazların enerji tüketim maliyetleri.....	65
Çizelge 4.7.	Biyodizel üretim maliyetleri ve dizel ile karşılaştırılması.	66
Çizelge 4.10.	Çalışmalarda kullanılan motora ait teknik özellikler.....	67
Çizelge 4.11.	Çalışmalarda kullanılan jeneratöre ait teknik özellikler.	68
Çizelge 4.12.	Egzoz gazı analiz cihazı teknik özellikleri.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

CO : karbonmonoksit

CO₂ : karbondioksit

CH₄ : metan

C : karbon

H : hidrojen

N : azot

S : kükürt

K : kelvin

C₂H₄ : etilen

C₂H₆ : etan

Ø : çap

MPa : megapaskal

µm : mikrometre

Hz : hertz

MHz : megahertz

GHz : gigahertz

W : watt

kWh : kilowatt saat

mg : milligram

mm : milimetre

ml : mililitre

min : minimum

dk : dakika

vd : ve diğerleri

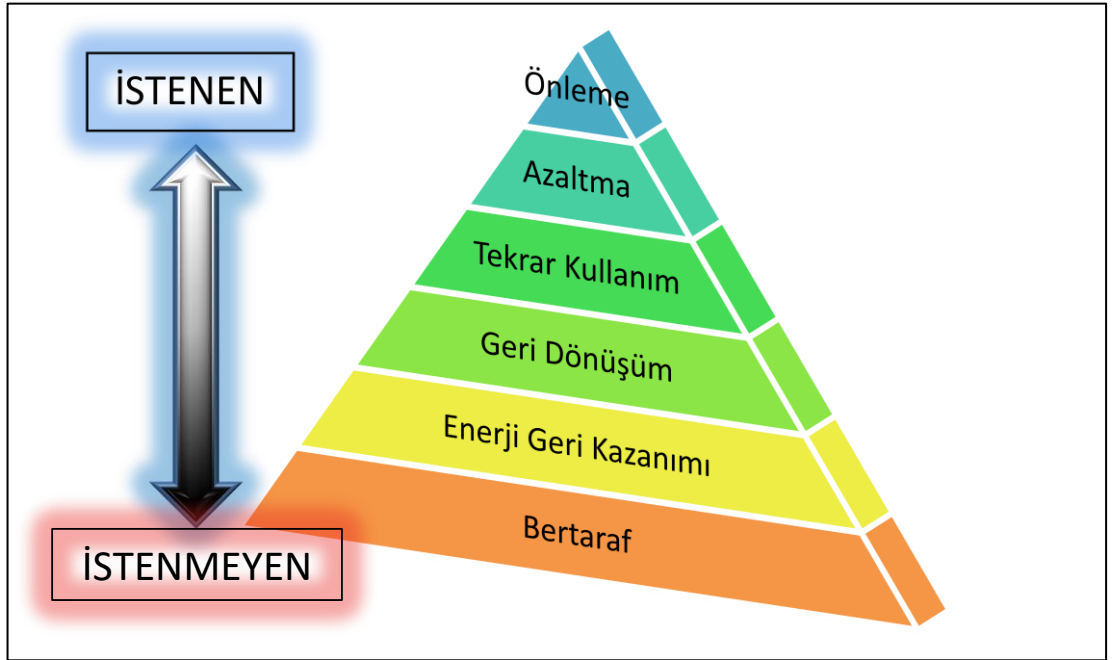
KISALTMALAR

TG Profili	: Termogravimetrik Profili
DTG Profili	: Türetilmiş Termogravimetrik Profili
ÖYT	: Özgül Yakıt Tüketimi
EGS	: Egzoz Gazı Sıcaklığı
Dizel	: Standart Dizel Yakıt
N1	: 1. Numune Özelliklerinde Üretilmiş Yakıt
N2	: 2. Numune Özelliklerinde Üretilmiş Yakıt

BÖLÜM 1

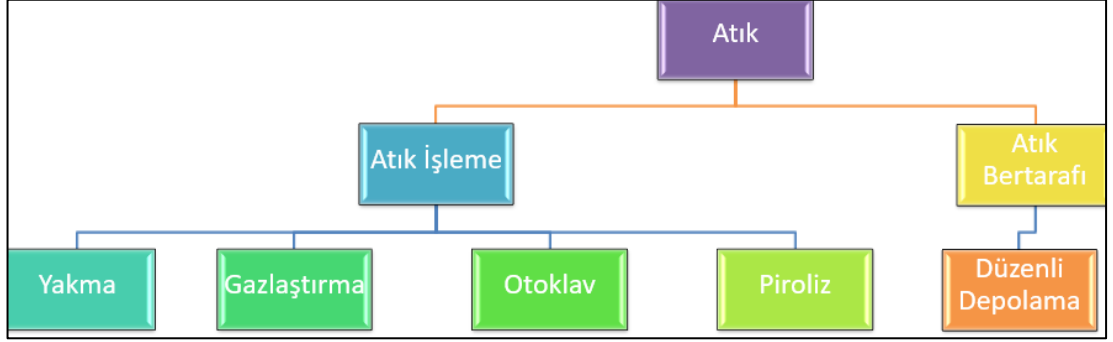
GİRİŞ

Atıklar, insanlık var olduğu sürece oluşacak ve insan nüfusu artışına paralel bir şekilde oluşmaya devam edecektir. Ülkeler bu artış karşısında çeşitli önlemler almaktadır. Atıkların yönetilmesine ilişkin Şekil 1.1’de gösterildiği gibi ‘Atık Hiyerarşisi’ oluşturulmuştur. Burada en öncelikli istenen durum atığın kaynağında önlenmesidir. Bu mümkün olmuyorsa atığın kaynağında azaltılması istenmektedir. Kaynağında önleme ve azaltma gibi yöntemlerin mümkün olmadığı durumlarda ise atığın, tekrar kullanımı, geri dönüşümü ve enerji geri kazanımı gibi seçenekler değerlendirilmektedir. Son olarak ise atığın bertarafı söz konusudur. Ancak bu durum en az istenen seçenek durumundadır. Atık üzerinde yapılması gereken tüm işlemler yapıldıktan sonra artık yapılacak başka bir seçenek kalmadığında son seçenek olarak atığın bertaraf edilmesi düşünülmektedir.



Şekil 1.1. Atık hiyerarşisi.

Atıkların yönetilmesi ile ilgili ülkemizde ‘Atık Yönetim Yönetmeliği’ başta olmak üzere çeşitli yönetmelikler mevcuttur. Atıklar, bu yönetmelikler çerçevesinde Şekil 1.2’de gösterilen örnek yöntemler ile yönetilmektedir.



Şekil 1.2. Atık işleme ve bertaraf yöntemleri.

Burada ‘Atık İşleme’ başlığı altında bulunan piroliz yöntemi atık hiyerarşisinde ‘Enerji Geri Kazanımı’ basamağını temsil etmektedir.

Yakma, gazlaştırma, otoklav yöntemlerine kıyasla piroliz yönteminde kullanılan atıklar faydalı ürünlere dönüştürülebilmektedir. Yakma, gazlaştırma ve otoklav gibi yöntemlerde piroliz yönteminde olduğu gibi verimli bir dönüşüm olmamaktadır. Bu yönüyle diğer yöntemler arasından pozitif yönde ayrışmaktadır.

Her alanda yaşanan gelişmeler atıkların işlenmesi konusunda kullanılan piroliz yönteminde de etkili olmuştur. Piroliz sistemlerinde enerji, zaman ve verim konularında daha avantajlı olan mikrodalga destekli piroliz sistemleri son zamanlarda ön plana çıkmaktadır. Piroliz sistemlerinde yaşanan bu olumlu gelişme faydalı bir yöntem olan piroliz sistemini daha cazip hale getirmektedir.

Yapılan literatür araştırmasında mikrodalga destekli piroliz yöntemi kullanılarak atıkların pirolizi ve elde edilen pirolitik yağın yakıt olarak kullanılması üzerine yeterince araştırma yapılmadığı gözlenmiş olup, bu eksikliğin bu çalışma ile giderilmesi amaçlanmaktadır.

Gerçekleştirilen bu çalışma, mikrodalga destekli piroliz sistemi ile atıklardan elde edilen yağın yakıt olarak kullanılabilirliğinin incelenmesini kapsamaktadır. İlk

aşamada mikrodalga destekli piroliz sistemi kurulmuştur. Kurulan sistemde farklı türdeki atıklarının mikrodalga destekli piroliz işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında piroliz işlemleri sonucunda elde edilen pirolitik yağların karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen pirolitik yağ laboratuvar ölçekli motorlarda yakıt katkısı olarak kullanılarak yanma verimleri incelenmiştir. Farklı yük değerlerinde motordaki yanma sonrasında ortaya çıkan emisyon değerleri belirlenerek değerlendirilmiştir.

Hazırlanan bu çalışma, altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde ‘Giriş’ başlığı altında çalışmanın geneli ile ilgili bilgi verilmiştir. İkinci bölümde; piroliz sistemi, piroliz yöntemleri, pirolizde termik olarak madde parçalanması, pirolizi etkileyen faktörler, piroliz sonucu oluşan ürünler, pirolitik yağ özellikleri ve mikrodalga destekli piroliz sistemleri hakkında geniş bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde konu ile ilgili literatür araştırması yapılarak bu alandaki çeşitli çalışmalar gösterilmiştir.

Beşinci bölümde çalışmada kullanılan hammaddeler, deney düzeneği ve pirolitik yağın test yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Son bölümde ise çalışma sonucunda elde edilen bulgular, çalışmanın amacına uygun olacak şekilde yorumlanarak çalışma sonuçlandırılmıştır.

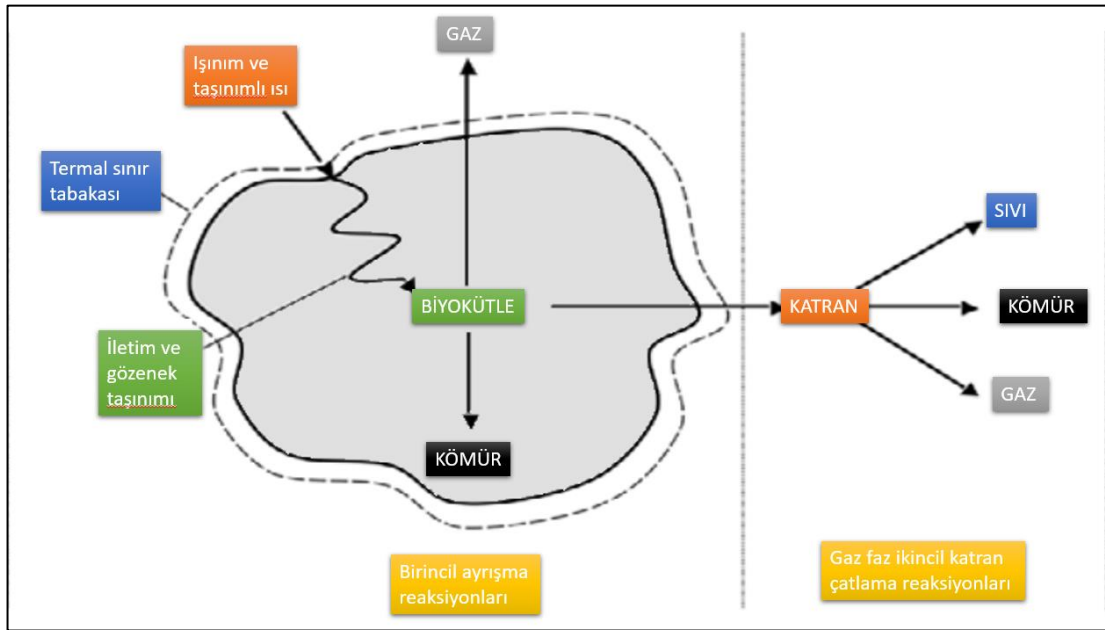
BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

2.1. PİROLİZ

Atıkların, yanma reaksiyonunun gerçekleşmesine sebep olacak oksijenin bulunmadığı ve yüksek sıcaklığın sağlandığı bir ortamda işlenerek atık vasfından kurtarılarak yararlı ürünler haline dönüştürüldüğü termokimyasal bir süreçtir. Bu işlem, atık olarak sisteme giren maddelerin katı, sıvı ve gaz şeklinde faydalı ürünlere dönüşmesi ile sonuçlanmaktadır [1].

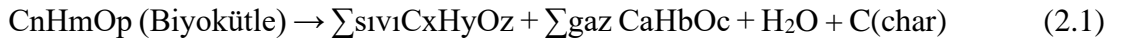
Piroliz işlemi sırasında Şekil 2.1’de görüldüğü gibi yoğunlaşabilir durumdaki gazlar, CO, CO₂, H₂ ve CH₄ gibi yoğunlaşamayan gazlara, sıvıya veya biyokömüre dönüşebilmektedir.



Şekil 2.1. Biyokütle parçacığında piroliz şeması [2].

Bu ayrışma işlemi, kısmen gaz fazında bulunan homojen reaksiyonlar yoluyla kısmen ise gaz-katı fazında bulunan heterojen termal reaksiyonlar yoluyla meydana gelmektedir. Gaz fazında gerçekleşen reaksiyonlarda, yoğunlaşabilir durumda bulunan buhar, CO ve CO₂ gibi yoğun olmayan küçük moleküllere parçalanmaktadır [2].

Piroliz işlemi reaksiyon denklemi ile ifade etmek gerekirse Eşitlik 2.1’de olduğu gibi genel bir gösterimi yapılabilmektedir [2].



Biyokütlerde bulunan büyük hidrokarbon molekülleri piroliz işlemi ile birlikte parçalanarak işlem sonunda daha küçük hidrokarbon moleküllerine dönüşmektedir [2].

Piroliz sistemleri çalışma şartlarına bağlı olarak genel bir ifade ile hızlı piroliz sistemi ve yavaş piroliz sistemi olmak üzere iki yöntem şeklinde uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden her biri farklı bir piroliz ürünü elde etmede bir diğerine göre daha verimli bir haldedir. Örneğin piroliz işleminin uzun sürede gerçekleştirildiği yavaş piroliz sisteminden biyokömür ve gaz ürün verimi daha yüksek olurken işlemin hızlı bir şekilde gerçekleştirildiği hızlı piroliz sistemlerinde sıvı ürün verimi daha yüksek olmaktadır [3].

2.2. PİROLİZ TÜRLERİ

Piroliz işlemlerinde kullanılan ısıtma hızı ve ısıtma sıcaklığı piroliz sonucunda elde edilecek ürün verimlerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Piroliz işlemleri de bu çerçevede ısıtma hızı ve süresi bakımından iki ana gruba ayrılmaktadır. Biyokömür ve gaz ürün üretimi için yavaş piroliz yöntemi verimli olurken sıvı ürün üretimi için hızlı piroliz yöntemi verimli olmaktadır [3], [4].

2.2.1. Yavaş Piroliz

Yavaş piroliz, normal piroliz sistemlerine kıyasla piroliz işleminin daha uzun sürede gerçekleştirildiği bir yöntemdir. Bu sayede biyokütlenin enerji içeriği yüksek olan daha değerli biyokömür ve gaz gibi ürünlere dönüştürülmesi amaçlanmaktadır. Yavaş piroliz sistemi geleneksel piroliz olarak da adlandırılmaktadır. Bunun sebebi bu yöntemin binlerce yıldır uygulanan bir yöntem olmasıdır. Geçmiş dönemlerde bu yöntem odun kömürü üretmek için kullanılmıştır. Düşük sıcaklıklarda uzun sürelerce piroliz işlemi devam etmektedir. Eski dönemlerde kömür verimini arttırmak için yavaş piroliz işlemi birkaç gün süren işlemler şeklinde yapılmaktadır [2], [5].

2.2.2. Hızlı Piroliz

Hızlı piroliz sisteminde biyoyağ üretimindeki verimin en üst düzeye çıkarılması amaçlanmaktadır. Bu verimi sağlayabilmek için biyokütle parçalanmadan sistemin en yüksek sıcaklığa ulaşması sağlanmaktadır. Burada bahsedilen sıcaklık yaklaşık olarak 1000 °C sıcaklıktır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken bir konu vardır. Üretilmek istenen ürün biyoyağ ise bu sıcak 650 °C'nin üzerine çıkarılmamalıdır. Ürün olarak gaz üretilmesi amaçlanıyorsa sıcaklık 1000 °C'ye kadar çıkarılmalıdır [2], [5].

Hızlı piroliz sistemlerinde biyoyağ verimini arttırmak için kontrol edilmesi gereken bazı hususlar vardır [2];

1. Piroliz işleminde çok yüksek ısıtma ve ısı transfer hızlarının kontrolü,
2. 425-500 °C olacak şekilde piroliz sıcaklığının sağlanması,
3. Reaktörü içerisinde buharın 2 saniyeden daha az süre kalmasının sağlanması,
4. Oluşan piroliz gazının hızlı bir şekilde soğutulmasıdır.

Piroliz işleminde biyoyağın (sıvı ürün) oluşması için gerekli olan şartlar; hızlı ısıtma ve hızlı soğutmadır. Sıvı ürün oluşumundaki verim bu şartlara bağlıdır. Hızlı ısıtma ve hızlı soğutma şartlarına dikkat edilmediği durumda, yüksek sıcaklık içerisinde kalan sıvı buharları içerisindeki yüksek moleküllü türler parçalanmaktadır. Bu parçalanma

sıvı ürünün gaz ürünlere dönüşmesine neden olarak sıvı ürün verimini düşürmektedir [5],[6].

Çizelge 2.1, farklı piroliz işlemi yöntemlerinden elde edilen ürün dağılımını göstermektedir. Piroliz yöntemleri arasından hızlı piroliz sıvı ürün verimi konusunda ön plana çıkmaktadır [7].

Çizelge 2.1. Ahşabın farklı piroliz yöntemleri ile elde edilen ürün verimleri [7].

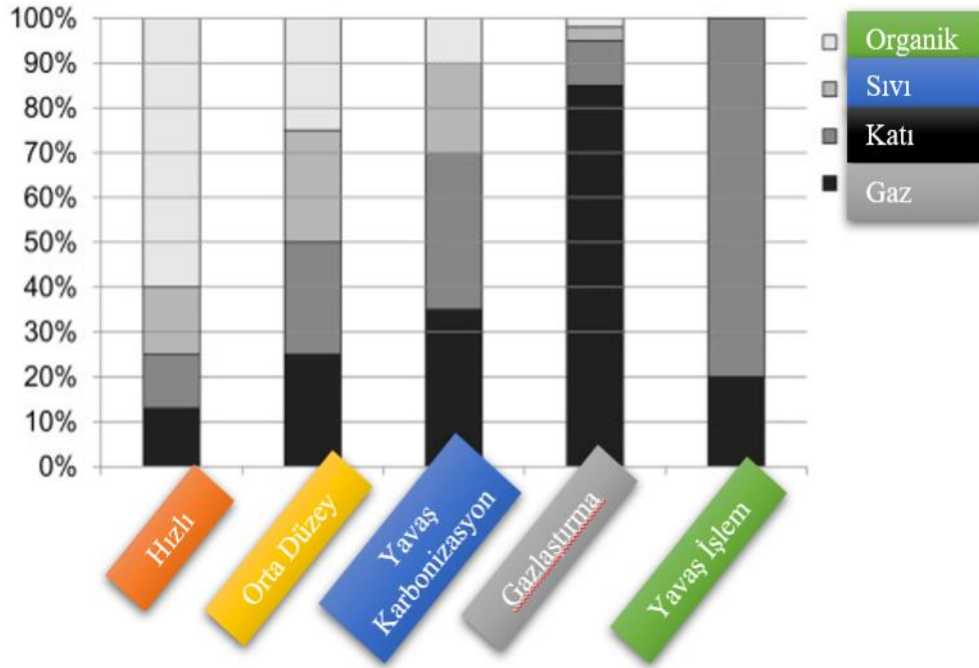
İşlem Türü	İşlem Koşulları	Sıvı (%)	Katı (%)	Gaz (%)
Hızlı Piroliz	Orta sıcaklık, kısa bekleme süresi	75	12	13
Karbonizasyon	Düşük sıcaklık, çok uzun bekleme süresi	30	35	35
Gazlaştırma	Yüksek sıcaklık, uzun bekleme süresi	5	10	85

Piroliz sistemlerinde işlem sonunda her zaman üç farklı ürün elde edilmektedir. Piroliz işletim şartlarında yapılacak değişiklikler ile oluşan ürünlerin oranlarında ayarlama yapılarak işlem sonunda istenilen üründen daha fazla elde etmek mümkündür.

Bu bağlamda hangi ürün için nasıl bir işletme şartı belirlenmesi gerektiği şu şekildedir [8];

1. Piroliz işlemi sonunda katı ürün verimini arttırarak katı üründen daha fazla elde edebilmek için işlem sıcaklığının düşük tutulması buna karşılık bekleme süresinin uzun olması gerekmektedir.
2. İşlem sonunda gaz ürün miktarının fazla olması isteniyorsa işlem sıcaklığının yüksek derecelere çıkarılması ve bekleme süresinin uzun tutulması gerekmektedir.
3. Piroliz işlemi sonunda sıvı ürün elde edilmek isteniyorsa işlem sıcaklığının ortalama bir değerde tutularak bekleme süresinin ise kısa olması gerekmektedir.

Yukarıda bahsedilen durumlar Çizelge 2.1 ve Şekil 2.2’de örneklendirilmiştir.



Şekil 2.2. Piroli ürün dağılımı [8].

Hızlı piroliz sisteminde işlem birkaç saniye gibi çok kısa sürelerde gerçekleşmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken konu, reaksiyona giren biyokütle parçacığının optimum sıcaklığa çıkmasını sağlarken, odun kömürü oluşumuna neden olan daha düşük ara sıcaklıkların yaşanmasını engellemek veya en aza indirmektir. Bunun sağlanabilmesi için biyokütle parçacıklarının akışkan yataklı sistemlerde küçük parçacık haline getirilmelidir [7].

2.2.2.1. Reaktörler

Hızlı piroliz sistemini diğerlerinden ayıran ve ön plana çıkmasına sebep olan özelliklerinin başında reaktörler gelmektedir.

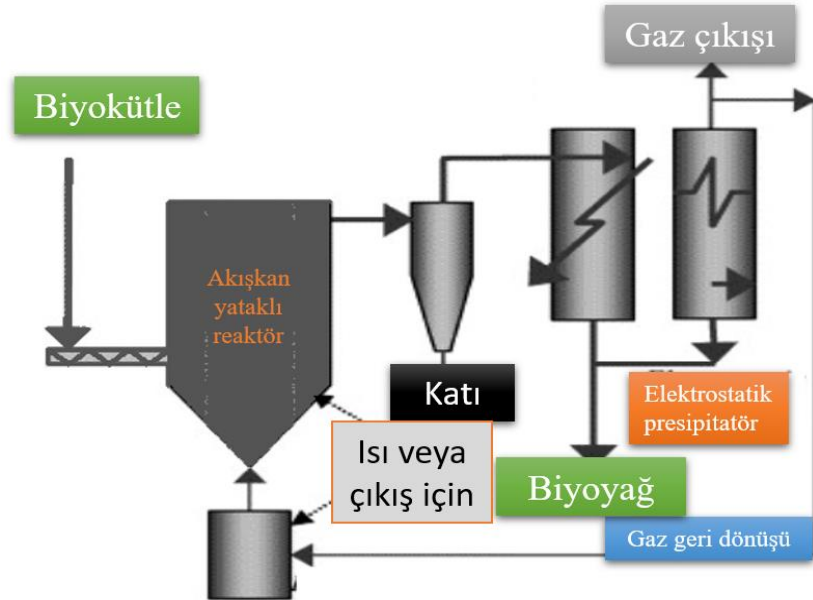
Reaktörlerin dışında hızlı piroliz sisteminin önemli konuları; Biyokütle tedariki, biyokütle depolama ve işleme, biyokütle kurutma ve öğütme, ürün toplama, depolamadan oluşmaktadır.

Hızlı piroliz sisteminde kullanılan reaktör tipleri ve özellikleri aşağıda verilmiştir [7].

Kabarcıklanan akışkan yataklı reaktör

1. Basit yapılıdır ve işlemleri kolaydır.
2. Sıcaklık kontrolü iyi bir şekilde sağlanabilmektedir.
3. Yüksek katı yoğunluğu özelliği ile Biyokütle parçacıklarına çok verimli ısı transferi sağlayabilmektedir.
4. Kolay ölçeklendirilebilmektedir.
5. Yüksek sıvı verimi vardır ve bunun yanında sistem performansı iyidir.
6. Kabarcıklanan akışkan yataklı reaktör sistemi çeşitli şekillerde ısıtma yöntemlerinin kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.
7. Yüksek Biyokütle ısıtma hızlarına ulaşabilmek için Biyokütle parçaları 2-3 mm'den daha küçük hale getirilmelidir.
8. Oluşan çar (kömür), hızlı piroliz sistemlerinde etkili bir buhar kırma katalizörü görevi görmektedir [7].

Kabarcıklanan akışkan takalı reaktör Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

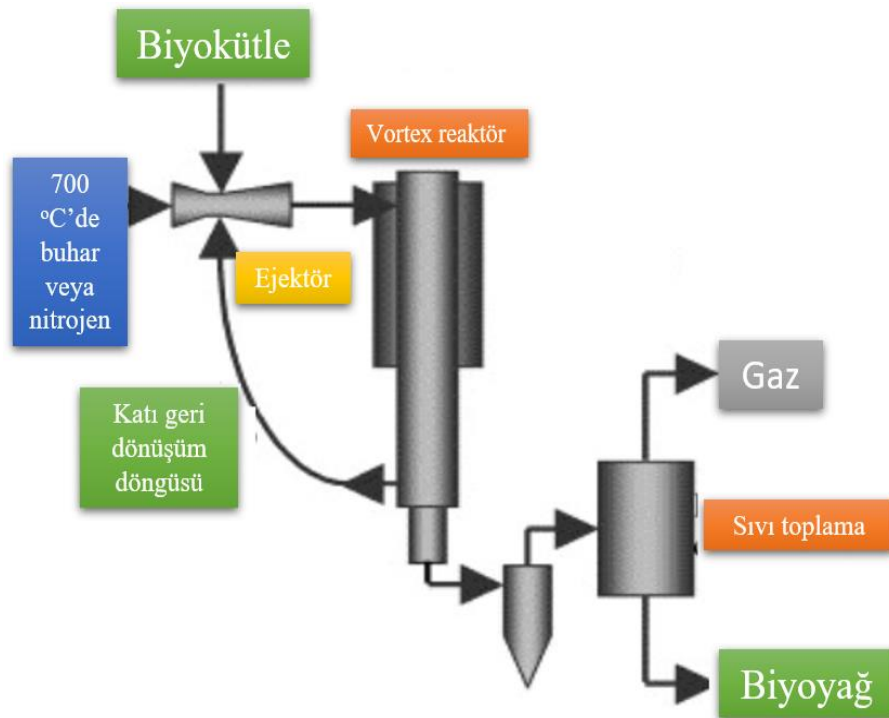


Şekil 2.3. Kabarcıklanan akışkan yataklı reaktör [7].

Vortex ablatif reaktör

1. Santrifüj kuvveti ile veya mekanik şekilde elde edilen sıcak reaktör duvarlarında yüksek derecede partikül basıncı bulunmaktadır.
2. Parçacık ve reaktör duvarları arasında yüksek derecede bağlı hareket bulunmaktadır.
3. Ablatif reaktör sistemlerinde reaktörün duvar sıcaklığı 600 °C'nin altında olmalıdır.
4. Büyük besleme tipleri için kullanılabilir.
5. Reaksiyon oranlarının sınırlandırılması biyokütleyle bağlı değil bunun yerine reaktör ısı transferi ile sınırlıdır.
6. Ablatif reaktör sistemlerinde işlemler mekanik olarak yürütüldüğü için reaktör daha karmaşık şekildedir [7].

Vortex ablatif reaktör Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

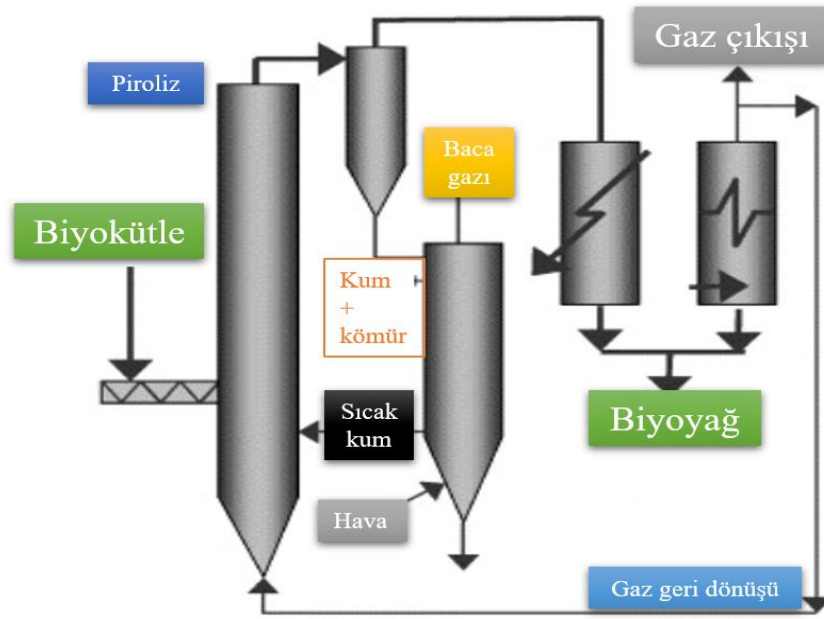


Şekil 2.4. Vortex ablatif reaktör [7].

Dolaşan akışkan yataklı reaktör

1. Reaktörde sıcaklık kontrolü iyi bir şekilde sağlanabilmektedir.
2. Çarın (kömürün) bekleme süresi buhar ve gazın bekleme süreleri ile birbirine çok yakındır.
3. Dolaşan akışkan yataklı reaktörler yüksek miktarda hedeflenen ürün çıktıları için uygundur.
4. Hidrodinamik yapısı karışık olabilmektedir.
5. Gaz akış hızları yüksek olması sebebi ile çar (kömür) aşınmıştır [7].

Dolaşan akışkan yataklı reaktör Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

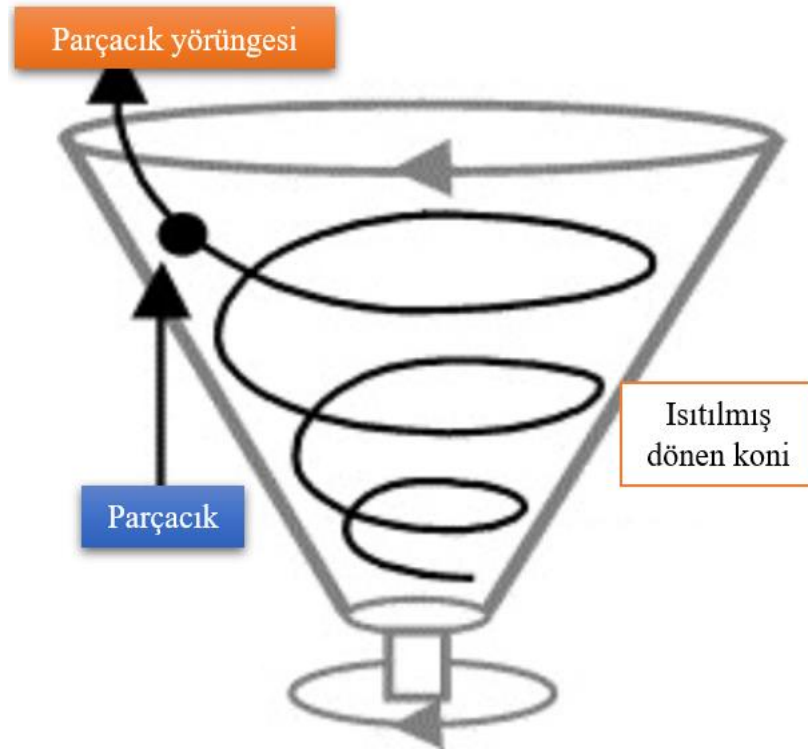


Şekil 2.5. Dolaşan akışkan yataklı reaktör [7].

Dönen koni reaktörü

1. Yaklaşık 10 Hz hızla sıcak kumu ve biyokütleyi ısıtılmış dönen bir koni yukarı çekmektedir.
2. Buharlar geleneksel olarak toplanıp işlenmektedir.
3. Kömür ve kum, çıkarıldıkları yerden koniyi çevreleyen bir akışkan yatağa düşmektedir. Burada kömür, kumun ısıtılması için yakıldığı ve dönen koniye geri bırakıldığı ayrı bir akışkan yataklı yakıcıya gelmektedir.
4. Kömür ikincil akışkan yataklı yakıcıda yakılarak sıcak kum piroliz sistemine yeniden sirküle edilmektedir.
5. Dönen koni sistemlerinde taşıyıcı gaz ihtiyacı diğer sistemlere göre daha az olsa da kömür yanması ve kum nakli için gereklidir [7].

Dönen koni piroliz reaktörü Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Dönen koni piroliz reaktörünün prensibi [7].

2.3. PİROLİZ ÜRÜNLERİ

Piroliz işlemi sonucunda üç farklı ürün elde edilmektedir. Bunlar; katı ürün, sıvı ürün ve gaz üründür. Piroliz işlemi sonucunda her zaman üç ürün çıkmaktadır. Ancak bu üç ürün miktarı arasında verimin belirlenebileceği ‘Hızlı Piroliz’ başlığı altında anlatılmıştır.

Ürünlerin oluşmasında işletim şartlarının etkisi kadar kullanılan malzemelerin özellikleri de etkilidir.

Piroliz işlemi sonucunda üretilen ürünler farklı alanlarda kullanılabilir. Katı ürünler aktif karbon, karbon siyahı olarak kullanılabilir. Sıvı ürünler ise iyileştirme işlemlerinin ardından biyoyağ olarak yakıt katkı maddesi şeklinde kullanılabilir.

2.3.1. Biyoyağ

Biyokütlenin pirolizi işleminden sonra elde edilen sıvı ürün biyokütle piroliz yağı veya kısaca biyoyağ, piroliz yağı şeklinde isimlendirilmektedir [9]. Piroliz işleminden sonra oluşan ham piroliz sıvısı veya bir diğer adıyla biyoyağ koyu kahverengi bir renkte ve akışkan bir yapıdadır. Viskoziteli bir akaryakıt benzemektedir. Geleneksel akaryakıt ile karşılaştırıldığında daha yüksek ısıtma değerine sahiptir [10].

Oluşan bu sıvının yapısı içerisinde su içeren karmaşık bir hidrokarbon yapıdan meydana gelmektedir [8].

Biyoyağ piroliz ürünleri arasında birincil ürün olarak değerlendirilmektedir. Biyoyağ verimini arttırabilmek için piroliz işlemleri arasında hızlı piroliz yöntemi tercih edilmektedir [11], [12].

Burada ürün veriminin artması için dikkat edilmesi gereken hususlar 450-650 °C gibi orta piroliz sıcaklığı ve kısa bekleme süreleri tercih edilmelidir. Biyokütlenin ürün verimi için 2 mm gibi küçük parçalara ayrılması gerekmektedir [13].

Biyoyağlar, selüloz, hemiselüloz ve ligninin parçalanması sonucu oluşan farklı boyuttaki moleküllerin çok bileşenli karışımlarıdır. Bu nedenle biyokütlenin pirolizi sonucu elde edilen biyoyağ yakıtının özellikleri petrol türevli yakıtlardan farklı özelliklere sahiptir [9].

Çizelge 2.2’de biyokütleden elde edilen biyoyağ yakıt özellikleri ile petrol türevli dizel yakıt özelliklerinin bazı parametreleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 2. 2. Biyoyağ ve Dizel yakıtı ait bazı parametreler [11].

Parametreler	Biyoyağ	Dizel
Nem İçeriği	15-30	-
pH	2.5	1
C	55-58	86
H	5.5-7.0	11.1
N	0-0.2	1
S	-	0.8
Viskozite	40-100 cp (315 K, %25 su)	<2.39 (325 K)

Biyoyağın yapısal özellikleri ile ilgili su, oksijen, viskozite, asitlik, ısıtma değeri ve kül özellikleri üzerinden bir değerlendirme yapılmıştır.

2.3.1.1. Su

Biyokütleden elde edilen biyoyağ, biyokütlenin kendisinde bulunan orijinal nem, depolama ve piroliz reaksiyonu sonucu oluşan %15 ile %30 arasında su içeriğine sahiptir. Biyoyağda bulunan bu suyun varlığı bazı olumlu ve olumsuz sonuçları beraberinde getirmektedir. Suyun varlığı ısıtma değerini düşürebilmektedir. Ancak olumlu olarak bakıldığında biyoküttelede bulunan su, viskoziteyi düşürerek akışkanlığı arttırmaktadır. Biyoyağın viskozitesinin düşük olmasından dolayı akışkanlığının fazla olması biyoyağın yanma verimi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir [9].

2.3.1.2. Oksijen

Piroliz işlemler sonucunda üretilen biyoyağlarda çeşitli oranlarda oksijen içeriği bulunmaktadır. Çizelge 2.3'te farklı yerlerde üretilmiş biyoyağın çeşitli özellikleri verilmiştir. Burada görüleceği üzere farklı yerlerde piroliz sonucu üretilen biyoyağlarda oksijen içeriği %33 ile %39 arasında değişiklik göstermektedir [14].

Çizelge 2.3. Piroliz sıvılarının su içeriği ve elementel analizleri [14].

Deney Yapılan Yer	Hammadde	Su içeriği (%)	Elementel Analiz (%)			
			C	H	N	O
Federal Ormancılık ve Orman Ürünleri Araştırma Merkezi	Kayın	31,9	54,35	6,8	0,22	38,63
ENSYN Teknoloji Enstitüsü	Karışık Parke	26,4	59,89	5,98	0,34	33,79
Union Elektrik FENOSA	Okaliptüs	25,6	54,44	6,1	0,39	39,07
Aston Üniversitesi, İngiltere	Kavak	16,1	53,55	6,5	0,35	39,6
Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı, ABD	Kavak	16,3	56,2	6,64	0,3	36,86
Twente Üniversitesi	Karışık Yumuşak Ahşap	18,6	54,84	6,51	0,39	38,26
Finlandiya Teknik Araştırma Merkezi	Çam	17,4	55,23	6,6	0,11	38,06

Biyoyağlarda değişik oranlarda bulunan oksijenin varlığı yakıt olarak kullanılmak istenen biyoyağın diğer hidrokarbon yakıtlar ile arasındaki temel farklılıklardan biridir. Bu durum biyoyağların yakıt olarak kullanılmasında önemli bir sorunu teşkil etmektedir. Bu sorunlar şu şekilde sıralanabilmektedir [9];

1. Yüksek oksijen içeriği, geleneksel yakıtlardan enerji yoğunluğu olarak %50 daha düşük hale gelmesine,
2. Üretilen biyoyağların hidrokarbon yakıtlar ile karışmamasına neden olmaktadır.

Bunların yanı sıra biyoyağların güçlü asidik yapıları onları kararsız hale getirmektedir. Karmaşık yapıya sahip biyoyağların kaynama noktası sıcaklık aralığı geniş bir aralığı kapsamaktadır [9].

2.3.1.3. Viskozite

Biyoyağların kinematik viskoziteleri, biyoyağ üretmek için kullanılan biyokütlenin türüne göre değişmektedir. Bu değişimin sebebi biyoyağda bulunan su içeriğidir. Biyokütlerde yüksek su içeriği var ise kinematik viskozite değerleri düşük olmaktadır [15].

Yapılan çalışmalarda biyoyağ üretimi sırasında metanol kullanımının da viskozite üzerinde etkileri görülmüştür. Bu bağlamda biyoyağ üretimi sırasında metanol kullanımı viskozite yoğunluğunu düşürmüştür [16].

2.3.1.4. Asitlik

Biyoyağlar bünyelerinde çeşitli asit gruplarını içermektedir. Biyoyağ içerisinde bulunan asetik asit ve formik asit gibi karboksilik asitler pH üzerinde etkilidir. Biyoyağ içerisinde bulunan karboksilik asitler pH'ı düşürerek 2 ile 3 aralığında pH değerlerine sebep olmaktadır. Asitlik hali biyoyağın aşındırıcılığını arttırarak özellikle yüksek sıcaklıklarda nakliyesinin zorluğuna sebep olabilmektedir [9].

2.3.1.5. Isıtma Değeri

Piroliz işlemleri sonucunda üretilen biyoyağların özellikleri çeşitli parametrelere bağlıdır. Biyoyağların özelliklerini etkileyen başlıca parametreler;

1. Biyokütle hammaddeleri,
2. Üretim süreçleri,
3. Reaksiyon koşulları şeklinde özetlenebilmektedir.

Biyokütlelerin hammadde kaynağına göre ısıtma türlerine bakıldığında yağ bitkilerine ait biyokütlelerin ısıtma değerleri saman, odun veya tarımsal atıklara kıyasla daha yüksek değere sahiptir [9].

2.3.1.6. Kül

Piroliz işlemleri sonucunda üretilen biyoyağların verimlilik parametrelerinin değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer tür kül oranıdır. Biyoyağ içerisinde kül bulunması bazı sorunlar yaşanmasına neden olabilmektedir. Bu sorunlar;

1. Motor ve valflerde erozyona,
2. Motor ve valflerde korozyona,
3. Kül içeriğinin 0.01 değerinin üstüne çıkması durumlarında ise motor sisteminde bozulmalara neden olabilmeleri şeklindedir.

Korozyonun oluşmasının sebebi yüksek sıcaklıklarda sodyum ve potasyum gibi elementlerdir. Sertliklerin oluşmasında ise kalsiyum etkilidir [9].

2.3.2. Biyokömür

Biyokömür bir diğer adıyla odun kömürü olarak adlandırılmaktadır. Prioliz sistemi içerisinde termokimyasal işlemler sonucunda biyokütle bileşenlerinin kısmen veya tamamen ayrışmasından üretilen karbonlu yapıya sahip katı üründür [9].

Bir diğere ifadeyle bitki ve hayvan bazlı biyokütlenin pirolizi yoluyla sentezlenen, karbon içeriği zengin yan ürün şeklinde adlandırılabilir [17].

Biyokömürün fiziksel kimyasal özellikleri hammadde türüne ve piroliz çalışma koşullarına bağlıdır [9]. Piroliz işlemi sonunda katı ürün verimini artırarak katı üründen daha fazla elde edebilmek için işlem sıcaklığının düşük tutulması buna karşılık bekleme süresinin uzun olması gerektiği bilinmektedir [8].

Piroliz işleminde düşük sıcaklık ve uzun bekleme süresi koşulları altında üretilmiş biyokömür çeşitli alanlarda kullanılabilir. Biyokömür, çeşitli organik ve inorganik kirleticilerle kirlenmiş toprağın temizlenmesinde ve bunun yanında kirlenmiş suyun arıtılmasında kullanılabilir.

Organik ve inorganik kirleticileri soğurma özelliğine sahip biyokömürün, piroliz sıcaklığından etkilenen biyokimyasal özellikleri soğurma verimliliği üzerinde büyük ölçüde etkilidir. Farklı sıcaklık özelliğinin ön plana çıkması ile farklı kirletici kaynaklarının arıtılmasında kullanılabilir.

1. Yüksek sıcaklıkta piroliz işlemine tabii tutulmuş biyokütlenin yüzey alanı fazla ve gözenek yapıları oldukça gelişmiş düzeydedir. Bu özellikleri ile yüksek sıcaklıkta üretilen biyokömür organik kirleticilerin giderilmesinde daha etkili olmaktadır.
2. Buna karşılık daha düşük sıcaklık şartlarında üretilmiş biyokömür, daha fazla katyon salınımı gibi nedenlerle inorganik kirleticilerin giderilmesinde etkilidir.

Biyokömürün değişik alanlarda kullanılabilmesinde bazı değişkenler ön plana çıkmaktadır. Bu değişkenler, piroliz koşulu ve hammadde türü olarak sınıflandırılabilir.

Piroliz koşulu ve hammadde türü biyokömür absorpsiyonu etkilemektedir. Kirlenmiş su üzerine yapılan uygulamalara kıyasla toprak kirliliği için uygulamalar toprak yapısının karmaşıklığı bu alanda uygulamaları sınırlandırmaktadır [17].

2.3.3. Biyogaz

Biyokütlenin dönüşümü için verimli yöntemlerden biri olan piroliz sistemleri yüksek sıcaklıklarda işlem yapılan termal proseslerdir. Piroliz işlemleri sonucunda oluşan üç ana üründen biri de biyogazdır. Termal pirolitik dönüşüm olan piroliz yönteminde, pirolitik koşullar altında biyokütle oksijensiz bir ortamda 450-500 °C'lere kadar ısıtılmaktadır.

500 °C'lik piroliz işlemi sonucunda üretilen biyogaz içerisinde CO, CO₂, ve az miktarlarda metan ve hidrokarbonlar bulunmaktadır. CO ve CO₂, hidrokarbon ve hidrojene kıyasla daha düşük sıcaklık aralığında oluşmaktadır. CO ve CO₂ biyokütlenin birincil buharlaşmasının ürünü iken hidrokarbonlar ve hidrojenler yüksek sıcaklıklara sahip ikinci buharlaşmanın ürünleridir [18].

Biyokütlenin pirolizi sonucu oluşan ürünlerin ısıtma hızına göre karşılaştırmaları Çizelge 2.4'te verilmiştir. Burada görüldüğü üzere ısıtma hızı arttığında uçucu ürün (gaz ürün) verimi düşmektedir.

Çizelge 2.4. Biyokütlenin uçucu, sıvı ürün ve odun kömürü verimleri [18].

Parametreler	500 °C'de verim (%)	
	10 °C/dakika	50 °C/dakika
CO ₂	18,6	11
CO	6,6	3,1
CH ₄	0,6	0,39
C ₂ H ₄	0,1	0,07
C ₂ H ₆	0,17	0,12
H ₂	0	0
Sıvılar	44,7	54,37
Odun Kömürü	29,3	31

Biyokütlenin piroliz işleminden sonra oluşan ürünler farklı alanlarda kullanılabilir. Piroliz sonucu oluşan üç üründen biri olan biyogazın yakıt olarak kullanılabilirliği vardır. Çizelge 2.5'te görüldüğü gibi biyokütle pirolizi sonucu oluşan gaz, karmaşık bir gazlı karışım halindedir.

Piroliz sonucu oluşan biyogazın yakıt olarak kullanılabilmesi için nitrojenin biyogaz ile ikame edilmesi gerekmektedir [19].

Çizelge 2. 5. Biyokütlelerin pirolizi sonucu gaz ürün bileşimi [19].

Pirinç Kabuğundan Çıkan Gaz		Talaştan Çıkan Gaz		Karışımdan Çıkan Gaz	
Parametreler	Oran %	Parametreler	Oran %	Parametreler	Oran %
N ₂	88	N ₂	86	N ₂	87
H ₂	0,01	H ₂	0,02	H ₂	0,02
CO	2,24	CO	3,4	CO	2,58
CO ₂	7,62	CO ₂	9,2	CO ₂	8,42
CH ₄	0,54	CH ₄	0,63	CH ₄	0,57
C ₂ H ₄	0,27	C ₂ H ₄	0,3	C ₂ H ₄	0,28

Biyokütlenin pirolizi sonucu oluşan sıvı ve gazlar yenilenebilir enerji sınıfına dahil olarak fosil yakıtların yerine kullanılabilir. Örneğin ısı veya elektrik üretimi için kıvılcım ateşlemeli ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanılabilir [20].

Biyokütleden piroliz yöntemi ile üretilen biyogazın bir diğer uygulama alanları şu şekilde olabilmektedir[13];

1. Sıcak pirolitik gaz, inert taşıyıcı gazı önceden ısıtmak için,
2. Üretilen biyogaz, piroliz reaktörüne geri döndürülerek taşıyıcı gaz olarak kullanılabilir.

2.3.3.1. Biyogaz verimini etkileyen parametreler

Reaktör Sıcaklığı

Biyokütlenin piroliz işlemi sırasında sıcaklıkta yaşanan artışlar gaz üretiminin artmasına bununla birlikte katı ürün fraksiyonunda azalmaya yol açmaktadır. Piroliz işlemi sırasında sıvı üretimi için en verimli sıcaklık 500 °C'dir. Bu sıcaklık değerine sahip işlemde sıvı verimindeki artış gaz oluşumundaki artıştan gelmektedir. Gaz oluşumundaki artışın 500 °C civarında meydana gelmesi sıvı fraksiyonunun çatlaması bu sıcaklıktan itibaren gerçekleştiği ile ilişkilendirilmektedir [21].

Bekleme Süresi

Biyokütlenin piroliz işlemi sırasında gaz veriminin arttırılabilmesi için gazın sistem içerisinde bekleme süresinin arttırılması gerekmektedir. Bekleme süresinin arttığı durumlarda gaz verimi artmaktadır.

Çizelge 2.6'da farklı biyokütle türlerinin farklı bekleme sürelerinin karşılaştırılmaları ile gaz ürün verimi incelenmiştir. Buradaki veriler bekleme süresinin artması ile gaz veriminin artacağını göstermektedir.

Çizelge 2. 6. Bekleme sürelerinin verim üzerine etkisi [21].

Biyokütle Türü	Bekleme Süreleri (saniye)				
	1,3	2	3	4,5	10
Pirinç samanı (%)	35,50	36,80	40	41	41,20
Talaş (%)	42,20	44,30	46,50	47	47,20

Bekleme süresindeki artış ile gaz veriminin arttırılabilmesinin sebebi sıvının birincil piroliz ürünüde meydana gelen çatlama reaksiyonu ile açıklanmaktadır [21]. Bu da uçucu fazın kalma süresinin ne kadar arttırılırsa çatlama reaksiyonu o kadar iyi

gerçekleştirilebileceği anlamına gelmektedir. Ancak belli bir bekleme süresinden sonra verim artışı yavaşlamaktadır.

Fiziksel ve Kimyasal Ön İşlemlerin Etkisi

Biyokütle hammaddesinin fiziksel ön işlemleri;

1. Mekanik öğütme
2. Ufalama

Kimyasal ön işlemleri;

1. Nem giderme
2. Nem ekleme
3. Kül giderimi

şeklinde özetlenebilmektedir.

Fiziksel ön işlemin gaz verimi üzerinde olumlu etkisi vardır. Biyokütle beslemesinde partikül boyutunun daha küçük olması gaz verimi üzerinde olumlu yönde bir artışa sebep olabilmektedir. Tablo 2.7’de farklı biyokütle türlerinin fiziksel ön işleme tabii tutulduktan sonraki durumu ile ilk durumunun gaz verimi üzerine etkisi gösterilmektedir.

Çizelge 2.7’de verilen çalışmaya göre biyokütlenin piroliz işlemi öncesi fiziksel ön işleme tabii tutulması gaz verimi üzerinde %12 ile %14 arasında bir verim artışı sağlandığını göstermektedir.

Çizelge 2.7. Fiziksel ön işlemin gaz verimine etkisi [21].

Biyokütle Türleri	Ham Hali (Ø)	Ham Hal Gaz Verimi (%)	İşlenmiş Boyut (Ø)	İşlenmiş Hal Gaz Verimi (%)	Artış Miktarı (%)
Pirinç Samanı	2*10 mm	35,50	0,132 mm	40,00	12,70
Talaş	10*4*2	37,00	0,25 mm	42,20	14,00

Biyokütle üzerine yapılan kimyasal ön işlemlerde fiziksel ön işlemlerde olduğu gibi gaz ürün verimi üzerinde kesin bir artışa sebep olduğu söylenememektedir. Örneğin kimyasal ön işlem olan nem ekleme işleminde gaz veriminde küçük bir artış yaşanabilirken nem uzaklaştırma işleminde bu durumun aksine gaz verimi üzerinde düşüşe sebebiyet verilebilmektedir. Bir diğer kimyasal ön işlem olan kül giderme işlemlerinde de sonuçlar aynı şekildedir. Kül giderme işlemi sonrasında biyokütle gaz ürün veriminde düşüş yaşanmaktadır. Çizelge 2.8’de kimyasal ön işlemlerin gaz verimi üzerindeki etkileri verilmiştir.

1. Nem giderme işleminde, biyokütlenin gaz ürün veriminde %0,20 ile %0,40 arasında azalma olduğu görülmektedir.
2. Nem ekleme işleminde ise %0,20 oranında bir artış söz konusudur.
3. Kül giderme işlemlerinde ise %0,7 ile %1,4 arasında bir azalma görülmektedir.

Çizelge 2. 8. Kimyasal ön işlemin gaz verimine etkisi [21].

Biyokütle Türleri	Ham Hali (%)	Nem Giderme (%)	Nem Ekleme (%)	Kül Giderme (%)
Pirinç Samanı	35,50	35,10 (-)	35,70 (+)	34,10 (-)
Talaş	42,20	42,00 (-)	42,40 (+)	41,50 (-)

Isı ve Kütle Transfer Kabiliyetinin Etkisi

Piroliz işleminde istenilen sıcaklığa ulaşabilmek için elektrik enerjisinin kullanıldığı sistemlerde ısı transfer özelliği önemli ölçüde ürün verimini etkileyebilmektedir. Isı transfer veriminin kütle transfer veriminin artırılması için reaktörde yapılacak

iyileştirmeler gaz ürün verimini arttırmaktadır. Çizelge 2.9’da reaktörün iyileştirme öncesi gaz verimi ile iyileştirme sonrası gaz verimi arasındaki fark bu bilgiyi doğrulamaktadır.

Çizelge 2. 9. Isı ve kütle transfer kabiliyetinin gaz verimine etkisi [21].

Biyokütle Türü	İyileştirmeden önce	İyileştirmeden Sonra	Değişim
Pirinç Samanı	35,5	40,1	15
Talaş	42,2	52,3	24,1

2.4. PİROLİZ TEKNOLOJİSİNİN AVANTAJLARI

Piroliz, yanma ve gazlaştırma teknolojileri biyokütleden enerji geri kazanımı için ısı işlem uygulama mantığı ile çalışan geri kazanım teknikleridir. Bu termokimyasal geri kazanım tekniklerinin bazı özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 2.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 2.10. Termokimyasal dönüşüm tekniklerinin karşılaştırılması [22].

Parametreler	Yanma	Gazlaştırma	Piroliz
Sıcaklık (°C)	800-1000	700-900	400-1200
Basınç (MPa)	0,1	0,1	0,1-0,5
Kaynaklar	Katı Biyokütle	Katı Biyokütle	Katı Biyokütle
Durum	Ticari	Ticari	Gelişen
Ön İşlem	Gerekli Değil	Gerekli	Gerekli
Maliyet	Düşük	Yüksek	Yüksek
Zararlı Emisyon	Yüksek	Düşük	Düşük
Ürün	Sıcaklık	Biyo-sentez, biyo-yağ ve kömür	Katı, Sıvı, Gaz

Bu teknikler arasında en eski yöntem yanma tekniğidir. Yanma tekniğine göre gazlaştırma ve piroliz teknikleri daha ilgi çekici ve verimli bir konumdadır.

Gazlaştırma ve piroliz teknikleri verim yönünden daha ön planda olmaları sebebi ile gelecek dönemlerde tercih edilecek teknolojiler arasında yer almaktadır. Gazlaştırma ve piroliz tekniklerinde kaynak olarak kullanılan biyokütle, petrokimyasal alanlarda yakıt veya hammadde olarak değerlendirilebilecek enerji yönünden zengin ürünlere dönüştürülmektedir. Gazlaştırma ve piroliz teknikleri ile üretilen ürünler uzak alanlara taşınarak kullanılabilirken yanma işlemi sonrası oluşan ısının uzak yerlere taşınması mümkün olmadığından bu teknik ile üretilen ürünün sadece yerel alanda kullanılabilirliği bu tekniği sınırlandırmaktadır [22].

Yanma veriminde düşük maliyet özelliği bu tekniği avantajlı kılmakta yeterli değildir. Büyük ölçekli gazlaştırma ve piroliz tesislerinde daha verimli ve daha yüksek kalorifik derece sahip ürünlerin üretilmesi ile maliyet farkı ortadan kaldırılarak gazlaştırma ve piroliz için avantajlı durum devam ettirilebilmektedir.

Bununla birlikte gazlaştırma ve piroliz teknikleri ile yapılan işlemler sırasında açığa çıkan emisyonlar yanma tekniği ile karşılaştırıldığında çok düşük seviyededir. Yanma işlemleri sırasında açığa çıkan zararlı emisyonlar, gazlaştırma ve piroliz tekniklerini yanmadan daha avantajlı konuma getirmektedir.

Piroliz tekniği günden güne hızla büyüyen ve geniş bir uygulama alanına kavuşan bir teknik halini almaktadır. Piroliz tekniği diğer termokimyasal dönüşüm teknolojilerinden pozitif yönde ayrılmaktadır. Piroliz tekniğini diğer tekniklerden ayıran en önemli avantajlarından biri istenen sonuçlara göre tekniğin işletim şartlarının değiştirilerek ürün veriminin ayarlanabilmesidir. Örneğin biyokömür üretimi için yavaş piroliz yöntemi kullanılırken biyoyağ veriminde istenilen artış için hızlı piroliz yöntemi kullanılabilir [22].

Piroliz işlemi sonucunda oluşan ürünlerin verimliliği istenildiği şekilde değiştirilebildiği gibi farklı piroliz yöntemleri ile oluşan piroliz ürünlerinin birbirlerine yakın oranlarda üretmek de mümkündür. Katı ve sıvı ürün verimliliğinin aynı oranda olması istenildiği takdirde vakumlu piroliz yöntemi kullanılarak istenilen sonuç elde edilebilmektedir [23].

Piroliz teknolojisinin birçok avantajı bulunmaktadır. Diğer yöntemlerden ayıran en önemli avantajlarından bir tanesi de hammadde türü ve çalışma koşulları bakımından sağladığı esnekliktir. Bununla birlikte piroliz işlemi sonucunda oluşan ürünlerin verimi diğer yöntemlerle kıyaslandığında piroliz tekniğini daha avantajlı konuma getirmektedir.

Piroliz işlemleri sonucunda oluşan emisyonlar da diğer teknolojilerde olduğu gibi çevreye oldukça fazla miktarda zarar verecek emisyonlar değildir. Piroliz işlemi sonucunda oluşan emisyonlar kükürt ve NO_x içeren gazlardır. Bu yönüyle sera gazı emisyonlarının oluşumunun belli miktarda önüne geçilmiş olmaktadır [22].

2.5. PİROLİZİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

Enerji geri dönüşümü konusunda diğer yöntemler ile kıyaslandığında önemli avantajlara sahip olan piroliz tekniği için reaksiyon koşulları büyük bir öneme sahiptir. Önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere piroliz yönteminin avantajları arasında sayılan işletme konusunda geniş bir alana sahip olması ürün verimi üzerinde etkilidir.

Piroliz işleminin sonucunu etkileyen parametreler arasında partikül boyutu, sıcaklık, basınç, ısıtma hızı, numune miktarının etkisi ve bunun gibi daha birçok parametrelerin sayılabilmesi mümkündür.

Bu bahsedilen parametreler piroliz işlemi sonucunda oluşan ürünlerin verimleri üzerindeki etkisi kadar oluşan ürünlerin kalitesinde de etkilidir. Bu nedenle bu parametrelerin bilinmesi gerekmektedir.

2.5.1. Partikül Boyutunun Etkisi

Enerji dönüşümü için kullanılan piroliz tekniğinin önemli avantajları arasında gösterdiğimiz geniş kullanım alanına sahip olması beraberinde dikkat edilmesi gereken bazı hususları ön plana çıkarmaktadır.

Farklı alanlardan farklı türdeki atıklar işleme alınacağı için farklı boyutlar söz konusu olacaktır. Ancak partikül boyutu, piroliz ortamındaki ısının biyokütle/ürüne aktarılmasında aktarım oranı üzerinde etkisi olduğu için dikkat edilmesi gereken bir faktördür. Piroliz tekniğinin termokimyasal bir süreç olduğu düşünüldüğünde bu durumun ürün verimleri açısından oldukça önemli olduğu görülmektedir.

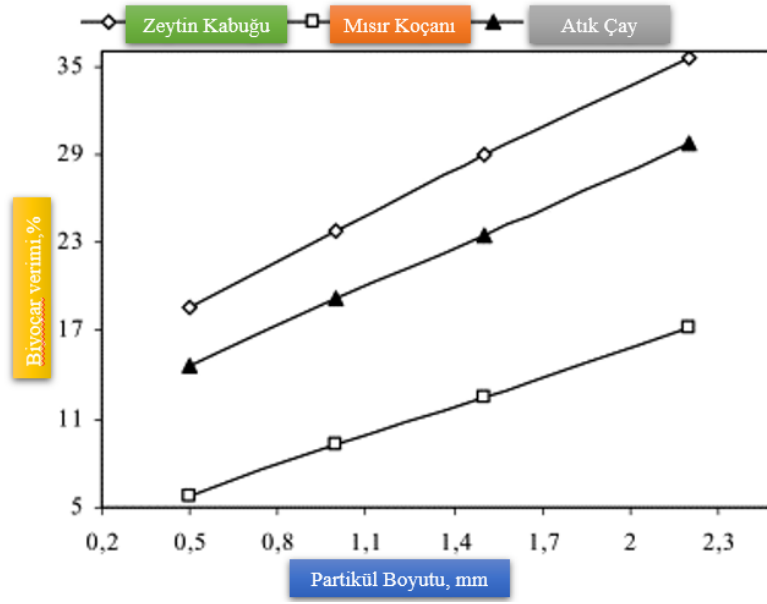
Partikül boyutunun artması biyokütlenin yüzeyi ile çekirdeği arasındaki mesafenin artmasına sebep olmaktadır. Bu durum piroliz ortamında sıcaklığın biyokütlenin çekirdeğine ulaşmasında gecikme olmasına sebep olmaktadır. Böyle bir durumda yaşanan sıcaklık gradyanı piroliz ürünü oluşmasında farklılık meydana getirerek biyokömür oluşumu üzerinde olumlu etkiye sahiptir. Ancak biyokömür üzerinde meydana gelen olumlu etki biyoyağ ve biyogaz ürünlerini olumsuz yönde etkilemektedir [22].

Şekil 2.7’de partikül boyutunun biyokömür verimi üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Burada farklı biyokütle kaynaklarının partikül boyutlarının değiştirilmesinden sonra elde edilen biyokömür veriminin etkilendiği görülmektedir.

Zeytin kabuğu ile yapılan deneyde ilk olarak işleme alınan 2,2 mm boyutlarındaki zeytin kabuğu daha sonra 0,5 mm civarına düşürüldüğünde biyokömür verimi %35 seviyelerinden %19 seviyelerine kadar düşmektedir.

Mısır koçanı için yapılan çalışmada partikül boyutunun 0,5 mm’den 2,2 mm’ye çıkarılmasından sonra piroliz işlemi sonunda oluşan katı tortunun %5,7’den %16,6’ya yükseldiği görülmüştür.

Şekildeki çalışmalarda da görüldüğü üzere mısır koçanı örneği üzerinde katı ürün miktarında %66’ya yakın bir oranda artış yaşanmıştır.

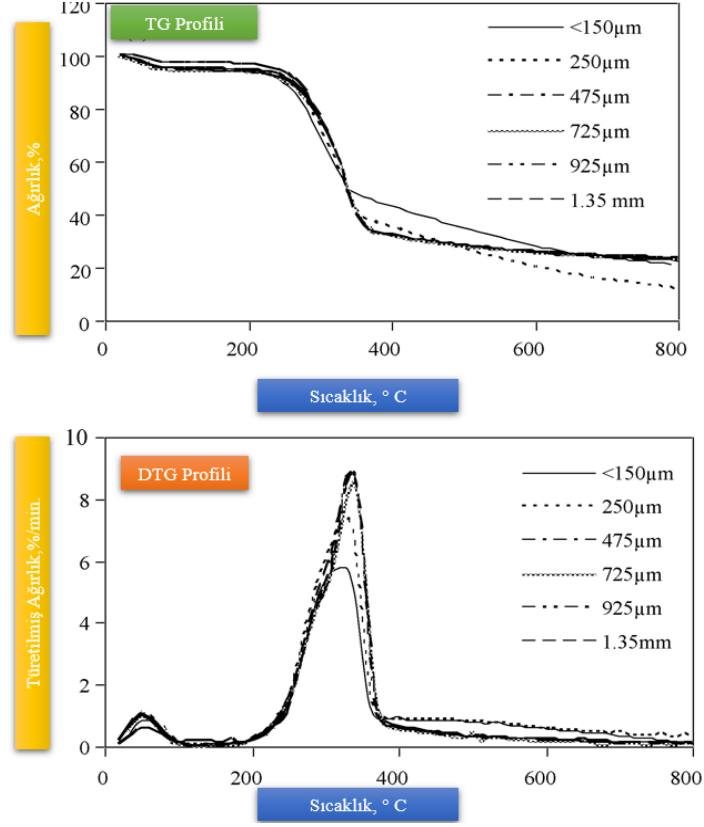


Şekil 2.7. Partikül boyutunun ürün verimi üzerindeki etkisi [24].

Farklı partikül boyutuna sahip biyokütler piroliz işleminde kullanıldıklarında farklı ürün veriminin üretildiği önceki bölümlerde anlatılmıştır. Ürün veriminin partikül boyutuna göre değişmesinin sebebi partikül boyutunun reaktör içerisindeki ısıtma oranını kontrol etmesi olarak gösterilmektedir [22].

Partikül boyutunun büyüklüğüne göre piroliz ortamında oluşan ısının biyokütlenin dış yüzeyinden içeriye doğru geçişi değişmektedir. Partikül boyutu büyükse ısı biyokütlenin içerisine hızlı bir şekilde geçemez ve biyokütlenin piroliz sıcaklığına ulaşması zaman alır. Isının biyokütlenin içerisine geçmesindeki süresinin uzaması partikül boyutunun ısıtma hızını yavaşlattığı anlamına gelmektedir.

Parçacık boyutunun buğday samanı pirolizi üzerindeki etkisi Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Parçacık boyutu 250 μm 'den 475 μm 'e yükseldikçe kömür veriminin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte buğday samanı pirolizinde diğer parçacık boyutlarından daha küçük parçacıklar için (150-250 μm) maksimum ayrışma oranları DTG eğrileri ile gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Farklı partikül boyutlarında buğday samanının pirolizi [25].

2.5.2. Sıcaklığın Etkisi

Piroliz işlemleri sırasında sıcaklığın artması biyokömür verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Sıcaklıkta meydana gelen artış ağır hidrokarbon malzemelerin termal olarak parçalanmasına neden olarak sıvı ve gazların artmasına yol açarak biyokömür veriminin düşmesine neden olmaktadır.

Çizelge 2.11'de farklı biyokütle kaynaklarının farklı sıcaklıklarda piroliz işlemi sonrasında oluşan biyoçar verimleri karşılaştırılmıştır. Veriler biyokömür veriminin sıcaklık arttıkça ürün veriminin düştüğünü göstermektedir.

Çizelge 2.11. Farklı biyokütle kaynaklarında sıcaklığın biyoçar üzerine etkisi [22].

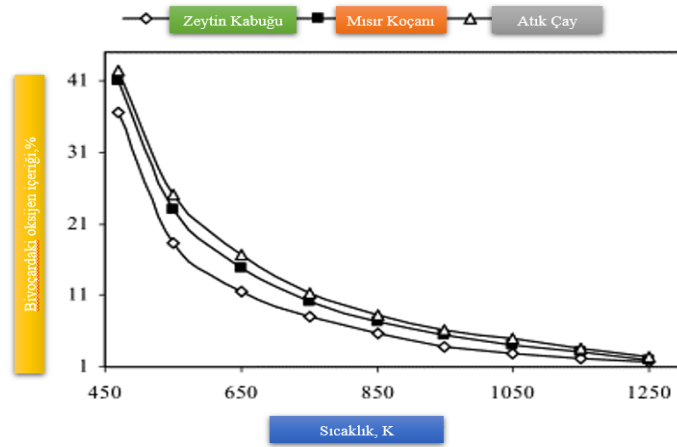
Biyokütle Kaynağı	Sıcaklık Aralığı (°C)	Biyoçar Verimi (%)
Pirinç Kabuğu	400-600	33-25,5
Ferula Arionalis	350-600	40,26-26,29
Mısır Koçanı	400-700	34,2-20,2
Zeytin Kabuğu	450-1250	44,5-19,4
Mısır Koçanı	450-1250	30,6-5,7
Çam	300-450	58-26

Bununla birlikte sıcaklığın oluşan ürünlerin oksijen, karbon ve hidrojen içeriğine etkileri olmaktadır.

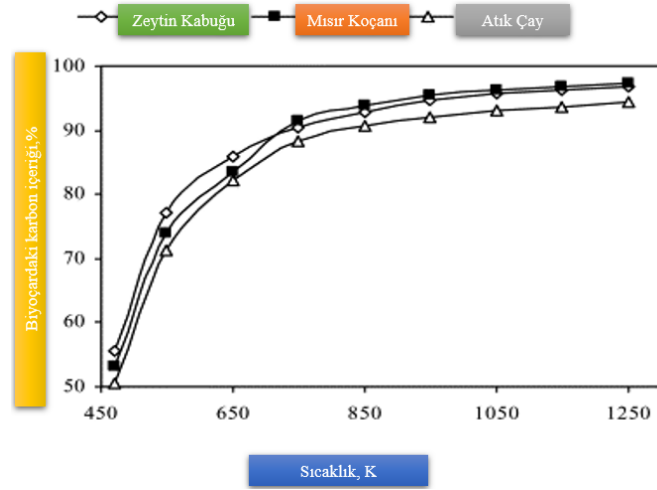
Şekil 2.9’da sıcaklığın biyokütlenin pirolizi sonucu oluşan biyokömürde bulunan oksijen içeriği üzerine etkisi gösterilmektedir.

Şekil 2.10’da sıcaklığın biyokütlenin pirolizi sonucu oluşan biyokömürde bulunan karbon içeriği üzerine etkisi gösterilmektedir.

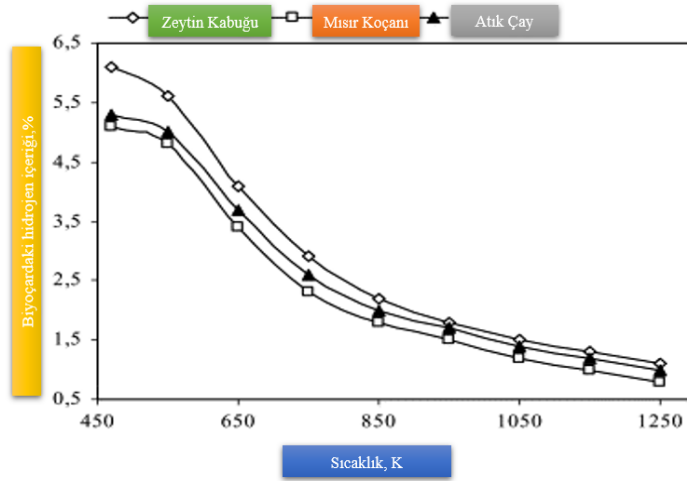
Şekil 2.11’de sıcaklığın biyokütlenin pirolizi sonucu oluşan biyokömürde bulunan hidrojen içeriği üzerine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Sıcaklığın oksijen içeriğine etkisi [24].



Şekil 2.10. Sıcaklığın karbon içeriğine etkisi [24].



Şekil 2.11. Sıcaklığın hidrojen içeriğine etkisi [24].

2.5.3. Basıncın Etkisi

Piroliz tekniği gün geçtikçe gelişmekte olan bir teknolojidir. Zaman içerisinde yapılan çalışmalar piroliz teknolojisinde ürün verimini etkileyen yeni bir parametreyi ortaya koymuştur. Zaman içerisinde basınç oluşumunun da pirolizi etkileyen parametreler arasında olduğu anlaşılmıştır.

Ortam basıncından daha yüksek bir basınç altında piroliz sistemi çalıştırıldığında ürün verimleri üzerindeki etki biyokömür lehine olmaktadır.

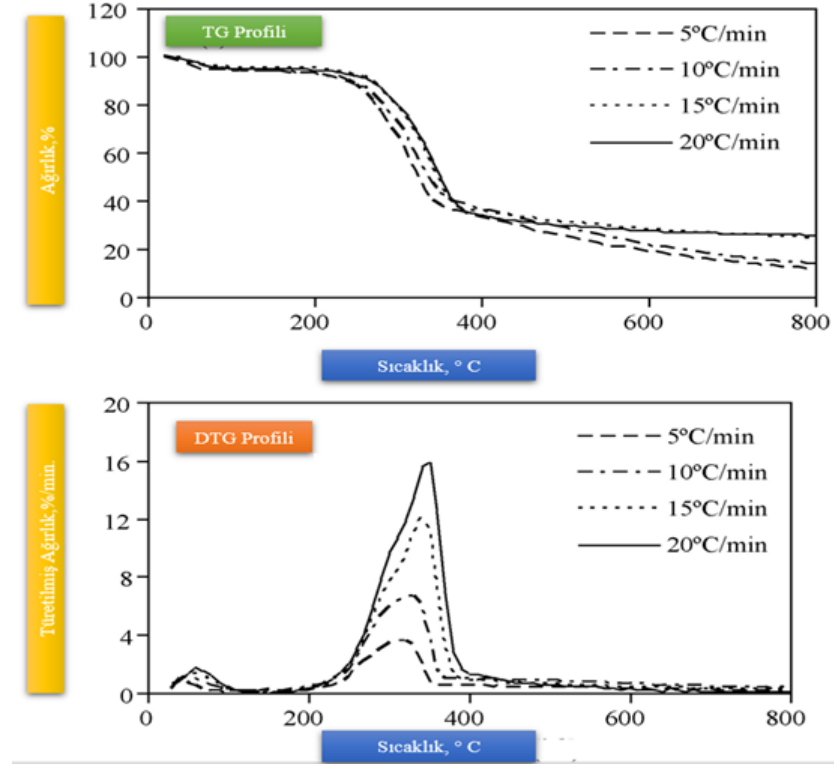
Basınç artışı piroliz reaktörü içerisinde bekleme süresini arttırarak bu durumun biyokömür oluşumuna katkı sağladığı görülmektedir.

Piroliz reaktörü içerisinde bulunan yüksek basınç biyokömürdeki karbon içeriğini de etkilemektedir. Biyokütle yüksek basınç altında piroliz işlemine alındığında biyokömürdeki karbon konsantrasyonu yükselmektedir. Bu durum basıncın artmasıyla biyokömürün enerji yoğunluğunun arttığını göstermektedir [22].

2.5.4. Isıtma Hızının Etkisi

Isıtma hızı piroliz sistemlerinde piroliz sürecini etkileyen parametreler arasında ısıtma hızı önemli bir yer almaktadır. Isıtma hızlarının değişmesiyle birlikte oluşan piroliz ürünlerinde farklılık meydana gelmektedir. Piroliz işlemi sonucunda oluşan üç ürün (katı, sıvı, gaz) arasında istenilen türün verim oranını arttırmak ısıtma hızında yapılacak değişiklikler ile mümkündür.

Piroliz işleminde ısıtma hızının artması sonucu oluşan ürünler arasında katı ürün verimliliğinde artış gözlenmektedir. Şekil 2.12’de ısıtma hızı dakikada 5 °C’den 20 °C’ye çıkarıldığında deney sonucunda katı ürün veriminde artış olduğu termogravimetrik eğriler ile görülebilmektedir.

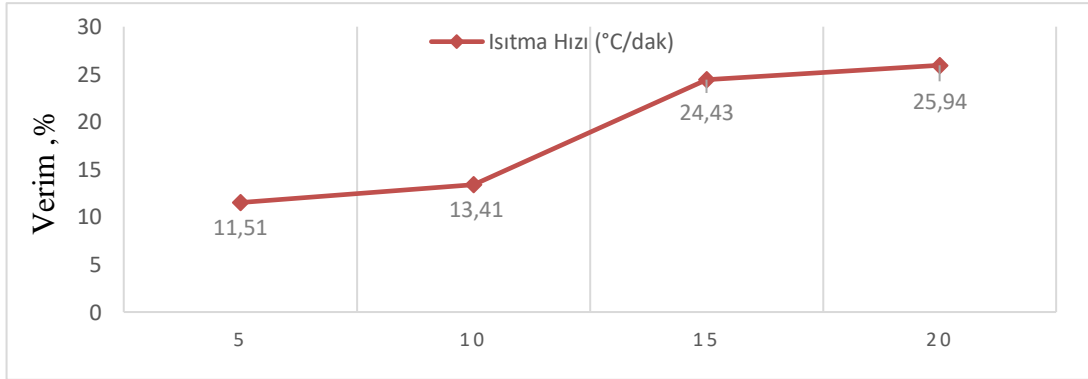


Şekil 2.12. Farklı ısıtma hızlarında buğday samanının pirolizi [25].

Isıtma hızındaki artış ayrışma hızının daha yüksek bir büyüklüğe ulaşmasını sağlamaktadır. Bu durumun nedeni parçacıkların ayrışması için gerekli minimum ısıya yüksek sıcaklıklarda ulaşılabilmesidir [25]. Çizelge 2.12’de ısıtma hızı, ortalama parçacık boyutu ve yaklaşık başlangıç ağırlığının katı ürün verimi üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Buradaki verilerde ısıtma hızının ürün verimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 2.13’te ısıtma hızının katı ürün verimi üzerine etkisi gösterilmektedir.

Çizelge 2. 12. Buğday samanı pirolizinin farklı parametrelerde katı ürün verimi [25].

Isıtma Hızı (°C/dak)	Ortalama Parçacık Boyutu (µm)	Yaklaşık Başlangıç Ağırlığı (mg)	Katı Ürün Verimi (%)
10	1350	10	23,37
10	925	10	22,73
10	725	10	23,35
10	475	10	23,28
10	325	10	13,41
10	250	10	11,85
5	325	10	11,51
15	325	10	24,43
20	325	10	25,94
10	325	5	8,3
10	325	15	21,29
10	325	20	21,3



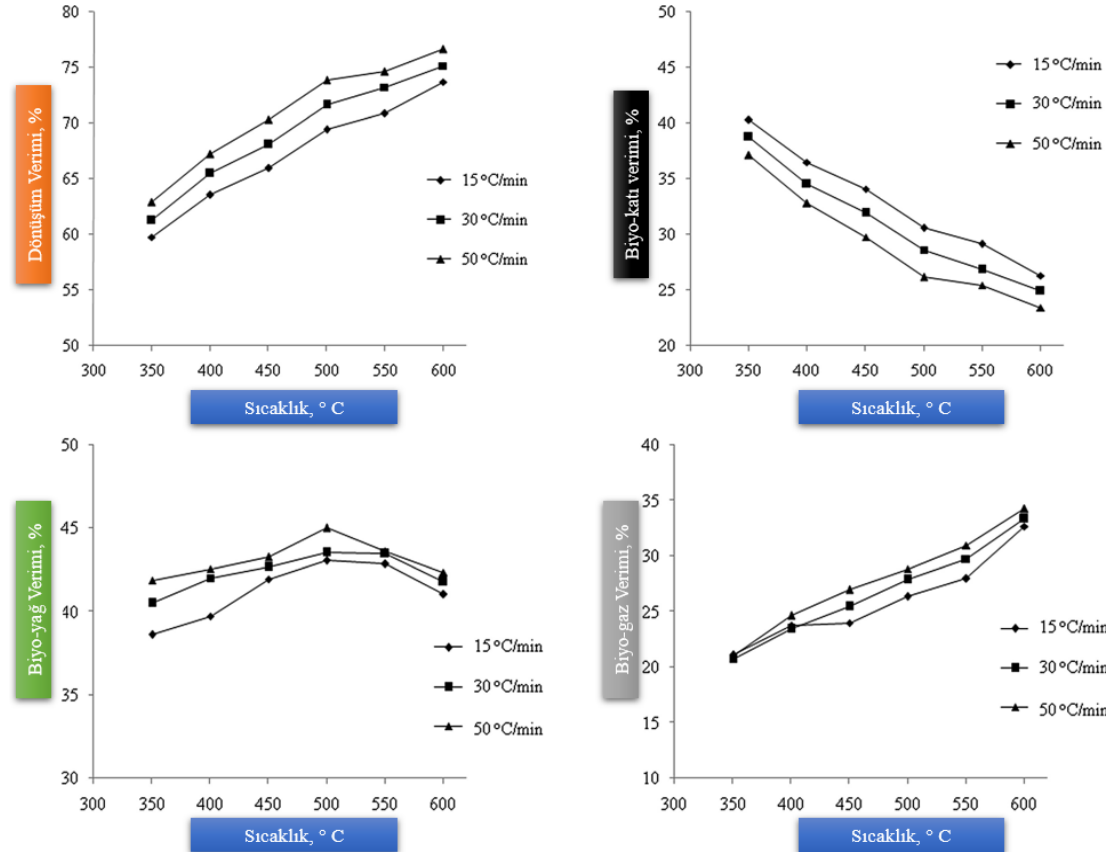
Şekil 2.13. Isıtma hızının katı ürün verimi üzerine etkisi [25].

Çizelge 2.13. Farklı sıcaklık ve ısıtma hızında pirolizin ürün verimine etkisi [26].

Sıcaklık (°C)	Dönüşüm (%)	Katı (%)	Sıvı (%)	Gaz (%)
15 (°C/dakika)				
350 (°C)	59,74	40,26	38,61	21,13
400 (°C)	63,52	36,48	39,73	23,79
450 (°C)	65,93	34,07	41,95	23,98
500 (°C)	69,44	30,56	43,07	26,37
550 (°C)	70,86	29,14	42,86	28
600 (°C)	73,71	26,29	41,04	32,67
30 (°C/dakika)				
350 (°C)	61,25	38,75	40,52	20,73
400 (°C)	65,47	34,53	42,03	23,44
450 (°C)	68,09	31,91	42,66	25,43
500 (°C)	71,62	28,58	43,55	27,87
550 (°C)	73,21	26,79	43,47	29,74
600 (°C)	75,14	24,86	41,75	33,26
50 (°C/dakika)				
350 (°C)	62,88	37,12	41,89	20,99
400 (°C)	67,23	32,77	42,56	24,67
450 (°C)	70,26	29,74	43,29	26,97
500 (°C)	73,85	26,15	45,02	28,83
550 (°C)	74,59	25,41	43,64	30,95
600 (°C)	76,62	23,38	42,37	34,25

Çizelge 2.13 ve Şekil 2.14'te piroliz işlemlerinde ısıtma hızı ve sıcaklığın ürün verimi üzerindeki etkilere gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre sıvı ürün verimi üzerinde belli bir oranda etki vardır. Dakikada 15 °C ısıtma hızıyla 350 °C'den 500 °C'ye çıkıldığında sıvı verim %38,61'den %43,07'ye çıkmaktadır. Dakikada 50 °C ısıtma hızıyla aynı sıcaklık değerlerinde %41,89'dan %45,02'ye doğru sıvı veriminde artış olmaktadır.

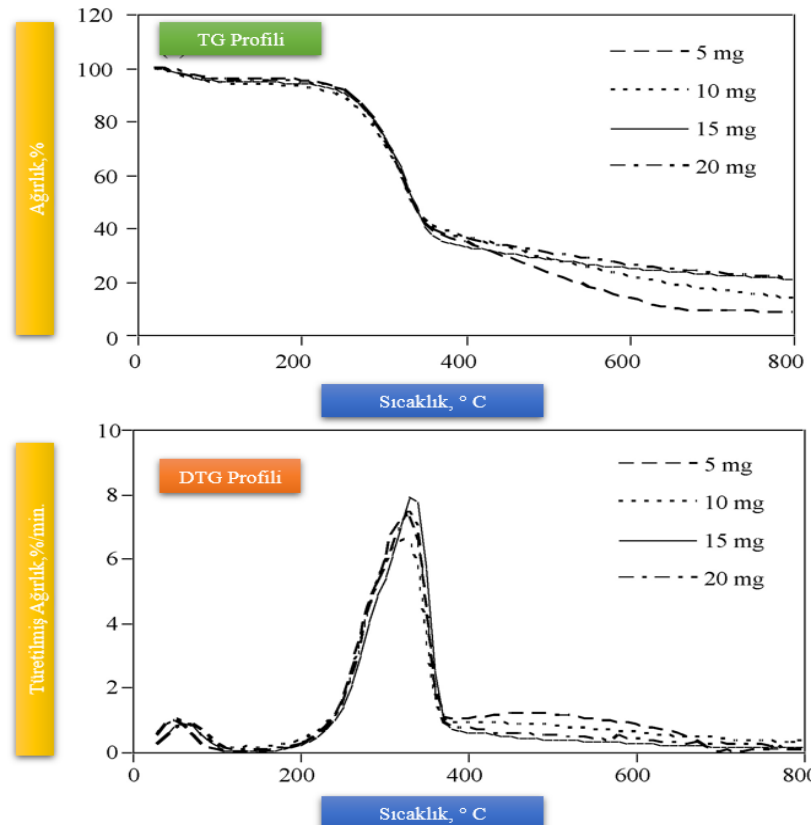
Ancak ısıtma hızındaki artışı doğrusal bir şekilde sürekli arttırıldığında sıvı ürün verimindeki artışın bu şekilde doğrusal bir artışı söz konusu değildir. 50 °C ısıtma hızında 500 °C'nin üzerine çıkıldığında sıvı verimi artmamaktadır. Aksine bu derecenin üzerine çıkıldığında az miktarda sıvı ürün verimi düşmektedir [26].



Şekil 2.14. Sıcaklık ve ısıtma hızının ürün verimi üzerindeki etkisi [26].

2.5.5. Numune Miktarının Etkisi

Piroliz sistemlerinde ürün verimi üzerine etkisi bulunan bir diğer parametre numunenin deneye başlangıç miktarıdır. Sıcaklık gibi diğer parametreler ile kontrol edilebilen ürün verimindeki değişiklik ilk başta kullanılan numune miktarı ile de kontrol edilebilmektedir. Üretmeyi istenilen katı ürünün toplam ürünler içerisindeki yüzdelik payı numunenin ilk başta kullanılan miktarındaki artış ile doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Ancak buradaki fark deney başlangıcında kullanılan numune miktarındaki artış ile doğru orantılı bir şekilde katı ürün verimindeki artışın sürekli devam etmediğidir. Belli bir orana kadar numune miktarında yapılan artış katı ürün verim yüzdesini arttırabilmekte ancak numunenin başlangıç ağırlığının belli bir düzeyinden sonra ürün verimi üzerine etkisi kalmamaktadır [25]. Şekil 2.15'te farklı başlangıç ağırlığına sahip buğday samanının pirolizi sonucu katı ürün verimi gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Farklı numune miktarlarındaki buğday samanının pirolizi [25].

2.6. MİKRODALGA

Isıtma işlemleri; gıda, kimya, tekstil, mühendislik gibi proses ve imalat endüstrileri tarafından kimyasal veya fiziksel işlemler için kullanılan en yaygın türdür. Bu derece yaygın ısıtma işlemleri kendi içerisinde elektromanyetik spektrumun belirli kısımlarını kullanan indüksiyon, radyo frekansı, doğrudan direnç kızılötesi ve mikrodalga ısıtma gibi birkaç elektro-ısı teknolojisine ayrılmaktadır [27].

1940 – 1945 yıllarından itibaren ısıtma uygulamalarında mikrodalga yönteminin kullanılmasında gelişmeler yaşanmıştır. Isıtma işlemlerinde mikrodalga enerjisinin kullanılmasının diğer ısıtma yöntemlerinden farklı olarak daha hızlı ve enerji verimliliği açısından daha üstün potansiyele sahip olduğu anlaşılmıştır.

Günümüzde mikrodalga kullanım alanları arasında gıda sektöründe yapılan gıda işlemleri, odun sanayisinde ahşap kurutma, plastik ve kauçuk işlemleri ile seramik sektörünü de içine alan sertleştirme ve ön işlemler gibi bir çok farklı alanlarda kullanılmaktadır [28].

Çok çeşitli alanlarda kullanılan mikrodalga ısıtma yönteminin son zamanlarda maden cevherlerinin işlenmesi ve atık yönetiminde atıkların işlenmesi için kullanılmasına dönük artan bir ilgi vardır [27].

Mikrodalga radyasyonu 300 MHz ile 300 GHz mikrodalga frekans aralığına sahip elektromanyetik radyasyon şeklinde tanımlanabilmektedir [27], [28].

Çoğu mikrodalga uygulamaları 3 ile 30 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmektedir. Kullanılan mikrodalga fırınları ile endüstriyel faaliyetlerde işlem gerçekleştirilen mikrodalga frekansı 2,45 GHz şeklindedir [27].

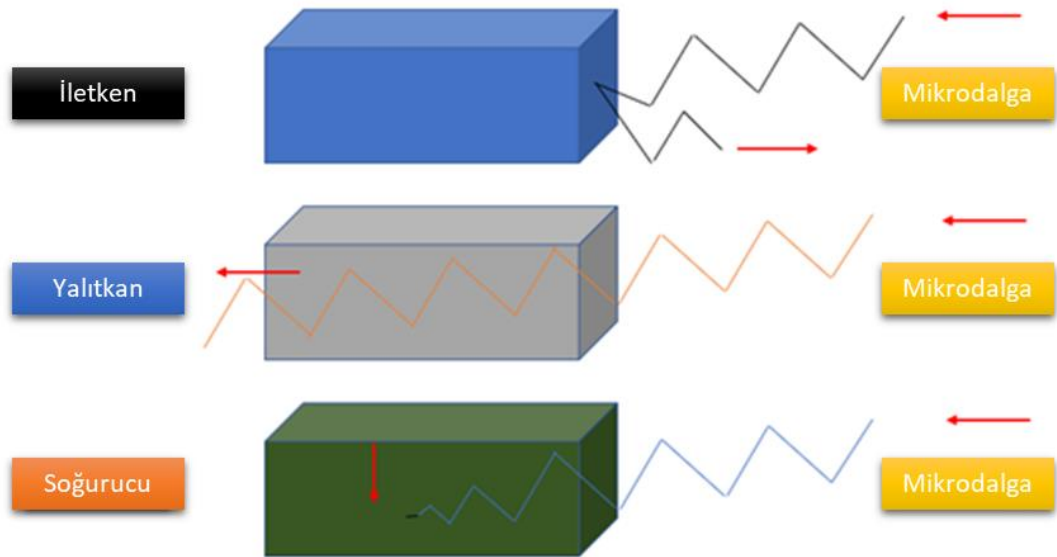
Ancak tüm malzemeler mikrodalga enerjisi ile ısıtılamamaktadır. Bunun nedeni her malzemenin mikrodalga enerjisini absorbe edememesidir. Mikrodalga enerjisini emen malzemelere dielektrik malzeme denilmektedir [28].

2.6.1. Malzemelerin Dielektrik Özellikleri

Her malzeme aynı özellikte değildir. Bu nedenle her malzeme mikrodalga sistemlerinde tek başına kullanılamazlar. Malzemelerin sınıflandırılması şu şekilde yapılabilmektedir;

1. İletken malzemeler,
2. Yalıtkan malzemeler,
3. Soğurucu malzemeler.

Malzeme tiplerine ait sınıflandırma Şekil 2.16'da gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Farklı malzeme tipleri.

Metal gibi iletken malzemeler mikrodalga enerjisinin geçişine izin vermemektedirler. Gelen mikrodalga enerjisinin malzeme yüzeyinden yansımını sağlayacak özelliktedirler. Mikrodalga destekli ısıtma işlemlerinde ancak mikrodalga soğurma özelliğine sahip malzemeler kullanılabilir [27].

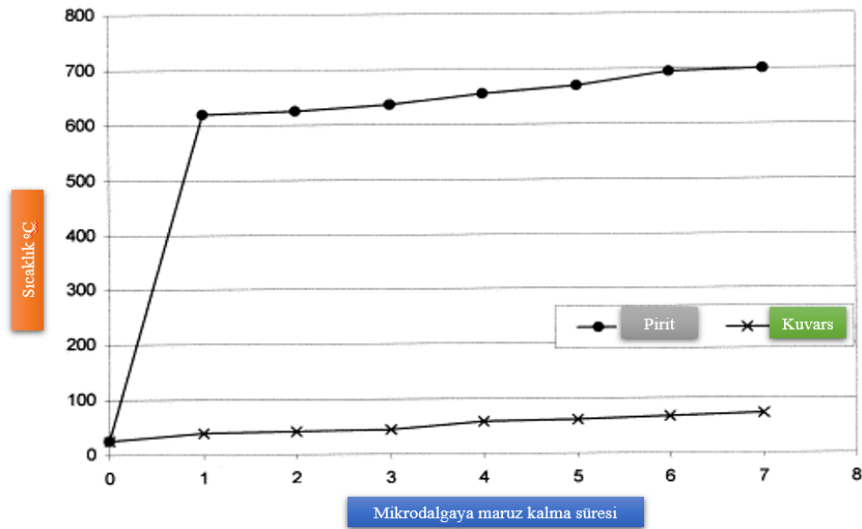
Mikrodalga radyasyonunu emen malzemelere dielektrik denildiği için mikrodalga kaynaklı ısıtmaya dielektrik ısıtma da denilebilmektedir.

Dielektrik özelliğe sahip malzemelerin mikrodalga ortamında elektromanyetik radyasyon ile etkileşimi enerji emilimi ile sonuçlanmaktadır [28].

Dielektrik özelliğe sahip malzeme mikrodalga ortamına yerleştirildiğinde malzeme içerisindeki çift kutuplar kendilerine uygulanan enerjiye göre yeniden hizalanmaya çalışmaktadırlar. Alternatif elektromanyetik alana maruz kalan malzemedeki çift kutuplar kendilerini saniyede yaklaşık 2,5 milyar kez yeniden hizalamaktadırlar. Bu durum 2,45 GHz'lik mikrodalga frekans koşulu için geçerli olmaktadır. Bu hareketlilik mikrodalgaya duyarlı malzemenin sürtünmeden kaynaklı ısınmasına sebep olmaktadır [27].

Malzemeleri kendi aralarında farklı tiplerde gruplandırılması yapıldığı gibi dielektrik özelliğe sahip malzemelerde kendi içlerinde farklılaşmaktadır. Kimi malzemelerin dielektrik özellikleri yüksek iken kimi malzemelerin dielektrik özellikleri düşük olmaktadır.

Şekil 2.17'de farklı malzemelerin mikrodalga enerjisine maruz kalma sürelerinde mikrodalga enerjisini absorblayarak sıcaklık artışlarındaki farklılık gösterilmektedir.



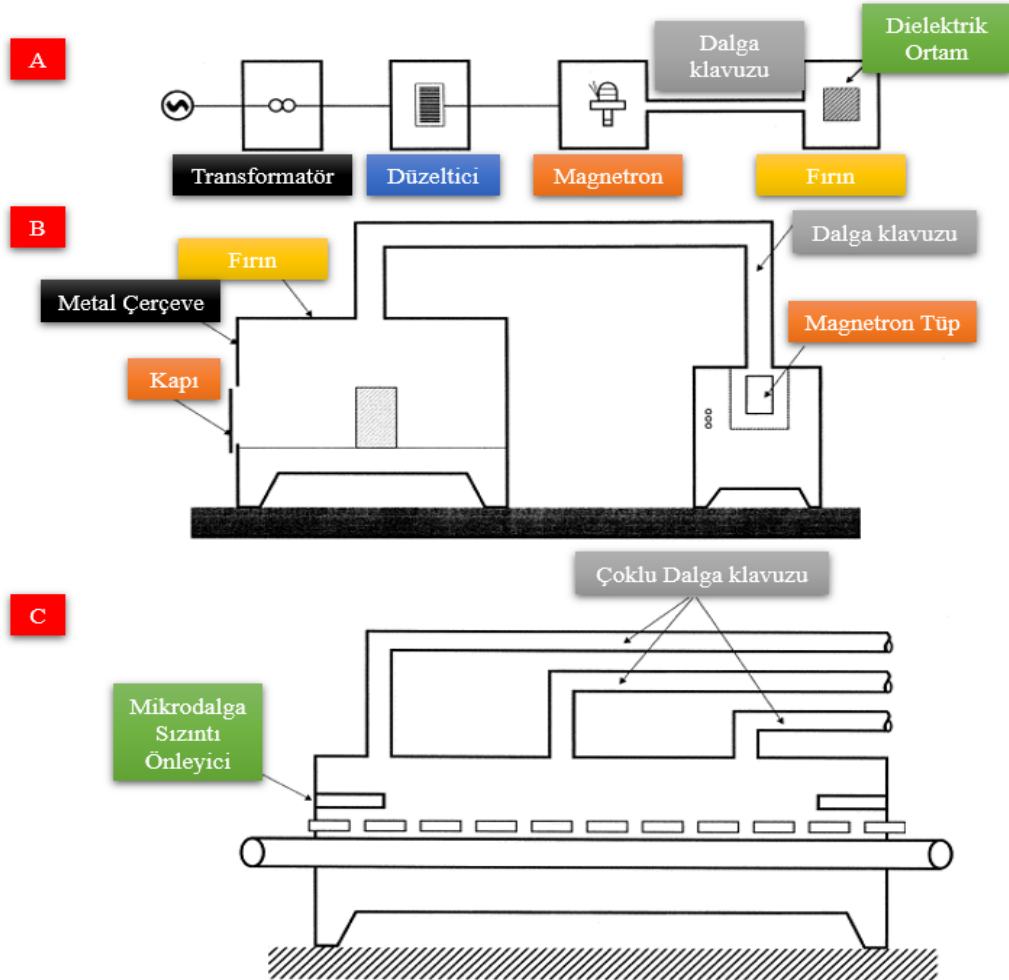
Şekil 2.17. Farklı malzemelere ait dielektrik özellikler [29].

2.6.2. Mikrodalga Isıtma Sistemi

Mikrodalga ısıtma sistemi dört temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar;

1. Güç kaynağı,
2. Magnetron,
3. Malzemenin ısıtılması için fırın,
4. Mikrodalgaları jeneratörden fırına taşımak için dalga kılavuzu.

Şekil 2.18’de mikrodalga ısıtma sisteminin basit bir diyagramı gösterilmektedir. Şekil 2.18 B ve C, endüstriyel büyüklükteki parti ve sürekli işlemlili mikrodalga ısıtma sistemlerini temsil etmektedir.



Şekil 2.18. (A) Mikrodalga ısıtma sistemi, (B) kesikli tip, (C) sürekli tip [30].

Parti tipi mikrodalga ısıtma sistemleri, çalışılan malzemenin ısıtılması için bir metal fırına yerleştirilmesi ve ısıtma işlemi tamamlandığında çıkarılmasından oluşur. Bu yönüyle ev tipi bir mikrodalga fırına benzemektedir.

Mikrodalga gücü, bir magnetron tüpü, transformatör, röle, kısma ve kontroller içeren bağımsız bir mikrodalga güç kaynağı ünitesinden sağlanmaktadır.

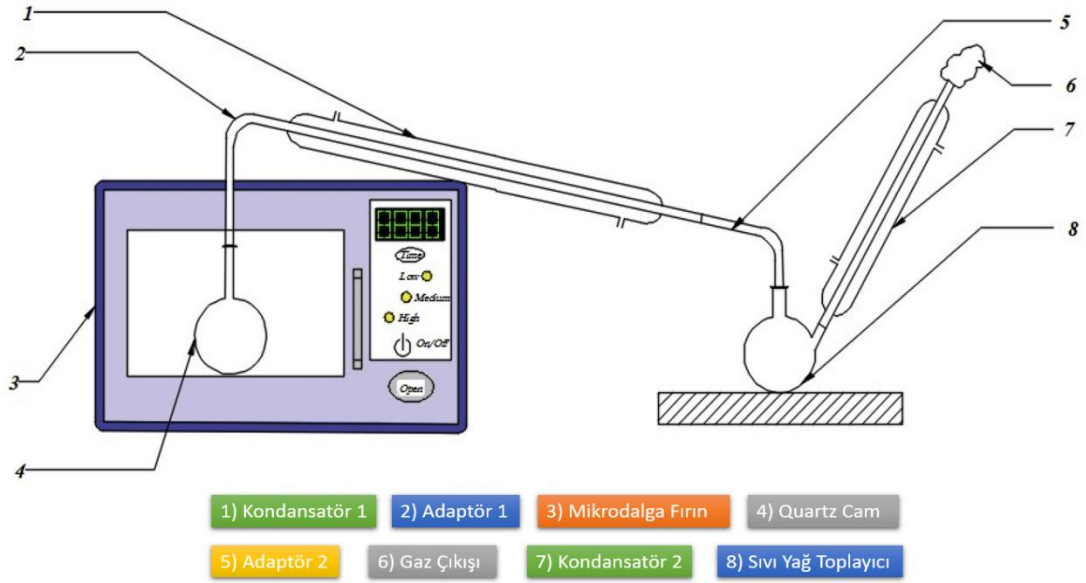
Mikrodalga enerjisi, bir dalga kılavuzu tarafından fırına yönlendirilmektedir. Sürekli tip mikrodalga ısıtma sistemlerinde malzemeyi hareket halinde ısıtma için taşıma bandı ile donatılmaktadır. Hareket ettirmede kullanılan bu konveyör bantlar izolatörden yapılmaktadır [30].

2.6.3. Mikrodalga Destekli Piroliz Sistemi

Mikrodalga piroliz sistemi, son zamanlarda geleneksel piroliz yöntemine alternatif olarak keşfedilen bir ısıtma yöntemidir. Piroliz reaksiyon koşullarının gerçekleşmesi için gerekli olan ısı mikrodalga enerjisi ile gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.19'da örnek bir mikrodalga destekli piroliz sistemi gösterilmektedir. Sistem genel olarak;

1. Kondansatör,
2. Adaptör,
3. Mikrodalga fırın,
4. Quartz cam (reaktör),
5. Gaz çıkışı,
6. Sıvı yağ toplayıcı

ünitelerinden oluşmaktadır. Sıcaklık ölçümleri için K tipi termokupl kullanılabilir.



Şekil 2.19. Örnek mikrodalga destekli piroliz düzeneği [31].

Geleneksel yöntemlerde olduğu şekli ile pirolizi yapılacak numune reaktör içerisinde mikrodalga fırına yerleştirilmektedir. Taşıyıcı gaz kullanımını da geleneksel piroliz yöntemlerinde kullanıldığı şekildedir.

Ancak burada farklı olan, mikrodalga enerjisini absorplayacak malzemelerdir. Her malzeme mikrodalga enerjisini absorblama kapasitesine sahip değildir. Piroliz reaksiyonun gerçekleşmesi için yüksek sıcaklık değerlerine ihtiyaç vardır. Bu değerlere ulaşabilmek için hammadde içerisinde mikrodalga absorplayıcı malzemeler eklenmelidir [32–34].

Mikrodalga destekli piroliz sistemlerinde yüksek sıcaklıklara çıkabilmek için mikrodalga enerjisini absorplayıcı olarak genellikle;

1. SiC,
2. Aktif karbon,
3. Kömür

gibi absorplama kapasitesi yüksek malzemeler kullanılmaktadır [35].

Linyit kömürü kullanılarak 3 dakika gibi kısa sürede 1015-1170 °C sıcaklığa ulaşmak mümkündür [36].

Farklı çalışmalarda geleneksel piroliz yönteminden elde edilen biyokömür ve grafit tozu mikrodalga destekli piroliz sistemlerinde mikrodalga absorplayıcı malzemeler olarak kullanılmıştır [34].

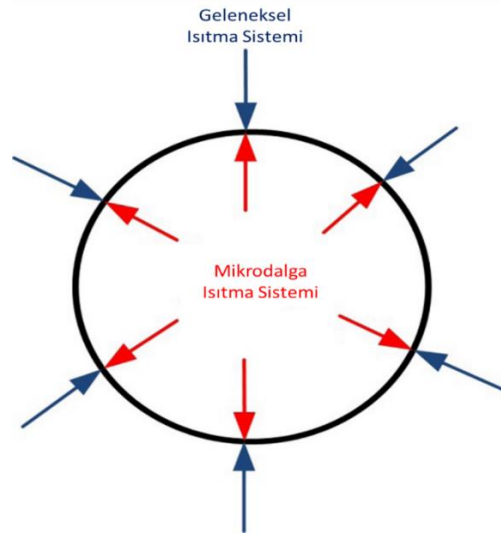
Farklı türlerdeki absorplayıcı malzemeler, mikrodalga destekli piroliz sistemlerinde mikrodalga absorplayıcı özelliği olmayan malzemelerin de işlenebilmesine olanak sağlayarak mikrodalga destekli piroliz sistemlerinin çalışma alanlarının önemli ölçüde genişlemesini sağlamaktadır.

2.6.4. Mikrodalga Destekli Piroliz Sistemlerinde Isıtma

Geleneksel ısıtma yöntemlerinden olan konvansiyonel termal ısıtma şekli, ısının iletilmesi, konveksiyon ve radyasyon yoluyla ısının yüzeyden malzemeye aktarıldığı sistemlerdir. Isınmanın bu şekilde gerçekleştirildiği işlemlerde ısıtma yavaş ve verimsiz olmaktadır. Ayrıca ısınmanın verimi malzemenin ısıl iletkenliği ile konveksiyon akımlara bağlı kalmaktadır.

Bu ısıtma sisteminin aksine dielektrik ısıtma yani mikrodalga enerjisinin kullanılması ile gerçekleştirilen ısıtma sistemlerinde elektromanyetik enerji termal enerjiye aktarılmaktadır. Bu nedenle ısıtmadan ziyade enerji dönüşümünü temsil etmektedir.

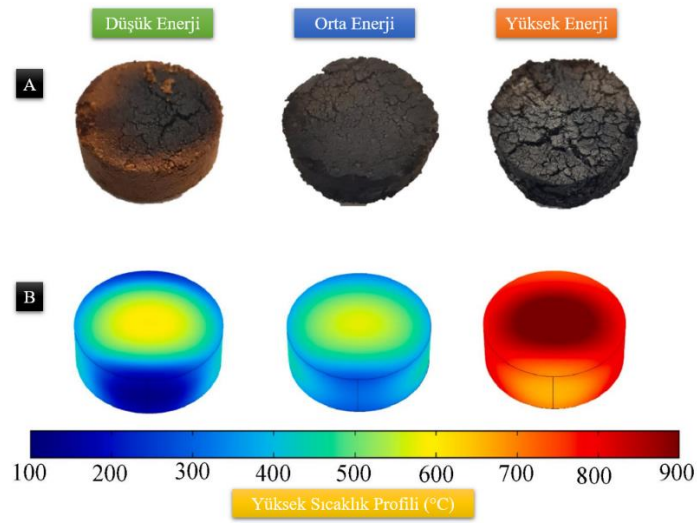
Mikrodalga enerjisi malzemeye nüfus ederek enerji birikimine sebep olabilmektedir. Bu sayede ısının harici bir kaynaktan gelmesinin yerine malzemenin içerisinde oluşması sağlanmaktadır [37]. Şekil 2.20'de geleneksel ısıtma ile mikrodalga ısıtma sisteminin gerçekleşme şekli gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Geleneksel ısıtma ile mikrodalga ısıtma sistemlerinin farkı [37].

Şekil 2.21’de mikrodalga pirolizi sonucu ürün üzerindeki ısı dağılımı verilmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak numune üzerindeki ısı dağılımını yukarıdaki bilgileri teyit etmektedir.

Mikrodalga destekli piroliz sistemlerinde ısınma, geleneksel yöntemlere kıyasla malzemenin ortasından başlayarak çevresine yayılmaktadır. Merkezden çevreye doğru ısı artışı görülmektedir.



Şekil 2.21. Mikrodalga pirolizinde ürün üzerindeki ısı dağılımını [38].

2.6.5. Mikrodalga Destekli Piroliz Sistemlerinin Avantajları

Mikrodalga destekli piroliz teknolojisi, enerji ve maliyet yönüyle diğer sistemler ile karşılaştırıldığında oldukça verimli bir konumdadır. Atık azaltımında, malzeme geri kazanımında, biyokütle ve biyo atıkları değerli ürünlere dönüştürmede etkili bir yöntemdir.

Mikrodalga destekli piroliz sistemlerinin ısıtma yönüyle hızlı bir şekilde işletilebilmesi diğer yöntemlerin önüne geçirmektedir. Isınma süresinde yaşanan verimlilik zaman kazancına etki ettiği gibi enerjinin daha az harcanması noktasında da katkı sunmaktadır.

Homojen olmayan karışık atıkların ve büyük boyutlu biyokütlelerin işlenmesini ve kullanılmasını sağlamaktadır. Bu sayede orman ve tarım atıklarıyla birlikte belediye katı atıkları ve yüksek nem içeriğine sahip katı maddelerin işlenmesine olanak sağlamaktadır [37].

Mikrodalga destekli piroliz sistemleri biyoyağ üretim verimliliği ve üretilen biyoyağın temizliği açısından geleneksel piroliz sistemleri ile karşılaştırıldığında mikrodalga destekli piroliz sistemi ile üretilmiş biyoyağdan daha verimli sonuçlar elde edilmektedir [39].

Mikrodalga destekli piroliz sistemleri ile üretilen biyoyağların içeriği incelendiğinde daha az oksijenli bileşikler içerdiği ve bu sebeple geleneksel piroliz yöntemlerinden elde edilen biyoyağlara kıyasla daha yüksek kalorifik değere sahip olduğu görülmektedir [39], [40].

Çizelge 2.14'te mikrodalga pirolizi ile geleneksel ısıtma yöntemlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Tablodaki bilgiler ışığında mikrodalga destekli piroliz sistemlerinin büyük avantajlarının yanında bazı olumsuz özelliklerinin de olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.14. Mikrodalga ve geleneksel ısıtmanın karşılaştırılması [41].

Mikrodalga dielektrik ısıtma	Geleneksel termal ısıtma
Enerji dönüşümü	Enerji transferi
Merkezden dışa hacimsel ısıtma, moleküler düzeyde enerjik eşleşme	Yüzeysel ısıtma, konveksiyon/iletim yolu ile ısıtma
Hızlı ve verimli ısıtma. Örneğin metanol 100 °C'nin üzerine hızla ısıtılabilir; iyonik sıvılar saniyeler içerisinde 200 °C'lik sıcaklık artışı elde edilebilir.	Isıtma yavaş ve verimsizdir. Isıtma hızı malzeme ısı iletkenliği ile sınırlıdır.
Seçici ısıtma özelliği vardır. Polar maddeler için hızlı ve yoğun ısıtma meydana gelirken apolar maddeler için etkisizdir.	Seçici özelliği yoktur.
Sıcak noktalar meydana gelebilmektedir. Malzeme içerisindeki mikrodalga alanının homojen olmaması veya dielektrik özellikleri nedeniyle malzemedeki yerel sıcaklıkların malzemenin tamamında ölçülen sıcaklıktan çok daha yüksek seviyede olabilmektedir.	Sıcak nokta meydana gelme durumu yaşanmamaktadır.
Mikrodalga destekli piroliz sistemlerinde reaksiyonu malzemenin özelliklerine bağlılığı fazladır.	Mikrodalga destekli sistemlere göre daha az bağımlılık vardır.
Kontrollü ve hızlı ısıtma-soğutma imkanı vardır. Güç açıldığında enerji girişi hemen başlar ve hemen durdurulabilir.	Daha az kontrol edilebilir özelliktedir. Isınmanın uzun süreli olduğu gibi soğuma içinde uzun süre beklenilmelidir.

BÖLÜM 3

LİTERATÜR TARAMASI

3.1. GELENEKSEL PİROLİZ YÖNTEMİ

Sun vd'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada mısır sapının hızlı pirolizi gerçekleştirilmiştir. Burada piroliz ile gaz kromatografisi ve kütle spektrometrisi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmada ürün dağılımı, sıcaklık, zaman ve katalizör yönünden incelenmiştir. Ürün bileşiklerinin türleri ve verimlerinin sıcaklık değişkeninden önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir. Buna karşın reaksiyon süresinin ürün bileşikleri üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Selüloz, hemiselüloz ve lignin etkileşimleri piroliz ürünlerinin oranlarının belirlenmesini sağlamaktadır. En az alkol ve karbonhidrat içeren en yüksek aldehit, furan ve olefin oranları MCM-41 katalizöründen elde edilmiştir. HZSM-5 katalizörünün aromatik hidrokarbonların seçiciliğini iyileştirirken asit oluşumunu da engellediği görülmüştür [42].

Chen vd'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada furan bileşiklerinin üretimi için SAPO tipi katalizörlerin selüloz pirolizi üzerindeki performansları incelenmiştir. Furan oluşumunu arttırmak için selülozun katalitik hızlı pirolizi için reaksiyon ortamına SAPO tipi katalizörler eklenmiştir. Sonuçlar, SAPO tipi katalizörlerin katalizi altında gerçekleşen katalik hızlı piroliz sonucunda şeker içeriğinin önemli ölçüde azaldığı ancak furan oluşumunun önemli ölçüde arttırıldığını göstermektedir. SAPO tipi katalizör olarak tanımlanan AlCu – SAPO – 34 ve ZrCu – SAPO – 18 katalitik hızlı piroliz sisteminde furan oluşumu için en iyi sonuç alınan katalizörler olmuştur. Bu katalizörlerin selülozun katalitik hızlı pirolizinde furan oranları sırası ile %56,94 ve %63,86 olmuştur. Ayrıca piroliz sisteminde kullanılan bu katalizörler furan oluşumunu destekleyen daha hafif asitliğe sahiptir. SAPO tipi katalizörler kullanılırken piroliz sıcaklığı 500-600 °C olarak belirlenmiştir [43].

Lu vd'nin 2011 yılında yaptıkları çalışmada hem piroliz sıcaklığından hem de zamandan etkilenen ürünlerin oluşum özelliklerini araştırmak için selülozun analitik hızlı pirolizini gerçekleştirmişlerdir. Selülozun hızlı pirolizi, çeşitli susuz şekerler, susuz şeker türevleri, furan bileşikleri, hafif doğrusal karboniller ve diğer bileşikleri oluşturmak için farklı yöntemleri içermektedir. Organik uçucu ürünler ilk olarak piroliz sıcaklığının 400 °C olduğu işlemlerde tespit edilmiş ve uçucu ürünlerde maksimum verimliğe ise 600-700 °C sıcaklıklarda ulaşılmıştır. Levoglukoza (LG), polisakkarit zincirindeki iki glikozid bağın ardışık bölünmesinden kaynaklanan en önemli pirolitik ürün konumundadır. Oluşumu için yüksek pirolitik koşullar gereklidir. Piroliz yöntemi ile LG üzerinde yapılan çalışma iyi bir termal kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Hızlı piroliz işlemi ile farklı oluşum özellikleri sergileyen çeşitli susuz şeker türevleri üretilmiştir [44].

Miskolczi vd'nin 2009 yılında yaptıkları çalışmada pilot ölçekli bir piroliz sürecini incelemiştir. Yapılan çalışmada atık plastikler sürekli beslemeli bir piroliz ünitesine besleme hızı saatte 9 kg olacak şekilde beslenmektedir. Piroliz sıcaklığı 520 °C'de beslemesi yapılan plastik atıkların termal ayrışması sağlanmıştır. Hammaddeler olarak kullanılan plastik atıklar tarım ve ambalaj endüstrisinden gelen atık grupları içerisinden seçilerek toplanmıştır. Piroliz sürecinde karbonlu bileşiklerin ayrışmasını sağlamak amacıyla %5 orana sahip bir ZSM-5 katalizörü kullanılmıştır. Kullanılan piroliz sistemi, yatay gazla ısıtılan tüplü bir reaktördür. Piroliz sisteminde yapılan çalışmalar sonucunda gaz, yakıt ve hafif yağ verimlerinin ZSM-5 katalizörü varlığında önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Tarımsal alanlardan gelen plastik atıkların katalizör yokluğunda piroliz işlemine alındığında gazların, yakıt ve hafif yağların verimleri sırası ile %5,1, %18,2 ve %17,9 şeklinde olmuştur. Ancak aynı piroliz koşulları geçerli olacak şekilde katalizör varlığında piroliz işlemi gerçekleştirildiğinde atıklardan daha yüksek uçucu fraksiyon verimi gözlemlenmiştir. Bileşiklerin ortalama karbon sayıları katalizörsüz piroliz işlemi sonucunda yaklaşık olarak 70 olarak bulunmuştur. Ancak bu sayı katalizör varlığında gerçekleştirilen piroliz sonucunda 60 olarak gözlemlenmiştir. Yakıt, hafif ve ağır yağ fraksiyonlarının yoğunlukları, petrokimya endüstrileri tarafından verilen fraksiyonlarla benzer değerlere sahip olduğu bulunmuştur. Son olarak ürünlerin özellikleri yakıt benzeri uygulamalar için avantajlıdır ve rafinerinin verimliliğini arttırabileceği söylenmektedir [45].

3.2. MİKRODALGA DESTEKLİ PİROLİZ SİSTEMİ

Klinger vd'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada mikrodalga destekli piroliz sistemi kullanılmıştır. Mikrodalga ile güçlendirilmiş hızlı piroliz reaktörü, hızlı piroliz sırasında sıvı verimleri ve sıvı bileşimi için biyokütle materyallerini incelemek için geliştirilmiştir. Mikrodalga destekli piroliz sistemi atık işleme koşullarında güvenilir ve yeniden kullanılabilir şekilde piroliz yağları üretebilmektedir. Bununla birlikte farklı türlerde numuneler kullanarak çok sayıda test yapmak için uygun bir sistem olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmada 33 biyokütle ve karışım, 500 °C'lik reaksiyon sıcaklığında piroliz yağı verimi ve temel kalite ölçümleri için değerlendirilmiştir. Mikrodalga destekli piroliz sistemleri hızlı bir şekilde yüksek sıcaklıklara çıkabilse de ısıtma hızı 10 °C/sn'den fazla olduğunda ve buhar bekleme süresi 0,5 ile 0,8 saniye arasında olduğunda piroliz yağlarının verimlerinin birbirleri ile yaklaşık değerlere sahip olduğu söylenmektedir. 1,05 ile 4,5 g arasında değişen numunelere eklenen %0-10 arasındaki aktif karbon, işlem sonucunda çıkacak sıvı ürün verimini etkilemediği aktarılmaktadır. Mikrodalga destekli piroliz işlemleri sonucu oluşan sıvı ürün verimliliği %47,8 ile %66,2 aralığında bulunmuştur [46].

Borges vd. 2014 yılında yaptıkları çalışmada mikrodalga destekli piroliz sistemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada mikrodalga destekli piroliz sisteminin verimini arttırmak için mikrodalga emici malzemeler kullanılmıştır. Yapılan mikrodalga destekli piroliz sisteminde hammadde olarak odun talaşı ve mısır talaşı kullanılmıştır. Mikrodalga enerjisini absorplaması için mikrodalga emici olarak silisyum karbür (SiC) kullanılmıştır. Mikrodalga destekli piroliz işlemi sonucunda biyoyağ karakterize edilerek sıcaklık, hammadde miktarı, partikül boyutları ve vakum etkisi analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda odun talaşı için biyoyağ verimi en yüksek koşulların 480 °C'lik ortam sıcaklığında 50 gr SiC katalizör eklemesi ve dakikada 2 g biyokütle beslemesi olduğu bulunmuştur. Bu koşullar altında elde edilen biyoyağ verimi %65 civarındadır. Mısır talaşı için ise 490 °C ile 560 °C arasında değişen sıcaklıklarda, 0,9 mm ile 1,9 mm arasında değişen biyokütle partikül boyutlarında ve 100 mmHg vakum derecesi altında en yüksek sıvı verimine ulaşılmıştır. Bu koşullar altında mısır talaşından elde edilen biyoyağ verimi ise %64 seviyesinde olmuştur. Bu

sonuçlar ile birlikte mikrodalga pirolizinin Pratik değerlerinin olduğunu ticari uygulamada umut verici bir teknoloji olduğu aktarılmıştır [47].

Mong vd'nin 2021 yaptıkları çalışmada biyoyakıt ve biyo-kimyasalların üretilmesi için at gübresinin mikrodalga destekli pirolizi gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga destekli piroliz işlemleri sonucunda at gübresinin geliştirilmiş enerji yoğunluğuna sahip biyokömür ürettiği ve biyoyağ ile biyogaz ürün verimlerini artırdığı bulunmuştur. Bu çalışmada optimum değerlere 550 C sıcaklık, 0,5 l/dk N gazı kullanımı ve katalizör olarak ½ şeklinde kullanılan aktif karbon şartları altında ulaşılmıştır. Optimum piroliz durumu esas alınarak at gübresinin pirolizi faydalı ürünler üretebilmek için modellenmiş endüstriyel bir tesiste simüle edilmiştir. Bu işlemler sırasında en fazla maliyet ve enerji harcanması, kurutma işlemleri ile piroliz işleminin gerçekleştirilmesi aşamasında olmuştur. Mikrodalga destekli piroliz işlemlerinin gerçekleşmesi ve işlemler için gerekli olan hammadde tedariki göz önüne alındığında tüm bu süreçlerde emisyon salınımında payın büyük bölümü %60'lık oranla hammadde tedarikinde yaşanmıştır. Yapılan bu çalışma diğer geleneksel piroliz yöntemleri ile gerçekleştirilen çalışmalar ile karşılaştırıldığında mikrodalga destekli pirolizin, daha düşük enerji tüketimi ve daha yüksek dönüşüm verimliliğine sahip olduğu görülmüştür. Mikrodalga destekli piroliz sisteminin bu sonuçlar dikkate alındığında geleneksel piroliz yöntemlerine kıyasla daha düşük çevresel etkiye sahip olduğu görülmektedir. Mikrodalga destekli piroliz sisteminin gübreleri işlemede umut verici bir yöntem olarak kullanılabileceği aktarılmaktadır [48].

Lam vd'nin 2016 yılında yaptıkları çalışmada atık yağların arıtılması ve geri kazanılması için mevcut teknikler hakkında bir inceleme yapılmıştır. Sürdürülebilir kalkınma ve atık yağlardan enerji geri kazanımında piroliz tekniklerinin kullanımındaki başarıların kapsamlı bir analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda piroliz tekniklerinin gelecekte yeniden kullanım için uygun potansiyel olarak yararlı piroliz ürünleri üreterek atık yağın hem enerjik hem kimyasal değerini geri kazanmada diğer mevcut tekniklere göre bazı avantaj sunduğu tespit edilmiştir. Özellikle mikrodalga destekli pirolizin geleneksel piroliz tekniklerine kıyasla hızlı ve enerji açısından verimli bir ısıtma sağladığı görülmüştür. Atık yağın ürün verimi, reaksiyon süresi, enerji tüketimi ve ürün kalitesi açısından iyi performans gösterdiği dolayısı ile atık

yağlardan enerji geri kazanımı için sürdürülebilir bir yöntem olduğu savunulmaktadır [49].

Lam vd.'nin 2010 yılında yaptıkları çalışmada kullanılmış motor yağları, değerli ürünlere geri dönüştürülmesi için mikrodalga destekli piroliz sisteminde işleme tabii tutulmuştur. Mikrodalga destekli piroliz işlemi sonrasında oluşan piroliz gazlarının bir kısmı yoğunlaştırılarak sıvı yağ haline dönüştürülmüştür. Geri kazanılan pirolitik yağın ve yoğunlaştırmadan geriye kalan yoğunlaşmayan gazların verimi ve bileşimi belirlenerek gerçek yakıt değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada işlem sıcaklığının geri kazanılan yağların toplam verimi ve oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Mikrodalga destekli piroliz işlemleri sonucunda elde edilerek geri kazanılan sıvı ve gaz piroliz ürünlerinin değerli bir yakıt ve endüstriyel bir hammadde olarak kullanılabilir çeşitli hafif hidrokarbonlar içerdiği belirtilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda araştırmacılar, mikrodalga destekli piroliz sisteminin yönetilmesi büyük bir sorun olan atık yağların geri dönüştürülmesi için son derece umut verici olduğunu belirtmektedirler [50].

Lam vd.'nin 2012 yılında yaptıkları çalışmada atık motor yağının mikrodalga destekli pirolizinin sonuçları incelenmiştir. Mikrodalga destekli piroliz işlemi ile, fosil kaynaklardan üretilen yoğunluk, kalorifik değer gibi parametrelerde geleneksel yakıt özelliklerine sahip, %88 oranında yoğunlaşabilen piroliz yağı üretilmiştir. Üretilen pirolitik yağın incelenmesi sonucunda kimyasal hammadde olarak da kullanılabilen hafif alifatik ve aromatik hidrokarbonların oluşumu görülmüştür. Mikrodalga destekli piroliz işlemi sonucunda üretilen pirolitik yağın nispeten kirletici içermeyen ve atık yağda bulunan enerjinin önemli ölçüde, yaklaşık olarak %90 oranında, geri kazanıldığı ve düşük seviyelerde kükürt-oksijen gibi parametrelere sahip olduğu görülmüştür. Pirolitik yağın bu kadar yüksek verimlilikte olması mikrodalga destekli piroliz sisteminde mevcut olan benzersiz ısıtma yöntemine ve kimyasal ortama bağlanmaktadır. Yapılan bu çalışma ile aynı zamanda besleme enjeksiyon hızının, taşıyıcı olarak kullanılan gaz akış hızının ve ısıtma kaynağının farklı yağların konsantrasyonunu ve moleküler yapısını etkilediğini göstermektedir. Piroliz proses koşullarının geri kazanılan atık yağların genel verimi ve oluşumu üzerindeki etkilerine ilişkin yeni bulgular sunulmaktadır. Araştırmacılar önceki çalışma sonuçları ile

birlikte bu çalışma sonucunu birleştirerek mikrodalga destekli piroliz sistemi ile benzin benzeri bir pirolitik yağın üretilebileceğini söylemektedirler. Kirletici içermemesi ve düşük oranda kükürt içeriğine sahip olması sebebi ile üretilen pirolitik yağ yeşil enerji olarak tanımlanmaktadır [51].

BÖLÜM 4

MATERYAL METOT

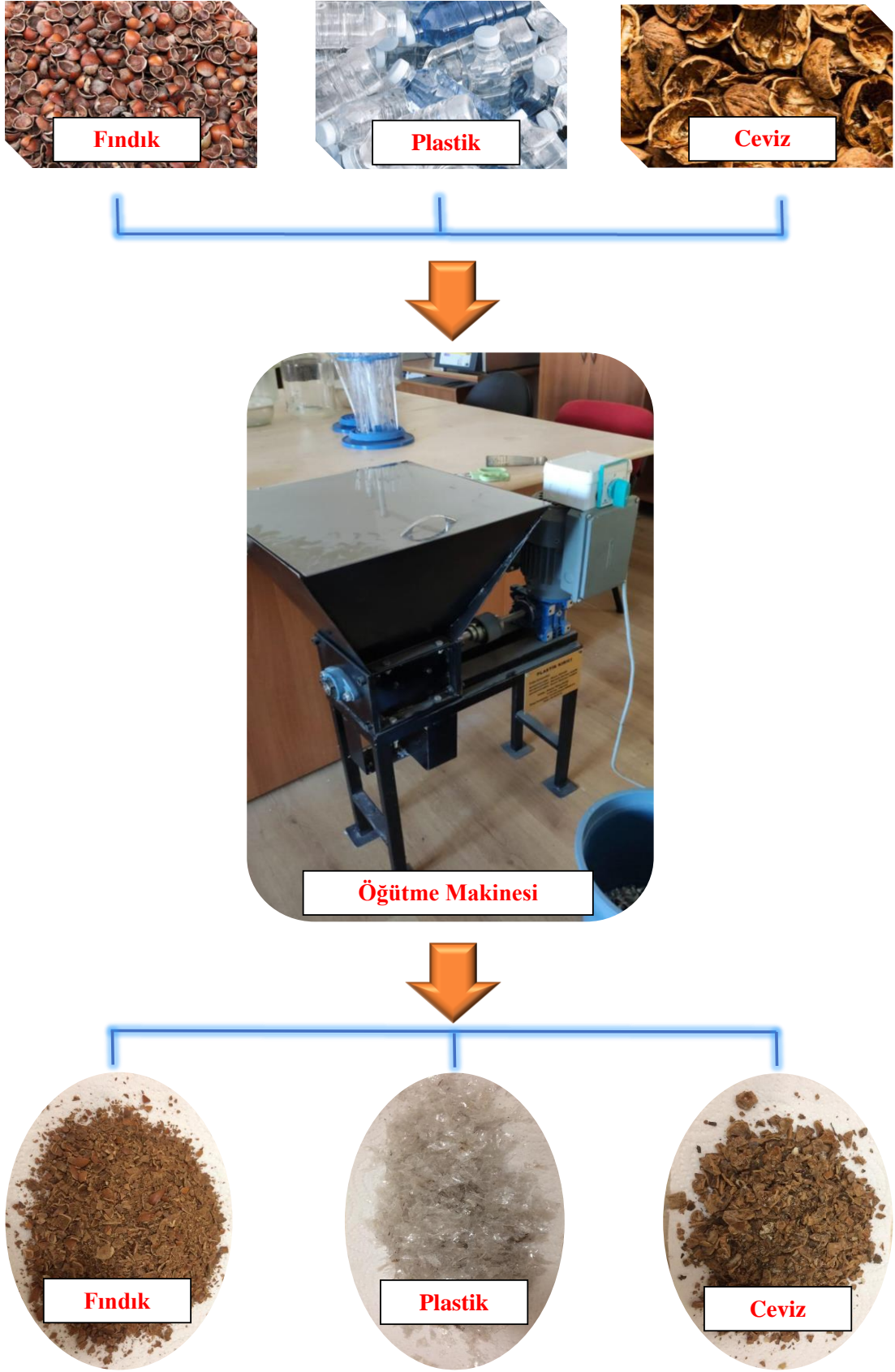
4.1. KULLANILAN MALZEMLER

4.1.1. Ceviz-Fındık-Plastik

Ceviz ve fındık üretimi sonrasında içi çıkarıldıktan sonra geriye kalan ceviz ve fındık kabukları mikrodalga destekli piroliz sisteminde biyoyağ hammaddesi olarak değerlendirilmek üzere toplanmıştır. Plastik su şişeleri ise kullanımlar sonrasında oluşan atıklardan toplanmıştır. Ceviz kabuğu, fındık kabuğu ve plastik su şişelerinden oluşan atık türleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Kullanılan hammaddelerin öğütülme öncesi ve sonrası halleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Piroliz sisteminde kullanılmak üzere elde edilen malzemeler öğütme makinesi yardımı ile yaklaşık 1-2 mm boyutlarına kadar küçültülmüştür.



Şekil 4.1. Ceviz, fındık malzemeleri ve plastik su şişeler



Şekil 4.2. Kullanılan hammaddelerin öğütülmesi.

4.2. DENEY DÜZENEĞİ

Deneysel çalışmalarda mikrodalga destekli piroliz işlemi gerçekleştirilebilmek amacıyla 2.45 GHz dalga boyu ve maksimum 800 W güce sahip ev tipi Samsung marka mikrodalga fırın modifiye edilerek kullanılmıştır. Mikrodalga destekli piroliz sistemi aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

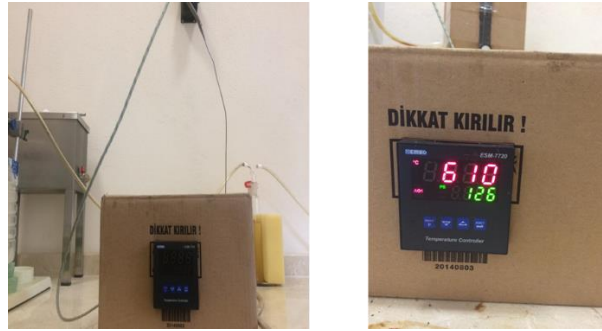
1. Mikrodalga fırın
2. Reaktör
3. Azot tüpü
4. Şamandıralı debimetre
5. K tipi termokupl
6. Cam bağlantı ekipmanları
7. Cam soğutma kolonları
8. Vigreux kolonu
9. Erlen

Mikrodalga destekli piroliz sistemi Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Mikrodalga destekli piroliz sistemi düzeneği.

Mikrodalga destekli piroliz sistemlerinde sıcaklık ölçümleri geleneksel sisteme kıyasla daha zorlu bir süreçtir. Geleneksel piroliz sistemlerinde olduğu gibi sürekli bir ölçüm mümkün değildir. Ancak mikrodalga sisteminin çalışmasını durdurarak ölçüm yapılabilmektedir. Deneysel çalışmalarda sıcaklık ölçümleri piroliz işlemi tamamlandıktan sonra K tipi termokupl ile malzemenin direkt olarak temas ettirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sıcaklık ölçümü için kullanılan K tipi termokupl Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



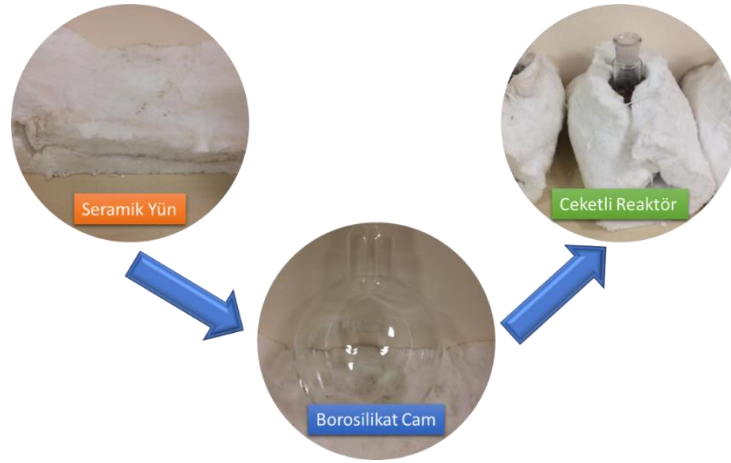
Şekil 4.4. Sıcaklık ölçümünde kullanılan K tipi termokupl.

Piroliz işleminin gerçekleştirilebilmesi için çalışma ortamının tamamen oksijensiz olması gerekmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda reaktör içerisinde tamamen oksijensiz ortamın sağlanabilmesi için N_2 gazı kullanılmıştır. Sistemde gaz akışının belirli bir debide sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle gaz akışının kontrolünün sağlanabilmesi için 0,2-2 l/dk özelliğine sahip ayar vanalı şamandıralı debimetre kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan ayar vanalı şamandıralı debimetre Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Ayar vanalı şamandıralı debimetre.

Mikrodalga destekli piroliz sisteminde piroliz işleminin gerçekleşebilmesi için gerekli olan yüksek sıcaklıklara çıkılabilmesi için reaktördeki ısı kaybının önlenmesi gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilmek amacıyla reaktör seramik yünü ile kaplanmıştır. Yalıtım malzemesi olarak kullanılan seramik yünü ve yalıtım işlemi Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Borosilikat cam balonun seramik yün ile kaplanması.



Şekil 4.7. Seramik yün ile kaplanmış reaktörün fırın içerisindeki görünümü.

4.3. DENEYSEL ÇALIŞMA KOŞULLARI

Mikrodalga destekli piroliz sisteminde biyoyağ üretimi için hammadde olarak ceviz kabuğu ve fındık kabuğu ile plastik su şişesi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan kabuklar öğütülerek, tanecik çapları 1-3 mm boyutlarına küçültülmüş, plastik şişeler ise kırıcı kullanılarak tanecik çapları 3-5 mm boyutlarına küçültülmüştür.

Mikrodalga destekli piroliz sistemlerinin çalışma şekli geleneksel piroliz sistemlerinden farklıdır. Mikrodalga enerjisinin malzemelerde absorplanabilmesi için dielektirik özelliklerde malzeme gereklidir. Ancak mikrodalga sistemi içerisinde dielektrik özelliğe sahip malzeme kullanılmamışsa gerekli mikrodalga enerjisini ortamda absorplayabilmek için dielektrik özelliğe sahip absorban malzeme kullanılabilir. Yapılan çalışmada mikrodalga enerjisini ortamda absorplayarak daha fazla verim alabilmek için absorban malzeme olarak biyokömür kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan biyokömür geleneksel piroliz yöntemi ile elde edilmiştir. Absorban malzeme olarak kullanılan biyokömür Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Piroliz sisteminde kullanılan absorban malzeme.

Deneysel çalışmalar iki farklı çalışma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. 1. Numune üretimi için 185 g ceviz kabuğu, 185 g fındık kabuğu, 10 g plastik ve 20 g absorban malzeme kullanılarak toplam 400 g numune hazırlanmıştır. 2. Numune üretimi için 175 g ceviz kabuğu, 175 g fındık kabuğu, 30 g plastik ve 20 g absorban malzeme kullanılarak toplam 400 g numune hazırlanmıştır. Her iki numune için absorban malzeme miktarları sabit tutularak kullanılan malzemelerin oranları değiştirilmiş ve değişen oranlarda elde edilen yakıtların motor performansı ve emisyon değerleri değerlendirilmiştir.

Bütün deneysel çalışmalar 700 W mikrodalga gücünde, 30 dk bekletme süresi ve 0,5 L/dk N₂ gaz akış hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma koşulları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4. 1. Çalışma Koşulları

	CEVİZ (g)	FINDIK (g)	PLASTİK (g)	ABSORBAN (g)	ÇALIŞMA KOŞULLARI
1. NUMUNE DENEYLERİ	185	185	10	20	700 W - 30 DK
2. NUMUNE DENEYLERİ	175	175	30	20	700 W - 30 DK

4.4. PİROLİTİK YAĞ İYİLEŞTİRME İŞLEMLERİ

Mikrodalga destekli piroliz sisteminde gerçekleştirilen işlemler sonrasında oluşan pirolitik yağın, biyodizele dönüştürülebilmesi ve motor deneylerinde kullanılabilmesi için içerisinde bulunan katı partiküllerin ve bazı kirleticilerin pirolitik yağdan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla mikrodalga destekli piroliz işlemi sonucunda elde edilen pirolitik yağ öncelikle filtrasyon işlemlerinden daha sonra ise distilasyon işleminden geçirilerek özellikleri iyileştirilmiştir. Mikrodalga destekli piroliz işlemleri sonrasında elde edilen pirolitik yağ örnekleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Pirolitik yağ.

4.4.1. Filtrasyon İşlemi

Filtreleme işlemleri vakumlu pompa yardımıyla pirolitik yağın filtre kağıdından süzülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Filtrasyon işleminde kullanılan vakumlu filtrasyon sistemi Şekil 4.11’de gösterilmektedir.

Filtrasyon işlemlerinin ardından partikül madde yönünden saha saf hale getirilen pirolitik yağa, içerisinde bulunan eter ve diğer yanma verimi etkileyici etmenlerin uzaklaştırılması için distilasyon işlemi uygulanmıştır.



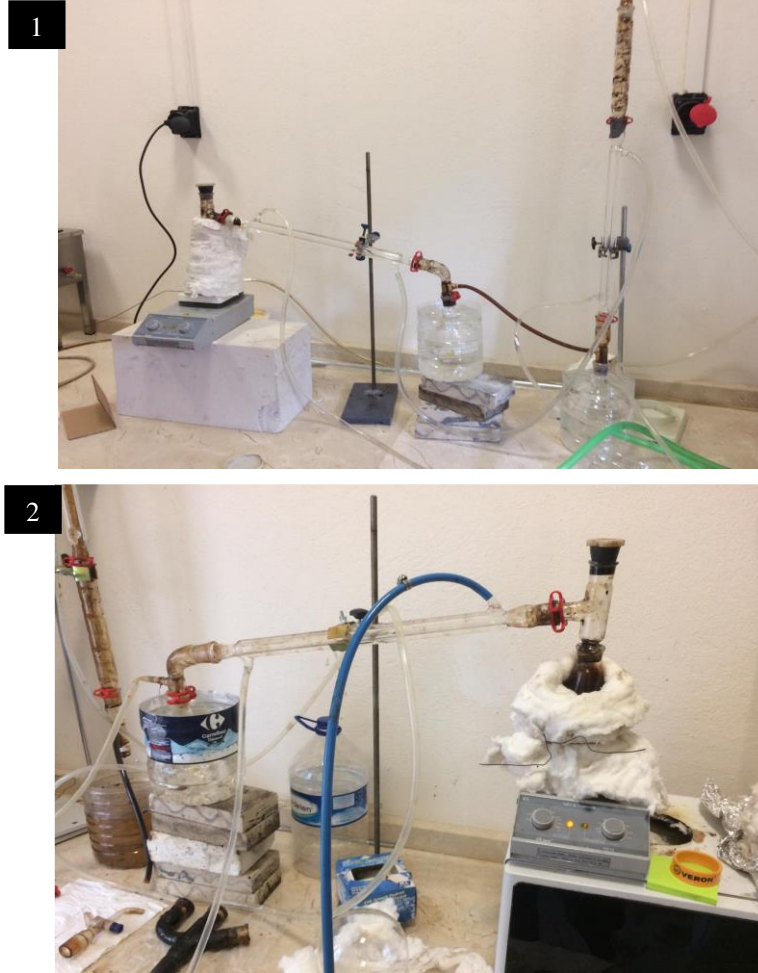
Şekil 4.10. Filtre işleminde kullanılan vakumlu filtrasyon düzeneği.

4.4.2. Distilasyon İşlemleri

Filtrasyon işlemlerinin ardından piroliz yağı distile edilmiştir. Distilasyon işlemi için iki distile ünitesi kullanılmıştır. Distilasyon işleminde kullanılan malzemeler;

1. Isıtıcı (manyetik karıştırıcı),
2. Reaktör (500 ml ölçüsünde borosilikat cam erlen),
3. Cam bağlantı ekipmanları,
4. Soğutma kolonu,
5. Erlen

Distilasyon ünitelerine ait görseller Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

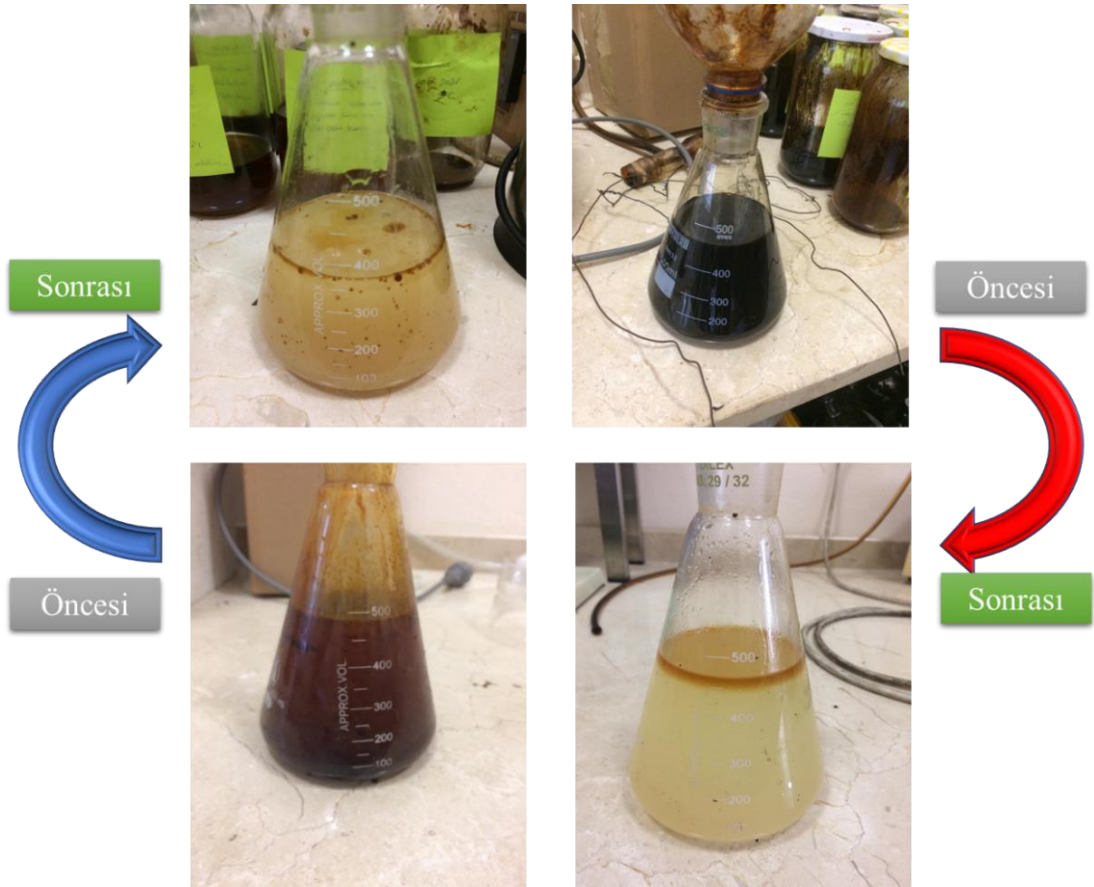


Şekil 4.11. Distilasyon üniteleri.

Distilasyon işlemleri, ısıtıcı manyetik karıştırıcı ile pirolitik yağın ısıtılması sonrasında sıvı fazından gaz fazına geçen pirolitik yağın daha sonrasında soğutma kolonları yardımı ile yoğunlaştırılması şeklinde yapılmıştır.

Distilasyon işlemi 170-190 °C sıcaklık aralığında ve 2-3 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Distilasyon işlemi erlen içerisinde kalan pirolitik yağ miktarı kontrol edilerek, pirolitik yağ bittiğinde durdurulmuştur.

Distilasyon işlemlerinin uygulanmasından sonra biyodizel dönüşüm işlemi tamamlanan pirolitik yağ, yağın kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için kimyasal analizlere göndermek üzere ve motor deneylerinde kullanılmak üzere uygun hale getirilmiştir. Pirolitik yağın distilasyon öncesi ve distilasyon işlemi uygulandıktan sonraki halleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Distilasyon işlemi öncesi ve sonrası numune görünümleri.

4.4.3. Analiz Sonuçları

Farklı tür atıklardan mikrodalga destekli piroliz yöntemi ile elde edilen pirolitik yağ ve dizel yakıtta ait yaklaşık olarak hesaplanmış analiz sonuçları Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4. 2. Dizel, N1 ve N2 yakıt türlerine ait analiz sonuçları.

Parametreler	Dizel	N1 Yakıtı	N2 Yakıtı
Kinematik Viskozite (mm ² /s)	2,96	3,36256	3,30434
Parlama Noktası (°C)	59,5	52,32	51,78
Yoğunluk (g/cm ³)	0,84	0,98367	0,98138
Kükürt (ppm)	0,05	0,12425	0,12525
Setan sayısı	61,5	49,354	49,356
Alt ısı değer (Mj/kg)	43,4	38,823	38,717

Çizelge 4. 3. N1-10%, N1-20% ve N1-30% yakıt türlerine ait analiz sonuçları.

Parametreler	N1-10%	N1-20%	N1-30%
Kinematik Viskozite (mm ² /s)	3,000256	3,040512	3,080768
Parlama Noktası (°C)	58,782	58,064	57,346
Yoğunluk (g/cm ³)	0,854367	0,868734	0,883101
Kükürt (ppm)	0,057425	0,06485	0,072275
Setan sayısı	60,2854	59,0708	57,8562
Alt ısı değer (Mj/kg)	42,9423	42,4846	42,0269

Çizelge 4. 4. N2-10%, N2-20% ve N3-30% yakıt türlerine ait analiz sonuçları.

Parametreler	N2-10%	N2-20%	N3-30%
Kinematik Viskozite (mm ² /s)	2,994434	3,028868	3,063302
Parlama Noktası (°C)	58,728	57,956	57,184
Yoğunluk (g/cm ³)	0,854138	0,868276	0,882414
Kükürt (ppm)	0,057525	0,06505	0,072575
Setan sayısı	60,2856	59,0712	57,8568
Alt ısı değer (Mj/kg)	42,9317	42,4634	41,9951

4.4.4. Maliyet Analizi

1 L iyileştirilmiş biyodizel yakıtın üretim maliyeti ile 1 L dizel yakıtın üretim maliyetlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Çizelge 4.5'te biyodizel üretim deneylerinde kullanılan atık türlerinin maliyetleri verilmiştir. Çizelge 4.6'da biyodizel üretiminde ve üretilen biyodizelin iyileştirilmesi işlemlerinde kullanılan cihazların enerji maliyetleri verilmiştir. Ham biyodizel üretildikten sonraki iyileştirme işlemleri sırasında kayıplar yaşanmaktadır. 1 L iyileştirilmiş biyodizel üretebilmek için yaklaşık olarak 1,5 L ham biyodizel üretilmesi gerekmektedir. 1,5 L ham biyodizel üretebilmek için belirtilen karışım oranlarında ve işletme şartlarında 9 adet mikrodalga destekli piroliz işlemi yapılması gerekmektedir. Damıtma ve süzme işlemleri sırasında ise yaklaşık olarak 0,5 litre kayıp yaşanmaktadır. Maliyet hesaplamaları 9 adet mikrodalga destekli piroliz işlemine göre gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.7'de biyodizel üretim maliyetleri ve dizel maliyeti karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 4.5. Atık maliyetleri.

Ceviz Kabuğu Fiyatı (TL/kg) [52]	Fındık Kabuğu Fiyatı (TL/kg) [52]	Atık Plastik Fiyatı (TL/kg) [53]
0,45	0,45	1,5

Çizelge 4.6. Deneyde kullanılan cihazların enerji tüketim maliyetleri.

	Cihaz gücü (kW)	Günlük çalışma süresi (Saat)	Günlük enerji tüketimi (kWh)	Elektrik birim fiyatı (TL/kWh)	Toplam tüketim maliyeti (TL)
Isıtıcı	0,68	2	1,36	0,706	0,96016
Mikrodalga Fırın	0,7	0,5	0,35	0,706	2,2239
Süzme Seti	0,372	0,5	0,186	0,706	0,131316

Çizelge 4.7. Biyodizel üretim maliyetleri ve dizel ile karşılaştırılması.

Yakıt Türleri	Toplam Kullanılan Atık Maliyeti (TL)	Mikrodalga Destekli Piroliz İşlemi Enerji Maliyeti (TL)	Biyodizel İyileştirme İşlemi Maliyeti (TL)	Biyodizel Üretim Maliyeti (TL/L)	Dizel Fiyatı (TL/L) [54]
N1	1,6335	2,2239	1,0914	4,9488	7,97
N2	1,8225	2,2239	1,0914	5,1378	

Yapılan deneyseller çalışmalar sonucunda N1 yakıtına ait 1 L iyileştirilmiş biyodizel üretim maliyeti 4,9488 TL, N2 yakıtına ait 1 L iyileştirilmiş biyodizel maliyeti ise 5,1378 TL olarak hesaplanmıştır. 17.10.2021 tarihinde Türkiye Petrolleri A.O internet sitesinden alınan güncel dizel fiyatlarına göre 1 L dizel yakıt maliyeti 7,97 TL şeklindedir. 1 L iyileştirilmiş biyodizel üretim maliyeti 1 L dizel yakıt üretim maliyetinden oldukça düşük gerçekleşmiştir.

Biyodizel üretim maliyeti döviz kurlarından ve vergilerden arındırılmış şekilde laboratuvar ölçekli üretim için hesaplanmıştır. Endüstriyel üretim için bu faktörlerin göz önünde bulundurularak hesaplamaların güncellenmesi gerekmektedir.

4.5. MOTOR DENEYLERİ

4.5.1. Motor Düzeneği

Deneysel çalışmalar tek silindirli dizel motor kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel motorun devri 3000 d/d'ya sabitlenerek, dört farklı motor yükünde (250, 500, 750 ve 1000 W) gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan dizel motorun özellikleri Çizelge 4.10'da, jeneratörün özellikleri ise Çizelge 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.14'te ise deneysel çalışmalarda kullanılan dizel motor gösterilmiştir.

Gerçekleştirilen dizel motor deneylerinde yakıt olarak standart dizel yakıt ile 1. Numune özelliklerine sahip yakıt (N1 yakıtı) ve 2. Numune özelliklerine sahip yakıt (N2) karışımları kullanılmıştır.



Şekil 4.13. Deneylerde kullanılan dizel motor.

Çizelge 4.8. Çalışmalarda kullanılan motora ait teknik özellikler.

Katana KD 4500 E Marşlı Dizel Motor	
Maks. Çıkış Gücü (HP/rpm)	6-3000
Motor Hacmi (cm ³)	296
Çap x Strok (mm)	78x62
Sıkıştırma Oranı	20:1
Silindir Sayısı	1

Çizelge 4.9. Çalışmalarda kullanılan jeneratöre ait teknik özellikler.

Katana KD 4500 E Marşlı Dizel Monofaze Jeneratör	
Motor Gücü (HP)	6,7
Maks.-Sürekli Çıkış Gücü (kVa)	4,2
Frekans (Hz)	50
Faz Sayısı	Monofaze
Çıkış Voltajı (V)	230

4.5.2. Yükleme Ünitesi

Deneylelerde dizel yakıtta belirli oranlarda (%10, %20 ve %30) biyodizel karıştırılarak elde edilen karışım yakıt, yakıt olarak kullanılmıştır. Kullanılan yakıtın motor performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla hazırlanan her bir karışım oranı için motora 250-1000 W arasında yükleme yapılmıştır. Çalışmalarda kullanılan deneysel motora yükleme işlemi, 250, 300, 500 ve 1000 W'lık halojen ampullerden dizayn edilmiş bir yükleme ünitesinin motora entegre edilmesiyle sağlanmıştır. Şekil 4.15'te yükleme ünitesi gösterilmiştir. Her bir karışım oranı için özgül yakıt tüketimi ve emisyon değerleri ölçülmüştür.

Motor yüklerinin yukarıda belirtilen oranlarda seçilme sebebi: bu değerlerin altındaki motor yüklemelerinde tutuşma gecikmesi ortaya çıkarak motor silindirleri içerisinde yanmanın tam olarak gerçekleştirilememesidir. Bu durumun üretilen biyodizele ait setan sayısındaki düşük değerlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.14. Yükleme ünitesi.

4.5.3. Emisyon Ölçümü

Piroliz işlemi sonucunda üretilen her iki numune için dizel yakıtta %10, %20 ve %30 oranlarında biyodizel karıştırılarak farklı motor yüklerinde elde edilen karışımların emisyon değerleri incelenmiştir.

Çalışmada emisyon ölçümleri BİLSA egzoz gaz analiz cihazı ile yapılmıştır. Egzoz gaz analiz cihazı ile HC, CO, CO₂, NO_x ve O₂ parametreleri ölçülebilmektedir. Çizelge 4.12’de egzoz gazı analiz cihazının teknik özellikleri gösterilmektedir. Şekil 4.16’da bilgisayarlı emisyon ölçüm cihazının genel görünümü gösterilmektedir.

Çizelge 4.10. Egzoz gazı analiz cihazı teknik özellikleri.

Parametreler	Ölçme Sınırı	Hassasiyet
CO	0 - 10,0 % vol.	0,001%
CO ₂	0 - 20.0 % vol.	0,001%
HC	0 - 10,000 PPM vol.	1 PPM
O ₂	0 - 10 % vol.	0,01%
NO _x	0 - 5000	1 PPM



Şekil 4.15. Egzoz gazı ölçüm cihazı.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

DeneySEL çalışmalarında öncelikle piroliz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda iki ceviz kabuğu, fındık kabuğu, plastik ve absorban malzemelerin farklı karışım oranları belirlenerek iki farklı pirolitik yağ elde edilmiştir. Bu kapsamda 1. karışımında 185 g ceviz kabuğu, 185 g fındık kabuğu, 10 g plastik ve 20 g absorban malzeme bulunmaktadır. 2. karışımında ise 175 g ceviz kabuğu, 175 g fındık kabuğu, 30 g plastik ve 20 g absorban malzeme bulunmaktadır. Böylelikle toplamda 400 g'lık iki farklı numune türünden pirolitik yağ elde edilmiştir.

400 g'lık numunelerin piroliz işlemleri sonrasında ağırlıkça yaklaşık %38 verimle 150 g pirolitik yağ elde edilmiştir. 150 g pirolitik yağdan filtrasyon ve distilasyon işlemleri sonucunda 1/3 oranında kayıp yaşanarak yaklaşık olarak 100 g kullanılabilir biyodizel elde edilmiştir.

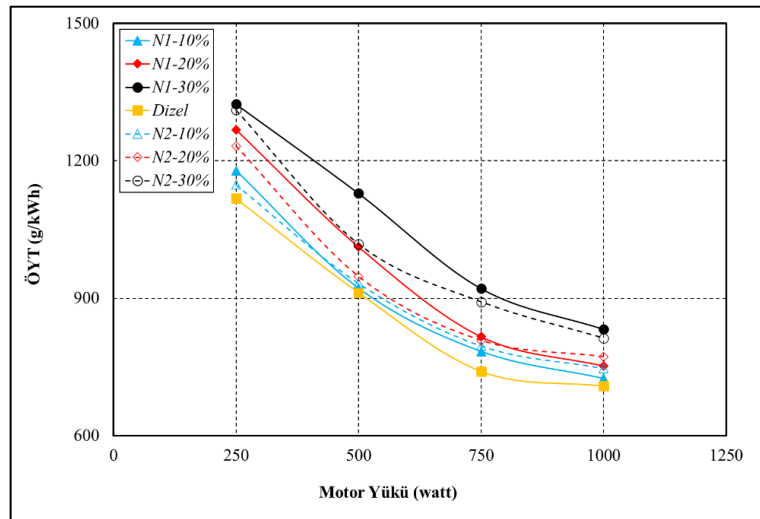
Daha sonra elde edilen biyodizel standart dizel yakıt içerisine sırası ile %10, %20 ve %30 oranlarında karıştırılmıştır. Karışımın motor performansı ve egzoz emisyonları üzerine etkisini analiz etmek için sırası ile 250, 500, 750 ve 1000 W motor yüklerinde deney motoru çalıştırılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

5.1. MOTOR PERFORMANSI

5.1.1. ÖYT Değerleri

Standart dizel yakıtla karışım sonucu oluşan N1 ve N2 yakıtlarının farklı karışım oranlarında ve farklı motor yüklerinde oluşan ÖYT değerleri Şekil 5.1’de gösterilmektedir.

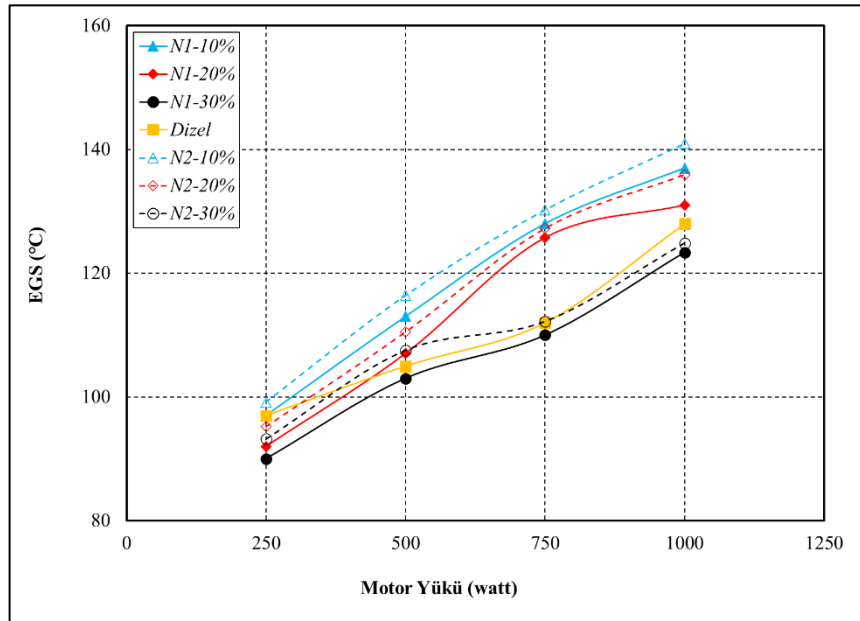
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda dizel, N1 ve N2 yakıt türlerine ait ÖYT miktarlarının, motora uygulanan yük miktarı arttıkça azaldığı görülmektedir. N1 ve N2 yakıt türlerine ait ÖYT değerleri, dizel yakıtın ÖYT değerlerinden daha yüksek olmuştur. N1 ve N2 yakıt türleri arasında en düşük ÖYT değerine 1000 W motor yüklemesinde N1-10% yakıt türünde ulaşılmıştır. En yüksek ÖYT değerine ise 250 W motor yüklemesinde N1-30% yakıt türünde ulaşılmıştır. Çizelge 4.2’de dizel, N1 ve N2 yakıt türlerine ait alt ısı değerleri incelendiğinde N1 ve N2 yakıt türlerine ait alt ısı değerlerin dizel yakıtın alt ısı değerinden daha düşük olduğu görülmektedir. ÖYT, motorda 1 kW güç üretebilmek için saatte harcanması gereken yakıt miktarının bir ölçüsüdür. Alt ısı değeri düşük bir yakıt kullanıldığında 1 kW güç üretebilmek için daha fazla yakıt kullanılması gerekmektedir. ÖYT değerleri incelendiğinde, alt ısı değeri daha yüksek olan dizel yakıtın daha düşük ÖYT değerlerine sahip olması bu bilgileri doğrulamaktadır.



Şekil 5.1. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait ÖYT değerleri.

5.1.2. EGS Değerleri

Yakıtın silindir içerisinde yanma reaksiyonu sonucunda ısı açığa çıkmaktadır. Bu ısının bir miktarı faydalı güce dönüşür, bir kısmı soğutma ve yağ vasıtasıyla motordan uzaklaşmaktadır. Geri kalan kısım ise egzoz gazları ile motordan atılmaktadır. Standart dizel yakıtla karışım sonucu oluşan N1 ve N2 yakıtlarının farklı karışım oranlarında ve farklı motor yüklerinde oluşan EGS emisyon değerleri Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Genel olarak en düşük EGS değerleri %30 biyodizel içerikli yakıt karışımları ile elde edilirken, en yüksek değerler %10 biyodizel içerikli yakıt karışımları ile elde edilmiştir. %30 biyodizel içerikli yakıt karışımları ile yanmanın kötüleşmesi, silindir içerisindeki yanmanın azalmasına ve sıcaklıkların düşmesine, dolayısıyla EGS’nin de düşmesine sebep olmuştur. Ayrıca yük artışıyla beraber EGS değerleri artmıştır. Bunun temel sebebi motor yükü arttıkça yanma odasının sıcaklık ve basınç değerlerinin artmasıdır. Tüm yakıtlarda en yüksek EGS değerleri 1000 W yükte elde edilmiştir.



Şekil 5. 2. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait EGS değerleri.

5.2. EGZOZ EMİSYONLARI

5.2.1. HC Emisyon Değerleri

Standart dizel yakıtla karışım sonucu oluşan N1 ve N2 yakıtlarının farklı karışım oranlarında ve farklı motor yüklerinde oluşan HC emisyon değerleri Şekil 5.3'te gösterilmektedir.

Egzoz gazı emisyonları içerisinde HC parametresinin varlığı yakıtın bir kısmının veya tamamının yanmadığını göstermektedir. HC emisyonları silindir içerisindeki bazı bölgelerde eksik yanma sonucu oluşan yakıt moleküllerinden meydana gelmektedir. HC emisyonları sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Dizel motorlarda açığa çıkan HC emisyonlarında meydana gelen artışın nedeni yakıt karışımlarında yaşanan sorundur. Zayıf karışım olarak tanımlanabilecek bu durumlarda hava oranında yaşanan yüksek artış ile yakıt, silindir içerisindeki bazı bölgelerde söner HC emisyonlarının oluşumuna sebep olmaktadır [55].

HC emisyonları için ppm değerinde ölçülen sonuçlar, N1 ve N2 yakıt türlerinin HC emisyon değerlerinde %10, %20 ve %30 karışımları için motor yükünün artmasıyla birlikte artış gerçekleştiğini göstermektedir.

N1-20%, N1-30%, N2-20% ve N2-30% yakıt türleri için 250 W motor yükünden 750 W motor yüküne kadar HC emisyon parametrelerinde hızlı bir yükselişin olduğu, 750 W motor yüklemesinden sonra ise HC emisyon parametrelerinde daha yatay bir seyir izlendiği görülmektedir. N2-10% yakıtı için bu durum farklılaşarak 250 W motor yüklemesinden 750 W motor yüklemesinde kadar yatay seyirde gerçekleşen HC emisyon değerlerinde, 750 W motor yüklemesinden 1000 W motor yüklemesine çıkıldığında daha hızlı bir artışın gerçekleştiği görülmüştür.

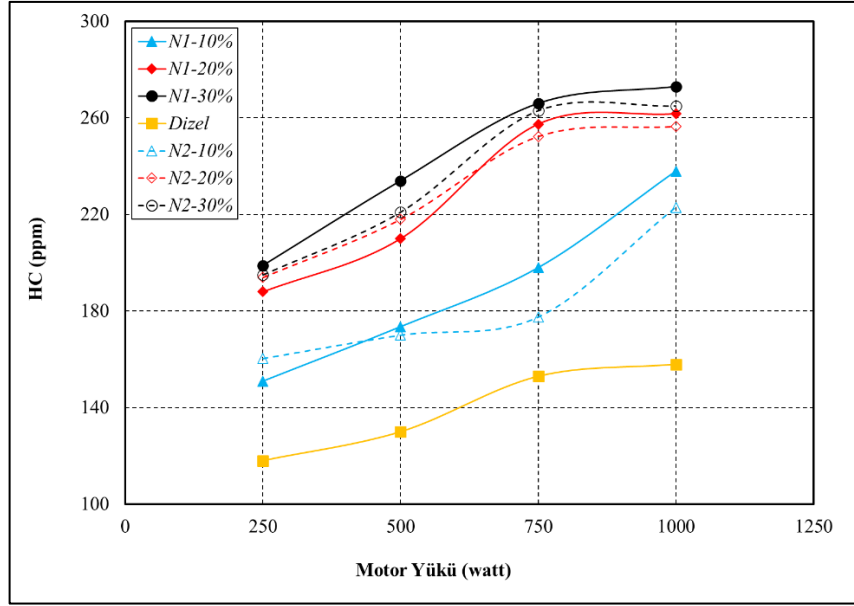
%20 ve %30 karışım oranlarında HC emisyon parametresinde elde edilen yüksek değerler, N1 ve N2 yakıt türlerinin, dizel ve %10 karışımında meydana gelen HC emisyon değerlerine kıyasla, yanma verimlerinde düşüş olduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, HC emisyon parametresinin %10 karışım oranında N1 ve N2 yakıtlarının, dizel yakıtın HC emisyon değerine daha yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. Dizel yakıtın HC emisyon değerine en yakın sonuç N2-10% yakıt türünde elde edilmiştir.

En düşük HC emisyon değerine sahip olan 250 W motor yükünde N1-10% yakıt türünün HC emisyon değeri dizel yakıtın 250 W motor yükünde oluşan HC emisyon değerinden yaklaşık olarak %28 daha yüksek olurken, en yüksek HC emisyon değerinin olduğu 1000 W motor yükünde N1-30% yakıt türünün HC emisyon değeri dizel yakıtın 1000 W motor yükünde oluşan HC emisyon değerinden yaklaşık olarak %72 daha fazla gerçekleşmiştir.

Dizel yakıt ile N1 ve N2 yakıt türlerinin kinematik viskozite değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmektedir. Bu değerler incelendiğinde N1 ve N2 yakıt türüne ait kinematik viskozite değerlerinin dizel yakıtın kinematik viskozite değerinden yaklaşık olarak %12,5 değerinde yüksek olduğu görülmektedir. Kinematik viskozite değerlerinin yüksek olması enjektörlerde püskürtme problemine yol açmaktadır. Bu durum eksik yanma üzerinde etkilidir. Bu nedenle N1 ve N2 yakıt türlerine ait kinematik viskozite değerlerinin yüksek olmasının HC emisyon parametrelerinde artışa neden olabileceği düşünülmektedir.

N2 yakıt türünde 750 W motor yüklemesi ile 1000 W motor yüklemesi sonucu oluşan HC emisyon değerleri N1 yakıt türüne göre daha düşük gerçekleşmiştir. Kinematik viskozite değerlerine bakıldığında N2 yakıt türünün kinematik viskozitesi N1 yakıt türüne göre yaklaşık olarak %2 oranında daha düşüktür. Bu durum yukarıdaki bilgiyi doğrulayarak N1 ve N2 yakıt türlerinde yanma verimi üzerinde kinematik viskozitenin önemini göstermektedir.



Şekil 5. 3 Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait HC emisyon değerleri.

5.2.2. CO Emisyon Değerleri

Standart dizel yakıtla karışım sonucu oluşan N1 ve N2 yakıtlarının farklı karışım oranlarında ve farklı motor yüklerinde oluşan CO emisyon değerleri Şekil 5.4'te gösterilmektedir. CO emisyonları, HC emisyonlarında olduğu gibi eksik yanmanın sonucunda oluşmaktadır. Gerçekleşen eksik yanmanın temel nedeni üretilen biyodizel yakıt içerisinde homojen karışımın sağlanamamasıdır.

Yapılan deneysel çalışma sonucunda, N1 ve N2 türüne ait karışım yakıtların CO emisyon değerlerinin tüm motor yüklerinde dizel yakıtın emisyon değerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. CO emisyonlarındaki artış motor yüklerinde meydana gelen artış ile paralel bir seyirde devam etmektedir.

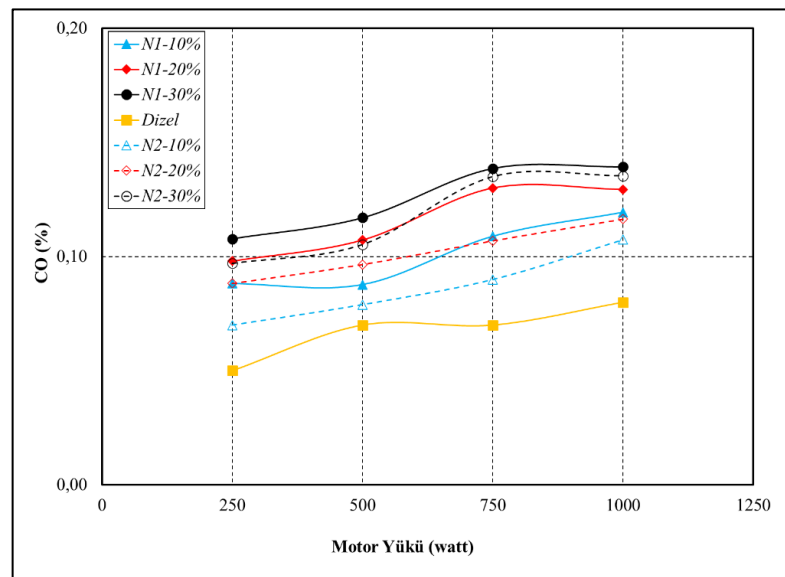
N1-20%, N1-30% ve N3-30% karışım yakıtlarının CO emisyon değerleri, 250 W motor yüklemesinden 750 W motor yüklemesine kadar artış eğiliminde olmuştur. 750 W motor yüklemesinden 1000 W motor yüklemesine çıktığında ise CO emisyon değerleri yatay bir seyir izlemiştir.

N2 yakıt türünün CO emisyon değerleri N1 yakıt türünün CO emisyon değerlerine kıyasla daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. CO emisyon değerlerinde yaşanan bu sonuca göre N2 yakıt türünün yanma verimi N1 yakıt türüne kıyasla daha iyi gerçekleşmiştir. N2 yakıt türündeki eksik yanma daha düşük olmuştur.

HC emisyon değerlerinde olduğu gibi CO emisyon değerlerinin yüksek seviyelerde gerçekleşmesinde önemli bir etkiye sahip olan oksijen yetersizliği, tam yanmanın gerçekleşmesini engelleyerek ortamda bulunan karbonun CO'e dönüşmesine neden olmuştur [56]. Bu durum N1 ve N2 yakıt türlerinde CO emisyon değerlerinin yüksek çıkmasına sebep olmuştur.

Bununla birlikte CO emisyon değerlerinde elde edilen yüksek sonuçlar, N1 ve N2 yakıt türlerinin homojenlik özelliklerinin dizel yakıtın homojenlik özelliğinden daha düşük olduğunu göstermektedir. Homojen yapıda olmayan yakıt türleri eksik yanmaya sebebiyet verebilmektedir. Elde edilen sonuçlar, N2 yakıt türünün homojenlik özelliğinin N1 yakıt türüne göre daha iyi olduğunu göstermektedir.

Homojenliğin artırılarak eksik yanmanın önüne geçilebilmesi ve CO emisyon değerlerinin düşürülmesi, üretilen yakıt türlerinde yapılan iyileştirme adımlarının güçlendirilmesi ile mümkün olacaktır.



Şekil 5. 4. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait CO emisyon değerleri.

5.2.3. CO₂ Emisyon Değerleri

Standart dizel yakıtla karışım sonucu oluşan N1 ve N2 yakıtlarının farklı karışım oranlarında ve farklı motor yüklerinde oluşan CO₂ emisyon değerleri Şekil 5.5'te gösterilmektedir.

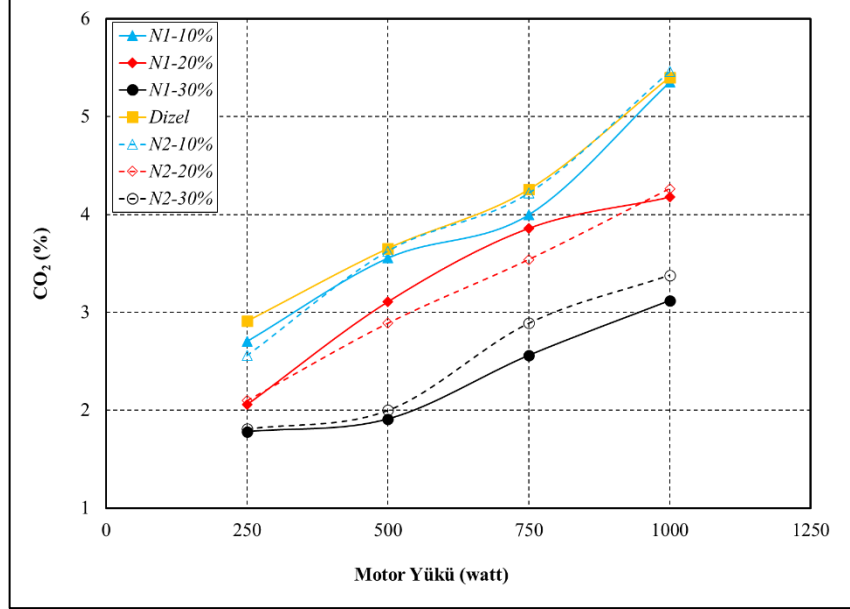
HC ve CO emisyon değerleri, eksik yanmanın neticesinde açığa çıkarak yakıtın yanma verimini gösteren emisyon parametrelerindedir. CO₂ emisyon değerleri ise HC ve CO emisyon değerlerinin aksine tam yanma sonucunda açığa çıkmaktadır. O₂ emisyon değerlerinin düşük olması yakıt içerisindeki karbonun CO₂'ye dönüşmesini engelleyerek tam yanmanın gerçekleşmemesine yol açmaktadır. Karbonun CO₂'ye dönüşmemesi sonucunda eksik yanmanın ürünü olan CO emisyonlarında artışa neden olmaktadır. Aynı zamanda bu durum bir diğer eksik yanma ürünü olan HC emisyonlarında da artışların görülmesine yol açmaktadır [57][58].

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda dizel, N1 ve N2 yakıt türlerinde motor yükleri 250 W motor yükünden 1000 W motor yüküne çıkarıldığında CO₂ emisyon değerlerinde artış görülmektedir.

N1 ve N2 yakıt türlerindeki tüm karışım oranlarında ortaya çıkan CO₂ emisyon değerleri dizel yakıtın CO₂ emisyon değerlerinin altında kalmıştır. Bu durum üretilen N1 ve N2 yakıt türlerinde tam yanma veriminin dizel yakıtın tam yanma veriminden daha düşük seviyelerde gerçekleştiğini göstermektedir. CO₂ emisyon değerlerinin en yüksek verilerine N1-10% ve N2-10% yakıt türlerinde ulaşılmıştır. CO₂ emisyon değerlerinin en düşük verilerine ise N1-30% ve N2-30% yakıt türlerinde ulaşılmıştır.

En düşük CO₂ emisyon değerlerine sahip olan 250 W motor yükünde N1-30% yakıt türünün CO₂ emisyon değerleri dizel yakıtın 250 W motor yükünde CO₂ emisyon değerlerinden yaklaşık olarak %63 daha düşük gerçekleşmiştir. En yüksek CO₂ emisyon değerlerine sahip olan 1000 W motor yükünde N2-10% yakıt türünün CO₂ emisyon değerleri dizel yakıtın 1000 W motor yükünde CO₂ emisyon değerlerinden yaklaşık olarak %1 daha yüksek gerçekleşmiştir.

Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar, N2 yakıt türünün CO₂ emisyon değerleri N1 yakıt türünün CO₂ emisyon değerlerinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum N2 yakıt türlerinde tam yanma veriminin N1 yakıt türünden daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5. 5. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait CO₂ emisyon değerleri.

5.2.4. O₂ Emisyon Değerleri

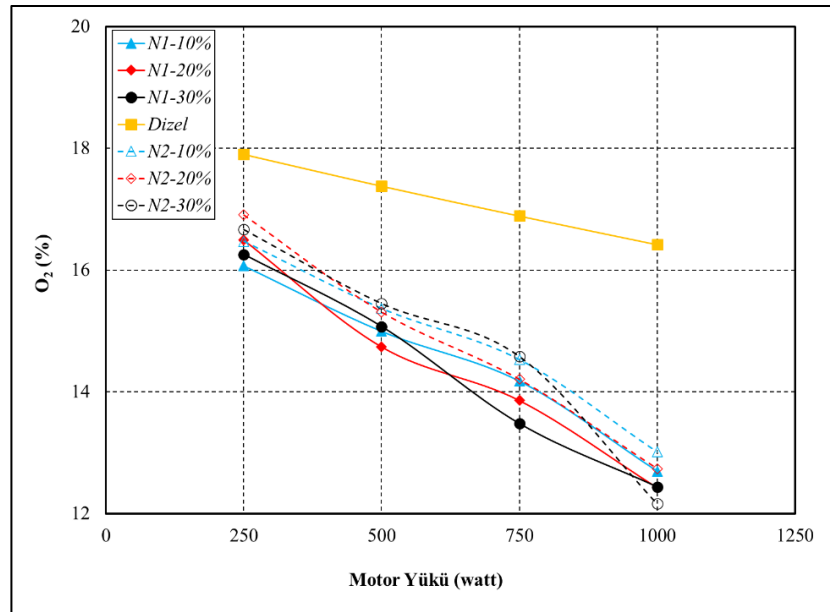
Standart dizel yakıtla karışım sonucu oluşan N1 ve N2 yakıtlarının farklı karışım oranlarında ve farklı motor yüklerinde oluşan CO emisyon değerleri Şekil 5.6'da gösterilmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda dizel, N1 ve N2 yakıt türlerinde motora uygulanan yük miktarı arttıkça O₂ emisyon değerlerinde düşüş yaşanmıştır. N1 ve N2 yakıt türleri karşılaştırıldığında N1 yakıt türünün tüm karışım oranlarında meydana gelen O₂ emisyon değerleri, N2 yakıt türünün tüm karışım oranlarında meydana gelen O₂ emisyon değerlerinden daha düşük gerçekleşmiştir. O₂ emisyon değerlerinde yaşanan bu durum tam yanmanın gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum yakıt içerisinde homojen bir karışımın sağlanamadığını göstermektedir. N1 ve N2 türlerinde homojen karışımın sağlanabilmesi için biyodizel iyileştirme

çalışmalarının geliştirilmesi gerekmektedir. Yakıt içerisindeki oksijen miktarının artırılması için üretilen biyodizel yakıtlara dietil eter gibi alkol içerikli kimyasallar eklenebilmektedir. Bu eklemeler %1 gibi düşük oranlarda olacağı için biyodizel üretimlerinin maliyetlerinde çok düşük artışlar meydana getirmektedir [59].

N1-30% ve N2-30% yakıt türlerinde 750 W motor yüklemesinden itibaren O₂ emisyonlarında yaşanan düşüş hızlanmıştır. 250 W motor yüklemesinden 1000 W motor yüklemesine çıkıldığında O₂ emisyonlarında yaşanan düşüş oranları N1-30% için yaklaşık olarak %12,44, N2-30% için yaklaşık olarak %17 şeklinde gerçekleşmiştir. O₂ emisyonunda 250 W motor yüklemesinden 1000 W motor yüklemesine çıkıldığında N1-10%, N1-20%, N2-10% ve N2-20% yakıt türlerinde yaşanan düşüş sırası ile, %26, %32, %27, %33 şeklinde gerçekleşmiştir.

N1 ve N2 yakıt türlerinde en düşük O₂ değerleri N2-20% karışımında elde edilmiştir. N2-20% yakıtının sahip olduğu O₂ emisyonu dizel yakıtın O₂ emisyonundan yaklaşık olarak %8,42 daha düşüktür. En yüksek O₂ emisyonu ise N2-30% yakıt türünde elde edilmiştir. N2-30% yakıtının sahip olduğu O₂ emisyonu ise dizel yakıtın O₂ emisyonundan yaklaşık olarak %35 daha düşük gerçekleşmiştir.



Şekil 5. 6. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait O₂ emisyon değerleri.

5.2.5. İs Emisyon Değerleri

Standart dizel yakıtla karışım sonucu oluşan N1 ve N2 yakıtlarının farklı karışım oranlarında ve farklı motor yüklerinde oluşan İs emisyon değerleri Şekil 5.7'de gösterilmektedir. İs emisyonları, H/Y oranının azalmasına bağlı olarak artış göstermektedir.

Motor yükündeki artış ile silindir içine püskürtülen yakıtın miktarı da artmaktadır. Yakıt miktarının artmasıyla, hava/yakıt oranı değişmekte ve bu değişim is emisyon miktarını yükselmesine neden olmaktadır[60]. Kısaca is emisyonu motor yükü ile doğru orantılı bir şekilde artış göstermiştir.

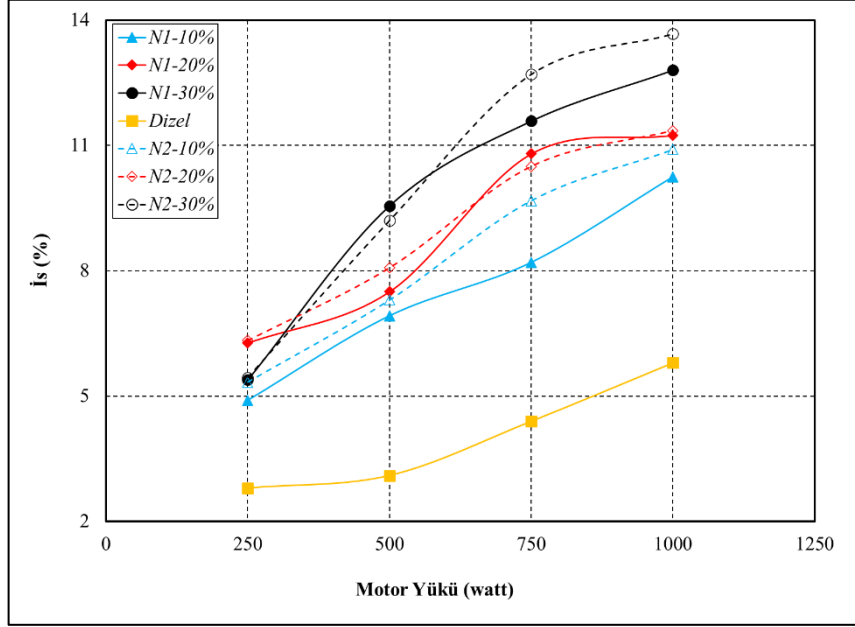
N1 ve N2 yakıt türlerinin her bir karışım oranı için is emisyon değerleri, dizel yakıtın is emisyon değerinden yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. İs emisyon değerleri, N2-10%, N2-20% ve N2-30% yakıtlarında N1-10%, N1-20% ve N1-30% yakıtlarından daha yüksek değerlerde gerçekleşmiştir. En yüksek is emisyon değerine ise N2-30% yakıtında ulaşılmıştır.

Yakıtların motorlarda yakılmaları sonucunda is emisyon değerlerinin yüksek seviyelerde gerçekleşmesine neden olan parametreler setan sayısı ve kükürt parametresindeki yüksek değerlerdir.

Çizelge 4.2 incelendiğinde N1 ve N2 yakıt türlerine ait setan sayısının yüksek olmadığı görülmektedir. Kükürt parametresi incelendiğinde ise N1 ve N2 yakıt türlerinin kükürt değerleri dizel yakıtın kükürt değerine oranla yaklaşık olarak 2 kat yüksektir.

Setan sayısının çok düşük olması da bazı sorunlara yol açabilmektedir. Yakıtın setan sayısı düşük olduğunda motorun tutuşma gecikmesi uzayarak yanma sürecindeki basıncın artış hızının yüksek olmasına neden olmaktadır. Bu durum soğuk havalarda çalıştırılan motorun ilk çalışma anında zorlanmaya, yanma gürültüsünde artışa ve emisyon parametrelerinde olumsuzluklara yol açabilmektedir [55].

Sonuç olarak N1 ve N2 türündeki yakıtların is emisyon değerlerinin dizel yakıtın is emisyon değerlerinden yüksek olmasının nedeni, N1 ve N2 yakıtlarına ait kükürt değerlerinin yüksek olmasıdır.



Şekil 5. 7. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait Is emisyon değerleri.

5.2.5. NO_x Emisyon Değerleri

Standart dizel yakıtla karışım sonucu oluşan N1 ve N2 yakıtlarının farklı karışım oranlarında ve farklı motor yüklerinde oluşan NO_x emisyon değerleri Şekil 5.8'de gösterilmektedir.

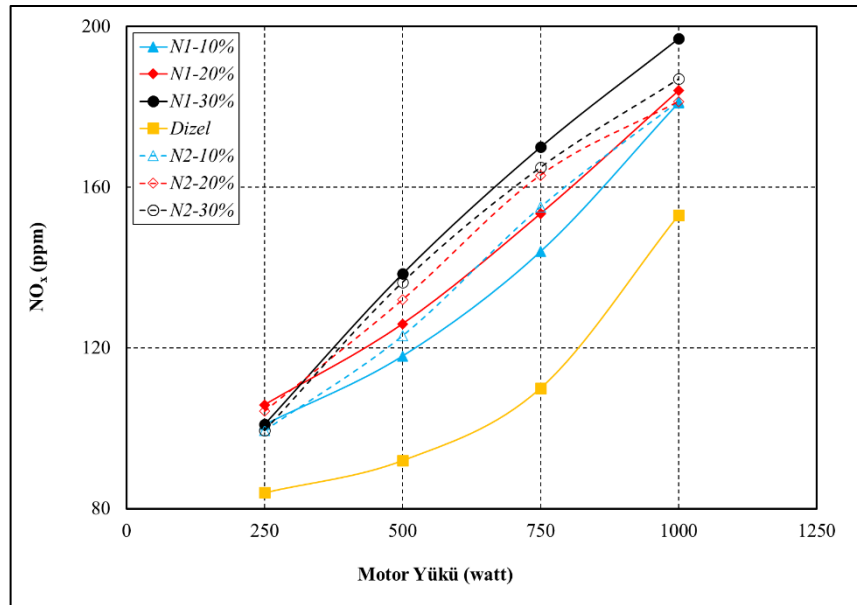
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda dizel, N1 ve N2 yakıt türlerinde motora uygulanan yük miktarı arttıkça NO_x emisyon değerlerinde artış yaşanmıştır. NO_x sıcaklığa bağlı olarak artış gösteren bir emisyon türü olduğu için silindir içi sıcaklık arttıkça NO_x emisyon değerleri artmaktadır. Silindir içi sıcaklık yakıt özelliği ve motor yükündeki artışa bağlı olarak artmaktadır [61]. NO_x emisyon değerlerindeki artışın motor yüklerinin artması ile paralel bir seyir izlemesi bu bilgiyi doğrulamaktadır.

N1 ve N2 yakıt türlerinin NO_x emisyon değerleri dizel yakıtın NO_x emisyon değerleri ile karşılaştırıldığında N1 ve N2 yakıt türlerinin NO_x emisyon değerlerinin daha

yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Yakıt özelliklerine bakıldığında kullanılan biyodizel yakıtların yoğunluğunun dizel yakıta kıyasla yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle, dizele farklı oranlarda biyodizel yakıt katılması ile elde edilen biyodizel karışımlarının yoğunlukları saf dizel yakıta göre daha yüksek değerlere sahiptir. Yakıt yoğunluğundaki artış yanma odasındaki yakıt miktarında artışa neden olduğundan bölgesel sıcaklık değerlerini yükseltmektedir. Bu nedenle biyodizel içerikli yakıtlar ile elde edilen NO_x emisyonları artış göstermiştir. Bu artış, artan biyodizel oranı ile daha da yükselmiştir [62].

N1 ve N2 yakıt türleri karşılaştırıldığında N2-10% ve N2-20% yakıt türlerinin NO_x emisyon değerleri, N1-10% ve N1-20% yakıt türlerinin NO_x emisyon değerlerinden daha yüksek değerlerde gerçekleşmiştir. Buna karşın N1-30% türündeki yakıtın NO_x emisyon değerleri, N2-30% yakıt türünün NO_x emisyon değerlerinden daha yüksek değerlere sahip olmuştur.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda N1 ve N2 yakıt türlerinde en az NO_x değerine 250 W motor yükünde N1-10% yakıt türünde ulaşılmıştır. En yüksek NO_x değerlerine ise 1000 W motor yükünde N1-30% yakıt türünde ulaşılmıştır.



Şekil 5. 8. Dizel yakıt, N1 ve N2 yakıt karışım türlerine ait NO_x emisyon değerleri.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada, farklı türden atıklar (ceviz kabuğu, fındık kabuğu ve plastik şişeler), atık türlerinin oranları farklı olacak şekilde iki atık numunesi (1. Numune ve 2. Numune) hazırlanmıştır. Hazırlanan bu atık numuneleri mikrodalga destekli piroliz sisteminde 750 W çalışma gücünde 30 dakika bekleme süresinde işleme alınmıştır. Mikrodalga destekli piroliz işlemi sonucunda oluşan pirolitik yağların, filtrasyon ve distilasyon işlemlerine tabi tutularak kalitesi arttırılmaya çalışılmıştır. İyileştirme işlemleri sonrasında elde edilen biyodizel yakıtlar (N1 ve N2 yakıtları), standart dizel yakıt ile %10, %20 ve %30 oranlarında karıştırılmıştır. Daha sonra oluşan biyodizel yakıtlar tek silindirli düşük güçlü dizel motorda, farklı motor yüklerinde (250, 500, 750 ve 1000 W) kullanılmıştır. Motorda kullanılan yakıtların farklı yüklerde motor performansı ve egzoz emisyon değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre:

1. Üretilen biyoyağın maliyet analizi ile standart dizel yakıtın maliyet analiz sonuçları karşılaştırıldığında 1 L biyoyağ üretim maliyetinin 1 L standart dizel yakıt üretim maliyetinden daha düşük olduğu görülmüştür.
2. ÖYT değerleri incelendiğinde, N1 ve N2 yakıt türlerine ait ÖYT değerlerinin dizel yakıtın ÖYT değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Kullanılan biyodizel yakıtların alt ısıl değerinin dizel yakıtı göre düşük olmasından dolayı bu durum ortaya çıkmıştır.
3. HC, CO, CO₂ ve O₂ değerleri incelendiğinde N1 ve N2 yakıtlarında, dizel yakıtı oranla, homojen yakıt karışımı elde edilemediğinden tam yanma oranının düşük kalması nedeniyle eksik yanmanın gerçekleştiği görülmüştür.

4. Ayrıca, N1 ve N2 yakıt türlerine ait kinematik viskozite değerleri incelendiğinde, kinematik viskozite değerlerinin dizele göre yüksek olması püskürtme problemlerine sebep olduğundan yanma verimini olumsuz etkilediği düşünülmektedir.
5. Eksik yanma gerçekleşmesinde büyük bir paya sahip olan homojen karışım sorunundan sonra gelen O₂ eksikliğinin giderilerek tam yanmanın daha verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamak amacı ile N1 ve N2 yakıt türlerine katkı maddeleri eklenerek O₂ miktarı artırılabilir. Bu sayede eksik yanmanın önüne geçilerek HC, CO emisyon değerlerini düşürmek mümkündür. Araştırmacıların bu konuya odaklanmaları gerekmektedir.
6. Eksik yanma sorunun çözülerek emisyon değerlerinin iyileştirilmesi için bir diğer yöntem olarak biyodizel yakıt içerisindeki kinematik viskozite oranı düşürülmeye çalışılabilir. Bu sayede eksik yanmanın sebep olduğu emisyon değerleri iyileştirilebilir. Kinematik viskozite parametresinin düşürülmesi için gerekli yöntemler hakkında bilimsel araştırmalar yapılmalıdır.
7. N1 ve N2 yakıt türlerinde homojen bir dağılımın olmaması enjektör tıkanmalarına ve eksik yanmanın oluşmasına neden olmuştur. Piroliz sonucu üretilen biyoyakıtın iyileştirilme adımları genişletilmelidir. Bu çalışmanın bir sonraki adımında pirolitik yağın daha verimli bir şekilde iyileştirilmesini sağlayacak yöntemler için araştırmalar yapılması yer almalıdır.

KAYNAKLAR

1. A. Demirbas, "Pyrolysis mechanisms of biomass materials," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 31, no. 13, pp. 1186–1193, (2009).
2. Basu, P., "Pyrolysis and torrefaction", *Biomass Gasification and Pyrolysis, Academic Press*, Boston, 65–96 (2010).
3. M. Melzer, J. Blin, A. Bensakhria, J. Valette, and F. Broust, "Pyrolysis of extractive rich agroindustrial residues," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 104, pp. 448–460, (2013).
4. B. Zhao *et al.*, "Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar," *J. Clean. Prod.*, vol. 174, pp. 977–987, (2018).
5. S. Yaman, "Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks," *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 5, pp. 651–671, (2004).
6. Keleş, S., "Hızlı piroliz yöntemi ile fındık kupulasının katalitik pirolizi ve sıvı ürünlerin karakterizasyonu", *Karadeniz Teknik Üniversitesi*, 27-32 (2011).
7. A. V. Bridgwater, "Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass," *Chem. Eng. J.*, vol. 91, no. 2–3, pp. 87–102, (2003).
8. A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading," *Biomass and Bioenergy*, vol. 38, pp. 68–94, (2012).
9. Q. Zhang, J. Chang, T. Wang, and Y. Xu, "Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 1, pp. 87–92, (2007).
10. A. V. Bridgwater and G. V. C. Peacocke, "Fast pyrolysis processes for biomass," *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–73, (2000).
11. M. Balat, M. Balat, E. Kirtay, and H. Balat, "Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 12, pp. 3147–3157, (2009).
12. A. V. Bridgwater, "Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 51, no. 1, pp. 3–22, (1999).
13. T. Kan, V. Strezov, and T. J. Evans, "Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1126–1140, (2016).

14. B. Scholze and D. Meier, "Characterization of the water-insoluble fraction from pyrolysis oil (pyrolytic lignin). Part I. PY-GC/MS, FTIR, and functional groups," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 60, no. 1, pp. 41–54, (2001).
15. Z. Luo, S. Wang, Y. Liao, J. Zhou, Y. Gu, and K. Cen, "Research on biomass fast pyrolysis for liquid fuel," *Biomass and Bioenergy*, vol. 26, no. 5, pp. 455–462, (2004).
16. M. E. Boucher, A. Chaala, and C. Roy, "Bio-oils obtained by vacuum pyrolysis of softwood bark as a liquid fuel for gas turbines. Part I: Properties of bio-oil and its blends with methanol and a pyrolytic aqueous phase," *Biomass and Bioenergy*, vol. 19, no. 5, pp. 337–350, (2000).
17. M. Ahmad *et al.*, "Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review," *Chemosphere*, vol. 99, pp. 19–33, (2014).
18. V. Strezov, T. J. Evans, and C. Hayman, "Thermal conversion of elephant grass (*Pennisetum Purpureum* Schum) to bio-gas, bio-oil and charcoal," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 17, pp. 8394–8399, (2008).
19. J. lu Zheng, X. feng Zhu, Q. xiang Guo, and Q. shi Zhu, "Thermal conversion of rice husks and sawdust to liquid fuel," *Waste Manag.*, vol. 26, no. 12, pp. 1430–1435, (2006).
20. A. K. Hossain and P. A. Davies, "Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 165–189, (2013).
21. H. Chen, G. J. Andries. Z, Luo, "Biomass pyrolysis gasification for product gas production parameter effects," *Pergamon*, vol. 44, pp. 1875–1884, (2003).
22. M. Tripathi, J. N. Sahu, and P. Ganesan, "Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 467–481, (2016).
23. M. Carrier, A. G. Hardie, Ü. Uras, J. Görgens, and J. Knoetze, "Production of char from vacuum pyrolysis of South-African sugar cane bagasse and its characterization as activated carbon and biochar," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 96, pp. 24–32, (2012).
24. A. Demirbas, "Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 72, no. 2, pp. 243–248, (2004).
25. T. Mani, P. Murugan, J. Abedi, and N. Mahinpey, "Pyrolysis of wheat straw in a thermogravimetric analyzer: Effect of particle size and heating rate on devolatilization and estimation of global kinetics," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 88, no. 8, pp. 952–958, (2010).

26. T. Aysu and M. M. Küçük, "Biomass pyrolysis in a fixed-bed reactor: Effects of pyrolysis parameters on product yields and characterization of products," *Energy*, vol. 64, pp. 1002–1025, (2014).
27. T. J. Appleton, R. I. Colder, S. W. Kingman, I. S. Lowndes, and A. G. Read, "Microwave technology for energy-efficient processing of waste," *Appl. Energy*, vol. 81, no. 1, pp. 85–113, (2005).
28. D. A. Jones, T. P. Lelyveld, S. D. Mavrofidis, S. W. Kingman, and N. J. Miles, "Microwave heating applications in environmental engineering - A review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 34, no. 2, pp. 75–90, (2002).
29. W. Vorster, N. A. Rowson, and S. W. Kingman, "The effect of microwave radiation upon the processing of Neves Corvo copper ore," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 63, no. 1, pp. 29–44, (2001).
30. K. E. Haque, "Microwave energy for mineral treatment processes - A brief review," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 57, no. 1, pp. 1–24, (1999).
31. P. Rex, I. P. Masilamani, and L. R. Miranda, "Microwave pyrolysis of polystyrene and polypropylene mixtures using different activated carbon from biomass," *J. Energy Inst.*, vol. 93, no. 5, pp. 1819–1832, (2020).
32. J. A. Menéndez, M. Inguanzo, and J. J. Pis, "Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge," *Water Res.*, vol. 36, no. 13, pp. 3261–3264, (2002).
33. A. Domínguez, J. A. Menéndez, M. Inguanzo, and J. J. Pis, "Investigations into the characteristics of oils produced from microwave pyrolysis of sewage sludge," *Fuel Process. Technol.*, vol. 86, no. 9, pp. 1007–1020, (2005).
34. D. Beneroso, J. M. Bermúdez, A. Arenillas, and J. A. Menéndez, "Microwave pyrolysis of microalgae for high syngas production," *Bioresour. Technol.*, vol. 144, pp. 240–246, (2013).
35. K. Azizi, M. Keshavarz Moraveji, and H. Abedini Najafabadi, "A review on bio-fuel production from microalgal biomass by using pyrolysis method," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. September 2017, pp. 3046–3059, (2018).
36. N. Wang, A. Tahmasebi, J. Yu, J. Xu, F. Huang, and A. Mamaeva, "A Comparative study of microwave-induced pyrolysis of lignocellulosic and algal biomass," *Bioresour. Technol.*, vol. 190, pp. 89–96, (2015).
37. F. Motasemi and M. T. Afzal, "A review on the microwave-assisted pyrolysis technique," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, pp. 317–330, (2013).
38. E. T. Kostas *et al.*, "Microwave pyrolysis of olive pomace for bio-oil and bio-char production," *Chem. Eng. J.*, vol. 387, no. November 2019, p. 123404, (2020).
39. S. Mutsengerere, C. H. Chihobo, D. Musademba, and I. Nhapi, "A review of

- operating parameters affecting bio-oil yield in microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 104, no. January, pp. 328–336, (2019).
40. N. Ferrera-Lorenzo, E. Fuente, J. M. Bermúdez, I. Suárez-Ruiz, and B. Ruiz, “Conventional and microwave pyrolysis of a macroalgae waste from the Agar-Agar industry. Prospects for bio-fuel production,” *Bioresour. Technol.*, vol. 151, pp. 199–206, (2014).
 41. C. Yin, “Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production,” *Bioresour. Technol.*, vol. 120, pp. 273–284, (2012).
 42. T. Sun *et al.*, “Fast corn stalk pyrolysis and the influence of catalysts on product distribution,” *Bioresour. Technol.*, vol. 301, no. January, p. 122739, (2020).
 43. X. Chen *et al.*, “Catalytic fast pyrolysis of cellulose to produce furan compounds with SAPO type catalysts,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 129, no. December 2017, pp. 53–60, (2018).
 44. Q. Lu, X. C. Yang, C. Q. Dong, Z. F. Zhang, X. M. Zhang, and X. F. Zhu, “Influence of pyrolysis temperature and time on the cellulose fast pyrolysis products: Analytical Py-GC/MS study,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 92, no. 2, pp. 430–438, (2011).
 45. N. Miskolczi, A. Angyal, L. Bartha, and I. Valkai, “Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 7–8, pp. 1032–1040, (2009).
 46. J. L. Klinger *et al.*, “Effect of biomass type, heating rate, and sample size on microwave-enhanced fast pyrolysis product yields and qualities,” *Appl. Energy*, vol. 228, no. February, pp. 535–545, (2018).
 47. F. C. Borges *et al.*, “Fast microwave assisted pyrolysis of biomass using microwave absorbent,” *Bioresour. Technol.*, vol. 156, pp. 267–274, (2014).
 48. G. R. Mong, C. T. Chong, J. H. Ng, W. W. F. Chong, H. C. Ong, and M. V. Tran, “Multivariate optimisation study and life cycle assessment of microwave-induced pyrolysis of horse manure for waste valorisation and management,” *Energy*, vol. 216, no. x, p. 119194, (2021).
 49. S. S. Lam, R. K. Liew, A. Jusoh, C. T. Chong, F. N. Ani, and H. A. Chase, “Progress in waste oil to sustainable energy, with emphasis on pyrolysis techniques,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 741–753, (2016).
 50. S. S. Lam, A. D. Russell, and H. A. Chase, “Microwave pyrolysis, a novel process for recycling waste automotive engine oil,” *Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 2985–2991, (2010).
 51. S. S. Lam, A. D. Russell, C. L. Lee, and H. A. Chase, “Microwave-heated pyrolysis

- of waste automotive engine oil: Influence of operation parameters on the yield, composition, and fuel properties of pyrolysis oil,” *Fuel*, vol. 92, no. 1, pp. 327–339, (2012).
52. İnternet: Yelisan Group, “Kabuk Maliyet Analizleri”, <https://www.organikyakit.com/genel/kabugun-diger-yakitlarla-kiyaslanmasi> (2021).
53. İnternet: Guncel Fiyatlari.com, “Hurda Fiyatları”, https://www.guncelfiyatlari.com/hurda-fiyatlari/#Hurda_Plastik_Fiyatlari (2021).
54. İnternet: Türkiye Petrolleri A.O., “Akaryakıt Fiyatları”, <https://www.tppd.com> (2021).
55. Uslu, S., “Düşük güçlü bir dizel motorda dietil eter kullanılması motor parametrelerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 53-54 (2015).
56. D. Damodharan, A. P. Sathiyagnanam, D. Rana, B. R. Kumar, and S. Saravanan, “Combined influence of injection timing and EGR on combustion, performance and emissions of DI diesel engine fueled with neat waste plastic oil,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 161, no. February, pp. 294–305, (2018).
57. M. Krishnamoorthi and R. Malayalamurthi, “The influence of charge air temperature and exhaust gas recirculation on the availability analysis, performance and emission behavior of diesel - bael oil - diethyl ether blend operated diesel engine,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 1835–1847, (2018).
58. P. Mohamed Shameer, K. Ramesh, R. Sakthivel, and R. Purnachandran, “Effects of fuel injection parameters on emission characteristics of diesel engines operating on various biodiesel: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, no. 3, pp. 1267–1281, (2017).
59. S. Uslu and M. B. Celik, “Prediction of engine emissions and performance with artificial neural networks in a single cylinder diesel engine using diethyl ether,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 21, no. 6, pp. 1194–1201, (2018).
60. S. Lahane and K. A. Subramanian, “Impact of nozzle holes configuration on fuel spray, wall impingement and NOx emission of a diesel engine for biodiesel-diesel blend (B20),” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 64, no. 1–2, pp. 307–314, (2014).
61. S. Dhingra, G. Bhushan, and K. K. Dubey, “Multi-objective optimization of combustion, performance and emission parameters in a jatropa biodiesel engine using Non-dominated sorting genetic algorithm-II,” *Front. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 81–94, (2014).
62. M. Krishnamoorthi, R. Malayalamurthi, and R. Sakthivel, “Optimization of compression ignition engine fueled with diesel - chaulmoogra oil - diethyl ether

blend with engine parameters and exhaust gas recirculation,” *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 579–602, (2019).

ÖZGEÇMİŞ

Ünal ERASLAN, ilk ve orta öğrenimini Karabük'te tamamladı. 2015 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2019 yılında bölüm birincisi olarak mezun oldu. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başlamıştır.