

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HIZLI PİROLİZ YÖNTEMİ İLE ORMAN ATIKLARININ PİROLİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Ömer KAYGUSUZ
ORCID : 0000-0002-2933-160X
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.10.2020

Enstitü Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mükrimin Şevket GÜNEY
ORCID : 0000-0002-7481-5072

**Ağustos 2020
GİRESUN**

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HIZLI PİROLİZ YÖNTEMİ İLE ORMAN ATIKLARININ PİROLİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer KAYGUSUZ

Enstitü Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Bu tez 21/09/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr.
Mükrimin Şevket GÜNEY
Jüri Başkanı**

**Doç. Dr.
Osman Akın KUTLAR
Üye**

**Dr. Öğr. Üyesi
Selçuk ATASOY
Üye**

**Doç. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ömer KAYGUSUZ

29/08/2020

TEŞEKKÜR

Günümüzde enerji ihtiyacının temininde tercih edilen yakıtlar büyük oranda fosil kökenli olanlardır. Oysa bu yakıtlar çevreye zarar verdikleri gibi ekonomik ömürleri de sınırlıdır. Buna karşın yenilenebilir enerji kaynakları, çevreye uyumlu ve sınırsız ekonomik ömüre sahip olduklarından fosil kaynaklara alternatif oluşturmaktadırlar. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde önemli bir potansiyel teşkil eden biyokütle, çevre dostu bir enerji kaynağı olmasından dolayı gittikçe önemi artan enerji kaynakları arasında yerini almıştır. Biyokütlenin, enerji kaynağı olma dışında gıda, inşaat ve mobilya sektöründe kullanımı, atmosferin karbondioksit dengesini sağlama, toprak erozyonunu önleme ve güneşin zararlı ışınlarından koruma gibi pek çok faydası vardır. Bu çalışmanın amacı bölgemizde bolca bulunan biyokütle kaynaklarından hızlı piroliz yöntemi ile elde edilen sıvı, katı ve gaz ürünlere sıcaklık, ısıtma hızı ve sürükleyici indirgen gaz hızı parametrelerinin etkisini incelemek, ayrıca hammaddesine nazaran enerji yoğunluğu fazla ve verimi yüksek sıvı ürün elde etmektir.

Hızlı piroliz yöntemi ile orman atıklarının pirolizi başlıklı bu çalışma, Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek Lisans Tez danışmanlığımı kabul eden, ilgi ve önerileriyle çalışmamda büyük katkıları olan değerli Hocam Prof. Dr. Mükrimin Şevket GÜNEY'e, çalıştığım alandaki engin bilgi ve tecrübesinden yararlandığım değerli Hocam Dr. Turgay KAR'a ve deneysel çalışmalarında laboratuvar imkanlarını kullanabilmemde yardımlarını esirgemeyen Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. Sevil Savaşkan YILMAZ'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Yaşamım süresince bana vermiş olduğu maddi ve manevi desteklerinden ötürü başta çok değeri bilim insanı sevgili babam Prof. Dr. Kâmil KAYGUSUZ'a ve aileme en içten duygularıyla minnettarım.



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER	III
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ÖZET.....	XI
SUMMARY	XII
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. Enerji ve İş	3
1.2. Dünyada ve Türkiye’de Enerji İhtiyacı.....	3
1.2.1 Dünyada enerji ihtiyacı	3
1.2.2. Türkiye’de enerji arz ve talebi	6
1.2.2.1 Birincil enerji arzının kaynaklara göre dağılımı	6
1.2.3. Türkiye birincil enerji üretimi.....	7
1.3. Yenilenebilir Enerji Kaynağı Olarak Biyokütle.....	9
1.3.1. Türkiye biyokütle enerjisi potansiyeli.....	11
1.3.2. Dünyada ve türkiyede biyokütle enerjisi kullanımı	12
1.3.2.1. Biyokütle enerjisinin toplam enerji arzı içindeki yeri.....	12
1.3.2.2. Biyokütlenin yenilebilir enerji kaynakları içindeki yeri	13
1.4. Biyokütle Enerjisi ve Faydaları.....	15
1.4.1. Biyokütle ve biyokütleden elde edilen ürünler	17
1.4.2. Biyokütle ürünleri ve endüstriyel kullanımı	20
1.4.2.1. Kimyasal endüstriler	21
1.4.2.2. Enerji endüstrileri.....	21
1.4.2.3. Taşıma endüstrileri.....	22

1.4.2.4. Çevre endüstrileri.....	23
1.5. Biyokütle Dönüşümü	23
1.5.1. Biyokimyasal dönüşüm.....	24
1.5.2. Termokimyasal dönüşüm	26
1.5.2.1. Yanma	28
1.5.2.2. Piroliz	29
1.5.2.3. Kavurma (Torrefaksiyon).....	30
1.5.2.4. Gazlaştırma	30
1.5.2.5. Sıvılaştırma	32
1.6. Biyokütle Dönüşümünün Faydaları	32
1.6.1. Yenilenebilir (sürekli tekrarlanabilir) olma faydası	33
1.6.2. Çevresel faydalar.....	34
1.7. Pirolizin Tanımı ve Kimyasal Mekanizması.....	35
1.7.1. Biyokütle pirolizinin tarihçesi.....	36
1.7.2. Biyokütlenin pirolizi	37
1.7.3. Piroliz ürünleri	39
1.7.3.1. Sıvı	39
1.7.3.2. Katı.....	40
1.7.3.3. Gaz	40
1.7.4. Piroliz çeşitleri.....	41
1.7.4.1. Yavaş piroliz	42
1.7.4.2. Hızlı Piroliz	43
1.7.4.3. Flaş (Ani) piroliz	43
1.7.4.4. Ultra hızlı piroliz.....	44
1.7.4.5. Bir ortamın varlığında piroliz.....	44
1.8. Piroliz Ürün Verimine Etki Eden Etmenler	45
1.8.1. Biyokütle bileşiminin etkisi	45
1.8.2. Piroliz sıcaklığının etkisi.....	46
1.8.3. Isıtma hızının etkisi	47
1.8.4. Parçacık boyutunun etkisi	48
1.8.5. Sürükleyici gaz akış hızının etkisi.....	48

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	49
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	54
3.1. Deneysel Çalışmalar İçin Kullanılan Hammaddeler.....	54
3.2. Hammadde Olarak Kullanılan Biyokütle Örneklerinin Hazırlanması.....	55
3.3. Biyokütle Örneklerine Uygulanan Kısa Analizler.....	55
3.3.1. Nem tayini.....	56
3.3.2. Uçucu madde tayini.....	56
3.3.3. Kül miktarı tayini.....	57
3.3.4. Sabit karbon miktarı tayini.....	57
3.3.5. Hammadde karışımı ve biyo-yagın ısı değeri.....	58
3.4. Biyokütle Karışımının Pirolizi.....	58
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	62
4.1. Biyokütle Örneklerine Uygulanan Kısa Analiz Sonuçları.....	62
4.2. Hızlı Pirolizden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar.....	63
4.3. Piroliz Ürün Verimlerine Sıcaklığın Etkisi.....	67
4.4. Piroliz Ürün Verimlerine Isıtma Hızının Etkisi.....	71
4.5. Piroliz Ürün Verimlerine Azot Akış Debisinin Etkisi.....	74
BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	80
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

BEPA	: Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası
cal/g	: kalori / gram
CBS	: Coğrafik Bilgi Sistemi
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FAO	: Dünya Gıda ve Tarım Kuruluşu
GHG	: Greenhouse Gases (Sera Gazları)
Ha	: Hektar
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IPCC	: Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
LHV	: Alt Isıl Değer
L	: Litre
MJ / kg	: Megajul / kilogram
mA	: Mili amper
MPa	: Megapaskal
MTEP	: Milyon Ton Eşdeğer Petrol
NO _x	: Azot oksit
TEP	: Ton Eşdeğer petrol

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 2018 Yılı Dünya Birincil Enerji Arzında Kaynakların Payı (IEA, 2019; Yılmaz, 2020).....	4
Şekil 1.2 2018 Yılı Türkiye Birincil Enerji Arzında Kaynakların Miktar ve Payları (ETKB, 2020).....	6
Şekil 1.3. Biyokütle Enerjisi Dönüşüm Yöntemleri (Acaroğlu, 2007).	10
Şekil 1.4. Türkiye’de İllere Göre Biyokütle Potansiyelinin Dağılımı (ETKB, 2020).	11
Şekil 1.5. Fotosentez ve biyokütlenin büyümesi (Acaroğlu, 2007)	17
Şekil 1.6. Biyokütlenin sıvı ve gaz yakıtlar ile kimyasallara dönüştürülme yöntemleri (Acaroğlu, 2007).....	24
Şekil 1.7. Şeker ve selülozik biyokütleden etanol üretmek için biyokimyasal iki yöntem: (A) Şeker ve mısırdan etanol eldesi, (B) Selülozik biyokütleden etanol eldesi.(Basu, 2018).....	26
Şekil 1.8. Enerji, gaz ve etanol üretimi için termokimyasal işlem.(Basu, 2018)	27
Şekil 1.9. Piroliz sırasında büyük hidrokarbon moleküllerinin daha küçük parçalara ayrışması (Basu, 2018).	36
Şekil 1.10. Odunun yavaş piroliziyle kömür üretimi için kovanlı fırın (Basu, 2018).	37
Şekil 1.11. Biyokütle parçacığında piroliz işlemi (Basu, 2018).....	38
Şekil 1.12. Basit bir piroliz prosesinin şeması (Basu, 2018)	38
Şekil 1.13. (A) Kabarcıklı akışkan yataklı piroliz; (B) Dolaşımli akışkan yataklı piroliz cihazı (Basu, 2018)	43
Şekil 3.1. Sabit yataklı borusal reaktör	58
Şekil 4.1. Biyokütle karışımının pirolizinde 50 cm ³ /dk azot akış debisi ve 100°C/dk ısıtma hızında ürün verimliliği üzerine piroliz sıcaklığının etkisi	68
Şekil 4.2. Biyokütle karışımının pirolizinde 50 cm ³ /dk azot akış debisi ve 250°C/dk ısıtma hızında ürün verimliliği üzerine piroliz sıcaklığının etkisi	68
Şekil 4.3. Biyokütle karışımının pirolizinde 50 cm ³ /dk azot akış debisi ve 400°C/dk ısıtma hızında ürün verimliliği üzerine piroliz sıcaklığının etkisi	69
Şekil 4.4. Biyokütle karışımının pirolizinde 50 cm ³ /dk azot akış debisi ve 600°C/dk ısıtma hızında ürün verimliliği üzerine piroliz sıcaklığının etkisi	69

Şekil 4.5. 50 cm ³ /dk sabit azot akış debisinde biyokütle karışımlarının pirolizinde farklı sıcaklıklardaki piroliz dönüşümü üzerine ısıtma hızının etkisi.....	71
Şekil 4.6. 50 cm ³ /dk sabit azot akış debisinde biyokütle karışımlarının pirolizinde farklı sıcaklıklardaki sıvı ürün verimi üzerine ısıtma hızının etkisi	72
Şekil 4.7. 50 cm ³ /dk sabit azot akış debisinde biyokütle karışımlarının pirolizinde farklı sıcaklıklardaki katı ürün verimi üzerine ısıtma hızının etkisi	72
Şekil 4.8. 50 cm ³ /dk sabit azot akış debisinde biyokütle karışımlarının pirolizinde farklı sıcaklıklardaki gaz ürün verimi üzerine ısıtma hızının etkisi.....	73
Şekil 4.9. 300°C sıcaklık ve 100°C/dk ısıtma hızında azot akış debisinin ürün verimleri üzerine etkisi.....	75
Şekil 4.10. 400°C sıcaklık ve 100°C/dk ısıtma hızında azot akış debisinin ürün verimleri üzerine etkisi	75
Şekil 4.11. 500°C sıcaklık ve 100°C/dk ısıtma hızında azot akış debisinin ürün verimleri üzerine etkisi	76
Şekil 4.12. 600°C sıcaklık ve 100°C/dk ısıtma hızında azot akış debisinin ürün verimleri üzerine etkisi	76
Şekil 4.13. 750°C sıcaklık ve 100°C/dk ısıtma hızında azot akış debisinin ürün verimleri üzerine etkisi	77

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Dünya Enerji Talebi (MTEP) (IEA, 2019 ve Yılmaz, 2020).....	4
Tablo 1.2. Bölgelere ve belirlenen senaryolara göre dünya birincil enerji talebi (IEA, 2019)	5
Tablo 1.3. Türkiye Birincil Enerji Talebi İçinde Kaynakların Miktarı (Bin TEP) ve Yüzdeleri (%) (ETKB, 2020).....	7
Tablo 1.4. Türkiye toplam enerji talebi, üretimi, ithalat ve ihracatı (MTEP) (ETKB, 2020).....	7
Tablo 1.5. Türkiye'nin Toplam İthalatında Enerjinin Payı (ETKB, 2020).....	9
Tablo 1.6. Türkiye'nin BEPA verilerine göre tahmini biyokütle enerji potansiyeli (2020) (ETKB, 2020).	11
Tablo 1.7. Kaynak türlerine göre dünya birincil enerji talebi (MTEP) (IEA, 2019)	13
Tablo 1.8. Biyokütle kaynakları (Basu, 2018)	20
Tablo 1.9. Biyokütle için önemli bazı termokimyasal dönüşme yöntemlerinin karşılaştırılması (Basu, 2018).....	27
Tablo 1.10. Bazı Yakıtların Isıtma Değerlerinin Karşılaştırılması (Basu, 2018).....	41
Tablo 1.11. Bazı Termal Ayrışma İşlemlerinin Özellikleri (Basu, 2018).....	42
Tablo 4.1. Biyokütle karışımına uygulanan kısa analiz sonuçları	62
Tablo 4.2. Biyokütle karışımının pirolizinde 300°C sıcaklık ve 50 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	63
Tablo 4.3. Biyokütle karışımının pirolizinde 300°C sıcaklık ve 100 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	63
Tablo 4.4. Biyokütle karışımının pirolizinde 300°C sıcaklık ve 200 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	63
Tablo 4.5. Biyokütle karışımının pirolizinde 300°C sıcaklık ve 300 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	64
Tablo 4.6. Biyokütle karışımının pirolizinde 400°C sıcaklık ve 50 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	64
Tablo 4.7. Biyokütle karışımının pirolizinde 400°C sıcaklık ve 100 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	64

Tablo 4.8. Biyokütle karışımının pirolizinde 400°C sıcaklık ve 200 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	64
Tablo 4.9. Biyokütle karışımının pirolizinde 400°C sıcaklık ve 300 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	64
Tablo 4.10. Biyokütle karışımının pirolizinde 500°C sıcaklık ve 50 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	65
Tablo 4.11. Biyokütle karışımının pirolizinde 500°C sıcaklık ve 100 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	65
Tablo 4.12. Biyokütle karışımının pirolizinde 500°C sıcaklık ve 200 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	65
Tablo 4.13. Biyokütle karışımının pirolizinde 500°C sıcaklık ve 300 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	65
Tablo 4.14. Biyokütle karışımının pirolizinde 600°C sıcaklık ve 50 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	65
Tablo 4.15. Biyokütle karışımının pirolizinde 600°C sıcaklık ve 100 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	66
Tablo 4.16. Biyokütle karışımının pirolizinde 600°C sıcaklık ve 200 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	66
Tablo 4.17. Biyokütle karışımının pirolizinde 600°C sıcaklık ve 300 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	66
Tablo 4.18. Biyokütle karışımının pirolizinde 750°C sıcaklık ve 50 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	66
Tablo 4.19. Biyokütle karışımının pirolizinde 750°C sıcaklık ve 100 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	66
Tablo 4.20. Biyokütle karışımının pirolizinde 750°C sıcaklık ve 200 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	67
Tablo 4.21. Biyokütle karışımının pirolizinde 750°C sıcaklık ve 300 cm ³ /dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar	67

HIZLI PİROLİZ YÖNTEMİ İLE ORMAN ATIKLARININ PİROLİZİ

ÖZET

Biyokütleyle uygulanan hızlı piroliz işlemi ile elde edilen sıvı ürünler, kimyasal hammadde ve sıvı yakıt olarak kullanılabilir. Yapılan bu çalışmada biyokütle örneği olarak seçilen çay çalısı, ceviz kabuğu ve çam kozalağı örnekleri, Doğu Karadeniz Bölgesindeki Trabzon ve Rize illerinden temin edilerek kullanılmıştır. İlk olarak, bu biyokütle örnekleri öğütme ve eleme işlemleriyle deneysel çalışmada kullanılan 1.0 mm parçacık boyutlu hale getirilmiştir. Böylece 1.0 mm parçacık boyutuna getirilen biyokütle örnekleri 1:1:1 oranında karıştırılarak biyokütle karışımı elde edilmiştir. Elde edilen bu biyokütle karışımına, sabit yataklı piroliz reaktöründe hızlı piroliz işlemi uygulanmıştır. Biyokütle karışımına uygulanan hızlı piroliz yönteminin ürün verimleri üzerine; sıcaklık, ısıtma hızı ve azot akış debisinin etkileri incelenmiştir. Hızlı piroliz deneyleri 1.0 mm sabit parçacık boyutunda, 300, 400, 500, 600 ve 750°C sıcaklıklarda, 100, 250, 400 ve 600 °C/dk ısıtma hızlarında ve 50, 100, 200 ve 300 cm³/dk akış debilerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde en yüksek sıvı ürün verimi 500 °C piroliz sıcaklığı, 100 °C/dk ısıtma hızı ve 50 cm³/dk azot akış debisinde elde edilmiştir. En verimli şartlarda elde edilen sıvı ürüne nem, ısı değeri, sabit karbon, kül, ham kok ve uçucu madde tayini analizi yapılmıştır. Ayrıca hızlı pirolizle en verimli şartlarda elde edilen ham biyo-yagın ısı değeri, hammaddesine göre yaklaşık % 40 artmış ve 5900 cal/g olarak ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; hızlı piroliz deneylerinden elde edilen sıvı ürünün sıvı yakıt olarak kullanılabilme potansiyeli olduğu gibi, hızlı piroliz sıvılarında oldukça fazla kimyasal hammadde olduğundan kimyasal hammadde potansiyelinin değerlendirilmesi de farklı bir disiplinde araştırma konusu olabilecek niteliktedir.

Anahtar kelimeler: Biyokütle, Hızlı Piroliz, Biyokütle Sıvısı, Biyo-yag, Ürün verimi

PYROLYSIS OF FOREST RESIDUES BY USING FAST PYROLYSIS METHOD

SUMMARY

Liquid products obtained by the rapid pyrolysis process applied to biomass can be used as a chemical raw material and liquid fuel. In this study, the selected biomass samples of tea bush, walnut shell and pine cone were obtained from Trabzon and Rize provinces in the Eastern Black Sea Region. First, these biomass samples brought to a particle size of 1.0 mm by grinding and sieving processes for pyrolysis experiments. After that, the biomass samples has 1.0 mm particle size mixed in a weight ratio of 1:1:1 to obtain biomass sample mixture for pyrolysis experiments. Rapid pyrolysis conversion process applied to this biomass mixture in a fixed bed pyrolysis reactor. In the experimental studies, the effects of temperature, heating rate and nitrogen flow rate on the product yields obtained from the fast pyrolysis method were investigated. Fast pyrolysis experiments were carried out with a fixed particle size of 1.0 mm, pyrolysis temperatures of 300, 400, 500, 600 and 750 °C, heating rates of 100, 250, 400 and 600°C/min and flow rates of 50, 100, 200 and 300 cm³ / min. In the experiments, the highest liquid product yield obtained at 500°C pyrolysis temperature, 100°C/min heating rate and 50 cm³/min nitrogen flow rate. Moisture, calorific value, fixed carbon, ash amount, raw coke and volatile matter analysis were performed on the liquid product obtained under the most efficient conditions. From the result of the experimental studies, it was seen that the liquid product obtained from the rapid pyrolysis experiments can be used as a chemical substance and liquid fuel. Also, the calorific value of the crude bio-oil obtained from the fast pyrolysis under the most efficient conditions has increased by approximately 40% according to its raw material content and it is calorific value measured as 5900 cal/g. As a result of the present study; the liquid product obtained from the rapid pyrolysis has the potential to be used as liquid fuel and the chemical raw materials. But this study only include fuel potential of the bio-oil and the potential of the remainder bio-oil as a chemical materials should be investigated in other study.

Keywords: Biomass, Fast Pyrolysis, Biomass Liquid, Bio-oil, Product yield

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanoğlunun enerji kaynakları ile tanışması, kendisiyle birlikte çevresini tanımaya, anlamaya ve temel ihtiyaçlarını karşılamaya çalışmasıyla başlamıştır. Böylece ateşin bulunması ile ısı enerjisi başta olmak üzere çeşitli enerji kaynaklarından günümüze kadar yararlanılmıştır. Yel değirmenleri ve yelkenli gemiler gibi çeşitli araç ve gereçler, rüzgar gücüyle cisimlerin hareket etmesinden esinlenerek yapılmış ve kullanılmıştır. Diğer taraftan, sanayi devrimi ile birlikte enerji ihtiyacı daha da artmıştır. Artan bu ihtiyacı karşılamak için fosil yakıtların kimyasal enerjisinden faydalanılarak buharlı makinelerle geçilmiş ve böylece teknolojinin insanoğlunun faydası için kullanımı sağlanmıştır. Dolayısıyla enerji teknolojinin gelişmesinde daima başrol üstlenmiş ve her alanda kendini ön plana çıkarmıştır (TMMOB, 2020).

Enerji üretiminde hala önemli ağırlığa sahip olan petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil kaynakları ile insanoğlunun ilk defa tanışması petrol ile olmuştur. Anadolu'nun bir parçası olan Mezopotamya'da, petrol türevlerinden olan katran gemicilikte yalıtım maddesi ve inşaat alanında harç katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Tarih kayıtlarından anlaşıldığına göre, doğal gazın yaygın olarak kullanımına 1790 yılında İngiltere'de başlanmış ve doğal gazın kolay taşınması, işlenmesi ve depolanmasından dolayı kullanımı süratli bir şekilde artmıştır. Doğal gazın modern anlamda endüstriyel kullanımının ise 1815 yılında Batı Virginia'da gerçekleştiği belirtilmektedir (TMMOB, 2020). Diğer taraftan 18. yüzyılın ikinci yarısında yaygınlaşan kömür, gelişen sanayi ile bir endüstri haline gelmiş ve en etkili ekonomik güç olmuştur. Özellikle 1973 yılında yaşanan petrol krizinden sonra geliştirilen yeni yöntem ve tekniklerle, kömürün kullanımı günümüze kadar etkili ve yaygın bir biçimde devam etmiştir (Acaroğlu, 2013; IEA, 2018; Atakan, 2020).

Fosil kaynakların ülkemizdeki tarihsel gelişimine bakıldığında, kömürün ilk olarak 1829 yılında Zonguldak ilinde, petrolün ise 1945 tarihinde Batman İline bağlı Raman Dağı'nda çıkarıldığı bilinmektedir. Yürütülen çalışmalar sonucunda, 1975 yılında Mardin Çamurlu sahasında da doğal gaz bulunmuş ve bu gaz 1982 yılında Mardin Çimento fabrikasında kullanılmaya başlanmıştır (TMMO, 2020).

Artan nüfusa paralel olarak ortaya çıkan teknolojik gelişmeler ve enerji kullanan ürünlerin tüketiminin artması, yeni enerji kaynakları arayışını doğurmuştur. Diğer taraftan fosil kaynakların çevreyi kirletmesi ve ekonomik ömürlerinin sınırlı olmasından dolayı yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak da isimlendirilen alternatif enerji kaynakları aşağıdaki maddeler halinde sıralanabilir (Boyle, 2013; IEA, 2017):

- 1) Güneş Enerjisi
- 2) Rüzgâr Enerjisi
- 3) Jeotermal Enerji
- 4) Hidrolik Enerji
- 5) Deniz Enerjisi (Dalga, Akıntı, Gel-Git Enerjisi)
- 6) Biyokütle Enerjisi
- 7) Hidrojen Enerjisi

Günümüzde özellikle modern sanayi toplumlarında gerek ekonomik ve gerekse sosyal anlamda etkin rol oynayan enerji tüketiminin sera etkisi başta olmak üzere bir kısım çevresel sorunlara yol açması, yenilenebilir ve çevre dostu alternatif enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmıştır. Diğer taraftan ülkemizin cari açığında en önemli yere sahip olan enerji harcamaları ekonomik, teknolojik, sosyal ve kültürel gelişmelerde atılan adımların hızını yavaşlatmaktadır. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında, ülkemizde zengin potansiyele sahip yenilenebilir ve yerli enerji kaynaklarımızdan en üst düzeyde yararlanmanın önemi ortadadır (TMMO, 2020).

1.1. Enerji ve İş

Enerji, genelde iş yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. İş, kuvvetin bir yol boyunca çalışması olarak tanımlanmakta, kuvvet ve alınan yol çarpımı ile basitçe hesaplanmaktadır. Başlıca enerji çeşitleri: elektrik, ısı, kinetik, mekanik, potansiyel, manyetik, nükleer ve kimyasal enerjidir. Bu enerjiler, enerji dönüşüm sistemleri ile birbirine dönüştürülebilmektedir (Boyle, 2013; Cengel ve Boles, 2015).

Fosil yakıtlar canlı organizmaların toprak altında yüksek basınç ve sıcaklıkta milyonlarca yıl kalarak kimyasal enerjiye dönüşmesiyle oluşmuştur. Petrolün keşfi Amerika Birleşik Devletlerinde olurken, kömürün keşfi İngiltere’de olmuştur. 1900’lü yıllardan günümüze kadar hem kullanım kolaylığı ve hemde ekonomik olmalarından dolayı özellikle 1973 petrol krizine kadar bu yakıtlar çok geniş bir şekilde kullanım alanı bulmuştur. Fakat gittikçe artan maliyetler ve çevre kirliliğinden dolayı fosil yakıtlara olan ilgi azalmaya başlamış, buna karşın alternatif olarak çevre dostu ve yerli olan yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi artmaya başlamıştır. Günümüzde ise kömür başta olmak üzere fosil yakıtların çevreye ve insan sağlığına yapmış oldukları büyük tahribattan dolayı bu yakıtlar yerlerini giderek artan bir hızda temiz enerji kaynaklarına bırakmaktadır. Fosil yakıtlardan en temiz ve en yaygın kullanılanı doğalgazdır (Boyle, 2013; IEA, 2019; Yılmaz, 2020).

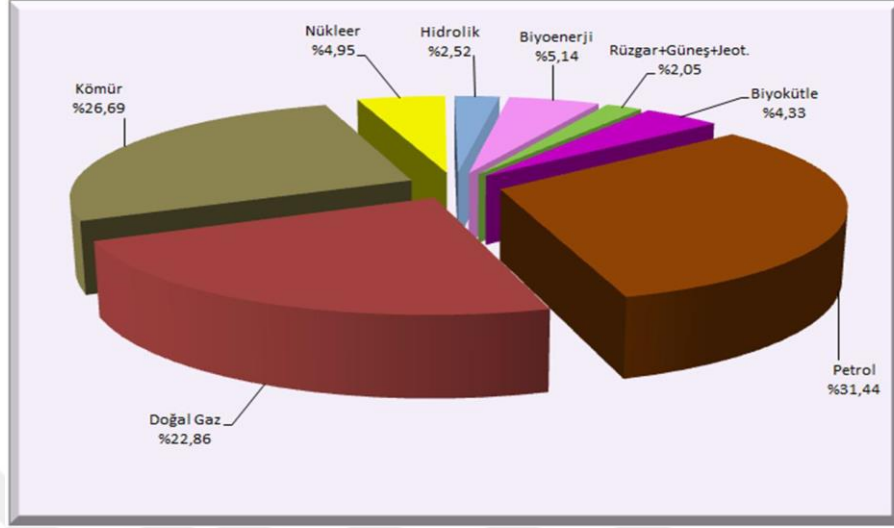
Yenilenebilir enerji kaynakları ise fosil kaynaklı olmayan, üretimi tüketiminden daha hızlı olan ve doğanın kendi döngüsü içinde bir sonraki gün mevcut olabilen enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar güneş, jeotermal, rüzgâr, hidroelektrik (hidrolik), dalga, hidrojen ve biyokütle kaynaklı enerjilerdir (Acaroğlu, 2007).

1.2. Dünyada ve Türkiye’de Enerji İhtiyacı

1.2.1. Dünyada enerji ihtiyacı

Dünyanın 2018 yılındaki toplam enerji arzı 14 314 Milyon Ton Eşdeğer Petrol (MTEP) dir. Bu arzın kaynaklara dağılımında (Şekil 1.1) ilk sırayı 4 501 MTEP ve

toplam arzın %31'i ile petrol almıştır. Petrolü, 3 821 milyon TEP ve %27 pay ile kömür, 3 273 MTEP ve %23 pay ile doğal gaz takip etmiştir (IEA, 2019).



Şekil 1.1. 2018 Yılı Dünya Birincil Enerji Arzında Kaynakların Payı (IEA, 2019; Yılmaz, 2020)

Dünya birincil enerji arzı 2000-2018 yılları arasında %42,6 oranında artmıştır. Bu dönemde, Tablo 1.1'de görüldüğü gibi, petrolün payı %36,5'ten %31,4'e, nükleerin payı %6,7'den %5'e gerilerken, doğal gazın payı %20,8'den %23'e, kömürün payı %23,1'den %26,7'ye, hidrolik dâhil yenilenebilir enerji kaynaklarının payı ise %6,6'dan %9,7'ye yükselmiştir (IEA, 2019; Yılmaz, 2020).

Tablo 1.1. Dünya Enerji Talebi (MTEP) (IEA, 2019 ve Yılmaz, 2020)

Yakıt Türü	2000	2018	2030	2040
Kömür	2 317	3 821	3 848	3 779
Petrol	3 665	4 501	4 872	4 921
Doğal Gaz	2 083	3 273	3 889	4 445
Nükleer	675	709	801	906
Hidrolik	225	361	452	524
Biyoenjerji (sıvı & gaz)	374	737	1 058	1 282
Biyokütle (odun v.b)	638	620	613	546
Rüz.&Gün.&Jeoter.	60	293	77	1 320
Toplam	10 037	14 314	16 311	17 723
Fosil Yakıt Oranı	%80	%81	%77	%74

MTEP: Milyon Ton Eşdeğer Petrol

Tablo 1.1’de görüldüğü gibi 2018 yılında fosil yakıtların payı %81’lerde olup, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından hazırlanan Dünya Enerji Görümü 2019 (IEA, 2019) Raporu’ndaki yapılan tahminler, 2040 yılında enerji kaynaklarının dağılımında önemli değişikliklerin olmayacağı ve fosil yakıt oranının %74 seviyesinde olacağını işaret etmektedir. Halbuki aynı rapordaki, küresel sıcaklık artışının 2°C’nin altında (tercihen 1,5°C’de) tutulmasını hedefleyen Paris Anlaşması ile uyumlu “Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu”na göre 2040 yılında fosil yakıt kullanım oranının %58 civarında olması gerektiği öngörülmektedir (IEA, 2019).

Dünya enerji arzında 2000-2018 yılları arasındaki %42,6 artışın yaklaşık %70’i Asya Kıtası’ndan kaynaklanmış; 2000 yılında %30 olan Asya Kıtası’nın payı 2018 yılında %42’ye kadar yükselmiştir. Son yıllarda birincil enerji arzı Çin’de %179 ve Hindistan’da ise %108 oranında yükselmiş, buna karşılık Avrupa Birliği’nde (AB) %5 ve ABD’de ise %2 oranında azalmıştır (Tablo 1.2) (IEA, 2019; BP, 2019).

Tablo 1.2. Bölgelere ve belirlenen senaryolara göre dünya birincil enerji talebi (IEA, 2019)

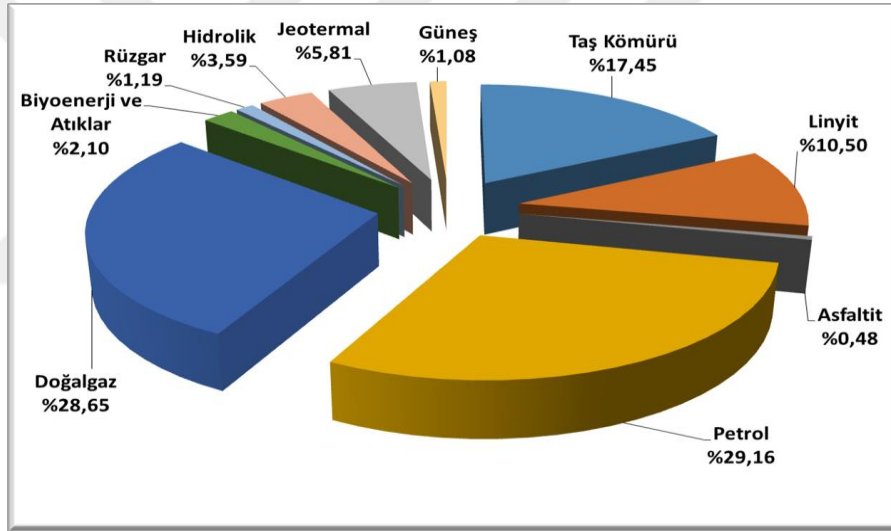
Bölgeler	2000	2018	2040
Kuzey Amerika	2 678	2 714	2 686
ABD	2 271	2 230	2 142
Orta ve Güney Amerika	449	660	913
Avrupa Birliği	2 027	2 000	1 723
Afrika	489	836	1 318
Orta Doğu	365	763	1 206
Avrasya	742	934	1 031
Asya Pasifik	3 012	5 989	8 208
Çin cumhuriyeti	1 143	3 187	3 972
Hindistan	441	916	1 841
Toplam	10 037	14 314	17 723

Uluslararası Enerji Ajansı’nın yaptığı değişik senaryo tahminlerine göre; Çin Halk Cumhuriyeti’nin tüm senaryolarda dünyanın en büyük enerji tüketicisi olmaya devam ettiği, ancak en büyük talep artışının Hindistan’da olduğu görülmektedir (IEA, 2019; Yılmaz, 2020; BP, 2019).

1.2.2. Türkiye’de enerji arz ve talebi

1.2.2.1. Birincil enerji arzının kaynaklara göre dağılımı

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) verilerine göre, Türkiye’nin 2018 yılındaki toplam enerji talebi 144 MTEP’dir (ETKB, 2020). Bu arzın kaynaklara dağılımında, ilk sırayı 41,91 MTEP ve toplam arzın %29,17’si ile petrol almıştır. Petrolü, 41 MTEP ve %28,66 pay ile doğal gaz; 41 MTEP ve %28,56 pay ile kömür takip etmiştir. Bunları 12 MTEP ve %8,07 pay ile jeotermal, rüzgâr ve güneş; 5.2 MTEP ve %3,59 pay ile hidrolik; 3.0 MTEP ve %2,10 pay ile biyoenerji, atık ve diğer kaynaklar izlemiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. 2018 Yılı Türkiye Birincil Enerji Arzında Kaynakların Miktar ve Payları (ETKB, 2020).

Türkiye’nin son 18 yıldaki toplam enerji arzı, 64 238 bin TEP ile %81 artarken, petrol 8 282 bin TEP ile %25; kömür 18 003 bin TEP ile %78; doğal gaz 28 725 bin TEP ile %231; hidrolik 2 499 bin TEP ile %94; jeotermal, güneş, rüzgar 10 631 bin TEP ile %1090 artmış; biyoenerji, odun, çöp ve atıklar toplamı ise %53 azalmıştır (Tablo 1.3) (ETKB, 2020).

Tablo 1.3. Türkiye Birincil Enerji Talebi İçinde Kaynakların Miktarı (Bin TEP) ve Yüzdeleri (%) (ETKB, 2020)

Enerji Kaynakları	1990	2000	2010	2018
Kömür	15 857 (30.2%)	22 972 (28.9%)	30 969 (29.2%)	40 975 (28.5%)
Petrol	24 192 (46.1%)	33 631 (42.3%)	31 937 (30.2%)	41 913 (29.2%)
Doğal Gaz	2 820 (5.4%)	12 446 (15.7%)	31 456 (29.7%)	41 171 (28.7%)
Hidrolik	1 991 (3.8%)	2 656 (3.3%)	4 454 (4.2%)	5 155 (3.6%)
Biyokütle	7 208 (13.7%)	6 457 (8.1%)	4 489 (4.2%)	3 014 (2.1%)
Jeo+Gün+Rüz	398 (0.8%)	975 (1.2%)	2 581 (2.4%)	11 606 (8.1%)
Toplam Enerji Talebi	52466 (100%)	79428 (100%)	105888 (100%)	143666 (100%)

2000-2018 yılları arasında Türkiye toplam enerji arzı içinde kaynakların paylarında, petrolün payı %13, biyoenerji, odun, çöp ve atıkların payı %5,7 azalırken; kömürün payı %2,8, doğal gazın payı %9,8, jeotermal, güneş ve rüzgârın payı %6,6 artmıştır (Tablo 1.3).

1.2.3. Türkiye birincil enerji üretimi

1990-2018 yılları arasındaki ülkemizin toplam enerji üretimi %58,8 oranında artarak, 25.2 MTEP'ten 39.7 MTEP düzeyine yükselirken; aynı dönemdeki toplam enerji tüketimi ise 52.5 MTEP'ten 143.6 MTEP düzeyine yükselerek %173,5 artmıştır. 2000 yılında Türkiye'nin toplam enerji üretimi 26.5 MTEP iken, son 18 yılda sadece 13.3 MTEP ile %50,4 artmıştır. Türkiye toplam birincil enerji üretimi 18 yılda 13.4 MTEP artmışken, bu artışın 5.7 bin TEP'i güneş, rüzgar ve jeotermal enerji olmak üzere 8.8 MTEP'i, son üç yılda gerçekleşmiştir. Diğer taraftan 2000-2018 yılları arasındaki toplam enerji üretimi %50,4 oranında artarken, enerji arzı %80,8 artmıştır. Bu dönemde toplam birincil enerji arzı 79.5 MTEP'den 143.6 MTEP'e yükselmiştir (Tablo 1.4) (ETKB, 2020; Yılmaz, 2020).

Tablo 1.4. Türkiye toplam enerji talebi, üretimi, ithalat ve ihracatı (MTEP) (ETKB, 2020)

Talep, Üretim, İthalat ve İhracat	1990	2000	2010	2015	2018
Toplam Birincil Enerji Tüketimi (TBET)	52.5	79.4	105.9	129.2	143.6
Toplam Birincil Enerji Üretimi (TBEÜ)	25	26.4	31.5	30.9	39.7
Toplam Birincil Enerji İthalatı (TBEİ)	31	55.1	84.6	112.8	115.8
Toplam Birincil Enerji İhracatı (TBEİ)	2.1	1.6	7.9	8.1	6.1
(TBEÜ/TBET)x100 = Enerji Talebinin Karşılama Yüzdesi	(47.6%)	(33.2%)	(29.7%)	(23.9%)	(27.6%)

MTEP: Milyon Ton Eşdeğer Petrol

Tablo 1.4'te de görüldüğü gibi son yirmi sekiz yılda toplam enerji ithalatı %273,5 oranında artarak 31 MTEP'ten 116 MTEP düzeyine yükselmiş; enerji ihracatı ise %190,5 artmıştır. 2000-2018 yılları arasındaki 18 yılda ise toplam enerji ithalatı %110,2 oranında artarak 55 MTEP'ten 116 MTEP düzeyine yükselmiştir. Bu dönemdeki toplam enerji ihracatı 1.6 MTEP'ten 6.1 MTEP düzeyine yükselerek %281,3 artmıştır (Tablo 1.4) (ETKB, 2020; Yılmaz, 2020).

Toplam enerji üretiminin toplam enerji arzını karşılama oranı; son 28 yıllık dönemde %47,6'dan %27,6'ya düşerken, 2000-2018 yılları arasındaki 18 yılda ise %33'ten %28'e düşmüştür. Başka bir ifadeyle Tablo 4'te görüldüğü üzere Türkiye'nin toplam enerji arzında dışa bağımlılığı, 1990'da %52 iken, 2000 yılında %67, 2010'da %70 ve 2018 yılında %72 düzeyine çıkarak son 28 yılda %20 artmıştır. Türkiye'nin toplam enerji arz, üretim, ithalat ve ihracat değerleri incelendiğinde; üretimin toplam enerji arzı içindeki payının %33,3'ten %27,6'ya düştüğü; ithalatın toplam enerji arzı içindeki payının %69,3'ten %80,6'ya, ihracatın toplam enerji arzı içindeki payının ise %2'den %4,2'ye çıktığı görülmektedir. Başka bir deyişle enerji arzı içinde 18 yılda ihracatın payı ancak %2,2, ithalatın payı %11,3 artmış; üretimin payı ise %5,7 oranında azalmıştır.

Diğer taraftan, 2013-2019 yılları arasında Türkiye enerji ithalatı içinde en büyük payı ham petrol ve doğal gaz kaynakları almaktadır. Kaynaklar bazında yıllara göre ithalat incelendiğinde; ham petrol ve doğal gaz ithalatının 2013 yılından 2016 yılına kadar azaldığı ancak 2017 yılında yeniden yükselmeye başladığı Tablo 1.5'te görülmektedir. Kömür ithalatının 2014 yılından sonra çok büyük artış gösterdiği, kok kömürü ve işlenmiş petrol ürünleri ithalatının ise 2013 yılına göre azaldığı görülmektedir. 2019 yılında Türkiye'nin toplam ithalatı 210,3 milyar dolar olmuştur. Tablo 1.5'e göre toplam ithalatın 41,6 milyar dolarını %19,8 ile birincil enerji kaynakları ithalatı oluşturmuştur.

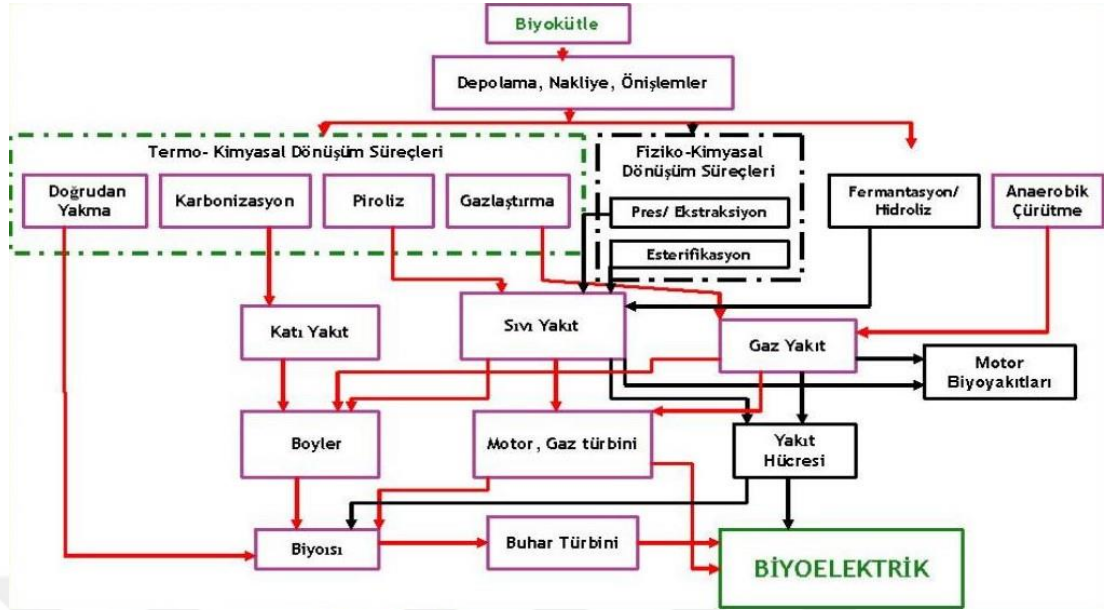
Tablo 1.5. Türkiye'nin Toplam İthalatında Enerjinin Payı (ETKB, 2020).

	Milyon Dolar						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Kömür ve linyit çıkartılması	827	787	2929	2632	4074	4385	3519
Ham petrol ve doğalgaz	35 732	34 700	23 425	15 285	20 697	22 911	26 582
Kok kömürü, Rafine edilmiş Petrol Ürünleri	20 780	20 153	11 868	9 266	12 723	16 160	11 511
Toplam Enerji İthalatı	57 340	55 641	38 222	27 183	37 493	43 457	41 612
Toplam ithalat Enerji ithalatının	260 823	251 142	213 619	202 189	238 715	231 152	210 347
Toplam İthalata oranı	22,0%	22,2%	17,9	13,4%	15,7%	18,8%	19,8%

1.3. Yenilenebilir Enerji Kaynağı Olarak Biyokütle

Biyokütle, kısa sürede (1-2 yıl) yenilenebilen, biyolojik kökenli canlı organik madde olarak tanımlanır. Bu tanıma göre biyokütle enerji kaynağının ana bileşenleri, karbonhidrat bileşiklerinden meydana gelen bitkisel ve hayvansal kökenli tüm organik maddeler olup, bunların tamamına biyokütle enerjisi denir (Acaroğlu, 2007; İllez, 2020).

Biyokütle orijinal haliyle yakıt olarak kullanılabilir ya da farklı katı, gaz veya sıvı yakıtlara dönüştürülebilmektedir (Şekil 1.3). Bu yakıtlar güç üretiminde, taşıma, ısıtma ve soğutma ile diğer endüstriyel prosesler için kullanılmaktadır. Bu nedenle Şekil 1.3'te görüldüğü üzere biyokütle enerji kaynakları; birincil katı biyo-yakıtlar, sıvı biyo-yakıtlar, biyogaz, belediye ve endüstri atıkları şeklinde sınıflandırılırlar (Acaroğlu, 2007 ve 2013).



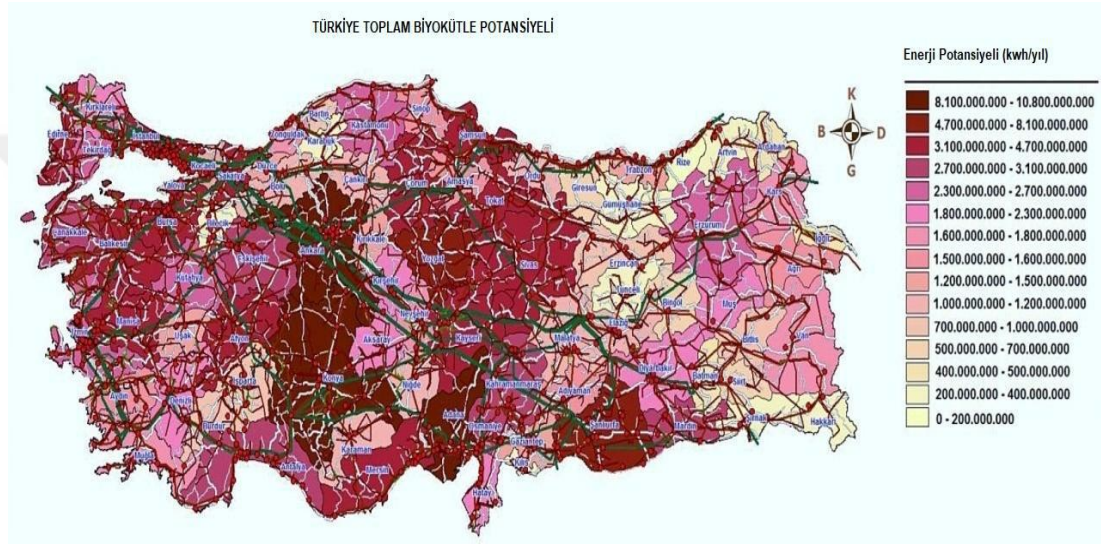
Şekil 1.3. Biyokütle Enerjisi Dönüşüm Yöntemleri (Acaroğlu, 2007).

Biyokütle enerjisinin kullanımı klasik ve modern yöntemler olmak üzere başlıca iki kategoriye ayrılabilir. Klasik kullanımda, bitki, odun ve hayvan atıkları gibi biyokütle malzemesinin direkt yakılmasıyla enerji sağlanmakta ve özellikle az gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Modern kullanımda ise organik içerikli evsel, kentsel ve endüstriyel atıklar/atık sular, hayvansal ve tarımsal atıklar, enerji bitkileri, orman atıkları, enerji ormancılığı ürünleri, sucul ekosistemlerde yetişen alg ve yosun gibi biyokütle malzemelerinden dönüşüm yöntemleri ile proses ısısı, elektrik ve sıvı/gaz yakıt elde etmek mümkün olmaktadır.

Sera gazı oluşumunda önemli paya sahip olan fosil kaynaklara ilaveten, son zamanlarda tarım, ormancılık ve diğer toprak kullanım biçimlerinin küresel insan kaynaklı %23'lük CO₂, %44'lük metan (CH₄) ve %82'lik azot oksit (N₂O) salınımindan sorumlu olduğu ve bunların insan kaynaklı toplam net sera gazı salınımlarının %23'ünü temsil ettiği belirtilmiştir. Diğer yandan 821 milyon insan hâlâ yetersiz beslense de muhtelif alanlarda ivedi ve geniş kapsamlı eylemler gerçekleştirilmesi kaydıyla, hâlihazırda kullanılan arazilerin değişen iklimlerde dünyayı besleyebileceği ve yenilenebilir enerji için biyokütle sağlayabileceği ifade edilmektedir. Sonuç olarak yenilenebilir enerji kaynakları içinde biyokütleyle ayrı bir önem verilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır (WEC, 2016; IEA, 2018; Illeez, 2020).

1.3.1. Türkiye biyokütle enerjisi potansiyeli

Türkiye'nin biyokütle enerji potansiyeli oldukça yüksektir. Fakat enerji olarak kullanım miktarı son zamanlarda doğalgaz kullanımından dolayı azalmıştır. Genel olarak, Türkiye'nin biyokütle kaynakları tarım, hayvan, orman ve organik kentsel atık vb. maddelerden oluştuğu dikkate alındığında, biyokütle enerjisi potansiyelinin dağılımı Şekil 1.4'teki gibi görünmektedir (Toklu, 2017).



Şekil 1.4. Türkiye'de illere göre biyokütle potansiyelinin dağılımı (ETKB, 2020).

Biyokütle enerji potansiyeli ile ilgili olarak Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün Türkiye Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası (BEPA) yayınlanmıştır (ETKB, 2020). BEPA ile atık miktarları ve atıkların toplam enerji miktarı gibi bilgiler Tablo 1.6'da verilmektedir.

Tablo 1.6. Türkiye'nin BEPA verilerine göre tahmini biyokütle enerji potansiyeli (2020) (ETKB, 2020).

Nüfus	82 003 882
Hayvan Sayısı (adet)	422 832 374
Hayvansal Atık Miktarı (ton/yıl)	193 878 079
Hayvansal Atıkların Teorik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	4 385 371
Hayvansal Atıkların Ekonomik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	1 084 506
Bitkisel Üretim Miktarı (ton/yıl)	184 593 134
Bitkisel Atık Miktarı (ton/yıl)	62 206 754
Bitkisel Atıkların Teorik Enerji Değeri (TEP/yıl)	6 009 049
Bitkisel Atıkların Ekonomik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	1 462 159
Belediye Atıkları Miktarı (ton/yıl)	32 170 975

Tablo 1.6 (Devamı)

Nüfus	82 003 882
Belediye Atıklarının Teorik Enerji Değeri (TEP/yıl)	3 373 011
Belediye Atıklarının Ekonomik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	485 858
Orman varlığı Atıkları (ster/yıl)	3 914 904
Orman Artıklarının Enerji Değeri (TEP/yıl)	859 899
Biyo-dizel İşleme Lisansı Sahibi Firma Sayısı	8
Biyoetanol İşleme Lisansı Sahibi Firma Sayısı	5
Biyokütle Kaynaklı Elektrik Üretim Santral sayısı	200
Atıkların Toplam Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	14 627 331

Türkiye’de büyükbaş hayvanların teorik biyogaz potansiyeli 2,77 milyon TEP/yıl ve teknik biyokütle potansiyeli 1,13 milyon TEP/yıl, kümes hayvanlarının teorik biyogaz potansiyeli 874.175 TEP/yıl ve teknik biyogaz potansiyeli 864.462 TEP/yıl olarak belirlenmiştir. Toplam teknik biyogaz potansiyelinin enerji değeri 2 milyon TEP/yıl’dır. Aynı çalışmada enerji bitkilerinin teorik biyogaz potansiyeli 7 milyon TEP/yıl ve teknik biyogaz potansiyeli 1,8 milyon TEP/yıl olarak verilmektedir. Belediye katı atıklarının teorik biyogaz potansiyeli 525.460 TEP/yıl ve teknik biyogaz potansiyeli 262.730 TEP/yıl’dır. Sığır ve kanatlı gübresi, tarımsal atıklar, enerji bitkileri, tarımsal sanayi artıkları ve belediye katı atık kaynaklı toplam teorik potansiyeli 19 milyon TEP/yıl ve toplam teknik potansiyeli 5,26 milyon TEP/yıl’dır (ETKB, 2020; Illeez, 2020).

1.3.2. Dünyada ve türkiyede biyokütle enerjisi kullanımı

1.3.2.1. Biyokütle enerjisinin toplam enerji arzı içindeki yeri

Dünya 2018 yılı birincil enerji arzı yaklaşık 14 milyar TEP olup, fosil yakıtlar toplam arzın %81,1’ini oluşturmaktadır (Tablo 1.7). Fosil kaynaklardan elde edilen bu enerji, dünya yüzeyine gelen ışıınım ortalama 1000 W/m^2 olarak alınırsa, güneşten gelen yıllık toplam ışıınının %0,01’ine denk gelir. Bitkisel biyokütlerde enerji depolanması fotosentez yoluyla olmaktadır ve verimi %1’in altındadır. Genel olarak, fotosentez yoluyla depo edilen enerji ise yıllık küresel enerji tüketiminin 10 katı civarındadır. Fakat bu enerjinin %1,5’inden azı kullanılabilmektedir.

Tablo 1.7. Kaynak türlerine göre dünya birincil enerji talebi (MTEP) (IEA, 2019)

Yıl	Toplam (MTEP)	Petrol (MTEP)	Kömür (MTEP)	Doğal Gaz (MTEP)	Nükleer (MTEP)	Hidrolik (MTEP)	Gün.& Rüz. (MTEP)	Biyo.& Atık (MTEP)
1990	8 765	3 233	2 220	1 664	526	184	37	902
1995	9 217	3 373	2 207	1 808	608	213	42	965
2000	10 024	3 663	2 317	2 072	675	225	60	1 012
2005	11 479	3 400	2 994	2 361	722	252	70	1 082
2010	12 849	4 136	3 653	2 733	719	296	110	1 202
2015	13 628	4 329	3 853	2 950	687	336	204	1 286
2018	14 314	4 501	3 821	3 273	709	361	293	1 357

Türkiye’de birincil enerji kaynaklarının kullanımı 1990 yılından 2018 yılına kadar 2,8 kat artmış olup, dünya genelinde bu artış %60 kadardır. Türkiye’de fosil kaynakların birincil enerji arzındaki payı %86,6’dır ve bu pay dünya ortalamasından daha yüksektir. Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji arzındaki payı 1990 yılında %19 iken, 2000 yılında %14’e, 2010 yılında %11’e gerilemiştir. Daha sonra artarak 2018 yılına gelindiğinde %14 ile tekrar 2000 yılındaki oranına ulaşmıştır ve bu oran gelecek yıllarda artma eğilimindedir.

1.3.2.2. Biyokütlenin yenilebilir enerji kaynakları içindeki yeri

Biyokütle, toplam yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde Afrika’da %96, Asya’da %65, Amerika’da %59 ve Avrupa’da %59 kullanım oranına sahiptir. Küresel olarak bakıldığında biyokütlenin yenilenebilir enerji kaynakları içindeki kullanım oranı 1990 yılında %80.4 iken 2000 yılında %78’e, 2018 yılında ise %67.5’e düşmüştür. Buna rağmen biyokütle enerjisi toplam yenilenebilir enerji kaynakları arzı içinde hâlâ büyük bir paya sahip olmaya devam etmektedir. Küresel olarak biyokütlenin diğer fosil yakıtlara göre kullanım oranı özellikle 2000’li yıllara kıyasla önemli ölçüde azalmasında, gelişmekte olan bölgelerde pişirme ve ısıtma için geleneksel biyokütle kullanımının azalmasının etkisinin olduğu belirtilmektedir. Ayrıca odun peletleri, sıvı biyoyakıtlar ve biyogaz gibi modern yenilebilir yakıtların kullanımlarının artmasından dolayı, biyoenerji kaynaklarının gelecekteki yenilenebilir enerji kaynakları dağılımında önemli bir yer alacağı anlaşılmaktadır (WBA, 2018). Türkiye’de biyokütlenin yenilenebilir enerji içindeki kullanım oranı küresel alandaki orandan farklı olarak 1990 yılında %75 iken, yıllar içerisinde sürekli azalarak 2018 yılı sonuna gelindiğinde %15’ler seviyesine düşmüştür (Tablo 1.3).

Bunun nedeni ısıtma ve yemek pişirmede odunun yerine doğalgaz ve sıvılaştırılmış petrol gazlarının kullanımının artmasıdır.

Küresel olarak 2017 yılında enerji amaçlı 1.328.000.000 TEP biyokütle kullanılmıştır. Kullanımın %86'sı odun pelletleri, odun yongaları, pişirme ve ısıtma için yakacak odun vb. gibi birincil katı biyoyakıtlar, %7'si sıvı biyoyakıt, her biri %2-3 oranında eşit paya sahip olarak biyogaz, endüstriyel atıklar ve belediye atıklarıdır. Biyokütle arzı 2017 yılında bir önceki yıla kıyasla, yaklaşık 24 milyon TEP olarak %1,5'lik düşüş ile son 17 yılda ilk kez azalmıştır. Bu düşüşün birincil katı biyoyakıtların yani klasik biyokütlenin azalmasıyla gerçekleştiği, buna karşılık modern biyokütle kullanımı ile atık, biyogaz ve sıvı biyoyakıtlarda artış olduğu görülmüştür (WEC, 2016; IEA, 2017, 2018 ve 2019).

Türkiye 2018 yılında 143.666.000 TEP olan toplam enerji ürünleri arzında 3.104.000 TEP ile yaklaşık %2'lik paya sahip olmuştur. 2018 yılı toplam enerji tüketimi ise 109.438.000 TEP olarak gerçekleşmiş ve bu tüketimin 2.548.000 TEP'lik kısmı biyoenerji ve atıklara aittir. Kullanılan biyokütlenin yaklaşık %82'si nihai sektörlerde kullanılmıştır. Bu tüketimin 834.000 TEP ile %33'ü sanayi, 159.000 TEP ile %6,2'si ulaştırma (karayolları), 1.555.000 TEP olarak %61'i konutlarda tüketilmiştir. 465.000 TEP'lik biyokütle ise çevrim ve enerji sektöründe ısı ve elektrik üretimi için kullanılmıştır (ETKB, 2020).

Türkiye'nin 2018 yılında elektrik üretimi 303.625 GWh (26 milyon TEP) olup, bu üretimin %68'i fosil kaynaklardan, %32'si de yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmiştir. Ancak biyokütlenin yenilenebilir enerji içindeki payı %2,75 ve toplam elektrik üretimi içindeki payı %0,88 olarak oldukça düşük seviyededir. Biyoetanol, araçlarda benzine alternatif olarak kullanılabildiği gibi, benzinle farklı oranlarda karıştırılarak da kullanılabilmektedir. Ülkemizde ise etanol sadece benzine karıştırılarak kullanılmaktadır. ETKB verilerinde de sıvı biyoyakıtlarla ilgili bilgiler bulunmamaktadır. Bununla birlikte ithal edilen benzin türlerine yerli tarım ürünlerinden üretilmiş etanolün hacimsel olarak en az %2 oranında harmanlanma zorunluluğu %3'e çıkarılmıştır. Araçlarda herhangi bir dönüştürmeye gerek

duymadan %10'a kadar katılabilen biyoetanol, daha yüksek karıştırma oranlarında motorda bazı düzenlemelerin yapılmasını gerekli kılmaktadır (Illeez, 2020).

Türkiye'nin toplam biyokütle enerji üretim potansiyeli yaklaşık 14–32 milyon TEP, hayvansal atık miktarı ise 4 milyon 385 bin 371 TEP olarak kabul edilmektedir. Özellikle ülkemizin kırsal alanlarında biyogazın üretimi ve kullanımı ile ekonomik ve sosyal kalkınmaya destek vermek mümkündür. Nitekim hayvansal atıkların kullanıldığı biyogaz sistemlerinden yılda yaklaşık olarak 2.2–3.9 milyar m³'lük biyogaz elde edilebileceği bilinmektedir (Toklu, 2017; ETKB, 2020).

1.4. Biyokütle Enerjisi ve Faydaları

İnsanlığın ilk çağlarından beri insanlık açısından önemli bir yakıt olan biyokütle (odun, saman, tezek vs.) günümüzde önemini kaybetmiş olup dünya enerji tüketimindeki payı %10 civarındadır (WEC,2016). Fakat fosil yakıtlarının rezerv ömürlerinin azalması ve küresel ısınmadan dolayı biyokütle'nin önemini tekrar arttırmaya başlamıştır. Biyokütlenin enerji amacıyla en genel kullanımı direkt yakma, gazlaştırma, karbonlaştırma ve pirolizdir. Biyokütleden piroliz, trans-esterleşme, mayalama ve gazifikasyon esaslı sentez gazlarının üretilmesiyle hem taşıt yakıtlarının eldesi hemde elektrik üretilmesi biyokütlenin tekrar ticari değer kazanmasına yol açmıştır. Biyokütleden karbonlaştırma yöntemiyle odun kömürü eldesi eski çağlarda Hindistan ve Çin'de demir filizinden saf ya da karışım halinde demir eldesinde kullanılmıştır. Odun kömürü günümüzde de dumansız yakıt olarak gıda endüstrisinde (mangal kömürü ve döner pişirmede) ve su-gaz filtrasyon işleminde dünyanın pek çok yerinde kullanılmaktadır (Klass, 1998; WEC, 2016; Basu, 2006 ve 2018).

Torrefaction (kavurma) yöntemi ile biyokütleden karbonizasyona benzer metotla katı yakıtlar elde edilir, fakat kavurma yöntemi karbonlaştırma yönteminden önemli bazı farklılıklar içerir. Özellikle kömürün yakıldığı termik santrallerde odun–kömür karışımının birlikte yakılarak, hem elektrik üretim maliyetinin düşürülmesi hem de havayı kirleten NO_x ve SO_x tanecik miktarlarının azaltılmasıyla hava kirliliğinin

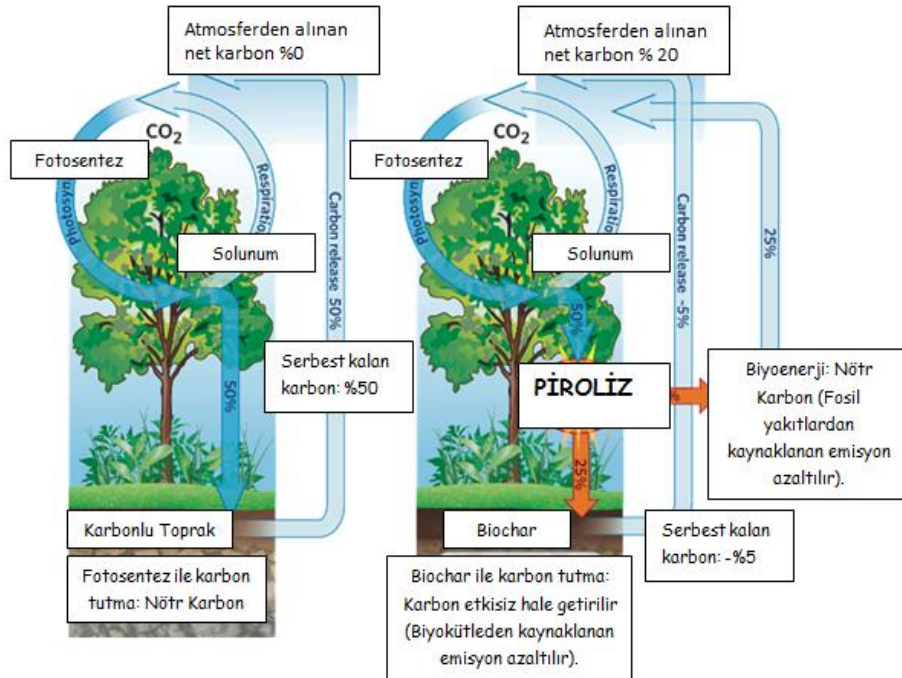
azaltılması sağlanmış olur. Ayrıca metalürjide kok kömürü ile kavrulmuş odun birlikte kullanılabilir, böylece odunun kavurulması, pirolizi ve gazlaştırılması ile katı, sıvı ve gaz ürünler elde edilir. Yani eskiden kullanılan ve verimi düşük olan yığın yöntemi ile odun kömürü eldesi yerine daha modern ve verimi yüksek kavurma yöntemi kullanılarak ekonomik ve yakıt değeri yüksek odun kömürü elde edilir. Piroliz yöntemi ile de dizel yakıtı benzeyen sıvı yağ ürün elde edilerek taşıtlarda dizel yakıtla birlikte kullanılır. Gazifikasyon yöntemiyle biyokütleden elde edilen gaz ürünler hem ısıtmada ve hem de elektrik üretiminde kullanılır. Böylece biyokütlenin direkt yakılmasıyla meydana gelen enerji kaybının da önüne geçilerek ekonomik değeri daha yüksek ürünler elde edilmiş olur (Wereko-Brobby ve Hagen, 1996; Klasss, 1998; Basu, 2006 ve 2018; Boyle, 2013).

Gazifikasyon (gazlaştırma) kimyasal bir proses olup biyokütle gibi karbonlu maddeleri faydalı daha uygun (ya da kullanışlı) gaz yakıtlara ya da kimyasal hammaddelere dönüştürür. Kısmi oksidasyon olan piroliz ve hidrojenasyon birbiriyle ilişkili proseslerdir. Yanma olayı da karbonlu maddeleri gaz ürünlere dönüştüren bir yöntemdir (örneğin odunun sobada yakılması), yalnız gazlaştırmadan önemli bazı farkları vardır. Örneğin; direkt yakmada oluşan gaz ürün herhangi bir faydalı ısıtma değerine sahip değildir yani ısı değeri düşük iken biyokütleden gazlaştırma ile elde edilen gaz ürünün ısı değeri yüksektir. Biyokütlenin gazlaştırılmasıyla gaz yakıtların enerji değeri artarken direkt yakmada ise açığa çıkan enerji çevreye yayılarak yakıtın kalori değeri azalır.

Biyokütlenin gazlaştırılması ya da sıvılaştırılmasının (piroliz) amacı sadece enerji elde etmek değil aynı zamanda kimyasal hammadde de üretmektir. Günümüzde gazifikasyon sadece katı hidrokarbonlarla sınırlı değildir. Daha faydalı yakıtlar elde etmek için sıvı ya da gaz hammaddeler de gazifikasyonda kullanılmaktadır. Örneğin, metan gazının kısmi oksidasyonu ile H_2 ve CO gaz karışımı şeklinde oluşan sentetik gaz (syngas) üretiminde yaygın olarak gazlaştırma işlemi kullanılır (Wereko-Brobby ve Hagen, 1996; Klasss, 1998; Basu, 2006 ve 2018; Boyle, 2013).

1.4.1. Biyokütle ve biyokütleden elde edilen ürünler

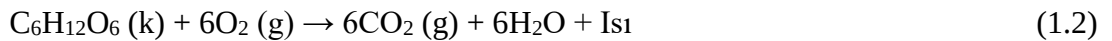
Biyokütle bitki ve hayvanlar gibi canlı türlerden çok kısa zamanda elde edilen ve doğada yaygın olarak bulunan hem enerji kaynağı ve hem de besin kaynağı olarak kullanılabilen odunsu bitkilerin genel adıdır. Biyokütle, tohumun toprağa atılmasıyla birkaç hafta gibi çok kısa zamanda canlı bir organizma olarak meydana gelir. Fosil yakıtların aksine biyokütle oluşması için milyonlarca yıllık zamana ihtiyaç yoktur. Tohum toprağa yerleştirilip gerekli su ve gübreleme yapıldığında, hava sıcaklığı da uygun olursa 15-20 gün gibi kısa bir zaman zarfında tohum filizlenir. Bitkilerin (yani biyokütlenin) meydana gelmesi fotosentez reaksiyonu ile olur. Böylece havadaki atmosferik karbondioksit ve su buharı yardımıyla güneş ışığı sayesinde ve de bitkilere yeşil rengi veren klorofilin katalizörlüğünde glikoz diye adlandırılan biyokütle elde edilir. Fotosentez reaksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir ve şematik olarak Şekil 1.5’ te görülmektedir:



Şekil 1.5. Fotosentez ve biyokütlenin büyümesi (Acaroğlu, 2007)

Elde edilen bu glikoz hayvan ve insanlar için besin kaynağı yani bedenleri için enerji kaynağıdır. Bilindiği gibi enerji iş yapabilme kapasitesidir. Dolayısıyla hareket eden her canlı bu hareket işini karşılamak için besine yani enerjiye ihtiyaç duyar. Toprakta tohumdan yetişen sebze ve meyvelerin gıda kısmı canlılar için besin kaynağı, geriye kalan odunsu ve kabuk ve çekirdekleri de yakıt olarak kullanılmaktadır. Bazı sebzeler yılda iki üç defa yetiştirilmekte, ağaçlar 3-5 sene de kesilecek hale gelmekte, buğday, arpa gibi bazı bitkiler de 2-3 ayda ve her sene yetiştirildiğinden biyokütle, fosil yakıtların aksine yenilenebilir bir besin ve yakıt kaynağıdır. Yani bazı bitkiler her yıl ya da altı ayda bir tekrar yetişmektedir. Halbuki milyonlarca yıl önce toprağın altında canlı organizmalar (bitki ve hayvanlar) yüksek basınç ve sıcaklıkta dönüşüme uğrayarak fosil kökenli petrol ve kömürü meydana getirmişlerdir. Fosil yakıtların yeniden oluşabilmesi için yine milyarlarca yıl gibi uzun zamana ihtiyaç vardır. Sonuç olarak biyokütlenin yenilenebilir (kısa sürede tekrar tekrar yetişebilir) olması, hem besin kaynağı hem kimyasal hammadde kaynağı hem de katı, sıvı ve gaz yakıt olarak kullanılabilmesi fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olduğu dünyamız için biyokütleyi önemli bir yaşam ve enerji kaynağı haline getirmektedir (Basu, 2018).

Her yıl bitkiler atmosferdeki CO₂'yi fotosentezle absorblayarak büyürler. Büyüyen bu biyokütle (odun, sap, saman) yakıldığı zaman bitkinin atmosferden absorbladığı CO₂ tekrar atmosfere salınır. Bitkinin oluşmasındaki fotosentez reaksiyonu endotermik yani enerji gerektiren bir reaksiyon olup bu enerji güneş tarafından karşılanmaktadır. Elde edilen odun ya da diğer biyokütlenin -ki buna glikoz (C₆H₁₂O₆) denmektedir- yanması ise ekzotermik olup reaksiyon sonucu enerji ve CO₂ açığa çıkar (Acaroğlu, 2007; Basu, 2018):



Böylece biyokütlenin yanmasıyla atmosfere CO₂ salındığından atmosferin CO₂ dengesinde bir azalma meydana gelmez. Ayrıca yanma reaksiyonu sonunda enerji açığa çıktığından biyokütle yakıt olarak da kullanılır. Dolayısıyla fotosentez reaksiyonuyla meydana gelen glikoz (odun veya sebze ya da ot) hem canlıların

gıdasıdır hem de insanlar için yakıt kaynağıdır. Buna ilaveten odunun yapısında pek çok kimyasal madde vardır. Bütün bunları dikkate aldığımızda; fotosentez gibi doğada kendiliğinden meydana gelen ve reaksiyon için gerekli enerji güneş tarafından karşılanarak yetiştirilen bitki ve ağaçlar insanoğlu için hem enerji kaynağı, hem besin kaynağı hem de kimyasal hammadde kaynağıdır. Ayrıca ağaçlar toprağın erozyonunu önler, insanları sıcağa karşı korur, bina ve mobilya yapımında kullanılarak çok yönlü fayda sağlamış olur (Basu, 2018).

Yeryüzünün sadece %5'i (13,5 milyar metrik ton) ormanla kaplıdır ve bu miktar gittikçe artırılsa dünya nüfusunun gerekli yakıt ve yapı malzeme ihtiyacını karşılayabilir. Böylece iyi bir ağaçlandırma yapılarak dünya enerji tüketiminin en az %26'sı biyokütleden karşılanabilir. Böylece hem yenilenebilir ve hem de atmosferin karbon dengesini bozmayan (karbon-nötr) biyokütle sayesinde fosil yakıtların tükenme hızları azaltılabilir ve dünyamızın su, oksijen ve karbon dengesi de korunmuş olur (Acaroğlu, 2007; Boyle, 2013; Basu, 2018).

Tablo 1.8, besin ve besin olmayan kategorideki iki yetiştirilen biyokütleyi listelemektedir ve bunlardan elde edilecek faydalı ürünleri göstermektedir. Biyokütleyi bu şekilde gruplandırmak ya da ayırmak önemlidir çünkü tahıldan taşıt yakıtı (etanol) elde etmek oldukça kolaydır ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte bu tür gıda bitkilerini (yan tahılları) enerji üretimi için kullanmak sürdürülebilir bir yöntem değildir. Bu sefer de gıda hammaddesi yakıt hammaddesi olarak kullanıldığında ortaya sosyal, ekonomik ve politik sorunlar çıkmaktadır. Otomobil ya da toplu taşıma araçlarının yakıtı karşılanırken diğer taraftan çok daha önemli gıda hammaddesi olan tahıl fiyatlarının yükselmesi ve tahıl stoklarının hızla azalması olumsuz sonuçlar doğurur. Bundan dolayı etanol yakıtının üretiminde gıda esaslı hammadde kullanmak yerine selülozik maddeler gibi gıda endüstrisinin hammaddesi olmayan biyokütle hammaddeleri kullanılmalıdır. Böylece hem taşıtlar için yakıt üretilmiş olur ve hem de gıda için yeterli tahıl stokları biriktirilmiş olur.

Tablo 1.8. Biyokütle kaynakları (Basu, 2018)

Biyokütle ana kaynağı	Elde edilen birinci ürün	Elde edilen ikincil ürün
Tarım Ürünleri	Şeker kamışı, mısır, şeker pancarı	Etanol
Tarım Ürünleri	Soyafasülyesi, ayçiçeği sap ve yaprakları v.s	Biyo-dizel
Lignoselülozik Maddeler	Saman, tahıl, mısır koçanı, odun v.s	Etanol, biyo sıvı ve gaz yakıt

1.4.2. Biyokütle ürünleri ve endüstriyel kullanımı

Biyokütle'den üretilebilecek başlıca üç tip yakıt vardır ve bunlar aşağıda verilmektedir:

- Sıvı yakıtlar; etanol, biyodizel, metanol, yemeklik yağlar ve piroliz yağları.
- Gaz yakıtlar; biyogaz (CH_4 , CO_2), üretici gaz (CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , H_2), sentezgazı (CO , H_2) doğal gaza alternatif gaz (CH_4).
- Katı yakıtlar; odun kömürü, biyo-kok, biyo-katran

Bu biyokütle ürünleri aşağıdaki dört tip endüstriyel üretimde hammadde olarak kullanılırlar:

1. Metanol, gübre, sentetik kauçuk ve diğer kimyasalların üretimi için kimya endüstrisinde,
2. Isı ve elektrik üretimi için enerji endüstrisinde,
3. Benzin ve dizel üretimi için taşıma endüstrisinde,
4. CO_2 ve diğer kirleticileri tutmak için çevre endüstrisinde.

Etanol ve biyo-dizelin taşıtlarda yakıt olarak kullanılması, enerji tüketim başına CO_2 emisyon miktarını azaltır ayrıca bu yakıtlar fosil yakıtlara olan bağımlılığı da azaltır. Böylece, biyokütle esaslı enerji sadece yenilenebilir değil aynı zamanda sera gazları açısından temiz olup küresel enerji açısından da önemli bir rol üstlenebilir. Bununla birlikte bu biyokütle esaslı yakıt dönüşümü yeni değildir. İlk insandan günümüze biyokütle (yani odun ve benzeri yakıtlar) ısıtma ve yemek pişirme amacıyla kullanılmaktadır. Günümüzde de odun ve benzeri biyokütle türü yakıtlar başta az gelişmiş ülkeler olmak üzere dünyanın hemen hemen her tarafında özellikle kırsal

alanlarda kullanılmaktadır (Klass, 1998; Acaroğlu, 2007; Basu, 2013 ve 2018; WBA, 2019).

1.4.2.1. Kimyasal endüstriler

Teorik olarak, petrol ya da doğalgazdan üretilen kimyasalların pek çoğu biyokütleden de (odun vb.) üretilir. Biyokütleden kimyasal madde üretmek için başlıca iki yöntem vardır; şeker-esaslı ve sentez-gaz-esaslı üretim. Şeker esaslı biyokütle glikoz, fruktoz, ksiloz, arabinoz, laktoz, sükroz ve nişasta gibi şekerleri içerirken sentez gaz esaslı olanlar CO ve H₂ gazı içerirler. Sentez gaz platformu sentez gazın yapısında bulunan (yani sentez gazını oluşturan) hidrojen ve karbon monoksit gazını kimyasal bağlı bloklar şeklinde oluşturur. Farklı kimyasallar için ara (ürün) bağlanma blokları ile bu metotla çok sayıda oluşabilir. Bunlar; hidrojen, metanol, gliserol (C3), fumarik asit (C4) xylitol (C5), glucasi asit (C6) ve gallik asit'dir. Bu ara ürünler taşıma, tekstil, gıda, çevre, sağlık ve tüketim gibi pek çok endüstri için büyük ölçekli kimyasallar olarak sentezlenir.

1.4.2.2. Enerji endüstrileri

Belki de biyokütlenin (odun vs.) insanoğlu tarafından ilk kullanım alanı ısınma ve yemek pişirme gibi enerji endüstrisidir. Fakat günümüzde biyokütlenin enerji üretiminde ve konutlarda ısıtma amacıyla kullanım yüzdesi %22 den daha azdır. Bunun nedeni petrolün taşıtlarda, kömür ve nükleer enerjinin elektrik üretiminde ve doğal gazın da ısıtma ve elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılmasıdır. Bunun başlıca sebebi fosil kökenli yakıtların ucuz ve kullanım kolaylığının olmasıdır. Biyokütlenin birincil enerji kaynağı olarak dünyadaki kullanım miktarı coğrafik ve sosyo ekonomik şartlara bağlı olarak değişmektedir. Örneğin; Nepal'de biyokütlenin kullanım oranı %90 iken, Ortadoğu ülkelerinde bu oran %0,1 civarındadır. Çünkü Ortadoğu ülkelerinde petrol ve doğalgaz bol iken odun ve diğer biyokütle kaynakları çok azdır. Nepal'de ise petrol ve doğalgaz bulunmaz iken biyokütle kaynakları boldur. Fakir ve gelişmekte olan ülkelerde odun ve diğer zirai ve hayvansal atıklar

yemek pişirmede yaygın olarak kullanılır (Klass, 1998; Acaroğlu, 2007; Basu, 2013 ve 2018; WBA, 2019).

Isı ve elektrik biyokütleden elde edilen birincil enerjinin iki şeklidir. Biyokütlenin karbon-nötral oluşundan dolayı gelişmiş ülkelerde verimli bir enerji kaynağı olarak kullanılırken pişirme amaçlı kullanımı daha çok az gelişmiş ülkelerde olmaktadır. Mevcut tesislerde fosil yakıtların (kömür, fuel-oil, doğal gaz) yerine biyokütle esaslı yakıtların kullanılması kavurma (torrefaction) işleminin geliştirilmesiyle daha basit olacaktır.

1.4.2.3. Taşıma endüstrileri

Ham petrolden elde edilen dizel ve benzin motoru taşıma endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Biyokütle esaslı yakıtlar (alkol ve biyodizel gibi) benzin ve dizele göre daha az zararlı gazlar yaydığından bunlarla karışım yapılarak otomobil, deniz taşıtları, kamyon ve otobüslerde kullanılabilir. Biyokütle esaslı yakıtlardan olan etanol şeker kamışı ve mısırdan biyodizel ise bitkisel yağlardan (ayçiçeği, kanola yağı gibi) elde edilir. Dizel ve benzinle bu iki biyoyakıt karıştırılarak kullanılabilir.

Piroliz, fermantasyon (mayalama) ve mekanik ekstraksiyon biyokütleden taşıma yakıtı üretiminde başlıca üç yöntemden biridir. Bunlardan ticari olarak en yaygın kullanılanı mayalama yöntemi olup şeker kamışı ya da mısır bitkisinden etanol elde edilir. Burada maya şekeri ya da nişasta fermente edilerek alkol (etanol) ve CO₂ meydana gelir. Daha sonra kimyasal işleme tabi tutularak elde edilen ticari kalitedeki etanol yakıldığında ya da motora konulduğunda önemli miktarda enerji açığa çıkar (Böyle, 2013; Basu, 2018).

Kolza tohumu gibi çekirdeklerden mekanik yöntemle bitkisel yağ çıkarmak binlerce yıldır uygulanmaktadır. Şimdi ise kanola yağı gibi bitkisel yağlar alkolle rafine edilerek (trans-esterifikasyon) metil ester yahut biyodizel üretilmektedir. Sıvı yakıt piroliz yöntemiyle üretilebilir ki bu yöntemde biyokütle havasız ortamda hızlı bir şekilde ısıtılır. Piroliz işleminden elde edilen sıvı ürün biyo-yag olup hidrojenle

muamele edilip “yeşil dizel” ya da “yeşil benzin” elde edilir. Böylece biyokütleden elde edilen etanol ve biyodizel taşıtlarda yakıt olarak kullanılır. Diğer taraftan, gazlaştırma ve havasız ortamda hayvan gübresinin karıştırılmasıyla biyokütleden metan gazı üretilir. Elde edilen bu metan gazı direkt olarak taşıtlarda yakıt olarak kullanılabilir gibi yeşil benzine de dönüştürülebilmektedir (Klass, 1998; Acaroğlu, 2007; Basu, 2013).

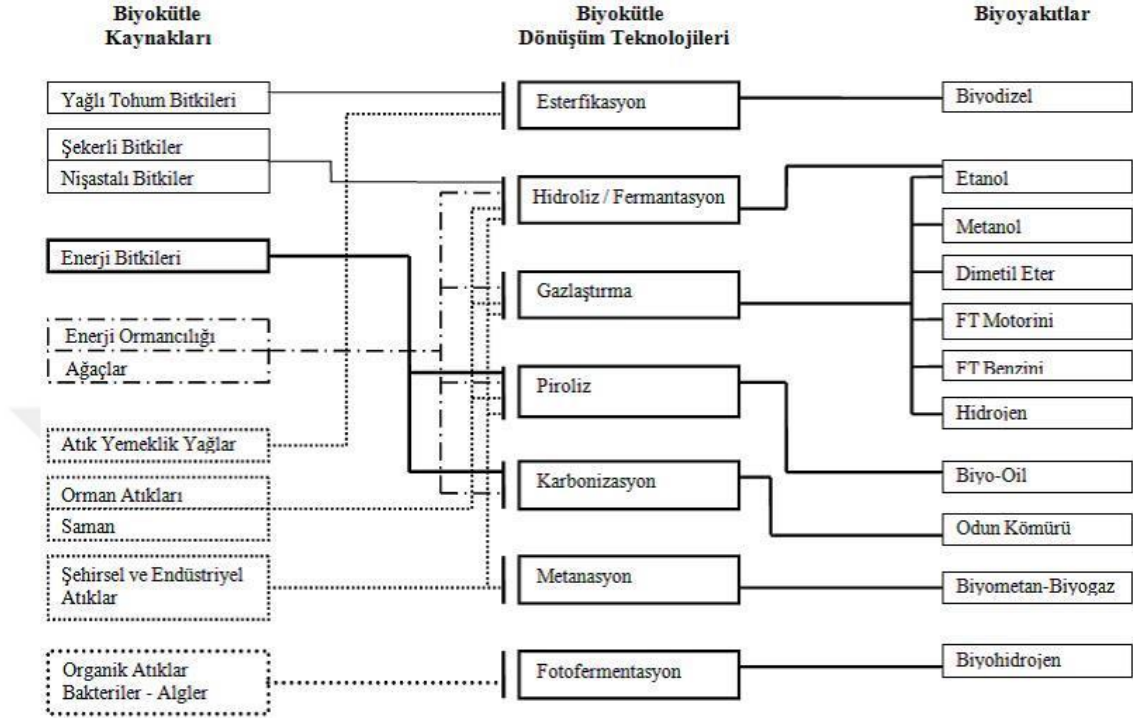
1.4.2.4. Çevre endüstrileri

Biyokütleden elde edilen aktif odun kömürünün başlıca önemli uygulama alanlarından biri kirlilik kontrol endüstrisidir ve suyun filtre edilmesinde yaygın olarak kullanılır. Aktifleşmiş odun kömürü çinko klorür gibi uygun kimyasallarla adsorbe edilerek termik santrallerdeki baca gazından cıvanın uzaklaştırılmasında oldukça etkilidir (Klass, 1998; Acaroğlu, 2007; Basu, 2013). Biyokütleden elde edilen katran, havadaki ya da baca gazındaki karbondioksitin kolay ve ucuz olarak tutuşmasını sağlar. Biyokütlenin pirolizinden elde edilen biyo-katran atmosferde biriken karbon dioksiti depolamak için önemli bir tutucu madde görevi görür. Bunun yanında katran toprağa atılırsa gübre görevi yaparak bitki yetişmesinde fayda sağlar (Lehman ve ark., 2006). Böylece katran doğal yoldan toprağa karışarak atmosferdeki karbon dioksit miktarını arttırmaz. Dolayısıyla biyokütle atmosferdeki karbon dengesini koruduğundan ‘karbon nötral’dir (Basu, 2018).

1.5. Biyokütle Dönüşümü

Biyokütlenin hacmine göre düşük enerji yoğunluğu ve taşıma için uygun olmayan şekli fosil kaynaklardan biyokütle esaslı yakıtlara hızlı bir geçiş yapmanın önündeki en büyük engeldir. Gaz ve sıvıların aksine biyokütle kolayca toplanmaz, depolanmaz ve taşınmaz. Bu durum katı biyokütlenin sıvı ve gaz yakıtlara dönüştürülmesinde başlıca etken olup böylece enerji yoğunluğu daha fazla olan yakıta dönüştürülen biyokütle oldukça kolay bir şekilde toplanarak depolanabilir. Bu dönüşüm başlıca iki yöntemden biriyle yapılabilir (Şekil 1.6): biyokimyasal dönüşüm (mayalama) ve termokimyasal dönüşüm (piroliz, gazifikasyon). Böylece biyokütleyle uygulanan bu

işlemlerle düşük enerji yoğunluklu ve taşıma için uygun olmayan özellikler giderilerek daha kullanışlı ve enerji yoğunluğu yüksek bir yakıt elde edilmiş olur.



Şekil 1.6. Biyokütlenin sıvı ve gaz yakıtlar ile kimyasallara dönüştürülme yöntemleri (Acaroğlu, 2007)

Biyokimyasal dönüşüm belki de biyokütlenin gazlaştırılmasının en eski yöntemidir. Hindistan ve Çin, yerel enerji ihtiyaçları için hayvan atıklarından havasız ortamda mikrobiyolojik yöntemle metan gazı üretmektedir. Günümüzde ise mısır şurubundan fermantasyon yöntemiyle taşıt yakıtları için etanol üretilmektedir. Biyokütlenin termokimyasal dönüşümüyle gaz yakıtlar elde edilebilir. İkinci dünya savaşı esnasında küçük ölçekli biyokütle gazlaştırıcı üniteler kullanılarak hem taşıtların ve hem de endüstrinin yakıt ihtiyacı endüstriyel ölçüde sağlanmıştır.

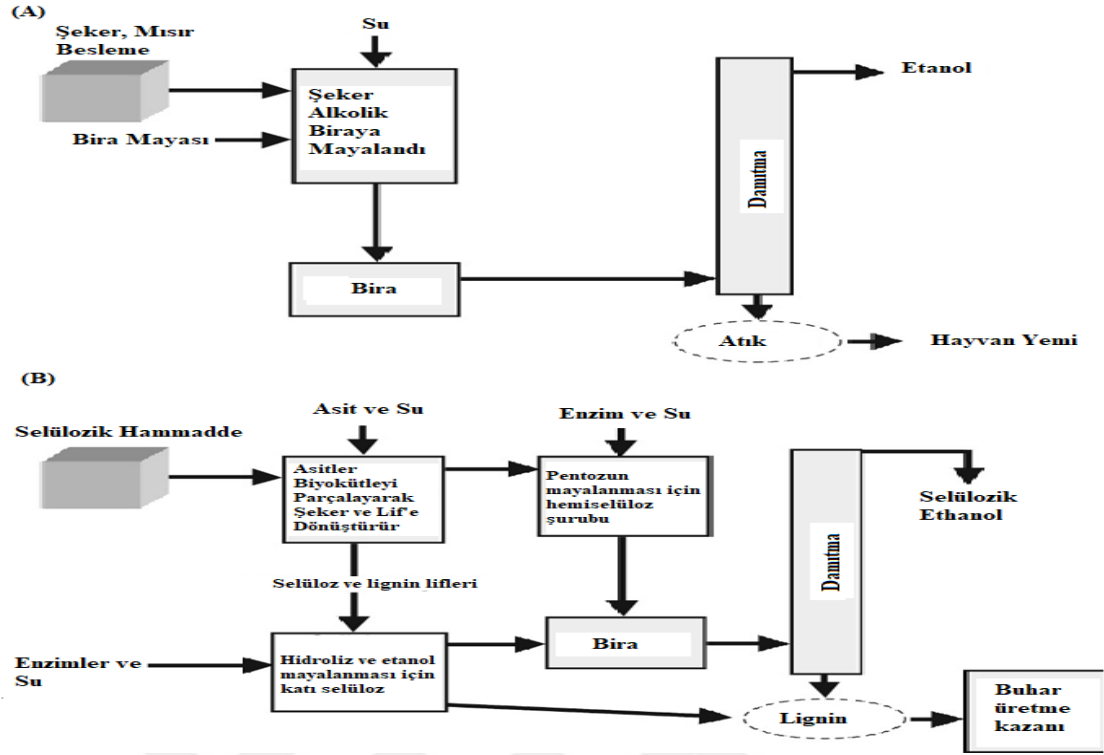
1.5.1. Biyokimyasal dönüşüm

Biyokimyasal dönüşümde, biyokütle molekülleri bakteri ya da enzimlerle daha küçük moleküllere parçalanırlar. Bu işlem termokimyasal dönüşüm işleminden çok daha yavaştır, fakat dışardan fazla enerji sisteme verilmesine ihtiyaç duyulmaz. Biyokimyasal dönüşüm için üç temel yöntem vardır:

- Yumuşatma/özümleme (digestion) (oksijenli ve oksijensiz ortam)
- Mayalama
- Enzimatik ya da asidik hidroliz

Oksijensiz ortamda gübrenin özümlemesinin başlıca ürünleri metan, karbondioksit ve katı atıktır. Bakteri, çevre havası yerine kendiliğinden biyokütleden oksijen alarak metan ve karbondioksiti açığa çıkarır. Havalı ortamdaki yumuşatma ya da kompostlama yöntemi ise biyokütlenin biyokimyasal yöntemle parçalanması olup işlem oksijen varlığında meydana gelir. Bu işlem farklı türdeki mikro organizmaları kullanır ve bunun için gerekli oksijeni havadan alarak karbondioksit, katı atık ve ısı üretir. Fermantasyonda (mayalama) biyokütlenin bir kısmı asit ve enzimler kullanılarak şekerlere dönüşür. Oluşan şeker mayalanarak etanol ya da diğer kimyasallara dönüşür. Diğer taraftan biyokütledeki lignin mayalanma ile şekere dönüşmez ancak termokimyasal yöntemle kimyasal maddelere dönüşür. Oksijensiz ortamda yumuşatmanın aksine oksijenli ortamda yapılan bozundurma işleminde ise ürün sıvıdır (Klass, 1998; Bridgwater, 1995, 1999 ve 2001).

Şeker esaslı hammaddenin ve nişastanın (örneğin mısır ve şeker kamışı) mayalanması ile etanole dönüşmesi ticari olarak çok gelişmiş bir prosestir, fakat burada selülozik biyokütle kullanılmaz (Şekil 1.7). Çünkü hem pahalıdır hem de parçalanıp mayalanarak şekerimsi maddelere dönüşmesi zordur. Şeker kamışı gibi lignoselülozik hammaddeler önceden hidroliz işlemine (asitik, enzimatik ya da hidrotermal) tabi tutularak mayalama işlemiyle bakteriler vasıtasıyla selüloz ve hemiselülozun parçalanmasıyla gerekli basit şekerlere dönüşürler. Asit hidroliz teknolojisi enzimli hidroliz teknolojisine göre daha gelişmiş bir teknolojidir, fakat enzimatik teknoloji daha ucuzdur (Bridgwater ve ark., 2002).

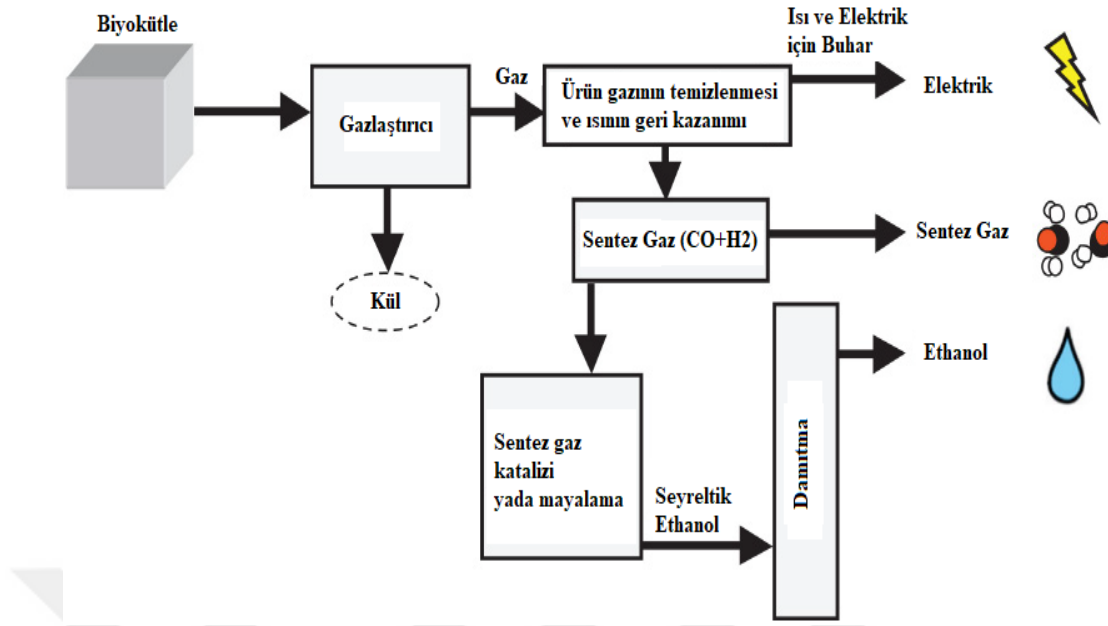


Şekil 1.7. Şeker ve selülozik biyokütleden etanol üretmek için biyokimyasal iki yöntem: (A) Şeker ve mısırdan etanol eldesi, (B) Selülozik biyokütleden etanol eldesi.(Basu, 2018)

1.5.2. Termokimyasal dönüşüm

Termokimyasal dönüşümde biyokütlenin tümü gaz ürünlere dönüşerek ya direkt yakıt olarak kullanılır ya da istenen kimyasal maddelerin sentezi için kullanılır (Şekil 1.8). Sentez gazının fisher-tropsen yöntemi ile otomobil yakıtlarına sentezi termokimyasal dönüşüme örnektir. Bu yöntemde ısı enerjisinin açığa çıkması dönüşümü sağlamada başlıca yürütücü kuvvet olup reaksiyon beş ana basamaktan oluşmaktadır:

- Yanma
- Karbonlaşma/kavurma
- Piroliz
- Gazlaşma
- Sıvılaşma



Şekil 1.8. Enerji, gaz ve etanol üretimi için termokimyasal işlem.(Basu, 2018)

Şekil 1.8’de görüldüğü gibi biyokütle önce sentez gaza dönüştürülerek daha sonra sentez ya da bazı diğer yöntemlerle etanole dönüştürülür. Tablo 1.9’da ise biyokütlelerin dönüşümünde kullanılan ve yukarıda ifade edilen bu beş kimyasal kademe karşılaştırılmaktadır. Ayrıca bu beş kademenin reaksiyon sıcaklık aralıklarını vermektedir.

Tablo 1.9. Biyokütle için önemli bazı termokimyasal dönüşme yöntemlerinin karşılaştırılması (Basu, 2018).

Proses	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	Kataliz	Kurutma
Sıvılaştırma	250-330	5-20	Gerekli	Gerekmez
Piroliz	300-600	0.1-0.5	Gerekmez	Gerekli
Yanma	700-1400	0.2-1.0	Gerekmez	Faydalı
Gazlaşma	500-1300	0.2-1.0	Gerekmez	Gerekli
Kavurma	200-300	0.1-0.2	Gerekmez	Gerekli

Yanma, yüksek sıcaklık ekzotermik oksidasyon (oksijence zengin çevre şartları) sonucunda sıcak baca gazı oluşturur. Karbonlaştırma geniş sıcaklık aralıklı bir kimyasal işlem olup organik maddelerin karbon içeriği termokimyasal bozunmayla artar. Biyokütle için daha sınırlayıcı bir uygulama odunun kömürü eldesidir ki bu işlemde odun yığını toprakla örtülür ve yukarıda bir baca bırakılarak 500-900 °C sıcaklık aralığında odunun yavaşça ısıtılır. Kavurma işleminde ise biyokütle

oksijensiz ya da az oksijenli ortamda 200-300 °C gibi düşük sıcaklık aralığında ısıtılır.

Yanmanın aksine gazlaştırma oksijensiz ortamda belli bir ısıtma değerine sahip ürünlerin elde edildiği kimyasal reaksiyonları içerir. Piroliz işlemi ise oksijensiz ortamda biyokütlenin hızlı bir şekilde ısıtılmasıdır. Sıvılaştırmada ise büyük moleküllü katı hammadde daha küçük moleküllere sahip sıvı faza dönüşür. Bu dönüşüm katalizör mevcudiyetinde ve düşük sıcaklıklarda meydana gelir.

Etanol üretimi için biyokimyasal yöntem termokimyasal yöntemle göre ticari olarak daha gelişmiştir fakat biyokimyasal yöntemde hammadde olarak şeker ya da nişasta gereklidir ve daha verimli lignoselülozik madde kullanmaya gerek yoktur. Sonuç olarak, kullanılan biyokütlenin büyük bir kısmı etanole dönüşmez. Örneğin, mısır bitkisinde etanol üretimi için sadece mısır taneleri kullanılır. Geri kalan mısırın koçanı, sapı ve yaprakları lignoselülozik atık olarak kalır. Dolayısıyla nişasta ya da şeker için mısır bitkisinin sadece taneleri işe yarar. Geri kalanlar hayvan yemi ya da enerji elde etmek için yakma fırınlarında yakılır. Her ne kadar enzimatik ya da biyokimyasal yöntem daha gelişmiş teknikler ise de bu yöntemler kesikli işlem ve termokimyasal prosese göre daha uygun sürede tamamlanır (Klass, 1998; Basu, 2007 ve 2013).

1.5.2.1. Yanma

Biyokütlenin yakılması insanoğlunun ateşi bulmasıyla başlayan en eski biyokütleden faydalanma yöntemidir. Ormandan sağlanan odun hem yemek pişirmede hem de ısıtmada asırlarca yarar sağlamıştır. Odunun yanması ekzotermik bir reaksiyon olup biyokütlerdeki oksijenle hidrokarbon arasında meydana gelir. Burada biyokütle iki önemli kararlı bileşik olan H_2O ve CO_2 'ye oksitlenir. Reaksiyonda açığa çıkan ısı pişirme ve ısıtma ihtiyacı için kullanılan enerjinin önemli bir kısmını teşkil eder. Özellikle az gelişmiş ülkelerde odun ve benzeri biyokütlesel yakıtlar fazla miktarda kullanılmaktadır (Klass, 1998; Brown, 2011).

Isı ve elektrik biyokütleden elde edilen enerjinin başlıca iki çeşididir. Özellikle kırsal bölgelerde günümüzde bile odun ve diğer biyokütle atıkları yemek pişirme ve ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Diğer taraftan biyokütle yakma kazanlarında elde edilen buhar, endüstride ikili ısıtma ya da tekli ısıtma şeklinde kullanılır. Ayrıca odun talaşından elde edilen sıkıştırılmış silindirik parçacıklar (pellet) sobalarda yakılarak ısıtma amaçlı ya da yemek pişirme amaçlı olarak son zamanlarda giderek artan miktarda kullanılmaktadır. Yine odun ve kömürü belli oranlarda karıştırıp termik santrallerde elektrik üretmek için yakma işlemi, havanın daha az kirlenmesini sağlamak ve daha yerli kaynaklarla elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Böylece yenilenebilir ve daha temiz olan biyokütle ile fosil yakıt olan kömür birlikte yakılarak hem yöresel hem de çevreyi daha az kirleten yöntemlerle elektrik üretimi mümkün olmaktadır (Abnisa ve ark., 2013; Abdoulmoumine ve ark., 2015; Açıkalın ve Karaca, 2017).

1.5.2.2. Piroliz

Yanmanın tersine piroliz oksijensiz ortamda meydana gelir ve bu işlemin gerçekleşmesinde gerekli ısıyı sağlamak için kısmi yanmaya izin verilir. Bu proseste biyokütle, 300-400°C sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda hızlıca ısıtılarak gaz, sıvı ve katı ürünlere dönüşür (Bridgwater ve ark., 2001 ve 2002).

Pirolizde, biyokütlenin büyük boyutlu hidrokarbon molekülleri daha küçük moleküllere parçalanır. Hızlı piroliz ile başlıca biyo-yağ olarak bilinen sıvı yakıt üretilirken yavaş pirolizle az miktarda gaz ürün ve katı odun kömürü (başlıca en eski yakıtlardan olup ısıtma ve kömür bulunmadan önce de metallerin eldesinde kullanılmaktadır) üretilir. Piroliz işlemi atık biyokütlenin faydalı sıvı yakıtlara dönüşmesini sağlar. Yanmanın aksine piroliz olayı ekzotermik değildir (IEA, 1998; Apaydın-Varol ve ark., 2007; Ilknur ve ark., 2012; Kara, 2012).

1.5.2.3. Kavurma (Torrefaksiyon)

Kavurma işlemi biyokütlenin temiz ve uygun katı bir yakıt olarak etkili bir şekilde kullanılması için uygulanabilecek bir yöntemdir. Bu işlemde, biyokütle 200-300°C sıcaklığa, oksijensiz ya da az bir oksijen temasıyla yavaşça ısıtılır. Kavurma işlemi; biyokütle hidrokarbonunun kimyasal yapısını, karbon miktarını artırıp oksijen miktarını azaltacak şekilde değiştirir. Yine kavurma işlemi biyokütlenin enerji yoğunluğunu artırır ve biyokütleyi higroskopik yapar. Böylece bu işleme tabi tutulan odunun enerji üretmek ve taşımacılıkta yakıt olarak kullanmak için ticari değeri artar (Gupta ve ark., 2014; Kar ve ark., 2019).

1.5.2.4. Gazlaştırma

Gazlaştırma ister fosil olsun ister olmasın tüm yakıtları (katı, sıvı ya da gaz) faydalı gazlara ve kimyasallara dönüştürür. Gazlaştırma, reaksiyon için gaz ya da süperkritik su gibi bir ortam ister (kızgınlaşma sıcaklığı altındaki şartlarda normal suyla karışmaz). Gaz ortamlar hava, oksijen, subkritikal buhar (kızgın buhar) ya da bunların bir karışımını ihtiva eder (içerir) (Diebold ve ark. 1997; Diebold ve Bridgwater, 1997).

Günümüzde, fosil yakıtların gazlaştırılmasıyla sentetik gazların üretimi; biyokütle gibi fosil olmayan yakıtlara göre daha çok kullanılır. Bununla birlikte biyokütle bir halden (katı) diğer bir hale (sıvı ya da gaz) dönüşme potansiyeli olan bir yakıttır. Bu tür bir dönüşüm için birkaç önemli husus olup bunlar aşağıda verilmektedir (Demirbaş, 2000 ve 2001; Demiral ve Sensöz, 2006a, b ve 2008; Dehiya, 2015):

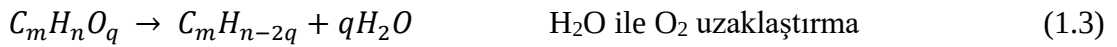
- Azot ve su gibi yanmayan bileşikleri yakıttan uzaklaştırarak yakıtın ısıtma değerini artırmak.
- Gaz yakıt kükürttten temizlenmelidir, çünkü yandığı zaman yakıttaki kükürt SO₂ ye dönüşerek havayı kirletir.
- Yakıttaki H/C kütle oranını artırmak
- Yakıttaki oksijen miktarını azaltmak

Genelde, bir yakıtın yüksek hidrojen içeriği daha düşük buharlaşma sıcaklığı ve dolayısıyla yakıtın gaz halinde bulunma ihtimalinin yüksekliği demektir. Gazlaştırma ya da piroliz aşağıdaki yöntemlerden biriyle ürünlerdeki bağlı hidrojen içeriğini (H/C oranı) artırır (Klass, 1998; demirbaş, 2000; Crocker, 2010; Basu, 2018):

1. Direkt: Yüksek basınçta direkt hidrojene maruz bırakmak
2. İndirekt: Yüksek sıcaklık ve basınçta buharla temas ettirmek. Burada hidrojen ara ürün olup esas ürüne ilave edilir. Bu işlem aynı zamanda buhar reformingini içerir.
3. Piroliz ya da devolatilizaion (uçucu giderme): katı katran ya da CO₂ gaz vasıtasıyla karbonu uzaklaştırarak karbon içeriğinde azalma.

Biyokütlenin gazlaştırılması yakıttan oksijeni uzaklaştırarak enerji yoğunluğunu artırır. Örneğin; normal bir biyokütle ağırlıkça %40 oranında oksijene sahiptir, fakat gazlaştırılan yakıttaki oksijen miktarı çok düşüktür. Biyokütleden oksijenin uzaklaştırılması ya dehidrasyon (su uzaklaştırma) (Eşitlik (1.3)) ya da dekarboksilasyon (Eşitlik (1.4)) reaksiyonlarıyla sağlanır. Dekarboksilasyon reaksiyonu CO₂ halinde oksijeni uzaklaştırırken aynı zamanda karbonu da uzaklaştırarak yakıtın H/C oranını artırır. Gazlaştırma ürününün avantajı yandığı zaman çevreye daha az sera gazı salınmasıdır.

Su Uzaklaştırma (Dehidrasyon):



Karbondioksit Uzaklaştırma (Dekarboksilasyon):



Amonyak üretmek için gerekli hidrojen gazı doğal gazdan elde edilir (doğalgazın başlıca bileşeni CH₄'tür) ki bu yöntem buhar reformingi olup sentez gazını ürün olarak verir. Sentez gazı da H₂ ve CO gazlarının bir karışımıdır. Sentez gazındaki CO

indirekt olarak buharla hidrojenlendirilerek metanol (CH_3OH) elde edilir; bu pek çok kimyasal maddenin üretiminde hammadde olarak kullanılır. Bununla birlikte bu proses fosil yakıt olan (yenilenebilir olmayan) doğal gazı kullanır ve atmosfere CO_2 gazı salarak sera gazlarının (GH_6) oluşmasına sebep olur. Diğer taraftan biyokütle, yakıt ya da kimyasal hammadde olarak fosil hidrokarbon yakıtlarla yer değiştirir. Böylece, biyokütlenin CO ve H_2 gazına dönüştürülmesi (gazifikasyon) taşıtlar için benzin, metanol ve sentetik kimyasalların üretimi için iyi bir temel işlemdir. Yine biyokütlenin gazlaştırılması ile enerji üretiminde direkt yakılabilen metan üretilir (Cheremisinoff ve ark., 1980; Gupta ve ark., 2014; Basu, 2007).

1.5.2.5. Sıvılaştırma

Katı biyokütlenin sıvılaştırılması; piroliz, gazlaştırma ve hidrotermal prosesle yapılabilir. Hidrotermal işlemde, biyokütle $300\text{-}350^\circ\text{C}$ sıcaklığa yükseltilmiş, $12\text{-}20$ MPa basınç aralığındaki su ile temas ettirilerek sıvılaştırılır. Ayrıca süperkritik buhar prosesi içeren diğer bazı yöntemler de vardır (Kumar ve Pratt, 1996; Lehman ve ark., 2006; Kim ve ark., 2013; Li ve Ge, 2016; Keleş ve ark., 2011 ve 2017; Kar ve ark., 2019).

1.6. Biyokütle Dönüşümünün Faydaları

Biyokütlenin ısı ve aydınlatma amacıyla ilk çağlardan beri kullanılması insanoğluna çok önemli faydalar sağlamıştır. Günümüzde bile özellikle kırsal kesimde yemek pişirme ve ısıtma amacıyla odun ve benzeri yakıtlar yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Dolayısıyla odunun dönüştürülerek enerji yoğunluğunu yükseltmek ve taşınmasını kolaylaştırmak için son zamanlarda oldukça fazla bilimsel çalışma yapılmaktadır. Amaç; hem biyokütlenin kullanımını yaygınlaştırmak hem de fosil yakıtlardan kaynaklanan çevre kirliliğini azaltmaktır. Yani dönüştürme yöntemlerini kullanmak, biyokütleyi bir manada kömür ve petrol yerine geçirerek ekonomik değerini arttırmaktadır. Biyokütlenin gaz ya da sıvı yakıtlara dönüştürülmesinde önemli rol oynayan başlıca faydalar aşağıda verilmektedir (IEA, 1998; Mohan ve ark., 2006; Basu, 2007; IEA, 2017, 2018 ve 2019):

- Yenilenebilir olma faydası
- Çevresel faydalar
- Sosyopolitik faydalar

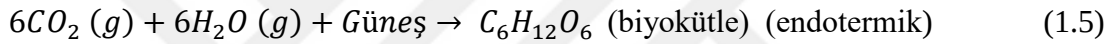
1.6.1. Yenilenebilir (sürekli tekrarlanabilir) olma faydası

Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar pratikte enerji kaynağı olarak çok uygundurlar ve insanoğlunun ihtiyacını etkili bir şekilde karşılarlar. Bununla birlikte önemli bir problem bu yakıtların yenilenebilir olmaması ve rezerv ömürlerinin sınırlı olmasıdır. Diğer taraftan biyokütle ekilip büyüeyebilen bir yapıda olduğu için yenilenebilirdir. Örneğin mısır bitkisini ele alalım; Nisan ayında dikilen mısır Eylül yada Ekim ayında hasad edilir, seneye tekrar ekilip biçilir ve bu böylece devam edeceği için odun, mısır, buğday, ot gibi biyokütle esaslı bitkiler, sebzeler, meyveler ve ağaclar yenilenebilir özelliğe sahiptirler. Buna karşın fosil yakıtların oluşabilmesi için milyonlarca yıla ihtiyaç vardır. Dolayısıyla bir ya da iki senede yetişen biyokütlesel yakıtların yanında fosil yakıtların yetişmesi için milyonlarca yıla ihtiyaç olması bunların yenilenebilir olmadıklarını gösterir. Böylece yenilenebilir yakıt olan odun ve odunsu bitkiler hiç tükenmez iken petrolün 60, doğalgazın 80 ve kömürün ekonomik ömrünün 200 yıl olduğu hesaplanmaktadır. Ayrıca biyokütle hem tahıl ve ham meyve, hem de sebze olarak insanlığın gıda ihtiyacını karşılamaktadır. Ayrıca ormanlardaki kereste ve kavak ağacları konut ve mobilya imalatında kullanılmaktadır. Kullanım sonucu geri kalan odun ve bitki atıkları yakıt olarak kullanılarak hem konut ısıtma hem de elektrik elde edilmesinde kullanılabilir. Yine mayalama (fermantasyon) ve termokimyasal dönüşümde mısır, şeker kamışı gibi bitkilerden biyodizel, metanol gibi taşıt yakıtları üretilebilir. Dünyada bunun en iyi örneği Brezilya'dır.

Diğer taraftan biyokütle fotosentez reaksiyonu ile oluşurken CO₂ ve H₂O hammadde olarak kullanılır, gerekli reaksiyon enerjisi de (endotermik reaksiyon) güneş tarafından sağlanır. Eğer reaksiyonun meydana gelmesi için yeterli enerji (güneş) yoksa bu durumda bitkilere yeşil rengi veren klorofil katalizör görevi yaparak yavaş

olan reaksiyonu hızlandırır. O halde ormanlar, meyve ağaçları, bitkiler ve diğer biyokütle esaslı canlı organizmalar aynı zamanda atmosferdeki CO₂'yi tüketerek büyürler. Yine ormanların ve ağaçların bol olduğu yerlerde havadaki oksijen miktarı fazladır. Bundan dolayı ormanların korunması ve yakıt için hızlı büyüyen enerji ormanlarının yetiştirilmesi gerekir. Ayrıca biyodizel ve etil alkol üretimi yapılırken gıda dengesine dikkat etmek gerekir. Bunun için biyokütleyi sadece yakıt olarak dikkate almamak gerekir. Gıda, barınak, mobilya, oksijen deposu, CO₂ tüketicisi, erozyondan koruyucu ve doğal güzellik gibi pek çok faydasını dikkate almak ve ona göre doğal dengeyi bozmayacak üretim ve tüketim planlamaları yapmak sürdürülebilir bir yaşam için önemlidir (Uzun ve ark., 2006; Yang ve ark., 2007).

Fotosentez reaksiyonu:



1.6.2. Çevresel faydalar

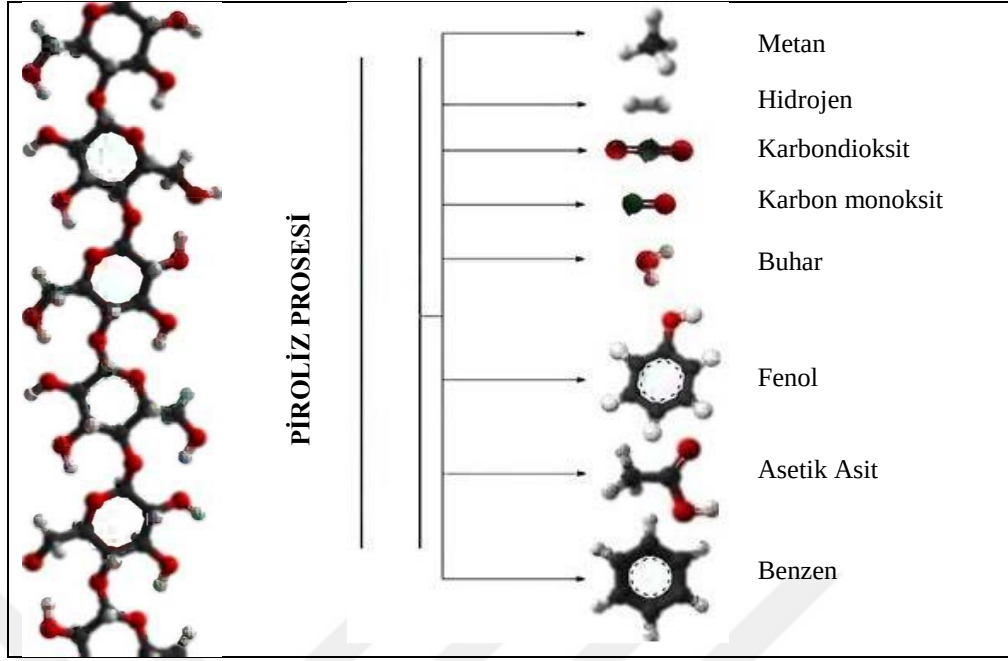
Küresel ısınmanın artmasıyla insanoğlunun yol açtığı sera gazı emisyonlarının (GHG) azaltılması giderek önem kazanmaktadır. Diğer taraftan NO, SO₂ ve Hg gibi hava kirleticisi diğer emisyonlar da giderek artış göstermekte ve yaşamı tehdit etmektedir. Dolayısıyla günümüzde hava kirliliği ve iklim değişimi yaşam alanlarını olumsuz etkilemektedir. Bundan dolayı temiz enerji kaynaklarının kullanımı hem insan sağlığı hem de temiz ve yaşanılabilir çevre açısından çok önemli hale gelmektedir. Bu bağlamda biyokütlenin daha fazla kullanılması hem enerji üretimi hem de iklim değişikliğine yol açan sera gazlarının azaltılmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Yeryüzünün orman ve ağaçlarla kaplanması hem enerji ve CO₂'yi tutma hem de gıda ihtiyacını karşılama açısından hayati öneme sahiptir. Biyokütle fotosentezle oluşurken havadaki CO₂ gazını ve su buharını kullanır. Yandığı zaman da havaya kullandığı CO₂'yi tekrar verdiği için biyokütle karbon dengesi için nötraldir. Yani biyokütle yetişirken atmosferden aldığı kadarını yandığı zaman tekrar geri verdiği için karbon dengesini bozmaz (Tilman, 1978; Acaroğlu, 2007; Basu, 2007 ve 2018; Boyle, 2013; TMMOB, 2020).

Fosil yakıt kaynakları kullanılarak yapılan enerji üretiminin çevreye zarar verdiği bilinen bir gerçektir. Bu nedenle, kullanılacak olan herhangi bir enerji kaynağı çevre etkisi ile değerlendirilmelidir. Küresel çevre sorunları doğrudan doğruya tüketilen enerjiye, daha doğrusu yüksek oranda kükürt ve diğer zararlı maddeleri içeren fosil yakıt kullanımına bağlıdır. Diğer taraftan, Dünyada son yüzyılda enerji tüketimi 17 kat artarken fosil yakıtlardan kaynaklanan ve atmosfere atılan CO₂, SO₂ ve NO_x gibi zararlı gazlar da benzer oranda artmıştır.

Biyokütlenin bölgesel ve modern işletilmesi ile özellikle enerji hatlarından uzak bölgelerde, gelişen ve kendi kendine yetecek enerjilerini de elde eden yerleşim alanları oluşturmak mümkün olabilmektedir. Biyokütleden enerji eldesi için daha çok tarım işçiliğine gerek duyulduğundan, biyo-enerji konusu, özellikle kırsal kesimde iş alanları yaratma açısından ideal bir seçenek sunmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerin karşılaştığı en büyük sorunlardan biri olan kırsal kesimden büyük şehirlere göç olayını da bu şekilde önlemek mümkün olabilmektedir. Biyokütlenin oldukça çorak alanlarda yetişmesi ile daha önce yararlanılamayan toprakların kullanılması ve kırsal alanların yetiştiricilik açısından değerlendirilmesi oldukça büyük öneme sahiptir (Acaroğlu, 2007 ve 2013).

1.7. Pirolizin Tanımı ve Kimyasal Mekanizması

Piroliz; biyokütlenin oksitleyici kimyasalların (başlıca oksijen) yokluğunda ya da önemli ölçüde gazlaşmaya izin vermeyen ortamda termokimyasal olarak faydalı ürünlere ayrışmasıdır. Piroliz aynı zamanda gazlaştırmanın birkaç başlangıç reaksiyon adımını oluşturur. Piroliz sırasında biyokütlenin büyük karmaşık hidrokarbon molekülleri, nispeten daha küçük ve daha basit gaz, sıvı ve karbonca zengin katı moleküllerine ayrılır (Şekil 1.9).



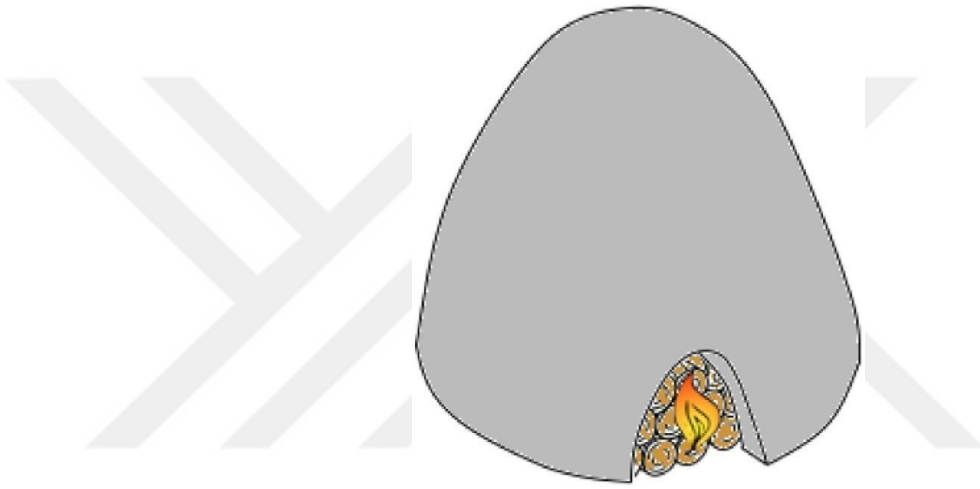
Şekil 1.9. Piroliz sırasında büyük hidrokarbon moleküllerinin daha küçük parçalara ayrışması (Basu, 2018).

Piroliz işlemi; çatlama, gaz alma, karbonizasyon, kavurma-kurutma, kuru damıtma, yıkıcı damıtma ve termoliz gibi süreçlerle benzerlik gösterir. Biyokütlenin pirolizi, tipik olarak, gazlaştırma için 800-1000 °C'ye ve kavurma-kurutma için 200-300 °C'ye kıyasla 300-650 °C'lik bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Karbonca zengin durum, biyokütle pirolizinin katı ürünüdür. Bu, karbonu atmosfere bırakan tarımsal ürünün veya orman kalıntılarının tamamen yanmasına bir alternatif sağlar.

1.7.1. Biyokütle pirolizinin tarihçesi

Biyokütlenin karbonca zengin olması onun yüzlerce yıldır toprakta kararlı bir şekilde katı halde bulunmasını sağlar. Kömür bulunmazdan önce insanlar madenleri eritmek için odunun piroliz yöntemini kullandılar. Piroliz yoluyla odundan odun kömürü üretimi, demir-çelik üretiminde demiri cevherinden elde etmek için gerekliydi. Şekil 1.10, yavaş bir piroliz işlemi kullanarak biyokütleden odun kömürü üretmek için eski zamanlarda kullanılan tipik bir kovanlı fırını göstermektedir. Bu uygulama, odun ihtiyacı neredeyse bitene kadar devam etti ve yeraltı madenlerinden ucuz olarak üretilen kömür, demir üretimi için odun kömürünün yerini aldı. Modern petrokimya endüstrisi, piroliz kullanarak kerosenin üretimi için icadın büyük bir kısmını buna

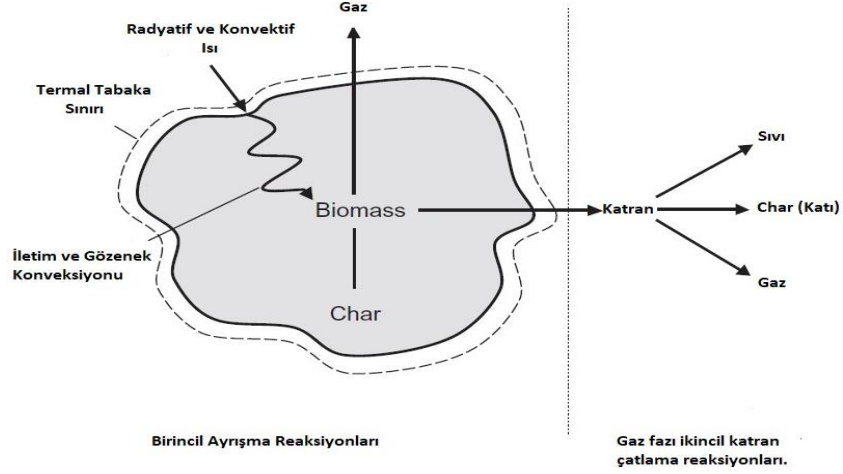
borçludur. Eskiden bakır kapları kalaylamak için gezici kalaycı ustaları yüksek sıcaklık elde etmek için ormandan aldıkları gürgen gibi yüksek kalorili odunları Şekil 1.10 da görülen basit bir düzenek yardımıyla yığınlar haline getirip üzerini toprakla örtüyorlardı en üst kısma gazların çıkması için bir baca deliği açıyorlardı. Böylece havasız ortamda odunun piroliz yöntemiyle kömürleşme sağlanıyordu. Elde edilen bu odun kömürleri yakılar kalay eritilip bakır kapların üzeri örtülüyordu. Yani bakırın okside olmaması için kalayla kaplanıyordu. Günümüzde odun kömürü daha modern ve daha yüksek verimlerle elde edilmektedir.



Şekil 1.10. Odunun yavaş piroliziyle kömür üretimi için kovanlı fırın (Basu, 2018).

1.7.2. Biyokütlenin pirolizi

Piroliz, piroliz sıcaklığı olarak bilinen maksimum sıcaklıkta hava veya oksijen yokluğunda biyokütlenin hızlı bir şekilde ısıtılmasını ve yoğuşmamış gazların katı kömür ve sıvı ürün üretmek için belirli bir süre boyunca tutulması sürecini içerir. Sıvı ürün pirolizde birincil önceliktir. Ürününün yapısı piroliz sıcaklığı ve ısıtma oranı olmak üzere başlıca iki faktörlere bağlıdır. Pirolizin ilk ürünü yoğunlaştırılmış gazlar ve katı kömürdür. Yoğuşabilir gaz daha fazla yoğunlaşabilir olmayan gazlara (CO , CO_2 , H_2 ve CH_4), sıvıya ve kömüre ayrılabilir (Şekil 1.11). Bu ayrışma kısmen gaz fazı homojen reaksiyonları ve kısmen de gaz fazı heterojen termal reaksiyonlar yoluyla gerçekleşir.

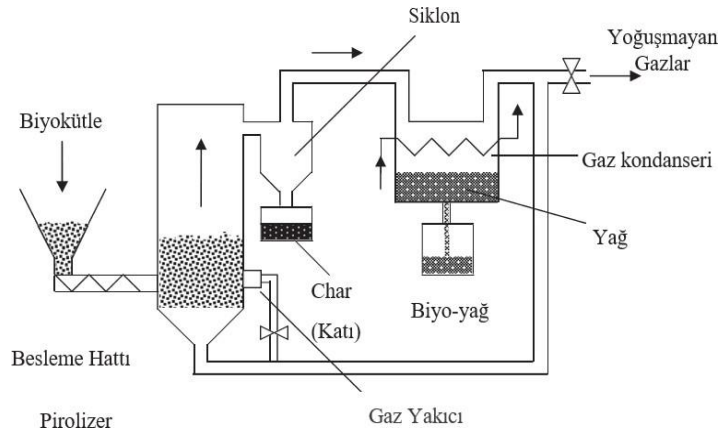


Şekil 1.11. Biyokütle parçacığında piroliz işlemi (Basu, 2018)

Gaz fazındaki reaksiyonlar, yoğunlaşan buhar CO ve CO₂ gibi daha az yoğunlaştırılabilir kalıcı gaz moleküllerine ayrılır. Piroliz işlemi, aşağıdaki gibi bir genel reaksiyon ile temsil edilebilir:



Piroliz bir gazlaştırıcıda gerekli bir ön adımdır. Bu adım, özellikle hızlı karıştırma ile reaktörlerde nispeten hızlıdır. Şekil 1.12’de bir akışkan yataklı piroliz prosesi şematik olarak görülmektedir. Biyokütle, ayrışımın başladığı piroliz sıcaklığına ısıtan sıcak katılar (akışkan yatak) içeren bir piroliz odasına beslenir. Biyokütleden salınan yoğunlaşabilir ve yoğunlaşmayan buharlar odadan ayrılırken, üretilen katı odun kısmen haznede ve kısmen de gazda kalır.



Şekil 1.12. Basit bir piroliz prosesinin şeması (Basu, 2018)

Gaz, kömürden ayrılır ve reaktörün aşağı akış yönünde soğutulur. Yoğunlaşan buhar biyo-petrol veya piroliz yağı olarak yoğunlaşır. Yoğuşmayan gazlar, ortamı istenen ürün gazı olarak terk eder. Benzer şekilde katı biyokütle, kullanılabilir bir ürün olarak toplanabilir veya piroliz için gerekli olan ısıyı üretmek üzere ayrı bir bölmede yanabilir. Bu gaz oksijensiz olduğundan, bir kısmı bir ısı taşıyıcı veya akışkanlaştırma aracı olarak piroliz odasına geri döndürülebilmektedir.

1.7.3. Piroliz ürünleri

Daha önce bahsedildiği gibi, piroliz büyük karmaşık moleküllerin küçük moleküllere parçalanmasını içerir. Ürün üç ana tip olarak sınıflandırılmıştır:

- Sıvı (katran, daha ağır hidrokarbonlar ve su)
- Katı (çoğunlukla karbonca zengin veya karbon)
- Gaz (örneğin; CO_2 , H_2O , CO , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_6H_6).

Bu ürünlerin bağıl miktarları, ısıtma oranı ve biyokütle tarafından ulaşılan son sıcaklık dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır.

1.7.3.1. Sıvı

Katran, biyo-yağ veya biyo-ham yağ olarak bilinen sıvı verim, siyah bir katran sıvısıdır. %20'ye kadar su içerir. Esas olarak eş fenolik bileşiklerden oluşur. Biyo-yağ, büyük miktarlarda karmaşık hidrokarbonların oksijen ve su ile karışımıdır. Ana biyokütle, 19.5-21 MJ/kg kuru baz aralığında daha düşük bir ısıtma değerine (LHV) sahipken, sıvı verimi 13-18 MJ /kg ıslak bazda daha düşük bir LHV değerine sahiptir. (Diebold ve ark., 1997; Basu, 2007).

Hızlı ve eş zamanlı depolimerizasyon ile selüloz, hemiselüloz ve lignin yapısının parçalanması ile biyo-yağ üretilir. Tipik bir işlemde biyokütle, sıcaklıkta hızlı bir artışa maruz bırakılır, ardından ara piroliz ürünlerini "dondurmak" için hemen su

verme işlemi uygulanır. Hızlı söndürme, diğer moleküllerle daha fazla bozulmayı, bölünmeyi veya reaksiyonu önlediğinden önemlidir.

Biyo-yağ, sürekli fazın sulu olduğu bir mikro emülsiyondur. Selüloz ve hemiselüloz dekompozisyon ürünleri ve lignin ayrışmasından küçük moleküller oluşur. Süreksiz faz büyük ölçüde pirolitik lignin makromoleküllerden oluşur (Piskorz ve ark., 1988). Biyo-yağ tipik olarak selüloz ve hemiselülozun moleküler parçalarını ve piroliz ortamından ayrılan lignin polimerlerini içerir. Yoğunlaşmış biyo-yağın moleküler ağırlığı 500 Dalton (Dalton=1.661 x 10⁻²⁴ g) değerini aşmaktadır (Diebold ve Bridgwater, 1997). Bileşenlerin bulunduğu biyo-yağ genellikle aşağıda belirtilen beş ana kategorinin içindedir (Speight, 2008; Shen ve ark., 2009; Said ve ark., 2014):

- Hidroksialdehidler
- Hidroksiketonlar
- Şekerler ve dehidroşekerler
- Karboksilik asitler
- Fenolik bileşikler.

1.7.3.2. Katı

Katran, pirolizin katı ürünüdür. Esas olarak karbondur (~85%), fakat aynı zamanda bir miktar oksijen ve hidrojen de içerebilir. Fosil yakıtların aksine, biyokütle çok az inorganik kül içerir. Biyokütle kömürünün LHV'si, ana biyokütle veya sıvı ürününden önemli ölçüde daha yüksektir ve yaklaşık 32 MJ / kg'dır (Diebold ve Bridgwater, 1997) ve geniş gözenekli yüzey alanı ile karakterizedir (Uzun ve ark., 2006; Yang ve ark., 2007; Basu 2007 ve 2018).

1.7.3.3. Gaz

Biyokütlenin birincil ayrışması, hem yoğun gazlar (buhar) hem de yoğunlaşmamış gazlar (birincil gaz) üretir. Daha ağır moleküllerden oluşan buharlar, soğutma ile yoğunlaşarak, pirolizin sıvı verimine eklenir. Yoğuşmayan gaz karışımı karbon

dioksit, karbon monoksit, metan, etan ve etilen gibi daha düşük moleküler ağırlıklı gazlar içerir. Tablo 1.10, piroliz gazı ısıtma değerlerini biyo-petrol, ham biyokütle ve iki fosil yakıtla karşılaştırmaktadır.

Tablo 1.10. Bazı Yakıtların Isıtma Değerlerinin Karşılaştırılması (Basu, 2018)

Yakıt	Dönüşen (MJ/kg)	Bitümlü Kömür (MJ/kg)	Talaş (MJ/kg kuru)	Biyo-yağ (MJ/kg)	Piroliz Gaz (MJ/Nm ³)
Isıtma Değeri	~29,8	~26,4	~20,5	13-18	11-20

İlave yoğunlaşmayan gazlar, daha yüksek sıcaklıktaki buharın ikincil çatlaması (kraking) yoluyla üretilir ve bunlara ikincil gazlar denir. Dolayısıyla son yoğunlaşmayan gaz ürünü, hem birincil hem de ikincil gazların bir karışımıdır. Birincil gazların düşük ısı değerleri (LHV) tipik olarak 11 MJ/Nm³ 'tür ancak buharın şiddetli ikincil çatlama reaksiyonundan sonra oluşan piroliz gazlarının oranı daha yüksektir ve ısı değerleri yaklaşık 20 MJ/Nm³ civarındadır (Diebold ve Bridgwater, 1997).

1.7.4. Piroliz çeşitleri

Isıtma oranına bağlı olarak, piroliz; hızlı, yavaş, flaş piroliz ve ultra hızlı piroliz olarak sınıflandırılabilir. Yakıtın piroliz sıcaklığına ısıtılması için gereken sürenin, karakteristik piroliz tepkime süresinden çok daha uzun olması ya da bunun tersine yavaş olarak kabul edilir. Yani:

- Yavaş Piroliz: $t_{\text{ısıtma}} \gg t_r$
- Hızlı Piroliz: $t_{\text{ısıtma}} \ll t_r$

Basit bir doğrusal ısıtma oranı ($T_{\text{piroliz}} / t_{\text{ısıtma}}$, K/s) varsayılarak, bu ölçülerde ısıtma oranı açısından ifade edilebilir. Burada, T_{piroliz} piroliz sıcaklığıdır. Ortama ve pirolizin gerçekleştirildiği basınca bağlı olarak birkaç farklı oluşum vardır. Özel çalışma koşulları göz önünde bulundurulduğunda, her işlem kendi karakteristik ürün ve uygulamalarına sahiptir. Yavaş ve hızlı piroliz ısıtma hızına dayanırken, hidropiroliz ise pirolizin yürütüldüğü ortam veya ortamlara dayanmaktadır. Yavaş ve hızlı piroliz genellikle bir ortamın yokluğunda gerçekleştirilir. Spesifik bir okside olmayan ortamda iki farklı tip piroliz daha gerçekleştirilir: sulu piroliz (H₂O içinde)

ve hidropiroliz (H_2 'de). Bu tipler esas olarak kimyasalların üretimi için kullanılır (Sensöz ve Angin, 2008a, b; Pütün, 2010; Pütün ve ark., 2004, 2005 ve 2006).

Yavaş pirolizde, piroliz bölgesinde buharın kalış süresi bir dakika veya daha fazladır. Bu süreç, sıvı üretiminin ana hedef olduğu geleneksel piroliz için kullanılmaz. Yavaş piroliz esas olarak katı biyokütle üretimi için kullanılırken, karbonlaştırma ve kurutma olarak iki kısma ayrılabilir. Kavurma (kurutma) çok düşük ve dar bir sıcaklık aralığında (200- 300°C) gerçekleşirken, karbonizasyon çok daha yüksek ve geniş sıcaklık aralıklarında gerçekleşir.

Hızlı pirolizde buhar halde kalma süresi saniye veya milisaniye mertebesindedir. Öncelikle biyo-petrol ve gaz üretimi için kullanılan bu tip piroliz hızlı ve ultra hızlı olarak, iki ana tiptedir. Tablo 1.11, farklı termal ayrıştırma süreçlerinin özelliklerini karşılaştırmakta ve karbonlaşmayı hızlı ve ultra hızlı olarak göstermektedir. Karbonlaşma yöntemiyle odun kömürü üretilir ve hızlı piroliz süreçleri sıvı veya gaz üretimini sağlar (Klass, 1998; Basu, 2007).

Tablo 1.11. Bazı Termal Ayrıştırma İşlemlerinin Özellikleri (Basu, 2018)

Piroliz işlem	Kalış Süresi	Isıtma Oranı	Final Sıcaklığı (°C)	Ürünler
Kavurma-Kurutma	10-60 dk	Çok küçük	280	Kavrulmuş, Kuru biyokütle
Karbonizasyon	Gün	Çok düşük	>400	Kömür
Hızlı	<2 s	Çok yüksek	~500	Biyo-yag
Çabuk	<1 s	Yüksek	<650	Biyo-yag,
Ultra hızlı	<0,5 s	Çok yüksek	~1000	Kimyasallar, Gaz
Vakum	2-30 s	Orta	400	Biyo-yag
Hidropiroliz	<10 s	Yüksek	<500	Biyo-yag
Metanopiroliz	<10 s	Yüksek	>700	Kimyasal

1.7.4.1. Yavaş piroliz

Karbonlaştırma, karbon veya karbonize üretiminin birincil hedef olduğu yavaş bir piroliz işlemidir. Binlerce yıldır kullanılan en eski piroliz şeklidir. Biyokütle, oksijenin yokluğunda, uzun bir süre boyunca nispeten düşük bir sıcaklığa (~400°C) yavaş yavaş ısıtılır; bu, eski zamanlarda karbon oluşumunu maksimuma çıkarmak

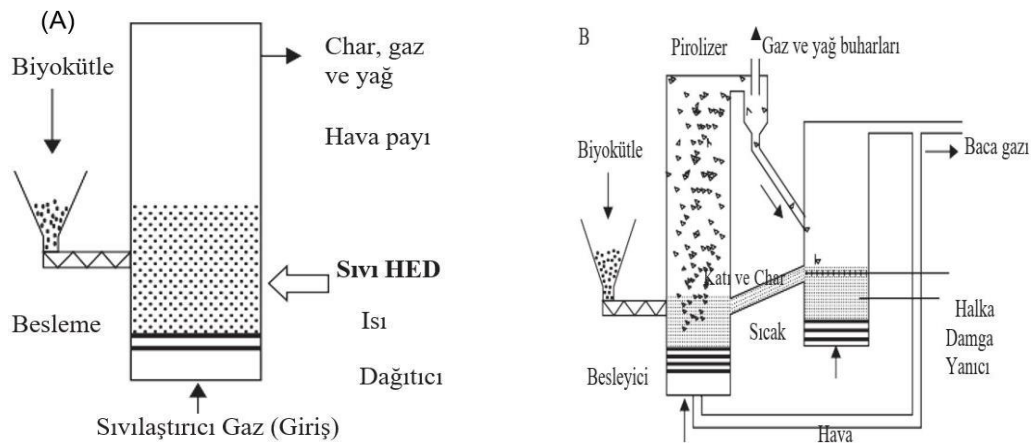
için birkaç gün boyunca sürdürülürdü. Geleneksel piroliz ise üç tür piroliz ürününü (gaz, sıvı ve katı) içerir.

1.7.4.2. Hızlı Piroliz

Hızlı pirolizin birincil amacı sıvı veya biyo-yag üretimini maksimize etmektir. Biyokütle o kadar hızlı ısıtılır ki, ayrılmadan önce tepe (piroliz) sıcaklığına ulaşır. Isıtma oranı 1000 - 10,000 °C/s kadar yüksek olabilir, ancak biyo-yagın tercih edilen ürün olması durumunda en yüksek sıcaklık 650 °C'nin altında olmalıdır. Bununla birlikte, gaz üretimi birincil amaç ise sıcaklık 1000 °C'ye veya daha üstüne kadar çıkarılabilir.

1.7.4.3. Flaş (Ani) piroliz

Flaş pirolizde, biyokütle, oksijenin yokluğunda, 450-600° C gibi nispeten düşük bir sıcaklık aralığına hızla ısıtılır. Yoğuşabilir ve yoğuşmayan gaz içeren ürün, piroliz cihazında 30-1500 ms'lik kısa bir bekleme süresi içinde bırakılır (Bridgwater, 1999). Soğutulduktan sonra, yoğuşan buhar daha sonra “biyo-yag” olarak bilinen bir sıvı yakıta konulur. Böyle bir işlem, kömür üretimini azaltırken sıvı verimini artırır. Flaş pirolizinde tipik bir biyo-yag verimi, toplam piroliz ürününün %70-75'i kadardır.



Şekil 1.13. (A) Kabarcıklı akışkan yataklı piroliz; (B) Dolaşimli akışkan yataklı piroliz cihazı (Basu, 2018)

1.7.4.4. Ultra hızlı piroliz

Ultra hızlı piroliz, biyokütlenin aşırı derecede hızlı ısınmasını içerir. Bu yöntemde, ısı taşıyıcı katılar biyokütle buharı üzerinde etkilidir, bu da çok yüksek ısıtma hızına neden olur. Birincil ürünün hızlı bir şekilde söndürülmesi, reaktörde meydana gelen pirolizi takip eder. Bir gaz-katı ayırıcı, sıcak ısı taşıyıcı katıları, yoğunlaşmayan gazlardan ve birincil ürün buharlarından ayırarak karıştırıcıya geri gönderir. Daha sonra bu katılar ayrı bir yakıcıda ısıtılırlar. Kesin olarak kontrol edilen kısa tekdüze bir bekletme süresi, ultra-hızlı pirolizin önemli bir özelliğidir. Gazın ürün verimini maksimize etmek için, piroliz sıcaklığı gaz için yaklaşık 1000 °C ve sıvı için yaklaşık 650 °C 'dir (Basu, 2018).

1.7.4.5. Bir ortamın varlığında piroliz

Normal piroliz, hava gibi bir ortamın yokluğunda gerçekleştirilir, ancak özel bir tip su veya hidrojen gibi bir ortamda da gerçekleştirilir. Hidro-piroliz, biyokütlenin bu termal ayrışmasının yüksek basınçlı bir hidrojen atmosferinde gerçekleştiği türdendir. Hidro-piroliz, uçucu verimi ve alt-molar kütle hidrokarbonlarının oranını artırabilir (Rocha ve ark., 1997). Bu süreç, çarın hidro-gazlaşmasından farklıdır. Daha yüksek uçucu verimi elde etmek, yeniden polimerize edilmeden ve çar oluşturmadan önce stabilize etmek için yeterli serbest kararlı parçaların hidrojenlenmesi ile sağlanır (Probst ve Hicks, 2006). Hidropiroliz, yüksek sıcaklıktaki suda biyokütlenin termal olarak parçalanmasıdır. Örneğin Türkiye’de bu yöntemle yakıt, gübre veya kimyasal madde üretimi için biyokütle hafif hidrokarbonlara dönüştürülebilmektedir (Bridgwater, 1995 ve 1999).

İki aşamalı bir işlemde, ilk aşama su içinde 200-300 ° C'de basınç altında gerçekleşir; ikinci aşamada üretilen hidrokarbon, yaklaşık 500 °C'lik bir sıcaklıkta daha hafif hidrokarbon içine çatlatılır (Basu, 2007 ve 2018). Yüksek oksijen içeriği, biyo-yagın önemli bir eksikliğidir. Hidropiroliz ile daha az oksijen içerikli biyo-yag üretilebilir (Bridgwater ve ark., 2001).

1.8. Piroliz Ürün Verimine Etki Eden Etmenler

Piroliz ürünü, pirolizin tasarımına, biyokütlenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine ve aşağıdaki gibi önemli çalışma parametrelerine bağlıdır (Bridgwater, 1999 ve 2002):

- Isıtma hızı
- Sıcaklık (piroliz sıcaklığı)
- Reaksiyon bölgesinde kalma süresi (alıkonma süresi).
- Biyokütle bileşimi
- Sürükleyici gaz debisi
- Parçacık boyutu

Bunların yanı sıra, katran ve diğer ürünlerin verimleri (i) basınç, (ii) ortam gaz bileşimi ve (iii) mineral katalizörlerin varlığına (Shafizadeh, 1984) bağlıdır. Son sıcaklığı ve ısıtma oranını değiştirerek, katı, sıvı ve gaz halindeki piroliz ürünlerinin göreceli verimini değiştirmek mümkündür. Hızlı ısıtma, daha yavaş bir ısıtma işlemi ile üretilenlerden daha yüksek uçucu ve daha reaktif çar sağlar. Daha yavaş ısıtma hızı ve daha uzun alıkonma süresi, birincil çar ve uçucu maddeler arasındaki bir reaksiyondan üretilen ikincil çar ile sonuçlanır.

1.8.1. Biyokütle bileşiminin etkisi

Biyokütlenin bileşimi, özellikle de hidrojen-karbon (H/C) oranı, piroliz verimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bir lignoselülozik biyokütlenin üç ana bileşeninin her biri, belirli sıcaklık aralıklarında ayrışır. Bazı seçilmiş biyokütle türlerinin termogravimetrik analizi pirolizin başlatılması için aşağıdaki sıcaklık aralıklarını göstermektedir (Kumar ve Pratt, 1996):

- Hemiselüloz: 150-350 ° C
- Selüloz: 275-350 ° C
- Lignin: 250-500 ° C

İç bileşenler pirolizden farklı şekilde geçmekte ve verimlere farklı katkılar sağlamaktadır. Bunlar arasında selüloz, yoğunlaşabilir buharın birincil kaynağıdır. Hemiselüloz, daha fazla yoğunlaşabilir olmayan gazlar ve selülozla salınandan daha az katran verir (Reed, 2002). Aromatik içeriği nedeniyle, lignin yavaş yavaş bozunarak, karbon verimine önemli bir katkıda bulunur.

Selüloz, 300-400 °C'lik dar bir sıcaklık aralığında bozulur. Herhangi bir katalizörün yokluğunda, saf selüloz baskın olarak bir monomer olan levoglukosana (Diebold ve Bridgwater, 1997) pirolize olur. 500 °C'nin üzerinde, levoglukosan ihmal edilebilir çar oluşumu ile buharlaşır, bu da esas olarak gaz ve petrol verimine katkıda bulunur. Hemiselülozlar odunun en az kararlı bileşenleridir ve 200-300 °C arasında ayrışır (Reed, 2002).

Selülozun aksine lignin, 350-450 °C'de 280-500 °C daha geniş bir sıcaklık aralığında ayrışır (Basu, 2013). Ligninin pirolizi, selüloz tarafından üretilenlerden daha fazla aromatik ve katı ürün üretir (Soltes ve Elder, 1981) ve ağırlığının yaklaşık %40'ını 400 °C'de yavaş bir ısıtma hızı altında çar olarak verir (Klass, 1998). Lignin, sulu bileşenler ve katran içeren sıvı verimine (~35%) oranında katkıda bulunur. Lignin, fenolik bileşenleri eter ve karbon-karbon bağlarının bölünmesiyle verir (Mohan ve ark., 2006). Lignin pirolizinin gaz halinde ürünü orijinal ağırlığının sadece yaklaşık %10'udur.

1.8.2. Piroliz sıcaklığının etkisi

Piroliz sırasında, biyokütle yakıt taneciği piroliz ortamında belirli bir hızda piroliz sıcaklığı olarak bilinen bir sıcaklıkta ısıtılır. Yakma işlemi tamamlanana kadar piroliz ortamında tutulur. Piroliz sıcaklığı hem bileşimi hem de ürünün verimini etkiler. Biyokütlenin pirolizi sırasında ürün gazları, sıcaklık değişimiyle farklılık gösterirler. Böylece, yayılım oranlarının farklı gaz bileşenleri için geniş çapta değiştiğini görebiliriz. Üretilen kömürleşmiş katı miktarı da piroliz sıcaklığına bağlıdır. Düşük sıcaklıklar daha fazla miktarda katı ürün ile sonuçlanır; yüksek sıcaklıklar daha az katı üretir. Bunun nedeni, daha yüksek bir ısıl değere sahip olan sabit karbonun,

katılaşmış kömürün uçucu madde içeriği azalırken artmasıdır. Yoğuşmayan gaz (CO_2 , CO , H_2 , CH_4) miktarı ise sıcaklık ile artar.

1.8.3. Isıtma hızının etkisi

Biyokütle parçacıklarının ısıtma hızı, ürünün verimi ve bileşimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Piroliz için orta dereceli sıcaklıklarda ($400\text{-}600\text{ }^\circ\text{C}$) hızlı ısıtma daha yüksek yoğuşmalı uçucu maddeler ve dolayısıyla daha fazla sıvı verir ve bu sıcaklıklarda daha yavaş ısıtma daha fazla   ar üretir. Örneğin, Debdoubi ve ark. (2006), espartonun pirolizi sırasında, ısıtma hızı $50\text{ }^\circ\text{C/dk'dan } 250\text{ }^\circ\text{C / dk'ya}$ yükseldiği zaman, $550\text{ }^\circ\text{C'lik}$ bir piroliz sıcaklığında sıvı verimin $\%45\text{'ten } \%68,5\text{'e}$ yükseldiğini gözlemlemiştir.

Bununla birlikte, yalnız ısıtma oranı, ürünü tanımlamaz. Ürünün reaktörde kalma süresi de önemlidir. Yavaş ısıtma sırasında, reaktörden uçucuların yavaş veya kademeli olarak uzaklaştırılması, char parçacıkları ve uçucu maddeler arasında ikincil bir reaksiyon oluşmasına izin vererek ikincil bir kömürleşmiş katı oluşumuna yol açar. Piroliz cihazının çalışma parametreleri, ilgili nihai ürünün gereksinimini karşılamak üzere ayarlanır. Bir pirolizde ısıtma için geçici tasarım normları aşağıdakileri içerir:

- Char üretimini en üst düzeye çıkarmak için, yavaş bir ısıtma oranı ($<0.01\text{-}2.0\text{ }^\circ\text{C / s}$), düşük bir son sıcaklık ve uzun bir gaz halde kalma süresi
- Sıvı verimini en üst düzeye çıkarmak için, yüksek bir ısıtma oranı, ılımlı bir son sıcaklık ($450\text{-}600\text{ }^\circ\text{C}$) ve kısa bir gaz halde kalma süresi
- Gaz üretimini en üst seviyeye çıkarmak için, orta derecede yavaş ısıtma hızı, yüksek bir son sıcaklık ($700\text{-}900\text{ }^\circ\text{C}$) ve uzun bir gaz halde kalma süresi

Karbonlaşma yoluyla kömür üretimi için adım (a), hızlı piroliz ile sıvı verimini en üst düzeye çıkarmak için adım (b), gaz üretimi maksimize edildiğinde ise adım (c) kullanılır (Basu, 2013 ve 2018).

1.8.4. Parçacık boyutunun etkisi

Biyokütlenin bileşimi, boyutu, şekli ve fiziksel yapısı, piroliz ürünü üzerinde, ısınma oranı üzerindeki etkileri ile birlikte nispeten etkilidir. Daha ince biyokütle partikülleri yoğunlaşabilir gazların kaçışına karşı daha az direnç gösterirler ve bu nedenle ikincil çatlamadan önce çevreye nispeten kolay bir şekilde dağılırlar ki bu durum daha yüksek bir sıvı verimi ile sonuçlanır.

Diğer taraftan, daha büyük parçacıklar, birincil piroliz ürününün kaçışına sundukları daha yüksek direnç nedeniyle ikincil krakingi kolaylaştırırlar. Bu nedenle eski kömür üretim yöntemlerinde kapalı bir odada büyük boyutlu ahşap parçaları kullanılmıştır.

1.8.5. Sürükleyici gaz akış hızının etkisi

Sürükleyici gaz akış hızı piroliz için önemli bir etkidir. Sürükleyici gaz akış hızının yüksek olması piroliz buharlarının ikincil reaksiyonların gerçekleşmesine izin vermeden ortamdaki hızla uzaklaşmasını sağlar ve böylece sıvı ürün verimi yüksek olur. Fakat sürükleyici gaz akış hızının iyi ayarlanması gerekir. Eğer sürükleyici gaz akış hızı çok yüksek olursa bu durumda ortamda oluşan buharların hızlı bir şekilde soğutma sistemine gönderilerek burada tutulması buharın yoğunlaşmasını zorlaştırır. Piroliz işleminde genellikle sürükleyici gaz olarak azot gazı kullanılır, çünkü azot inert olduğundan reaksiyon ortamındaki gaz ürünlerle reaksiyona girmez. Pirolize sürükleyici gaz akış hızının etkisinin belirlenmesi için literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır (Pütün ve ark., 2001, 2006; Gerçel, 2002; Demiral ve Sensöz, 2006a, b; Sensöz ve Angin, 2008a, b; Said ve ark., 2014; Pütün ve ark., 2015; Kar ve ark., 2019).

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Rocha ve ark. (1997) yaptıkları deneysel çalışmada odun talaşını, inert ortam koşullarında, serbest düşmeli sabit yataklı piroliz reaktöründe pirolize tabi tutmuşlardır. Bu çalışmanın ilk kısmında piroliz sıcaklığının (450, 500, 550, 600 ve 650 °C) piroliz ürün verimi üzerinde etkisi araştırılmıştır. Kullanılan bu biyokütle örneklerinin 550 °C ve 600 °C civarlarındaki maksimum biyoyakıt ürün veriminin ağırlıkça yaklaşık %33 ile benzer olduğu bulunmuştur. Çalışmanın ikinci kısmında piroliz ürünleri ve kompozisyonları üzerinde maksimum piroliz sıcaklığında, biyokütle tipine göre analiz yapılmıştır. Elde edilen biyoyakıt örneğinin yüksek oranda oksijen, hidrojen ve fazlaca su içeriğine sahip olduğu saptanmıştır. Yüksek oranda su içeriğinin biyoyakıtın enerji değerini düşürdüğü ifade edilmiştir (Rocha ve ark., 1997).

Pütün ve ark. (2005) biyokütle örnekleri için piroliz deneyleri gerçekleştirdiler. Yaptıkları çalışmada, pamuk saplarının pirolizi ve elde edilen sıvı ve katı ürünlerin yapılarını ve miktarlarını belirlediler. Piroliz deneyleri 400-700 °C piroliz sıcaklıklarında, 0.25 mm'den 1.8 mm ye kadar değişen parçacık büyüklüklerinde ve 50'den 400 cm³/dk'ya kadar sürükleyici gaz akış hızlarında piroliz deneyleri gerçekleştirildi. Tüm deneyler 7 °C/dk ısıtma hızında gerçekleştirildi ve biyokütlenin tanecik büyüklüğü ile azot akış debisinin piroliz verimini önemli ölçüde etkilediği bulundu. Sıvı ürünler ve uygun çözücülerde çözünebilen kısımların elementel analizi, FT-IR spektroskopisi ile analiz edildi ve çözücünün (pentan) alt bileşenleri gaz kromatografisi ile analiz edildi. Pütün ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada; odun kömüründe sıcaklığın artmasıyla H/C ve O/C oranlarının azaldığını gözlemledi (Pütün ve ark., 2005).

Pütün ve ark. (2006) tarafından yapılan araştırmada pamuk çekirdeği küspesinin farklı piroliz şartlarında katalitik pirolizi çalışıldı. Araştırılan değişkenler piroliz sıcaklığı, kataliz içeriği ve sürükleyici gaz akış hızıdır. Yapılan deneyler termodinamik olarak izotermal şartlarda gerçekleştirildi ve piroliz ürünleri olarak sıvı, gaz ve odun kömürü elde edildi. Dört farklı piroliz sıcaklığında bu ürünlerin dağılımının katalizörün ağırlık yüzdesine bağlı olarak (%1, 5, 10 ve 20) değişimi incelendi. Yapılan çalışmaların sonucunda; maksimum sıvı verimi 500 °C sıcaklıkta 100 cm³/dk sürükleyici gaz akış hızında ve ağırlıkça %20 zeolit katalizörü varlığında %30,84 olarak elde edildi.

Yang ve ark. (2007) tarafından üç farklı biyokütlenin hızlı pirolizle termal bozunması üzerine bir çalışma yapılmıştır. Araştırmada ürünler gaz kromatografisi ve kütle spektroskopisi ile aydınlatılmıştır. Biyokütle atık örneklerinin termal bozunması başlıca dört aşamada gerçekleşmiştir: Ekstraktiflerin bozunmaya başlaması (<490 K), hemiselülozun bozunması (490-650 K), selüloz ve ligninin bozunması (650-780 K) ve ligninin bozunması (>780 K). Termokimyasal dönüşüm sıcaklığı 700 K'dir. Karbondioksit gazı akış hızı 30 mL/dk iken maksimum biyoyakıt eldesi sırasıyla %51, 48, 28 ile sedir talaşı, kahve tohumu, pirinç kabuğu şeklindedir. Biyoyakıt iki ana faz içermekte olup, bunların birincisi selüloz ve ligninden yağ fazı, ikincisi ise selüloz ve hemiselülozdan sulu fazdır. Ekstraktifler hegzanda çözülebilir bileşenleri içeren hidrokarbonlardır. Yağ fazı hegzanda çözünen alifatik, aromatik ve polar yapılardan oluşmaktadır. Biyokütle atıklarından elde edilen sulu faz ise önemli oranda karbosiklik bileşenleri, aromatik bileşenler ve oksijenli bileşenlerinden oluşmaktadır (Yang ark., 2007).

Şensöz ve Angın (2008) tarafından yapılan bir çalışmada safran tohum küspesinin sabit yataklı bir reaktörde pirolizi deneysel olarak incelenmiştir. Ürün verimleri üzerine piroliz sıcaklığı, ısıtma hızı ve sürükleyici gaz akış hızının etkisi incelenmiştir. Piroliz işlemleri 400-600 °C sıcaklık aralığında ve 10, 30 ve 50 °C/dak ısıtma hızlarında gerçekleştirildi. Elde edilen katı, sıvı ve gaz verimleri sırasıyla katı için ağırlıkça %25 ve %34 arasında, sıvı ürün verimi %28 ve %36 arasında ve gaz ürün verimi ise %19 ile %25 arasında değiştiği gözlenmiştir. Maksimum sıvı

veriminin elde edildiği şartlar sürükleyici gaz için 100 cm³/dak, ısıtma hızı için 50 °C/dak hızında ve piroliz sıcaklığı için ise 500 °C olduğu deneysel olarak belirlenmiştir. Yine bu çalışmada elde edilen diğer bir sonuç; piroliz sıcaklığının ve sürükleyici gaz akış hızının etkisinin ısıtma hızının etkisinden daha büyük olduğudur (Sensöz ve Angın, 2008).

Keleş ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada hızlı piroliz yöntemiyle fındık kupulasının katalitik pirolizi ve elde edilen sıvı ürünlerin karakterizasyonu deneysel olarak çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmada, farklı deneysel şartlar altında sabit yataklı bir reaktör içerisinde fındık kupulasının hızlı pirolizi incelenmiştir. Piroliz deneyleri için tarımsal bir yan ürün olan fındık kupulası biyokütle olarak seçilmiştir. Sabit yataklı bir reaktör içerisinde fındık kupulasına uygulanan hızlı piroliz deneyleri sonucunda ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığı, sürükleyici gaz akış hızı ve parçacık boyutunun etkileri araştırılmıştır. Deneyler 200 °C/dak ısıtma hızında 400, 500, 600 ve 700 °C piroliz sıcaklıklarında yapılmıştır. Deneyler sonucunda piroliz ürün veriminin büyük ölçüde piroliz sıcaklığına bağlı olduğu gözlenmiş ve piroliz sıvısının maksimum verimle elde edildiği en uygun piroliz sıcaklığı 600 °C olarak belirlenmiştir. Hızlı pirolizden elde edilen sıvı ürün verimini artırmak için sabit yataklı reaktör içerisinde katalizörlü deneyler gerçekleştirilmiştir. Katalizör olarak ZnO kullanılmıştır. Katalitik deneyler azot atmosferi altında 200 °C/dak ısıtma hızında, 0.250–0.150 mm parçacık boyutunda ve 400, 500, 600 ve 700 °C piroliz sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Hammaddeye değişik oranlarda katalizör ilave edilerek ürün verimi ve bileşimi üzerine katalizörün etkisi incelenmiştir (Keleş ve ark., 2011).

Kara (2012) tarafından yapılan çalışmada değişik deneysel şartlar altında sabit yataklı bir reaktör içerisinde çay çalısı ve orman gülünün hızlı pirolizi incelenmiştir. Piroliz deneyleri için tarımsal atık olan çay çalısı ve bölgemize haz bir bitki türü olan orman gülü biyokütle örnekleri seçilmiştir. Sabit yataklı bir reaktör içerisinde çay çalısı ve orman gülüne uygulanan hızlı piroliz deneyleri sonucunda ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığı, sürükleyici gaz akış hızı ve parçacık boyutunun etkileri incelenmiştir. Deneyler 200 °C/dak ısıtma hızında 450, 500, 550, 600 ve 650 °C

piroliz sıcaklıklarında yapıldı. Deneyler sonucunda piroliz piroliz ürün veriminin büyük ölçüde piroliz sıcaklığına bağlı olduğu gözlemlendi. Sonuç olarak çay çalısı için piroliz sıvısının maksimum verimle elde edildiği en uygun piroliz sıcaklığının 550 °C ve orman gülü için ise 600 °C olarak tespit edilmiştir (Kara, 2012).

Said ve ark. (2014) yaptıkları deneysel çalışmada tarım ve orman atıklarının yenilenebilir enerji kaynağı olarak çok önemli potansiyeli sahip olduklarını dikkate alarak bu biyokütle türlerinin pirolizini incelediler. Yaptıkları deneysel çalışmada ısıtma hızı olarak 10 ve 50 °C/dk'lık hızları kullanarak elephant bitkisine piroliz işlemini uygulayarak sıvı, gaz ve katı ürünler elde ettiler. Elde edilen piroliz sıvı ve gaz ürünlerinin türü ve miktarı gaz kromatografisi kullanılarak belirlendi. Bu gaz ürünlerin esas olarak CO ve CO₂ ve az miktarda da metan ile küçük molekül ağırlıklı hidrokarbonlar olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan piroliz sıvısının organik asitler, esterler, benzen türevleri ve amidlerden oluştuğu tespit edilmiştir. Yine bu çalışmada; 50 cm³/dk ısıtma hızında ise organik asitlerin ve benzen bileşiklerinin miktarı azalırken ester ve naftalen bileşiklerinin miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Isıtma hızının artması ile piroliz sıvı ürünlerindeki bu değişimin sebebinin piroliz buharlarının ortamda alıkonma zamanının azalmasından dolayı meydana gelebilecek ikincil reaksiyonların oluşma ihtimalinin azalması olduğu anlaşılmıştır (Said ve ark., 2014).

Kar (2018) tarafından yapılan deneysel çalışmada biyokütle örnekleri olarak fındık kabuğu, çay çalısı ve fındık budağı seçilmiştir. Öncelikle, bu biyokütle örnekleri öğütme ve eleme işlemleriyle dört farklı parçacık boyutuna ayrılmıştır. Piroliz deneyleri numuneler belirli oranlarda karıştırıldıktan sonra hızlı pirolizi sabit yataklı bir piroliz reaktöründe yapılmıştır. Ayrıca sıvı ürün verimini arttırmak için katalizör olarak ağırlıkça %2 V₂O₅ kullanılmıştır. Hem katalizörlü hem de katalizörsüz şartlarda piroliz ürün verimleri üzerine sıcaklık, ısıtma hızı ve parçacık boyutunun etkileri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Hızlı piroliz deneyleri 2-1 mm, 1-0,500, 0,500-0,250 mm, 0,250 mm> parçacık boyutlarında, 350, 450, 450, 550 °C sıcaklıklarda, 150, 300, 450, 600 °C/dk ısıtma

hızlarında gerçekleştirilmiştir. Bütün hızlı piroliz deneylerinde sürükleyici azot gazı akış hızı sabit ve 200 cm³/dk' dır. Hem katalizörlü hem de katalizörsüz deneylerde en yüksek sıvı ürün verimi 450 °C ve 450 °C/dk ısıtma hızında ve 1-0,500 mm parçacık boyutunda elde edilmiştir. Son olarak katalizörlü ve katalizörsüz piroliz deneylerden optimum şartlarda elde edilen sıvı ürünlere ve bunların alt fraksiyonlarına karakterizasyon işlemleri uygulanmıştır. Katalizör ilavesinin sıvı ürün verimi ve kalitesini arttırdığı saptanmıştır. Sonuçta hızlı piroliz deneylerinden elde edilen sıvı ürünlerin hem kimyasal madde hem de sıvı yakıt olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Biyoyakıt üretimi için palmye ağacı kabuğunun hammadde olarak kullanıldığı bir hızlı piroliz uygulamasında, 550 °C sıcaklıkta dakikada 2 L gaz akışının olduğu ve yine dakikada 10 g biyokütle beslemesinin olduğu sistemdeki maksimum biyokütle verimi ağırlıkça %57 olarak tespit edilmiştir. 550 °C üretilen yüksek ısı değerli biyoyakıtın enerji değeri 23.48 MJ/kg bulunmuştur (Kar, 2018).

Chen ve ark. (2018) yaptıkları çalışmalarda furfural gibi çeşitli biyokütle kaynaklarının pirolizinden çeşitli sıvı ürünler elde etmişlerdir. Bu çalışmada, furfural üretimi için heterojen katalizörler (titanyum bileşikler (TiN, TiO₂ ve TiOSO₄) ve metal nitrürler (MoN, GaN ve VN) ile biyokütlenin pirolizi gerçekleştirilmiş, yapı aydınlatması için gaz/kütle spektrometresi (GC-MS) kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları, TiN (titanyum nitrür) ve GaN'nin (galyum nitrür) ve özellikle oligosakaritlerin doğrudan parçalanması yoluyla furfural bileşiklerin üretimini arttırdığını göstermiştir. Piroliz esnasındaki alıkonma süresi 10-30 s aralığında olduğunda furfural üretiminin düştüğü gözlenmiş, bunun nedeni olarak da yarışmalı reaksiyonların (1,6-anhidro-beta-D-glukopiranoz oluşumu) furfural oluşumunu baskılaması olarak ifade edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre furfural üretimine yönelik hızlı piroliz uygulamalarında TiN katalizörünün, tarımdaki biyokütle kalıntılarına başarılı şekilde uygulanabildiği belirtilmiştir. Mısır koçanı, buğday samanı ve pamuk sapı gibi üç ayrı biyokütle kalıntısı karşılaştırıldığında, mısır koçanı yüksek holoselüloz içeriğinden dolayı daha yüksek furfural verimi göstermiştir (Chen ark., 2018).

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneyisel Çalışmalar İçin Kullanılan Hammaddeler

Hızlı piroliz deneylerinde kullanılmış olan hammaddeler; çay çalısı, ceviz kabuğu ve çam kozalağıdır. Ülkemizde Doğu Karadeniz Bölgesinde 830 bin dekar çaylık alan bulunmaktadır. Ocak 2005 'te yürürlüğe giren uygulama ile çaylıkların her yıl 1/7 oranında budanması ile başlanmış ancak her yıl 1/10 oranında budanması olarak güncellenip devam ettirilmiştir. 2017 yılında bu yasayla budanması gereken çaylık alan 83 bin dekar olup budanan alan 78 bin dekadır. Her yıl budanan bu çaylıklardaki çalılar, geleneksel yöntemlerle yakılarak ısınma amaçlı kullanılmaktadır. Çaykur Çay İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nden öğrenilen verilere göre son dokuz yılda toplam 744,3 bin dekar çay budaması yapılmıştır (Kar, 2018).

Ceviz, FAO 2016 yılı verilerine göre sert kabuklu meyveler içerisinde dünyada alan olarak %24'lük pay ile ilk üç sırada, üretim miktarı bakımından ise %34'lük pay ile birinci sırada yer almaktadır. Türkiye'nin tarımsal üretimde kullandığı işlenen toplam tarım alanı yaklaşık 23,7 milyon hektar olup, bunun 2 milyon hektar alanı meyve bahçeleri ile kaplıdır. Sert kabuklu meyve alanı içerisinde Türkiye 2016 yılında %61,31 ile fındıkta ilk sırada yer alırken, bunu %27,24 ile antepfıstığı, %7,55 ile ceviz, %2,90 ile badem ve son olarak %1 ile kestane izlemektedir. Ağaç başına elde edilen verimde ise 33 kg/ağaç ile kestane, 24 kg/ağaç ile ceviz ve 13 kg/ağaç ile badem ilk üç sırada yer almaktadır (TÜİK, 2017; Ketenci ve Bayramoğlu,2018).

Türkiye yaklaşık olarak 80 milyon hektar yüzölçümü ile dağlık ve ekocoğrafya bakımından zengin bir çeşitliliğe sahiptir. Bu ekolojik zenginliğe paralel olarak ormanları da tür ve kompozisyon olarak zengindir. 2012 yılı itibarıyla yapılan tespitlere göre ormanlar, ülke yüz ölçümünün %27,6'sını kaplamaktadır. Bu rakama

orman içi açıklıklar dahil değildir. Genel ormanlık alanın %35'ini yapraklı ormanlar (meşe, kızılâğaç, kayın, kestane ve gürgen gibi ağaç türleri), %54'ünü iğne yapraklı (ibrelî) ormanlar (kızılçam, sarıçam, karaçam, göknar, ladin ve sedir gibi ağaç türleri), %11'ini ise ibrelî yapraklı karışık ormanlar kaplamaktadır. Ormanlarda yayılış alanı olarak en fazla kızılçam (5,9 milyon ha) yayılış göstermekte, sonra alan büyüklüğü sırasına göre meşe türleri, karaçam, kayın, sarıçam, göknar, ardıç, sedir, ladin, kızılâğaç, kestane, fıstıkçami, gürgen, ıhlamur, dişbudak, kavak ve okaliptüs gelmektedir (OGM,2014).

Bu veriler ışığında biyokütle örneği olarak düşünüldüğünde; çay çalısı, ceviz kabuğu ve çam kozalağının ciddi bir biyokütle potansiyeli oluşturduğu söylenebilir.

3.2. Hammadde Olarak Kullanılan Biyokütle Örneklerinin Hazırlanması

Piroliz deneylerinde kullanılan hammadde örneklerinden çay çalısı Rize ilinden, ceviz kabuğu ve çam kozalağı Trabzon ilinden temin edilmiştir. Kullanılan tüm biyokütle örnekleri önce 1-2 cm' lik kıymıklar haline getirilmiş, her bir biyokütle örneği Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Endüstri Mühendisliği bölümünde bulunan 2 mm delik çaplı "Thomas-WILEY LABORAORY MILL Model 4" değirmeninde öğütülmüştür. Daha sonra, öğütülmüş olan numunelerin daha önceden belirlenmiş olan parçacık boyutunda ayrılması için, "Vibratory Sieve Shakers A 200 basic" titreşimli elek sallayıcı cihazı ve parçacık boyutu ayırımına uygun gözenekli ASTM elek seti kullanılmıştır. Üç farklı biyokütle örneğinin her biri, yukarıda belirtilen ayırma işlemlerinden geçtikten sonra 1mm parçacık boyutlu olacak şekilde ayarlanmıştır. Boyutları ayarlanan bu numuneler 10 gün boyunca havayla teması sağlandıktan sonra, piroliz deneylerinde kullanılmak üzere uygun laboratuvar ortamı koşullarında korunmuştur.

3.3. Biyokütle Örneklerine Uygulanan Kısa Analizler

Üç ayrı hammaddeden (çay çalısı, ceviz kabuğu ve çam kozalağı) oluşan biyokütle karışımına nem, ısıl değer, sabit karbon, kül, ham kok ve uçucu madde tayini analizi

yapılmıştır. Bu analizler Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümünde yapılmıştır.

3.3.1. Nem tayini

Numuneler, nem miktarları belirlenmeden önce, 10 gün boyunca havayla teması olacak şekilde bekletilmiştir. Nem tayini ASTM D-346 standart metodu kullanılarak yapılmıştır. Nem yüzdesinin hesaplanmasında biyokütle karışımının önceden belirlenen 1 mm parçacık boyutundaki numunesi kullanılmıştır. Çay çalısı, ceviz kabuğu ve çam kozalağı numunelerinden 1'er gram alınarak oluşturulan karışım %0,1 duyarlılıkta tartılıp, 103±2 °C'deki etüvde sabit tartıma gelinceye kadar bekletilmiş, etüvden alınan numuneler desikatörde soğutulup tartımları alınmıştır. Nem yüzdesi hesaplaması, eşitlik 3.1'deki gibi yapılmıştır.

$$\text{Nem (\%)} : [(w_1 - w_2) / w_1] \times 100 \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1:

w_1 : Örneğin başlangıçtaki tartımı (g)

w_2 : Örneğin etüvde kurutulduktan sonraki tartımı (g)

3.3.2. Uçucu madde tayini

Uçucu madde miktarının belirlenmesinde ASTM E 987-82 standart yöntemi kullanılmıştır. Biyokütle karışımının 1 gramlık örneği, sabit tartıma getirilmiş platin kroze içine, 0.1 mg hassasiyette konularak bek alevinde 10 dakika boyunca ısıtılmış ve desikatörde soğuması beklendikten sonra tartımları alınmıştır. Bu şekilde yapılan işlemde krozede kalan madde biyokütle örneğinin, uçucu ve nemi giderilmiş olan kalıntısıdır ki buna ham kok denmektedir. Ham kokun haricindeki bileşenler uçucu ve nem bileşenleridir. Nem miktarı daha önceden eşitlik 1'deki gibi hesaplandığından ilgili değerler eşitlik 3.2'de yerine yazılarak uçucu madde miktarı (%) aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır. Eşitlik 3.3 ise ham kok miktarının ağırlıkça yüzdesinin hesaplanışını göstermektedir.

$$\text{Uçucu madde miktarı (\%)} = 100 - (\text{Ham kok (\%)} + \text{nem (\%)}) \quad (3.2)$$

$$\text{Ham kok miktarı (\%)} = [(w_1 - w_2) / w_0] \times 100 \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.3'teki simgeler aşağıda belirtildiği şekilde ifade edilmektedir:

w_1 : Isıtma sonrası platin kroze ve içindeki kalıntının ağırlıkları toplamı (g)

w_2 : Boş haldeki platin krozenin ağırlığı (dara) (g)

w_0 : Başlangıçta platin kroze konulan biyokütle örneğinin ağırlığı (g)

3.3.3. Kül miktarı tayini

Kül miktarının belirlenmesinde ASTM- D 1102 standart yöntemi kullanılmıştır. Biyokütle karışımından alınan ve 0,1 mg hassasiyetle tartılan 1 g'lık örnek sabit tartıma getirilmiş bir platin kroze konulmuş ve 600 °C'ye ısıtılmış fırında üç saat bekletilmiştir. Ardından desikatörde bekletilen örnekler tartılarak kül miktarları eşitlik 3.4'teki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Kül miktarı (\%)} : [(w_1 - w_2) / w_0] \times 100 \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4'teki ifadeler aşağıda belirtildiği şekilde açıklanır:

w_1 : Platin kroze ve kalıntı kül ağırlığının toplamı (g)

w_2 : Boş platin krozenin ağırlığı (dara) (g)

w_0 : Başlangıçta platin kroze konulan biyokütle örneğin ağırlığı (g)

3.3.4. Sabit karbon miktarı tayini

Biyokütle karışımının nem, kül ve uçucu madde miktarları belirlendikten sonra, sabit karbon miktarları eşitlik 3.5'teki gibi hesaplanmıştır.

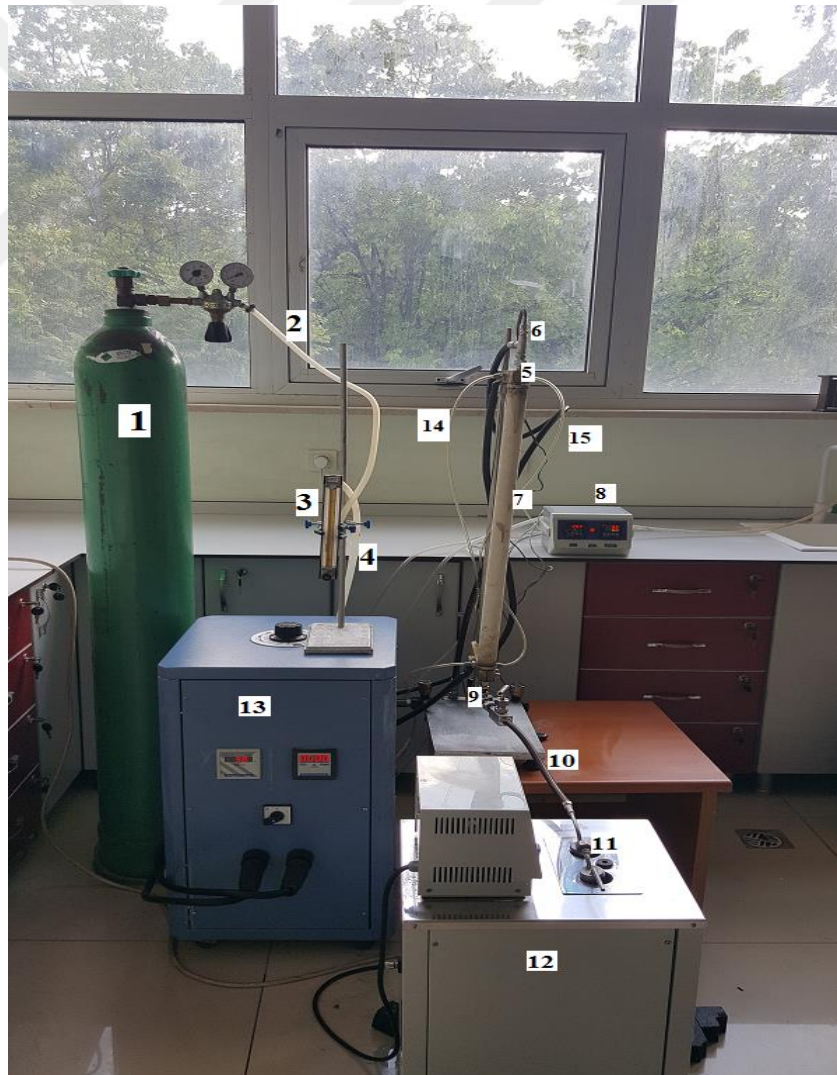
$$\text{Sabit karbon (\%)} = 100 - (\text{kül} + \text{nem} + \text{uçucu madde}) \quad (3.5)$$

3.3.5. Hammadde karışımı ve biyo-yağın ısıl değeri

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Döner Sermaye Laboratuvarı'nda bulunan IKA C 200 marka ve modeli kalorimetre cihazında yapılan ölçümlerle hammadde karışımının ve biyo-yagın ısıl değerleri cal/g olarak ölçülmüştür.

3.4. Biyokütle Karışımının Pirolizi

Yapılan piroliz deneylerinde, paslanmaz çelik borudan imal edilmiş, yalıtımlı seramik boru içerisine yerleştirilmiş, 70 cm³ hacminde, sabit yataklı borusal bir reaktör kullanılmıştır. Kullanılan reaktör Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Sabit yataklı borusal reaktör

Şekil 3.1’de numaralandırılmış reaktör kısımları aşağıda açıklanmıştır:

1. Azot tankı
2. Azot akış borusu
3. Azot akışını ölçen debimetre
4. Debimetreden çıkan azot gazını reaktöre ileten plastik hortum
5. Numune besleme kısmı
6. Sıcaklık ölçen termoçift
7. Piroliz reaktörü
8. Dijital sıcaklık ve basınç göstege paneli
9. Katı ürünün alındığı kısım
10. Piroliz buharlarını soğutucuya aktaran plastik hortum
11. Sıvı ürünün toplandığı cam hazne
12. Sirkülatörlü soğutucu
13. Güç kaynağı
14. Soğutma suyu girişi
15. Soğutma suyu çıkışı

Reaktör; adım kontrollü sıcaklık programına, 12 mA voltaj kontrollü güç sistemine, dijital ısı ve gösterge paneline ve sıcaklık ölçümü için PT 100 sıcaklık ölçere sahiptir. Sıcaklık ve ısıtma hızı değişkenleri, sıcaklık ölçer ile bağlantılı dijital gösterge paneli yardımıyla kontrol edilmiştir. Reaktör içerisinde tepkimesiz bir ortam oluşturup, açığa çıkan gazların reaktörden soğutucu düzeneğe sürüklenmesini sağlayan azot gazı akışı, bir azot tüpüyle bağlantılı akış metre ile kontrol edilmiştir. Reaktöre azot akışı sağlayan bağlantıların sızdırmazlığı sıvı conta ve kelepçelerle sağlanmıştır. Ayrıca reaktör bağlantılarının, aşırı ısınmadan kaynaklı zararı en aza indirmek için ilgili bağlantıların etrafına, sürekli devir daim yapan musluk suyunun olduğu borular bağlanmıştır. Piroliz buharlarını yoğunlaştırmak için -40 °C’ye kadar soğutabilen Labo PL400-H22 cihazı kullanılmıştır. Piroliz buharlarının yoğunlaştırıldığı cam hazne; -40 °C’ye kadar soğutulmuş, antifiriz-su karışımının olduğu soğutucu cihaz içine yerleştirilmiştir. Piroliz buharları, reaktörün gaz çıkışına bağlı silikon hortum vasıtasıyla soğutucu cihazın içinde bulunan cam aparatın giriş

kısmına bağlanmış ve yoğunlaşmayan gazların tahliyesi için bir diğer hortum da cam aparatın çıkış kısmına bağlanmıştır.

Deneylerin yapılırken takip edilen sıralama aşağıda verilmiştir:

1. Piroliz deneyleri için önceden hazırlanmış, havada kuru, 1 mm parçacık boyutlarına ayrılmış çay çalısı, ceviz kabuğu ve çam kozalağı karışımları 1 ± 0.001 g hassasiyetle tartılarak reaktöre üst kısmından doldurulmuş ve kapatılmıştır.
2. İstenilen sıcaklık ve ısıtma hızı parametreleri sıcaklık ölçere (termoçift) ve güç kaynağına bağlı, gösterge panelinden ayarlanmıştır.
3. Reaktöre azot gazı akışı için debimetre ayarlanıp, reaksiyon süresince belirlenen sabit miktarda azot akışı sağlanmıştır.
4. Soğutma ünitesinin içine yerleştirilmiş olan cam haznenin tahliye kısmından gaz çıkışı kesilinceye kadar piroliz işlemine devam edilmiştir.
5. Deney sırasında çıkan buharlar sıvılaştırma haznesine gönderilip sıvılaştırılmış ve sıvılaşmayan kısım tahliye hortumuyla atmosfere salınmıştır.
6. Sıvılaştırma ünitesindeki cam hazne çıkarılarak oda sıcaklığına getirilip tartılmıştır.
7. Daha önceden cam haznenin darası alındığı için içindeki sıvı miktarı belirlenip, bu sıvı miktarı başlangıçta reaktöre yerleştirilen biyokütle örnek karışımına oranlanarak piroliz işlemindeki ağırlıkça sıvı ürün miktarı (%) hesaplanmıştır.
8. Reaktörde kalan katı madde tartılarak katı madde miktarı ağırlıkça % olarak tespit edilmiştir. Sıvı, katı ve gaz ürünlerin toplamı yüzde yüz olarak düşünüldüğünde, gaz ürün miktarı da toplam yüzdeden, sıvı ve katı ürünlerin yüzde miktarlarının toplamı çıkarılarak bulunmuştur.

Deneylerdeki biyokütle karışımları 1 mm parçacık boyutlarında seçilmiştir. Sürükleyici azot gazı akış debisi 50, 100, 200, 300 cm³/dk olarak, sıcaklık 300, 400, 500, 600, 750 °C ve ısıtma hızları 100, 250, 400 ve 600 °C/dk olarak alınmıştır.

Piroliz deneylerinde, reaktöre yüklenen yaklaşık 1 g'lık örnek sabit parçacık boyutunda ve 1:1:1 oranında seçilmiştir. Yani 1 g'lık biyokütleyi oluşturan çay çalısı, ceviz kabuğu ve çam kozalağı eşit miktarlarda alınmıştır.

Yapılan deneysel çalışmada; deneyler piroliz ürün verimliliğine etki eden üç farklı parametreyi incelemek üzere yapılmıştır. Öncelikli olarak piroliz ürün verimliliğine sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. Sabit parçacık boyutundaki (1 mm) 1'g'lık biyokütle karışımı reaktöre koyulmuş 300, 400, 500, 600 ve 750°C sıcaklıklarda deneyler yapılmıştır. İkinci olarak piroliz ürün verimliliğine ısıtma hızının etkisi araştırılmıştır. Yine sabit parçacık boyundaki (1 mm) 1'g'lık biyokütle karışımı reaktöre koyulmuş 100, 250, 400 ve 600°C/dk ısıtma hızlarında, 300, 400, 500, 600 ve 750°C sıcaklıklarda deneyler yapılmıştır. Üçüncü olarak da piroliz ürün verimliliğine azot akış debisinin etkisi araştırılmıştır. Yine sabit parçacık boyutundaki (1 mm) biyokütle karışımı reaktöre koyulmuş 300, 400, 500, 600 ve 750°C sıcaklıklar da 100, 250, 400 ve 600°C/dk ısıtma hızlarında ve 50, 100, 200, 300 cm³/dk azot akış debilerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneyler sonucunda da sıvı, katı, gaz ürünler ve piroliz dönüşümleri ağırlıkça yüzde olarak hesaplanmıştır. Çalışmada yapılan tüm deneylerin sonuçları iki tekrar deneyi yapılarak verilmiştir.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu kısımda kullanılan biyokütle karışımının (çam kozalağı, çay çalısı, ceviz kabuğu) kısa analiz sonuçları, ardından hızlı piroliz yöntemi ile yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar tablo ve grafiklerle verilmiş, yine bu sonuçlardan faydalanılarak ürün verimliliklerine yönelik; sıcaklık, ısıtma hızı ve sürükleyici azot akış debisinin etkileri grafiklerle ifade edilmiştir.

4.1. Biyokütle Örneklerine Uygulanan Kısa Analiz Sonuçları

Üç ayrı hammaddeden (çay çalısı, ceviz kabuğu ve çam kozalağı) oluşan biyokütle karışımının nem, sabit karbon, kül ve uçucu madde analizi sonuçları Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Biyokütle karışımına uygulanan kısa analiz sonuçları

Kısa Analiz (Ağırlıkça %)	Kullanılan Biyokütle karışımı
Nem	13,04
Uçucu Madde	61,26
Kül	1,02
Sabit Karbon	24,68

Tablo 4.1’e bakıldığında bu çalışmada kullanılan biyokütle karışımına uygulanan analizler sonucunda nem miktarı %13,04, uçucu madde miktarı %61,26, kül miktarı %1,02 ve sabit karbon miktarı %24,68 olarak hesaplanmıştır.

Eşit oranda karıştırılan çay çalısı, ceviz kabuğu ve çam kozalağından oluşan ve pirolize tabi tutulan hammadde karışımının ısı değeri 4227 cal/g, hızlı pirolizle en verimli şartlarda (50 cm³/dk azot akış debisi, 100°C/dk ısıtma hızı ve 500°C piroliz sıcaklığı) elde edilen ham biyo-yagın ısı değeri ise 5900 cal/g olarak tespit edilmiştir.

4.2. Hızlı Pirolizden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

Hızlı piroliz deneyleri; sabit parçacık boyutlu (1mm), çam kozalağı, çay çalısı ve ceviz kabuğunun sırasıyla 1:1:1 oranında tartılarak yaklaşık 1 g karışım olacak şekilde hazırlanmış; 50, 100, 200, 300 cm³/dk azot akış debisinde; 300, 400, 500, 600 ve 750°C sıcaklıklarda ve 100, 250, 400, 600 °C/dk ısıtma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneylerin sonuçları ağırlıkça yüzde değerleriyle birlikte tablolar halinde verilmiştir (Tablo 4.2 - 4.21).

Tablo 4.2. Biyokütle karışımının pirolizinde 300°C sıcaklık ve 50 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 300 °C		Azot Akış Debisi 50 cm ³ /dk		
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	47,84	37,90	52,16	9,94
250	57,22	40,31	42,78	16,91
400	64,32	57,15	35,68	7,17
600	49,50	38,17	50,50	11,33

Tablo 4.3. Biyokütle karışımının pirolizinde 300°C sıcaklık ve 100 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 300 °C		Azot Akış Debisi 100 cm ³ /dk		
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	50,62	41,80	49,38	8,82
250	52,37	36,15	47,63	16,22
400	68,21	55,15	31,79	13,06
600	56,07	38,71	43,93	17,36

Tablo 4.4. Biyokütle karışımının pirolizinde 300°C sıcaklık ve 200 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 300 °C		Azot Akış Debisi 200 cm ³ /dk		
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	51,10	41,23	48,90	9,87
250	56,13	33,14	43,87	22,99
400	70,65	54,46	29,35	16,19
600	58,09	31,62	41,91	26,47

Tablo 4.5. Biyokütle karışımının pirolizinde 300°C sıcaklık ve 300 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 300 °C			Azot Akış Debisi 300 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	57,94	29,52	42,06	28,42
250	52,93	35,00	47,07	17,93
400	70,47	56,14	29,53	14,33
600	57,26	40,31	42,74	16,95

Tablo 4.6. Biyokütle karışımının pirolizinde 400°C sıcaklık ve 50 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 400 °C			Azot Akış Debisi 50 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	69,82	46,41	30,18	23,41
250	80,91	46,41	19,09	34,50
400	78,41	46,87	21,59	31,54
600	75,95	52,46	24,05	23,49

Tablo 4.7. Biyokütle karışımının pirolizinde 400°C sıcaklık ve 100 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 400 °C			Azot Akış Debisi 100 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	74,59	49,04	25,41	25,55
250	77,78	55,97	22,22	21,81
400	77,22	56,19	22,78	21,03
600	76,33	52,76	23,67	23,57

Tablo 4.8. Biyokütle karışımının pirolizinde 400°C sıcaklık ve 200 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 400 °C			Azot Akış Debisi 200 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	74,75	49,17	25,25	25,58
250	76,45	51,35	23,55	25,10
400	78,34	53,16	21,66	25,18
600	75,73	53,68	24,27	22,05

Tablo 4.9. Biyokütle karışımının pirolizinde 400°C sıcaklık ve 300 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 400 °C			Azot Akış Debisi 300 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	78,49	50,50	21,51	27,99
250	73,89	47,36	26,11	26,53
400	79,22	52,61	20,78	26,61
600	72,30	55,08	27,70	17,22

Tablo 4.10. Biyokütle karışımının pirolizinde 500°C sıcaklık ve 50 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 500 °C			Azot Akış Debisi 50 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	78,73	69,77	21,27	8,96
250	79,83	65,08	20,17	14,75
400	80,58	54,46	19,42	26,12
600	81,38	59,05	18,62	22,33

Tablo 4.11. Biyokütle karışımının pirolizinde 500°C sıcaklık ve 100 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 500 °C			Azot Akış Debisi 100 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	81,62	58,24	18,38	23,38
250	80,76	59,00	19,24	21,76
400	81,93	57,56	18,07	24,37
600	82,02	56,73	17,98	25,29

Tablo 4.12. Biyokütle karışımının pirolizinde 500°C sıcaklık ve 200 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 500 °C			Azot Akış Debisi 200 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	79,80	60,37	20,20	19,43
250	79,63	59,88	20,37	19,75
400	80,70	63,58	19,30	17,12
600	81,56	53,27	18,44	28,29

Tablo 4.13. Biyokütle karışımının pirolizinde 500°C sıcaklık ve 300 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 500 °C			Azot Akış Debisi 300 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	81,84	59,26	18,16	22,58
250	81,29	60,69	18,71	20,60
400	82,41	58,13	17,59	24,28
600	81,71	52,86	18,29	28,85

Tablo 4.14. Biyokütle karışımının pirolizinde 600°C sıcaklık ve 50 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 600 °C			Azot Akış Debisi 50 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	82,28	56,84	17,72	25,44
250	81,47	47,94	18,53	33,53
400	82,00	55,22	18,00	26,78
600	81,54	55,63	18,46	25,91

Tablo 4.15. Biyokütle karışımının pirolizinde 600°C sıcaklık ve 100 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 600 °C			Azot Akış Debisi 100 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	78,53	57,51	21,47	21,02
250	81,12	57,49	18,88	23,63
400	80,09	57,28	19,91	22,81
600	80,10	59,56	19,90	20,54

Tablo 4.16. Biyokütle karışımının pirolizinde 600°C sıcaklık ve 200 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 600 °C			Azot Akış Debisi 200 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	78,23	47,83	21,77	30,40
250	80,63	58,90	19,37	21,73
400	83,00	53,49	17,00	29,51
600	82,01	55,16	17,99	26,85

Tablo 4.17. Biyokütle karışımının pirolizinde 600°C sıcaklık ve 300 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 600 °C			Azot Akış Debisi 300 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	84,01	56,82	15,99	27,19
250	82,18	56,74	17,82	25,44
400	81,39	55,92	18,61	25,47
600	79,45	46,05	20,55	33,40

Tablo 4.18. Biyokütle karışımının pirolizinde 750°C sıcaklık ve 50 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 750 °C			Azot Akış Debisi 50 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	79,07	52,20	20,93	26,87
250	82,20	49,56	18,80	32,64
400	84,20	55,13	15,80	29,07
600	82,74	49,25	17,26	33,49

Tablo 4.19. Biyokütle karışımının pirolizinde 750°C sıcaklık ve 100 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz sıcaklığı: 750 °C			Azot Akış Debisi 100 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	78,03	51,28	21,97	26,75
250	81,83	44,73	18,17	37,10
400	83,15	49,55	16,85	33,60
600	72,63	46,44	27,37	26,19

Tablo 4.20. Biyokütle karışımının pirolizinde 750°C sıcaklık ve 200 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

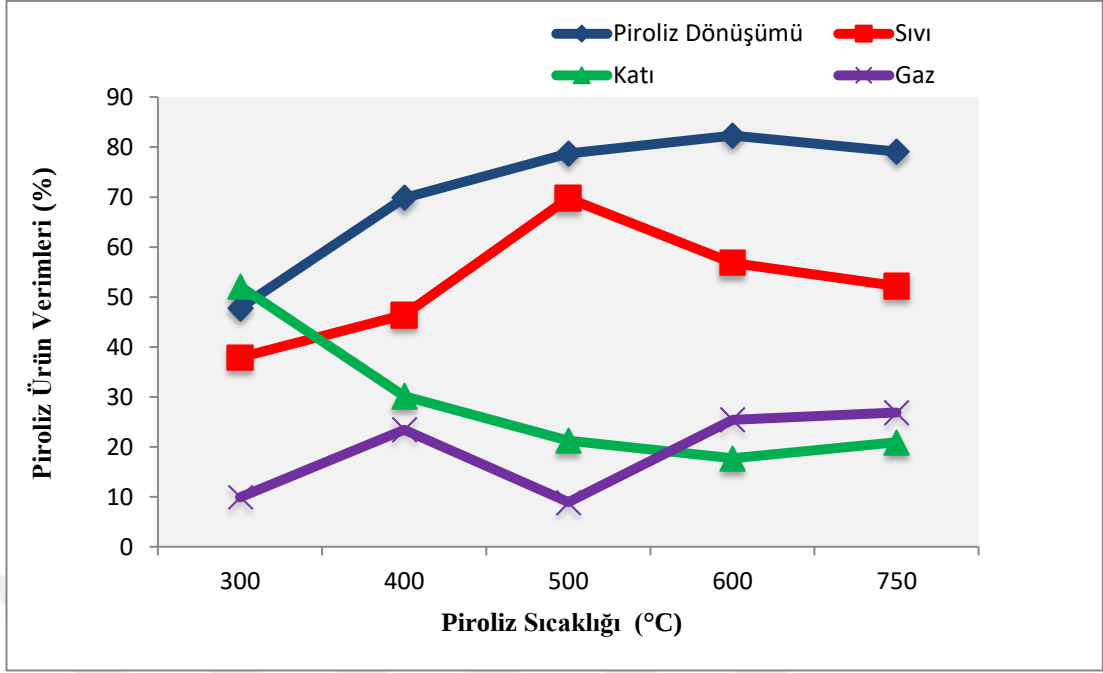
Piroliz sıcaklığı: 750 °C			Azot Akış Debisi 200 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	82,29	40,84	17,71	41,45
250	81,20	53,14	18,80	28,06
400	82,26	48,11	17,74	34,15
600	76,16	43,57	23,84	32,59

Tablo 4.21. Biyokütle karışımının pirolizinde 750°C sıcaklık ve 300 cm³/dk azot akış debisinde elde edilen deneysel sonuçlar

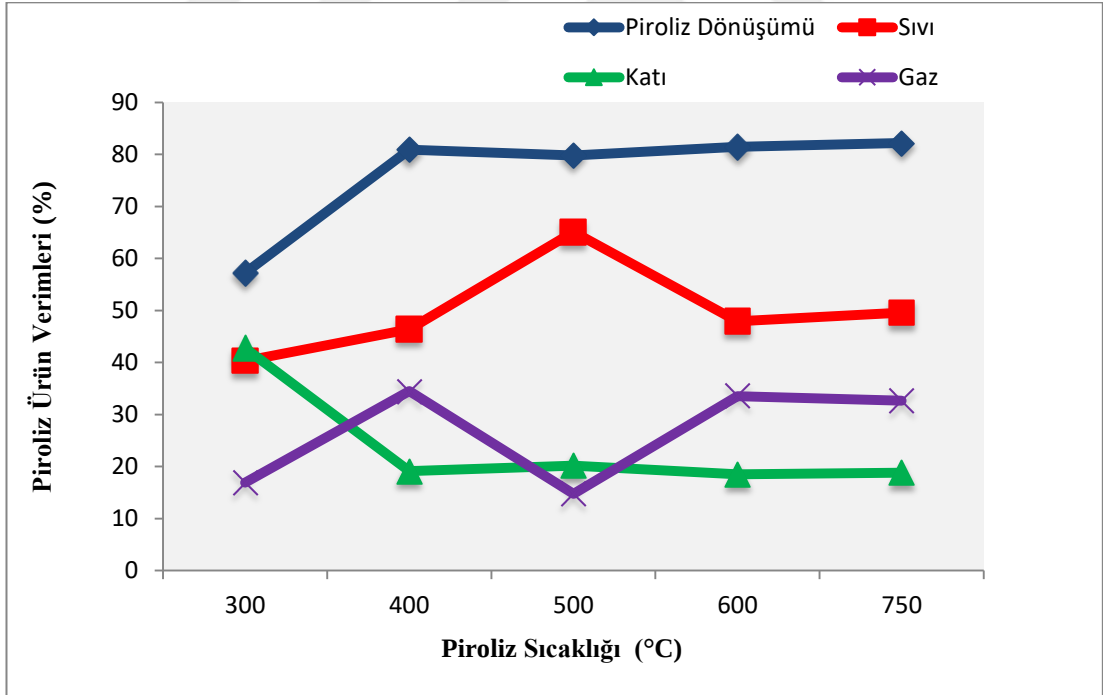
Piroliz sıcaklığı: 750 °C			Azot Akış Debisi 300 cm ³ /dk	
Isıtma Hızı (°C/dk)	Piroliz Dönüşümü (%)	Sıvı Ürün (%)	Katı Ürün (%)	Gaz Ürün (%)
100	79,62	52,29	20,38	27,33
250	83,66	43,13	16,34	40,53
400	85,14	55,19	14,86	29,95
600	80,89	42,49	19,11	38,40

4.3. Piroliz Ürün Verimlerine Sıcaklığın Etkisi

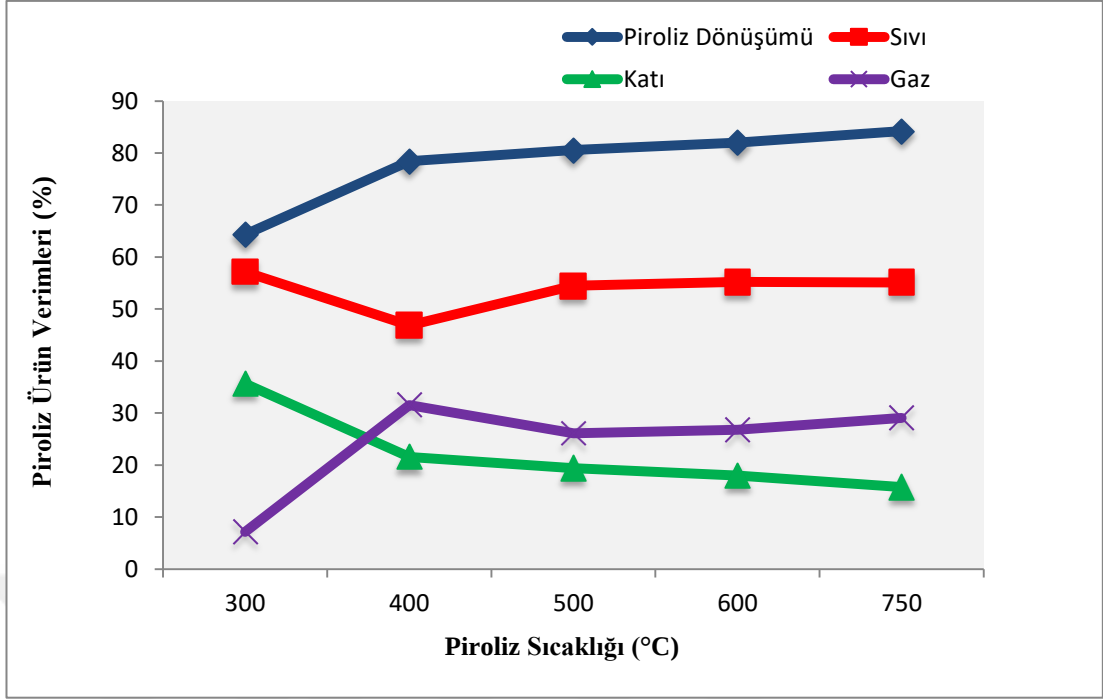
Biyokütlenin pirolizi deneylerinde faydalanan sıcaklık parametresi, piroliz sonucu oluşan ürün verimliliği ve miktarı açısından önemli bir etkiye sahiptir. Çoğunlukla piroliz sıcaklığının artması ile gaz ürün veriminde artma gözlemlenirken, katı ürün veriminde azalma gözlemlenir. Orta dereceli sıcaklıklarda (400-500°C) sıvı ürün veriminde artma gözlemlenirken, sıcaklık artışına bağlı olarak buhar ayrışmasına neden olan ikincil reaksiyonlardan dolayı sıvı ürün veriminde düşüş gözlemlenir. Bu çalışmada yapılan piroliz deneyleri 300, 400, 500, 600 ve 750°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiş olup en yüksek sıvı veriminin gözlemlendiği 50 cm³/dk azot akış debisinde kullanılan biyokütle karışımının farklı ısıtma hızlarında ürün verimliliği üzerine piroliz sıcaklığının etkisi yukarıdaki tablolardan (4.2 - 4.21) yararlanılarak çizilen grafiklerle verilmiştir.



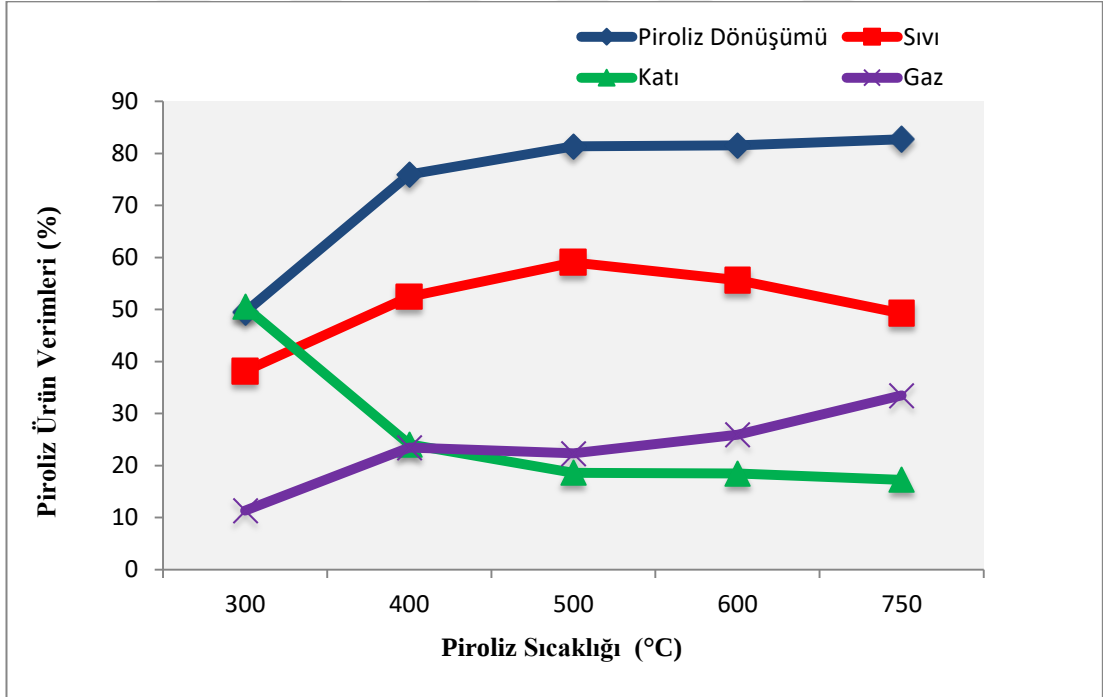
Şekil 4.1. Biyokütle karışımının pirolizinde 50 cm³/dk azot akış debisi ve 100°C/dk ısıtma hızında ürün verimliliği üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



Şekil 4.2. Biyokütle karışımının pirolizinde 50 cm³/dk azot akış debisi ve 250°C/dk ısıtma hızında ürün verimliliği üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



Şekil 4.3. Biyokütle karışımının pirolizinde 50 cm³/dk azot akış debisi ve 400°C/dk ısıtma hızında ürün verimliliği üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



Şekil 4.4. Biyokütle karışımının pirolizinde 50 cm³/dk azot akış debisi ve 600°C/dk ısıtma hızında ürün verimliliği üzerine piroliz sıcaklığının etkisi

Şekil 4.1'deki verilere bakıldığında %69.77 değeri ile en yüksek sıvı verimine 500°C de ulaşıldığı gözlemlenmektedir. Grafiklerdeki sıcaklık değişimlerinin ürün verimi üzerine olan etkisi incelenirken ısıtma hızlarının değişmesiyle sıvı ürün verimi değişkenlik göstermiş olsa da incelenen dört grafikte 500°C de en yüksek sıvı ürün verimliliğine ulaşıldığı gözlemlenmektedir. Sıvı ürün veriminin en yüksek olduğu Şekil 4.1'deki %69,77 değerinin 100°C/dk ısıtma hızında elde edildiği görülmektedir. Bu şartlarda gerçekleştirilen deneyde piroliz dönüşümü %78,73'tür. En yüksek piroliz dönüşüm yüzdesi ise Şekil 4.4'te görülen 600°C/dk ısıtma hızında ve 750°C de elde edilen %82,74'tür. Şekil 4.2 ve 4.3'e bakılacak olursa; piroliz dönüşüm verimi değerlerinin sıcaklık arttıkça artış gösterdiği, bu artışın 500°C' ye kadar sıvı ürün verimindeki artıştan, 500°C den sonra ise gaz ürün verimindeki artıştan kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Piroliz ürün verimliliğindeki bu değişkenlik literatür çalışmalarıyla uyumludur (Pütün, 2010; Kar, 2018).

Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda çizilen grafiklerde düşük sıcaklıklarda sıvı ürün verimliliğinin de düşük olduğu gözlemlenmektedir. En düşük sıvı ürün verimi Şekil 4.2'deki 100°C/dk ısıtma hızı ve 300°C piroliz sıcaklığındaki %37,9 değeridir. Şekil 4.3-4.4'teki grafikler incelendiğinde 500°C'den yukarıdaki sıcaklıklarda sıvı ürün verimliliğinin düşmesine gaz ürün verimliliğinin artışının neden olduğu gözlemlenmektedir.

Yine Şekil 4.1-4.4'teki grafikler incelendiğinde sıcaklığın artması ile katı ürün verimliliğinin düştüğü gözlemlenmektedir. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere katı ürün verimi 300°C ve 400°C/dk ısıtma hızında %35,68 ile en düşük değerini almıştır. En yüksek katı ürün verimi ise Şekil 4.4'te 600°C/dk ısıtma hızı ve 300°C'de %50,5 olarak elde edilmiştir.

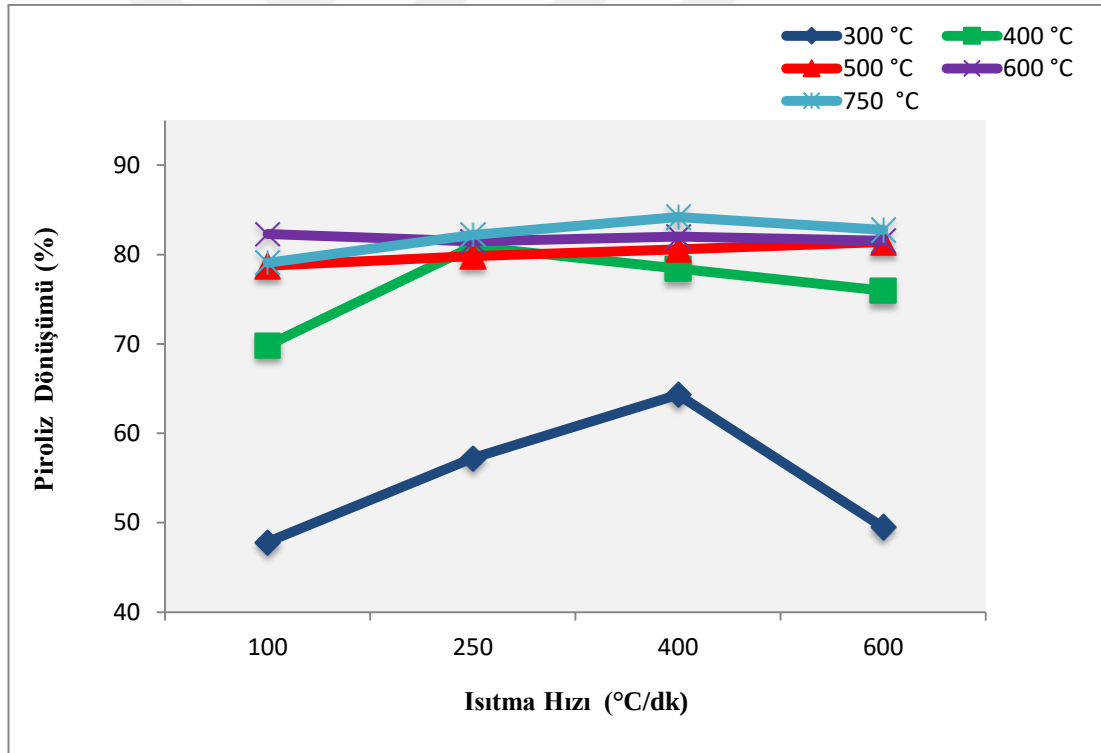
Grafiklerdeki gaz ürün değişimleri incelendiğinde genel olarak sıcaklığın artması ile gaz ürün verimliliği artmış olsa da gaz ürün verimliliğindeki en düşük değerler 500°C sıcaklıkta bulunmuş, buna da 500°C'deki sıvı ürün verimliliğindeki ani artışın sebep olduğu düşünülmektedir. En yüksek gaz ürün verimi Şekil 4.4'te görüldüğü gibi 750°C ve 600°C/dk ısıtma hızında elde edilmiş ve bu değer %33,49'dur. En

düşük gaz ürün veriminin ise Şekil 4.2’de , 500°C ve 100°C/dk’da %8,96 olarak elde edildiği görülmektedir.

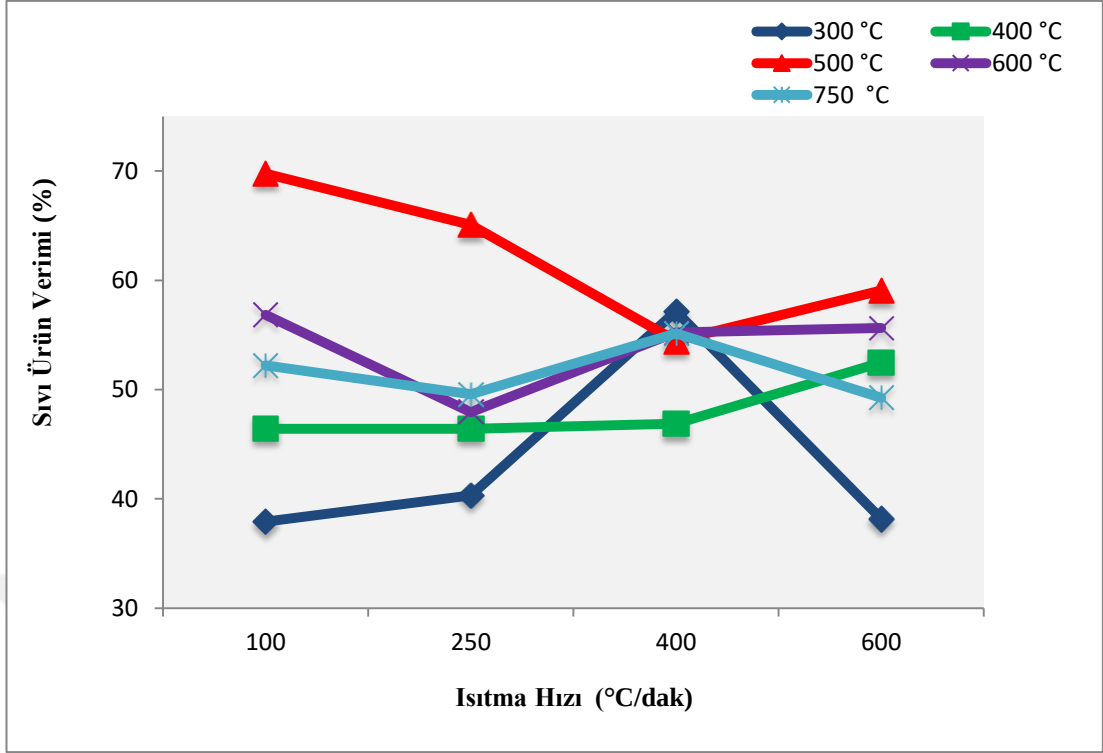
Grafikler incelendiğinde; gaz ürün ve piroliz dönüşüm verimliliğinin 500°C ve 600°C sıcaklıklarda büyük bir değişkenlik göstermediği, birbirine yakın değerler aldığı da görülmektedir.

4.4. Piroliz Ürün Verimlerine Isıtma Hızının Etkisi

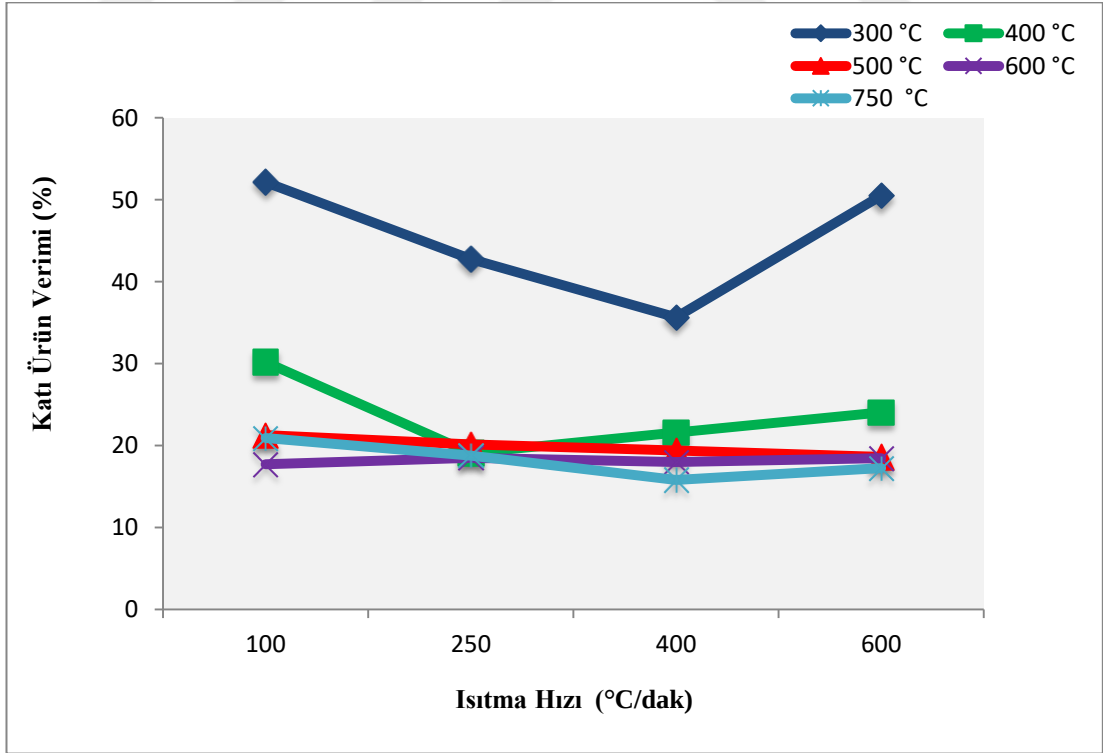
Yapılan deneysel çalışmada, en yüksek sıvı ürün veriminin alındığı 50 cm³/dk azot akış debisinde farklı ısıtma hızlarının piroliz dönüşümü, sıvı ürün verimi, katı ürün verimi ve gaz ürün verimliliğine etkisi Şekil 4.5-4.8’deki grafik verileriyle incelenmiştir.



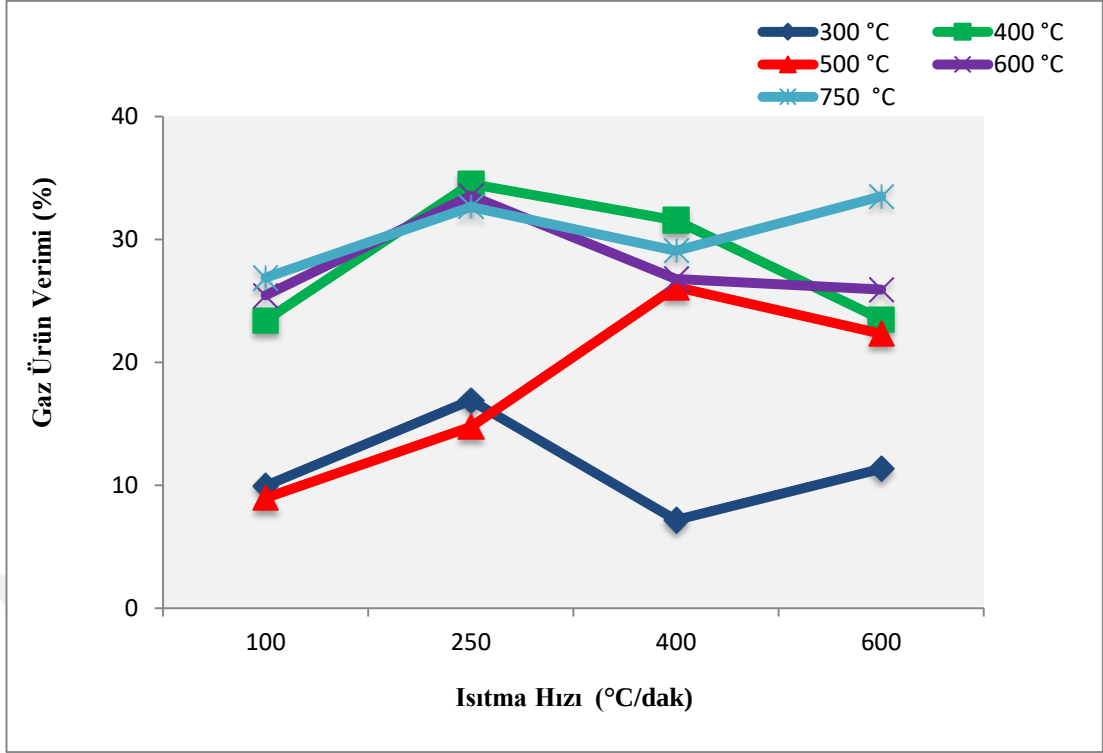
Şekil 4.5. 50 cm³/dk sabit azot akış debisinde biyokütle karışımlarının pirolizinde farklı sıcaklıklardaki piroliz dönüşümü üzerine ısıtma hızının etkisi



Şekil 4.6. 50 cm³/dk sabit azot akış debisinde biyokütle karışımlarının pirolizinde farklı sıcaklıklardaki sıvı ürün verimi üzerine ısıtma hızının etkisi



Şekil 4.7. 50 cm³/dk sabit azot akış debisinde biyokütle karışımlarının pirolizinde farklı sıcaklıklardaki katı ürün verimi üzerine ısıtma hızının etkisi



Şekil 4.8. 50 cm³/dk sabit azot akış debisinde biyokütle karışımlarının pirolizinde farklı sıcaklıklardaki gaz ürün verimi üzerine ısıtma hızının etkisi

Şekil 4.5'te en yüksek piroliz dönüşüm veriminin oluştuğu 750°C'deki değerler incelendiğinde, %84,2'lik değerın ısıtma hızının 400°C/dk olduğu şartlarda elde edildiği görülmektedir. 300°C'deki piroliz dönüşüm verimleri ısıtma hızının 100°C/dk' dan 400°C/dk 'ya kadar çıkmasıyla doğru orantılı olarak arttığı, 600°C/dk ısıtma hızında ise dönüşüm veriminin önemli oranda azaldığı görülmektedir. Bu azalışın nedeni çok yüksek ısıtma hızı ve düşük sıcaklıklarda biyokütle karışımının koklaşması nedeniyle katı ürün verimini arttırıp gaz ve sıvı ürün verimlerini düşürmesidir. 500°C sıcaklıktaki piroliz dönüşüm verimleri incelendiğinde sıvı ve gaz ürün verimleri toplamı çok fazla değişmediği için ısıtma hızı 100°C/dk'dan 600°C/dk'ya çıkarıldığında bu dönüşüm verimlerinde önemli, ölçülebilir bir değişiklik gözlenmemiştir.

Şekil 4.6 incelendiğinde, en yüksek sıvı ürün veriminin 500°C sıcaklık ve 100°C/dk azot akış debisinde %69,77 olduğu gözlenmektedir. En düşük değer de 300°C ve 100°C/dk 'da %37,9'dur.

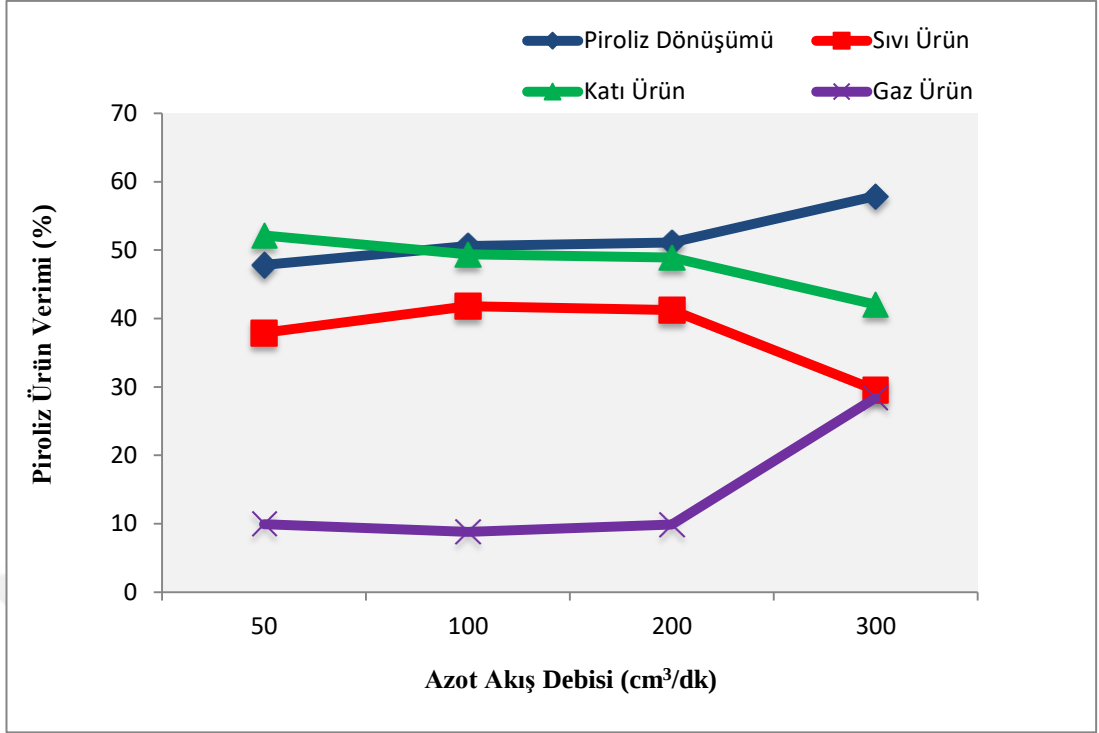
Sıvı ürün veriminin 500°C’de ısıtma hızı 400°C/dk olduğu durumda azalmasının sebebinin gaz ürün veriminin artışına bağlı olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca 400°C/dk ısıtma hızındaki sıvı ürün verimlerinin yüksek piroliz sıcaklıklarında birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür.

Şekil 4.6’da katı ürün verimine ısıtma hızının etkisi incelendiğinde, en yüksek katı ürün veriminin 300°C piroliz sıcaklığı ve 100°C/dk ısıtma hızında %52,16 olduğu gözlenirken, en düşük verim ise 750°C piroliz sıcaklığı ve 400°C/dk ısıtma hızında %15,8’dir. Yüksek sıcaklıklarda katı ürün veriminin düşük olması sıvı ve gaz ürün veriminin artışından kaynaklanmaktadır. Ayrıca 300°C ve 600°C/dk’da katı ürün veriminin artması; yüksek ısıtma hızının reaktördeki biyokütle karışımına etkisinden dolayı katının topaklaşma (koklaşma) yapmasından kaynaklanmaktadır.

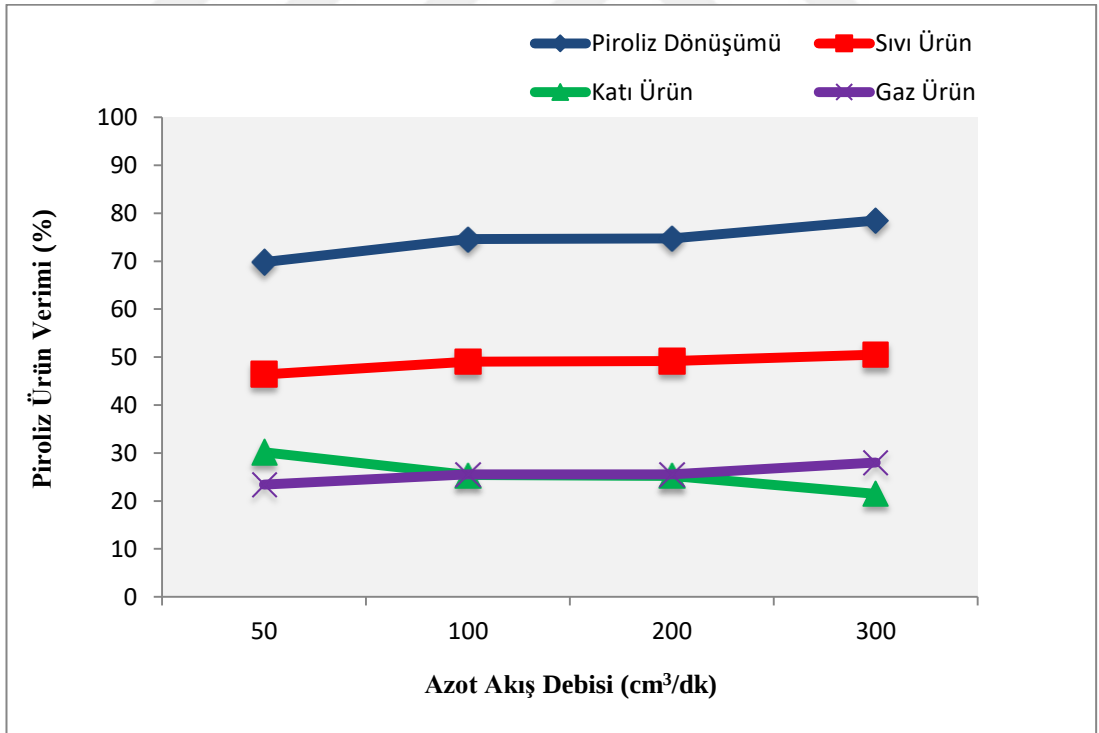
Şekil 4.8’de gaz ürün verimine ısıtma hızının etkisi incelendiğinde, en yüksek gaz ürün verimi 250°C/dk ısıtma hızında ve 400°C piroliz sıcaklığında %34,5 olarak elde edilmiştir. En düşük değer ise 500°C piroliz sıcaklığı ve 100°C/dk ısıtma hızında %8,96 olarak bulunmuştur. En düşük gaz ürün verim değeri olan %8,96 sıvı ürün veriminin en yüksek olduğu şartlarda görülmüştür.

4.5. Piroliz Ürün Verimlerine Azot Akış Debisinin Etkisi

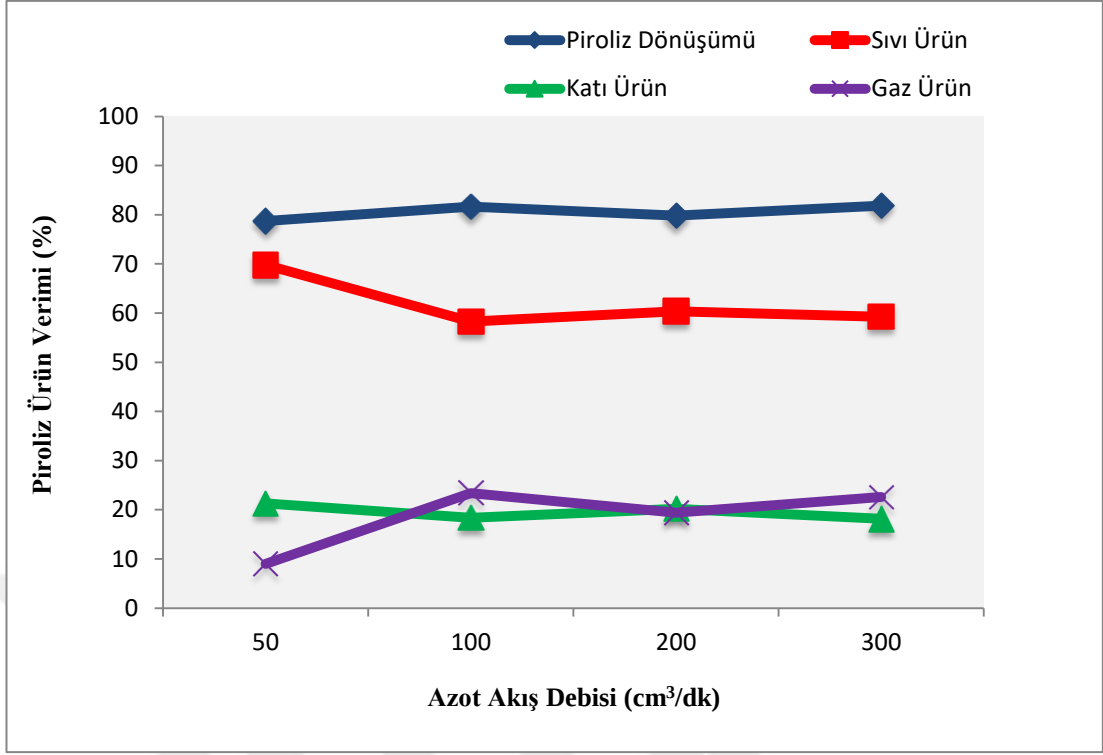
Yapılan çalışmada incelenen parametrelerden biri olan azot akış debisinin, 100°C/dk ısıtma hızında farklı piroliz sıcaklarında; piroliz dönüşümü, sıvı ürün verimi, katı ürün verimi ve gaz ürün verimliliğine olan etkisi Şekil 4.9-4.13’teki grafik verileri ile incelenmiştir.



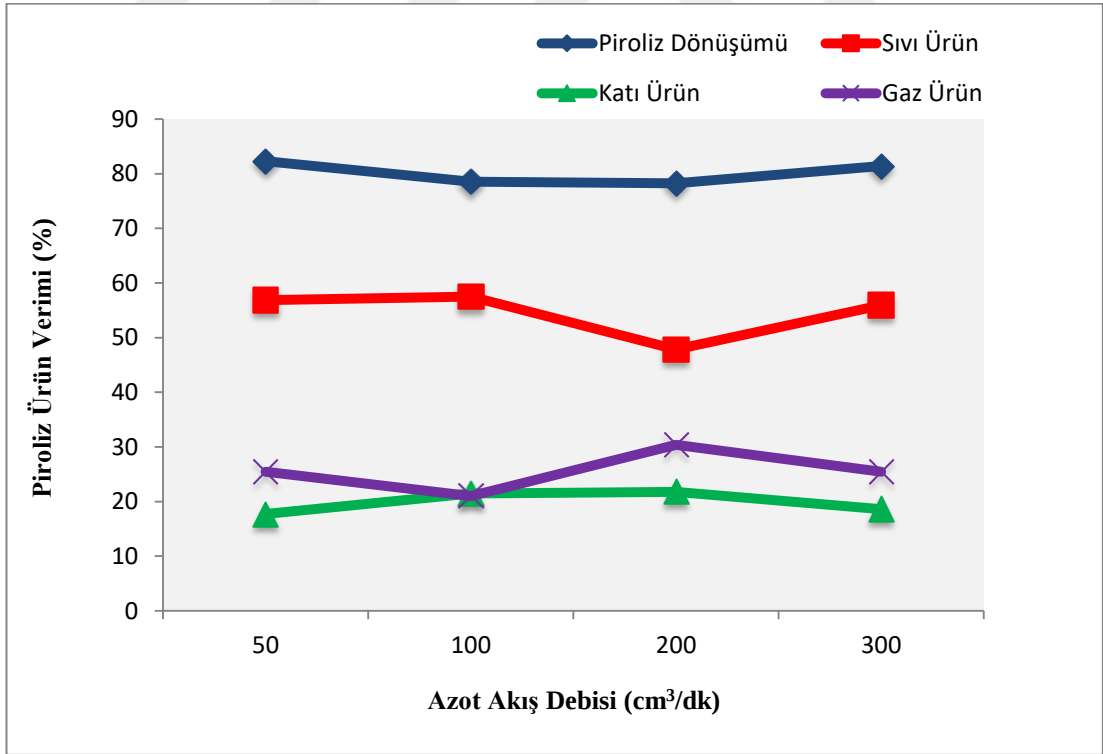
Şekil 4.9. 300°C sıcaklık ve 100°C/dk ısıtma hızında azot akış debisinin ürün verimleri üzerine etkisi



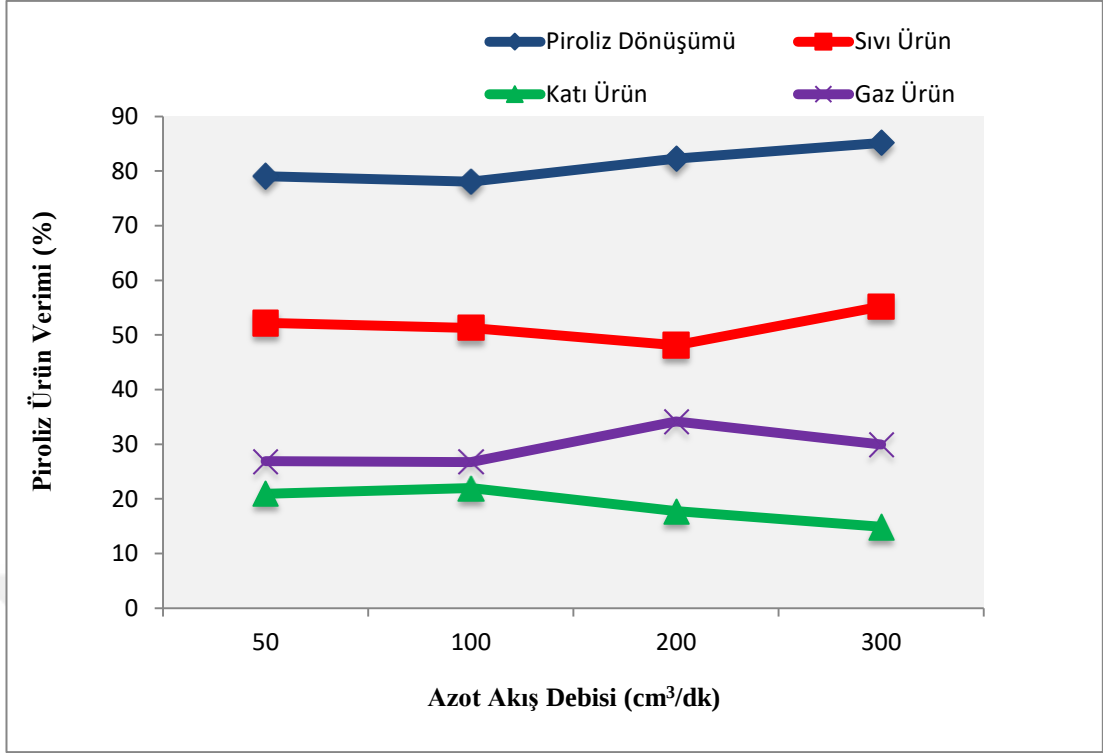
Şekil 4.10. 400°C sıcaklık ve 100°C/dk ısıtma hızında azot akış debisinin ürün verimleri üzerine etkisi



Şekil 4.11. 500°C sıcaklık ve 100°C/dk ısıtma hızında azot akış debisinin ürün verimleri üzerine etkisi



Şekil 4.12. 600°C sıcaklık ve 100°C/dk ısıtma hızında azot akış debisinin ürün verimleri üzerine etkisi



Şekil 4.13. 750°C sıcaklık ve 100°C/dk ısıtma hızında azot akış debisinin ürün verimleri üzerine etkisi

Şekil 4.9 incelendiğinde; 300°C piroliz sıcaklığı ve 100°C/dk ısıtma hızında, piroliz dönüşümünde en yüksek değer 300 cm³/dk azot akış debisinde %57,9 olduğu, en düşük değerinde 50 cm³/dk azot akış debisinde %47,84 olduğu görülmektedir. Azot akış debisi piroliz dönüşümünde orta hızlarda etkisi az olur iken, 300 cm³/dk azot akış debisinde gaz ürün veriminin artışından dolayı en yüksek değerine ulaştığı gözlemlenmektedir. Yine Şekil 4.9 incelendiğinde, sıvı ürün veriminin en yüksek değerinin 100 cm³/dk azot akış debisinde %41,8 olduğu, en düşük değerin 300 cm³/dk azot akış debisinde %29,52 olduğu görülmektedir. Azot akış debisi 300 cm³/dk' ya çıkınca sıvı ürün veriminin düşmesi gaz ürün veriminin artmasından kaynaklanır. Katı ürün veriminde ise en yüksek değerin 50 cm³/dk azot akış debisinde %52,16 olduğu, en düşük değerin de 300 cm³/dk azot akış debisinde %42,06 olduğu görülmektedir. Azot akış debisinin 300 cm³/dk'ya çıkmasıyla sıvı ürün verimi, gaz ürün veriminin artmasından dolayı azalır. Gaz ürün verimindeki değişime bakıldığında, en yüksek değerin 300 cm³/dk azot akış debisinde %28,42 olduğu, en düşük değerin de 100 cm³/dk azot akış debisinde %8,82 olduğu görülmektedir. Gaz ürün veriminin 300 cm³/dk azot akış debisinde artmasının da sıvı

ve katı ürün veriminin azalmasından dolayı gerçekleştiği yine Şekil 4.9'daki grafik incelendiğinde görülmektedir.

Şekil 4.10 incelendiğinde; 400°C piroliz sıcaklığı ve 100°C/dk ısıtma hızında, piroliz dönüşümünde en yüksek değerin 300 cm³/dk azot akış debisinde %78,49 değeri, en düşük değerin de 50 cm³/dk azot akış debisinde %69,82 olduğu görülmektedir. Sıvı ürün verimliliğinde ise en yüksek değerin 300 cm³/dk azot akış debisinde %50,5 olduğu, en düşük değerin ise 50 cm³/dk azot akış debisinde %46,41 olduğu gözlemlenmektedir. Katı ürün verimine azot akış debisinin etkisine bakılırsa; en yüksek değer 100 cm³/dk azot akış debisinde %30,18, en düşük değer 300 cm³/dk azot akış debisinde %21,52'dir. Gaz ürün veriminde ise en yüksek değer 300 cm³/dk'da %27,99, en düşük değer ise 50 cm³/dk azot akış debisinde %23,41'dir.

Şekil 4.11 incelendiğinde; 500°C piroliz sıcaklığı ve 100°C/dk ısıtma hızında, piroliz dönüşümünde en yüksek değerin 300 cm³/dk azot akış debisinde %81,84, en düşük değerin de 50 cm³/dk azot akış debisinde %78,73 olduğu görülmektedir. Sıvı ürün eldesinde ise 50 cm³/dk'da elde edilen %69,77'lik verim en yüksek, 100 cm³/dk azot akış debisinde %58,24 ise en düşük verimdir. Katı ürün verimine azot akış debisinin etkisine bakılırsa, en yüksek değer 50 cm³/dk azot akış debisinde %21,27, en düşük değer, 300 cm³/dk azot akış debisinde %18,16'dır. Gaz ürün veriminde ise en yüksek verim 100 cm³/dk azot akış debisinde %23,38 iken en düşük verim ise 50 cm³/dk azot akış debisinde %8,96'dır.

Şekil 4.12 incelendiğinde; 600°C piroliz sıcaklığı ve 100°C/dk ısıtma hızında, piroliz dönüşümünde en yüksek değer 50 cm³/dk azot akış debisinde %82,28, en düşük değer ise 200 cm³/dk azot akış debisinde %78,23'tür.. Sıvı ürün verimliliğinde ise en büyük değerin 100 cm³/dk azot akış debisinde %57,51 olduğu, en düşük değerin de 200 cm³/dk azot akış debisinde %47,83 olduğu görülmektedir. Katı ürün verimine azot akış debisi etkisine bakılırsa; en yüksek verimin 200 cm³/dk azot akış debisinde %21,77, en düşük verimin ise 50 cm³/dk azot akış debisinde %17,72 olduğu görülmektedir. Gaz ürün veriminde ise en yüksek değer 200 cm³/dk azot akış

debisinde %30,4, en düşük değer 100 cm³/dk azot akış debisinde %21,02 olarak tespit edilmiştir.

şekil 4.13 incelendiğinde; 750°C piroliz sıcaklığı ve 100°C/dk ısıtma hızında, piroliz dönüşümünde en yüksek verim 300 cm³/dk azot akış debisinde %85,14, en düşük verim ise 100 cm³/dk azot akış debisinde %79,07 olarak bulunmuştur. Sıvı ürün verimliliğinde ise en yüksek değerin 300 cm³/dk azot akış debisinde %55,19 olduğu, en düşük değerin 200 cm³/dk azot akış debisinde %48,11 olduğu görülmektedir. Katı ürün verimine azot akış debisinin etkisine bakılırsa en yüksek verimin 100 cm³/dk azot akış debisinde %21,97 olduğu, en düşük veriminse 300 cm³/dk azot akış debisinde %14,86 olduğu görülmüştür. Gaz ürün veriminde ise en yüksek verim değerinin 200 cm³/dk azot akış debisinde %34,15 olduğu, en düşük verim değerinin ise 100 cm³/dk azot akış debisinde %26,75 olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan bu çalışmada ülkemizde biyokütle hammaddesi olarak oldukça yaygın bulunabilecek çay çalısı, ceviz kabuğu ve çam kozalağı karışımının pirolizini gerçekleştirdik. Seçilen bu üç farklı biyokütle örnekleri 1:1:1 oranında karıştırılmıştır. Canlılık ve ekosistem için nispeten temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütlenin, doğrudan yakacak olarak kullanılan atıklarının enerji kapasitesi daha yüksek sıvı ürünlere dönüşüm verimliliğini belirlemek temel amaç edinilmiştir. Ayrıca mevcut dönüşüm içeriğindeki katı ve gaz ürün verimliliği de incelenmiştir.

Bu amaçlar doğrultusunda öncelikle; çay çalısı, ceviz kabuğu, çam kozalağı örnekleri öğütme ve eleme basamaklarından geçirilerek 1 mm'lik parçacık boyutlarında elde edilmiştir. 1 mm parçacık boyutundaki üç farklı biyokütle örneği eşit oranda karıştırılarak elde edilen karışıma kısa analiz süreçleri uygulanmış nem, uçucu madde, sabit karbon ve kül miktarı kütlece yüzde olarak sırasıyla %13,04 , %61,26 , %24,68 ve %1,02 olarak tespit edilmiştir. Daha sonra bu karışımın ısı değeri kalorimetre ile 4227 cal/g olarak belirlenmiştir. Piroliz deneylerinde kullanılan biyokütle karışımının kısa analiz sonuçları ve ısı değerine bakıldığında; elde edilen veriler mevcut biyokütle karışımının biyo-yakıt üretimi için kullanılabilecek biyokütle örneklerinin sahip olması gereken özellikleri barındırdığı görülmektedir (Lehto ark.,2014; Kar, 2018).

Kısa analiz işlemleri ve karışımın ısı değeri belirlendikten sonra piroliz deneylerinden en verimli şartlarda (50 cm³/dk azot akış debisi, 500°C piroliz sıcaklığı, 100°C/dk ısıtma hızı) elde edilen biyo-yag'ın ısı değeri 5900 cal/g olarak tespit edilmiştir. Hammadde karışımının ısı değeri ile hızlı piroliz sonucunda elde edilen biyo-yagın ısı değeri kıyaslandığında ham biyo-yagın ısı değerinin ham

madde karışımından yaklaşık %40 daha yüksek olduğu görülmektedir. Enerji içeriğindeki bu artış yukarıda da belirttiğimiz, doğrudan yakacak olarak kullanılan biyokütlelerin hızlı pirolizle enerji içeriği daha yüksek sıvı ürünlere dönüştürülmesi amacına uygun düşmektedir.

Bir sonraki aşamada çay çalısı, ceviz kabuğu ve çam kozalağından oluşan biyokütle karışımının hızlı piroliz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Biyokütle karışımının hızlı piroliz işleminde sıvı, gaz ve katı verimlerine sırasıyla sıcaklığın, ısıtma hızının ve sürükleyici gaz akış hızının etkileri incelenmiştir.

Sıcaklık, hızlı piroliz işlemindeki ürün verimlerini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bu çalışmada 300 ve 400°C’de gerçekleştirilen deneylerde genel olarak katı ürün veriminin fazla olduğu, hızlı piroliz için orta dereceli sıcaklıklar olarak nitelendirilen 500 ve 600°C’de sıvı ürün veriminin genellikle yükseldiği, yüksek sıcaklıklarda (600-750°C) ise sıvı ürün veriminin katı ve gaz ürün verimlerinin de etkisiyle düştüğü gözlemlenmektedir. Nitekim yapılan bu çalışmada en yüksek sıvı ürün verim değeri olan %69,77’nin 500°C piroliz sıcaklığında elde edildiği bilinmektedir. En yüksek verimin elde edildiği 500°C’lik bu piroliz sıcaklığı, literatürde de sıvı ürün veriminin maksimum olarak gözlendiği sıcaklık aralığındadır (Kan ve ark., 2016).

Isıtma hızının ürün verimlerine etkisinin incelendiği Şekil 4.6’ daki en yüksek piroliz dönüşüm değeri olan %84,20’nin 400°C/dk’lık ısıtma hızında elde edildiği görülmüştür. Yine aynı grafikteki verilere bakıldığında sıcaklığın 300°C’den yüksek olduğu durumlarda ısıtma hızı değişiminin piroliz dönüşüm verimlerini önemli ölçüde etkilemediği tespit edilmiştir. Şekil 4.6’daki grafiğe göre düşük sıcaklık ve yüksek ısıtma hızlarında koklaşma nedeni ile katı ürün verimi artış göstermiş olup sıvı ve gaz ürün verimlerinde düşüşler görülmüştür. Bu sonuç literatürde de bahsedilen bulgularla örtüşmektedir (Kar, 2018).

Şekil 4.6'daki grafiksel veriler incelendiğinde 100°C/dk'lık ısıtma hızının sıvı ürün verimi için optimum ısıtma hızı olduğu görülmektedir. Yine bu grafiğe göre çok yüksek ısıtma hızlarında (400, 600°C/dk) gaz ürün verimi artışı ve koklaşma nedeni ile katı ürün verimi artışından dolayı sıvı ürün veriminin düştüğü görülmüştür.

Şekilde 4.7'deki grafikte yüksek ısıtma hızının genellikle katı ürün verimini olumsuz etkilediği, düşük sıcaklık ve düşük ısıtma hızının ise katı ürün veriminde olumlu bir etki oluşturduğu görülmektedir. Nitekim 400°C/dk ısıtma hızı ve 300°C sıcaklıkta en düşük katı ürün verimi olarak elde edilen %15,80' lik değer bu durumu açıkça ifade etmektedir. Bu durum literatürdeki araştırma bulgularıyla desteklenmektedir (Şensöz ve Can, 2002).

Şekil 4.11'deki veriler değerlendirildiğinde 500°C sıcaklıkta 50 cm³/dk azot akış debisinde, sıvı ürün veriminin maksimum olduğu görülmektedir. Bunun nedeni muhtemelen sürükleyici azot akış debisi yüksek olduğunda, piroliz esnasında ortaya çıkan gazların oldukça hızlı sürüklenmesi ve yoğunlaşabilen gazların da soğutucuyu daha çabuk terketmesidir. Bu sebeple akış hızı 50'den 300 cm³/dk'ya çıktığında genellikle yoğunlaşamayan gaz verimi de artış göstermiştir ve genellikle sıvı ürün veriminde düşüş gözlenmiştir. Bu sonuçlara benzer sonuçların literatürde de yer aldığını görmekteyiz (Pütün, 2010;Demiral ve Ayan 2011). Şekil 4.9-4.13'teki tüm grafik verilerine göre azot akış debisi değişiminin piroliz dönüşüm verimlerini önemli oranda etkilemediği söylenebilir.

Gerek kullanılan biyokütle hammaddelerinin ulaşılabilirliği ve miktarı gerek elde edilen sıvı ürün verimliliği gerekse elde edilen biyo-yagın ısı değeri değerlendirildiğinde mevcut biyokütle karışımının yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Özellikle elde edilen ham biyo-yagın verimliliğinin çok yüksek olması biyokütleden sıvı yakıt elde edilmesinde önemli bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca üretilen ham biyo-yagın ısı değerinin hammaddesine göre oldukça yüksek olması, enerji verimliliği açısından da yapılan çalışmanın yararlı sonuçlarından biri olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdoulmoumine, N., Adhikari, S., Kulkarni, A., Chattanathan, S., 2015. A review on biomass gasification syngas cleanup. *Appl. Energy* 155, 294–307.
- Abnisa, F., Arami-Niya, A., Sahu, J.N, Noor, I.M. 2013. Utilization of oil palm tree residues to produce bio-oil and bio-char via pyrolysis. *Energy Convers Mgmt* 76: 1073-1082.
- Acaroğlu, M. 2007. *Alternatif Enerji Kaynakları*. 2.Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Acaroğlu, M. 2013. *Alternatif Enerji Kaynakları*. 3.Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Acıkalın, K., Karaca, F. 2017. Fixed-bed pyrolysis of walnut shell: parameter effects on yields and characterization of product. *J. Analytical Applied Pyrolysis* 125: 234-242.
- Apaydin-Varol, E., Pütün, E., Pütün, A.E. 2007. Slow pyrolysis of pistachio shell. *Fuel* 86, 1892-1899.
- Atakan, Y. 2020. Dünya enerji tüketimine 2050 yıllarında güneş, rüzgar ve nükleerin katkısı ne kadar olabilir ? www.herkesebilimteknoloji.com/ (Erişim 14 Temmuz 2020).
- Babu, B.V., Chaurasia, A.S. 2004a. Parametric study of thermal and thermodynamic properties on pyrolysis of biomass in thermally thick regime. *Energy Convers. Manage.* 45; 53–72.
- Babu, B.V., Chaurasia, A.S. 2004b. Pyrolysis of biomass: improved models for simultaneous kinetics and transport of heat, mass and momentum. *Energy Conversion and Management* 45: 1297–1327.
- Basu, P., 2006. *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. CRC Press, Taylor & Francis, New York, NY.
- Basu, P., Butler, J., Leon, M.A. 2011. Biomass co-firing options on the emission reduction and electricity generation costs in coal-fired power plants. *Renew. Energy* 36, 282–288.
- Basu, P. 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory Second Edition*. Elsevier, London.
- Basu, P. 2018. *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory Third Edition*. Elsevier, London.

- Boyle, G (Ed.). 2013. Renewable energy power for a sustainable future. 3th Edit, Oxford, UK.
- BP, British Petroleum. 2019. Statistical Review of World Energy 2019. BP, London, UK.
- Bridgwater, A.V. 1995. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. *Fuel* 74 (5), 633–653.
- Bridgwater, A.V., 1999. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. *J. Anal. Appl. Phys.* 51 (1-2), 3–22.
- Bridgwater, A.V., 2002. *Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook*, vol. 2. CPL Press.
- Bridgwater, A.V., Czernik, S., Piskorz, J., 2001. An overview of fast pyrolysis. In: Bridgwater, A.V. (Ed.), *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*. Blackwell Science, pp. 977–997.
- Bridgwater, A.V., Toft, A.J., Brammer, J.G., 2002. A techno-economic comparison of power Production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. *Renew. Sust. Energy Rev.* 6 (3), 181–246.
- Brown, R.C. (Ed.), 2011. *Thermochemical Processing of Biomass*. Wiley, pp. 78–123.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A. 2015. *Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımlarıyla*, Pınarbaşı, A (Çeviri Editörü), Palme Yayınevi, Ankara.
- Chen, X., Zhang, H., Song, Y., Xiao, R. 2018. Prediction of product distribution and bio-oil heating value of biomass fast. *Chem. Eng. & Proc.: Process Intensif.* 130, 36-42.
- Cheremisinoff, N.P., Cheremisinoff, P.N., Ellerbusch, F. 1980. *Biomass: application, Technology and production*. Marcell Dekker, Inc, New York.
- Crocker, M (Ed.). 2010. *Thermochemical Conversion of Biomass to Liquid Fuels and Chemicals*. RSC Publishing, London.
- Dahiya, A (Ed.). 2015. *Bioenergy: Biomass to Biofuels*. Elsevier/Academic Press, New York.
- Demiral, I., Ayan, E.A. 2011. Pyrolysis of grape bagasse: Effect of pyrolysis conditions on the product yields and characterization of the liquid product. *Bioresource Technology*, 102, 3946-3951.
- Demiral, I., Şensöz, S. 2006a. Fixed-bed pyrolysis of hazelnut bagasse: influence of pyrolysis parameter on product yields. *Energy Sources, Part A*, 28: 1149-1158.
- Demiral, I., Sensöz, S. 2006b. Structural analysis of pyrolysis products from pyrolysis of hazelnut bagasse. *Energy Sources, Part A*, 2006; 28: 1159-1168.
- Demiral, I., Sensöz, S. 2008. The effects of different catalysts on the pyrolysis of industrial wastes (olive and hazelnut bagasse). *Bioresource Technology* 99, 8002-8007.
- Demirbas, A., 2000. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass. *Energy Convers. Manage.* 41 (6), 633–646.

- Demirbas, A., 2001. Biomass resources facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energ. Convers. Manage.* 42 (11), 1357–1378.
- Diebold, J.P., Bridgwater, A.V., 1997. Overview of fast pyrolysis of biomass for the production of liquid fuels. In: Bridgwater, A.V., Boocock, D.G.B. (Eds.), *Developments in Thermochemical Biomass Conversion*. Blackie Academic & Professional, pp. 5–27.
- Diebold, J.P., Milne, T.A., Czernik, S., Osamaa, A., Bridgwater, A.V., Cuevas, A. 1997. Proposed specification for various grades of pyrolysis oils. *Developments in Thermochemical Biomass Conversion*. Blackie Academic & Professional.
- ETKB, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2020. Türkiye'nin Enerji Görünümü 2018. ETKB, Ankara. www.enerji.gov.tr/(erişim 10 Ekim 2019).
- ETKB, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2020. Türkiye'nin Enerji Görünümü 2019. ETKB, Ankara. www.enerji.gov.tr/(erişim 20 Temmuz 2020).
- Gupta, V.K., Tuohy, M.G., Kubicek, C.P., Saddler, J., Xu, F. (Eds.). 2014. *Bioenergy research: advances and applications*. Elsevier Science, New York.
- IEA, International Energy Agency. 1998. Biomass energy, data, analysis and trends. Conference Proceedings. 23-24 March, Paris, France.
- IEA, International Energy Agency. 2017. *World Energy Outlook, 2017*. IEA, Paris.
- IEA, International Energy Agency. 2018. *World Energy Outlook, 2018*. IEA, Paris.
- IEA, International Energy Agency. 2019. *World Energy Outlook, 2019*. IEA, Paris.
- İlknur, D., Eryazici, A., Sensoz, S. 2012. Bio-oil production from pyrolysis of corncob (*Zea mays* L.). *Biomass and Bioenergy* 36, 43-49.
- İlleez, B. 2020. Türkiye'de Biyokütle Enerjisi. "Türkiye'nin Enerji Görünümü 2020". TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Ankara.
- Kan, T., Strezov, V., Evans, T. J. 2016. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1126-1140.
- Kara, B. 2012. Çay çalısı ve Orman Gülünün Hızlı Pirolizisi. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
- Kar, T. 2018. Doğu Karadeniz Bölgesindeki Bazı Atık Biyokütle Karışımlarının Katalizörsüz ve Katalizörlü Pirolizisi ve Sıvı Ürünlerin Karakterizasyonu. Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kar, T., Keleş, S., Kaygusuz, K. 2019. Comparison of catalytic and noncatalytic pyrolysis and product yields of some waste biomass species. *Int. J. Energy Research* 43: 2032-2043.
- Keleş, S., Kaygusuz, K., Akgün, M. 2011. Pyrolysis of woody biomass for sustainable bio-oil. *Energy Sources, Part A*, 33, 2216-2225.
- Keles, S., Kar, T., Akgün, M., Kaygusuz, K. 2017. Catalytic fast pyrolysis of hazelnut cupula: characterization of bio-oil. *Energy Sources, Part A*, 39, 2216-2225.

- Ketenci, C.K. ve Bayramoğlu, Z. 2018 Türkiyede Ceviz Üretiminin Rekabet Analizi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 5(3), 339-347.
- KKim, S.W., Koo, B.S., Ryu, J.W., Lee, J.S., Kim, C.J. 2013. Bio-oil from the pyrolysis of palm and jatropha wastes in a fluidized bed. *Fuel Processes Technology* 108, 118-24.
- Klass, D.L., 1998. Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals. Academic Press.
- Kocaeren, AA (Editör). 2016. Çevre ve Enerji. Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Kumar, J.V., Pratt, B.C., 1996. Compositional analysis of some renewable biofuels. *Am. Lab.* 28 (8), 15–20.
- Lehman, J., Gaunt, J., Rondon, M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystem: a review. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change* 11, 403–427.
- Lehto, J., Oasmaa A.A., Solantausta Y., Kytö, M. ve Chiaramonti, D., 2014. Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass *Applied*, 116, 178-190.
- Li, Y., Ge, X (Ed.). 2016. *Advances in Bioenergy*. Elsevier/Academic Press, New York.
- Ly, H.V., Kim, S.S., Choi, J.H., Woo, H.C., Kim, J. 2016. Fast pyrolysis of *Saccharina japonica* alga in a fixed-bed reactor for bio-oil production. *Energy Convers Mgmt* 112, 526-534.
- Mohan, D., Pittman, C.U., Steele, P.H., 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuels* 20 (3), 848–889.
- Morali, U., Şensöz, S. 2015. Pyrolysis of hornbeam shell in a fixed bed reactor: characterization of bio-oil and bio-char. *Fuel* 150, 672-678.
- Morali, U., Yavuzel, N., Şensöz, S. 2016. Pyrolysis of horn beam sawdust: characterization of bio-oil and bio-char. *Bioresource Technology* 271, 682-685.
- Piskorz, J., Scott, D.S., Radlien, D., 1988. Composition of oils obtained by fast pyrolysis of different woods. In: Soltes, J., Milne T.A. (Eds.), *Pyrolysis Oils from Biomass: Producing, Analyzing and Upgrading*, American Chemical Society, pp. 167-178. (Chapter 16).
- Probstein, R.F., Hicks, R.E., 2006. *Synthetic Fuels*. Dover Publications, pp. 63, 98–99.
- Putun, A.E., Ozcan, A., Putun, E. 1999. Pyrolysis of hazelnut shells in a fixed-bed tubular reactor: yields and structural analysis of bio-oil. *J. of Anal. Applied Pyrolysis* 52: 33-49.
- Putun, A.E., Apaydin, E., Putun, E. 2004. Rice straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis. *Energy* 29: 2171-2180.
- Putun, A.E., Ozbay, N., Onal, E.P.; Pütün, E. 2005. Fixed-bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products. *Fuel Processing Technology* 86, 1207-1219.

- Putun, E., Uzun, BB., Putun, AE. 2006. Fixed-bed catalytic pyrolysis of cotton-seed cake: Effects of pyrolysis temperature, natural zeolite content and sweeping gas flow rate. *Bioresource Technology* 2006; 97: 701-710.
- Pütün, E. 2010. Catalytic pyrolysis of biomass: Effects of pyrolysis temperature, sweeping gas flow rate and MgO catalyst. *Energy* 35, 2761-2766.
- Rocha, J.D., Brown, S.D., Love, G.D., ve Snape, C.E. 1997. Hydropyrolysis: a versatile technique for solid fuel liquefaction, sulfur speciation and biomarker release. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 40: 91–103.
- Sensöz, S., Angin, D. 2008a. Pyrolysis of safflower seed press cake: Part 1. The effects of pyrolysis parameters on the product yields. *Bioresource Technology* 99: 5492-5497.
- Sensöz, S., Angin, D. 2008b. Pyrolysis of safflower seed press cake: Part 2. The effects of pyrolysis parameters on the product yields. *Bioresource Technology* 99: 5498-5504.
- Sensöz, S., Can, M. 2002. Pyrolysis of Pine (*Pinus Brutia* Ten.) Chips: 1. Effect of Pyrolysis Temperature and Heating Rate on the Product Yields. *Energy Sources*, 24, 347-355.
- SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi. 2019. Türkiye'nin 2030 yılına doğru optimum elektrik üretim kapasitesi. İstanbul, 2019.
- Souza, GM., Victoria, RL., Joly, CA., Verdade, LM (Eds.). 2015. *Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps*. Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), São Paulo, Brazil.
- Said, MM., John, GR., Mhilu, CF., Manyele, SV. 2014. Analysis of pyrolysis kinetic and energy content of agricultural and forest waste. *J. Renew Energy Sustain Develop* 1: 36-44.
- Shen, J., Wand, X., Perez, M., Maurant, D., Rhodes, M., Li, C., 2009. Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass. *Fuel* 88 (10), 1810–1817.
- Speight, JG. 2008. *Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance*. The McGraw-Hill Companies, New York.
- Tillman, D.A. 1978. *Wood as an energy resource*. Academic Press, New York.
- TMMOB Makine Mühendisleri Odası. Türkiye'nin Enerji Görünümü 2020. Ankara, 2020.
- Toklu, E. 2017. Biomass energy potential and utilization in Turkey. *Renew Energy* 107, 235-244.
- Uzun, BB., Putun, AE., Putun, E. 2006. Fast pyrolysis of soybean cake: Product yields and compositions. *Bioresource Technology* 2006; 97: 569-576.
- WBA, world Bioenergy Association. 2020. Global Bioenergy Statistics 2019. Available from www.worldbioenergy.org (accessed 10 July 2020).
- WEC, World Energy Council. 2016. *World Energy Resources 2016*, WEC, London.

- Wereko-Brobby, C.Y., Hagen, E.B. 1996. Biomass Conversion and Technology. John Wiley & Sons, New York.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, DH., Zheng, C. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel 286, 1781-1788.
- Yılmaz, S. 2020. Dünyada ve Türkiye’de birincil enerji Arzı. “Türkiye’nin Enerji Görünümü 2020”. TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Ankara.



ÖZGEÇMİŞ

Ömer Kaygusuz 1991 yılında Trabzon'un Sürmene ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Mimar Sinan İlköğretim okulunda, lise eğitimini Trabzon Kanuni Anadolu Lisesinde tamamladı. 2009 yılında Kanuni Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında başladığı Erzurum Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2013 yılında Beykent Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne geçiş yaptı. Beykent Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2017 yılında bitirdi. 2018 yılında Giresun Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Bekar olup, ingilizce bilmektedir.