



**HAVA DEBİSİ AYARLANABİLEN ALTTAN AKIŞLI  
BİR GAZLAŞTIRICININ GAZLAŞTIRMA PERFORMANSININ  
SAPTANMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

**Bahar DİKEN**

**Doktora Tezi**

**Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU**

**2021**

T.C.

TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**HAVA DEBİSİ AYARLANABİLEN ALTTAN AKIŞLI  
BİR GAZLAŞTIRICININ GAZLAŞTIRMA PERFORMANSININ  
SAPTANMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

**Bahar DİKEN**

**Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU**

**TEKİRDAĞ-2021**

**Her hakkı saklıdır.**

## ÖZET

Doktora Tezi  
HAVA DEBİSİ AYARLANABİLEN ALTTAN AKIŞLI  
BİR GAZLAŞTIRICININ GAZLAŞTIRMA PERFORMANSININ  
SAPTANMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

**Bahar DİKEN**

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr.Birol KAYIŞOĞLU

Bu tez çalışmasında, gürgen ve çam ağaçlarının budama atıklarından imal edilmiş olan peletlerin gazlaştırılması ile ilgili deneysel bir araştırma, pilot ölçekli aşağı çekişli sabit yataklı gazlaştırıcı sistemde hava besleme oranına bağlı olarak 3 farklı hava eşdeğerlik oranı (ER=0,25, ER=0,30 ve Er=0,35) değerinde gerçekleştirilmiştir. Gazlaştırma performansını etkileyen parametreler ile ER değerlerinin ilişkisi araştırılmıştır. Her iki biyokütlenin gazlaştırılması esnasında kor bölgesi sıcaklıkları 650 °C ile 800 °C arasında değişmiştir. Gürgen ve çam peletlerinin biyokütle tüketim oranları sırasıyla 8,05-9,75 kg/h ve 8,00-9,66 kg/h aralığında değişmiştir. ER değeri gaz üretim ve biyokütle tüketim oranlarını önemli ölçüde etkilemiştir. Gürgen peletlerinin ortalama kütleli gaz üretim oranı 22,82 kg/h, çam peletlerinin 22,64 kg/h olmuştur. Gürgen ve çam peletlerinin ortalama özgül gaz üretimleri sırasıyla 2,33 Nm<sup>3</sup>/kg ve 2,30 Nm<sup>3</sup>/kg olmuştur. Gürgen peletlerinden elde edilen sentez gazın ortalama alt ısı değeri (LHV) 5,02 MJ/Nm<sup>3</sup>, üst ısı değeri (HHV) 5,45 MJ/Nm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Çam peletlerinden elde edilen sentez gazın alt ısı değeri 4,95 MJ/Nm<sup>3</sup>, üst ısı değeri 5,38 MJ/Nm<sup>3</sup> olmuştur. Her iki pelet örneğinde de ortalama karbon dönüşüm oranları birbirine çok yakın bulunmuştur (%86,58). Ortalama soğuk gaz verimleri gürgen peletlerinde %60,97, çam peletlerinde %58,96 olmuştur. Gürgen ve çam peletlerinin gazlaştırılmasında sistemin ortalama enerji verimlilikleri sırasıyla %86,2 ve %83,6 olmuştur. Sistemin ortalama ekserji verimliliği gürgen peletlerinde %75,2, çam peletlerinde %73,0 olarak hesaplanmıştır. Her iki pelet örneğinde de ekserji verimliliklerinin enerji verimliliklerinden daha düşük olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Gazlaştırma, sentez gaz, ısı değeri, soğuk gaz verimi, ekserji verimliliği, enerji verimliliği

2021, 71 Sayfa

## ABSTRACT

Ph.D. Thesis  
A STUDY ON THE DETERMINATION  
OF THE GASIFICATION PERFORMANCE OF  
A DOWNDRAFT GASIFIER WITH ADJUSTABLE AIR FLOW RATE

**Bahar DİKEN**

Tekirdağ Namık Kemal University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of BIOSYSTEM ENGINEERING

Supervisor: Prof.Dr. Birol KAYIŞOĞLU

In this thesis, an experimental study on the gasification of pellets produced using pruning wastes of hornbeam and pine trees was carried out at 3 different air equivalence ratios (ER = 0.25, ER = 0.30 and ER = 0.35) depending on the air supply ratio in a pilot scale downdraft fixed bed gasifier system. The relationship between the parameters affecting the gasification performance and ER has been investigated. During the gasification of both biomass, the core zone temperatures varied between 650 °C and 800 °C. Biomass consumption rates of hornbeam and pine pellets varied between 8,05-9,75 kg/h and 8,00-9,66 kg/h kg/h, respectively. The average mass gas production rate of hornbeam pellets was 22,82 kg/h and pine pellets 22,64 kg/h. The air supply rate significantly affected the gas production rate. Average specific gas productions of hornbeam and pine pellets were 2,33 Nm<sup>3</sup>/kg and 2,30 Nm<sup>3</sup>/kg, respectively. The average lower heating value (LHV) of the synthesis gas obtained from hornbeam pellets was calculated as 5,02 MJ/Nm<sup>3</sup>, and the upper heating value (HHV) was 5,45 MJ/Nm<sup>3</sup>. The lower heating value of the synthesis gas obtained from pine pellets was 4.95 MJ/Nm<sup>3</sup> and the upper heating value was 5.38 MJ/Nm<sup>3</sup>. Average carbon conversion rates were found to be very close to each other in both pellet samples (86,58%). Average cold gas yields were 60,97% in hornbeam pellets and 58,96% in pine pellets. Average energy efficiencies of the system for gasification of hornbeam and pine pellets were 86,2% and 83,6%, respectively. The average exergy efficiency of the system was calculated as 75,2% for hornbeam pellets and 73,0% for pine pellets. Exergy efficiencies were found to be lower than energy efficiencies in both pellet samples.

**Keywords:** Gasification, syngas, heating value, cold gas efficiency, exergy efficiency, energy efficiency

2021, 71 Pages

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÇİZELGE DİZİNİ</b> .....	<b>v</b>
<b>ŞEKİL DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Biyokütle .....	2
1.2. Biyokütle enerjisi dönüşüm yöntemleri .....	6
1.3. Gazlaştırma teknolojisi .....	7
1.3.1. Gazlaştırma işleminin yararları .....	7
1.3.2. Gazlaştırıcı ortam .....	8
1.3.3. Gazlaştırma işleminin aşamaları .....	8
1.3.4. Gazlaştırma reaktörleri .....	12
1.3.5. Sentez gazın temizlenmesi ve kullanımı .....	20
1.4. Tezin amacı .....	21
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	<b>22</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>29</b>
3.1. Materyal .....	29
3.1.1. Gazlaştırma denemelerinde kullanılan biyokütle materyalleri .....	29
3.1.2. Gazlaştırma ünitesi .....	29
3.1.3. Hava pompası .....	32
3.1.4. Gaz kromatografi cihazı (GC) .....	32
3.1.5. Filtre malzemeleri .....	33
3.1.6. Hava hızı ölçüm cihazı (anemometre) .....	33
3.1.7. Kontrol paneli .....	34
3.2. Yöntem .....	35
3.2.1. Denemelerin yürütülmesi .....	35
3.2.2. Gazlaştırma İşlemi .....	36
3.2.3. Gaz analizleri .....	36
3.2.4. Gazlaştırma havasının hızının ölçülmesi .....	38
3.2.5. Gazlaştırma havasının kütle akış oranının hesaplanması .....	38
3.2.6. Gaz üretim oranının hesaplanması .....	39
3.2.7. Biyokütle tüketim oranının hesaplanması .....	40
3.2.8. Hava eş değerlik oranının (ER) hesaplanması .....	40

3.2.9. Sentez gazın ısııl değerinin hesaplanması .....	40
3.2.10.Özgöl gaz üretiminin saptanması .....	41
3.2.11.Karbon dönüşüm verimliliğinin saptanması.....	41
3.2.12.Soğuk gaz verimliliğinin saptanması.....	42
3.2.13.Kütle ve enerji denkliği hesaplamaları .....	42
3.2.14.Ekserji denkliği hesaplamaları .....	44
3.2.15.Gazlaştırma sisteminin enerji ve ekserji verimliliklerinin hesaplanması .....	45
3.2.16.Verilerin değerlendirilmesi .....	46
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>47</b>
4.1.Gazlaştırma sıcaklıkları.....	47
4.2.Üretilen sentez gazın bileşenleri .....	51
4.3.Hacimsel gaz üretim oranları .....	52
4.4.Biyokütlenin ısııl ve özgül ekserji değerleri .....	53
4.5.Sentez gazların özgül enerji ve ekserji değerleri.....	53
4.6.Gazlaştırma işleminde kütleli akış oranları ve dengesi.....	54
4.7.Özgöl gaz üretimi .....	54
4.8.Soğuk gaz ve karbon dönüşüm verimleri .....	55
4.9. Gazlaştırma işlemlerinde enerji akışı ve dengesi .....	56
4.10.Gazlaştırma işlemlerinde ekserji akışı ve dengesi .....	56
4.11.Gazlaştırma sisteminin enerji ve ekserji verimlilikleri .....	57
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>59</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>65</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>71</b>

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 1.1.	Yenilenebilir enerji kaynaklarının birincil enerji kaynakları içindeki payı [1] .....	1
Çizelge 1.2.	Kısmi oksidasyon aşamasında meydana gelen temel reaksiyonlar [18].....	11
Çizelge 1.3.	İndirgeme aşamasındaki temel reaksiyonlar [18], [21] .....	12
Çizelge 3.1.	Çam ve gürgen peletlerinin kısa ve nihai analiz sonuçları .....	29
Çizelge 3.2.	Gazlaştırma işleminin yapılacağı ER değerlerinde kütleli hava ve biyokütle akış oranları.....	36
Çizelge 4.1.	Sentez gaz bileşenleri (%V) .....	51
Çizelge 4.2.	Sentez gazların mol kütlesi ve yoğunlukları .....	52
Çizelge 4.3.	Hacimsel gaz üretim oranları (Nm <sup>3</sup> /h).....	53
Çizelge 4.4.	Biyokütlelerin ısı ve özgül ekserji değerleri .....	53
Çizelge 4.5.	Sentez gazların kütleli ısı ve özgül ekserji değerleri (MJ/kg).....	54
Çizelge 4.6.	Sentez gazların hacimsel ısı ve özgül ekserji değerleri (MJ/Nm <sup>3</sup> ) ...	54
Çizelge 4.7.	Gazlaştırma sisteminde kütleli akış oranları ve dengesi .....	55
Çizelge 4.8.	Özgül gaz üretimi (Nm <sup>3</sup> -gaz/kg-biyokütle) .....	55
Çizelge 4.9.	Gazlaştırma işleminde soğuk gaz ve karbon dönüşüm verimleri (%) .....	55
Çizelge 4.10.	Gazlaştırma sisteminde enerji akışı ve dengesi.....	57
Çizelge 4.11.	Gazlaştırma sisteminde ekserji akışı ve dengesi .....	57
Çizelge 4.12.	Gazlaştırma sisteminin enerji ve ekserji verimliliği.....	58

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1.	Odunsu biyokütlenin hücre duvarının yapısı [9]..... 4
Şekil 1.2.	Biyokütlenin enerjiye dönüşüm teknolojileri..... 6
Şekil 1.3.	Gazlaştırma aşamaları ve oluşan ürünler [16] ..... 9
Şekil 1.4.	Yukarı akışlı gazlaştırıcı [16] ..... 13
Şekil 1.5.	Boğazlı tip aşağı akışlı gazlaştırıcı [16] ..... 14
Şekil 1.6.	Çapraz akışlı gazlaştırıcı [16]..... 15
Şekil 1.7.	Açık tip gazlaştırıcı [16]..... 16
Şekil 1.8.	Kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcı [18]..... 17
Şekil 1.9.	Sirkülasyonlu akışkan yataklı gazlaştırıcı [18] ..... 18
Şekil 1.10.	Çift akışkan yataklı gazlaştırıcı [18] ..... 19
Şekil 1.11.	Plazma gazlaştırıcı [16]..... 20
Şekil 3.1.	Gazlaştırma ünitesinin revizyon öncesi görünümü [35]..... 30
Şekil 3.2.	Denemelerde kullanılan yeniden tasarlanmış gazlaştırma ünitesi..... 31
Şekil 3.3.	Sensörlerin gazlaştırma sistemi üzerindeki yerleşimleri ..... 31
Şekil 3.4.	Hava pompası ..... 32
Şekil 3.5.	Gaz kromotografi cihazı, kuru hava ve argon gazı tüpleri ..... 33
Şekil 3.6.	Filtre malzemeleri ..... 34
Şekil 3.7.	Mini higro-termo anemometre ..... 34
Şekil 3.8.	Kontrol paneli [35] ..... 35
Şekil 3.9.	Şırınga ile gaz örneklerinin alınması..... 37
Şekil 3.10.	Gaz analizi sonuç raporu ..... 37
Şekil 3.11.	Hava hızı ölçümü..... 38
Şekil 3.12.	Gazlaştırma işleminin kütle denklik diyagramı ..... 42
Şekil 3.13.	Gazlaştırma işleminin enerji denklik diyagramı ..... 43
Şekil 3.14.	Gazlaştırma işleminin ekserji denklik diyagramı..... 44
Şekil 4.1.	Gürgen peletlerinin ER=0,25 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi ..... 47
Şekil 4.2.	Gürgen peletlerinin ER=0,30 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi ..... 48
Şekil 4.3.	Gürgen peletlerinin ER=0,35 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi ..... 49
Şekil 4.4.	Çam peletlerinin ER=0,25 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi ..... 49
Şekil 4.5.	Çam peletlerinin ER=0,30 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi ..... 50
Şekil 4.6.	Çam peletlerinin ER=0,35 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi ..... 51



Şekil 4.7.	Sentez gaz bileşenlerinin hacimsel oranları .....	52
Şekil 4.8.	Soğuk gaz (CGE) ve karbon dönüşüm (CCE) verimlerinin ER değerleriyle değişimi.....	56
Şekil 4.9.	Gazlaştırma sisteminin enerji ve ekserji verimliliklerinin ER değerleriyle değişimi.....	58



## SİMGELER ve KISALTMALAR

$\dot{m}_{hava}$	: Kütlesel hava besleme oranı (kg/h)
$\rho_{hava}$	: Havanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{gaz}$	: Normal koşullardaki sentez gazının yoğunluğu (kg/Nm <sup>3</sup> )
$\dot{m}_{kk}$	: Gaza dönüşen biyokütle oranı (kg/h)
$\dot{m}_{gaz}$	: Kütlesel gaz üretim oranı (kg/h)
$\dot{v}_{gaz}$	: Normal koşullardaki hacimsel gaz üretim oranı (Nm <sup>3</sup> /h)
$\dot{m}_{biyokutle}$	: Biyokütle tüketim oranı (kg/h)
$\dot{m}_{char}$	: Char üretim oranı (kg/h)
$\dot{m}_{katran}$	: Katran üretim oranı (kg/h)
$ER$	: Eşdeğerlik oranı
$SR_m$	: Kütlesel stokiyometrik hava oranı (kg-hava/kg-biyokütle)
$HHV$	: Üst ısıl değer (MJ/kg, kJ/kg, MJ/Nm <sup>3</sup> )
$LHV$	: Alt ısıl değer (MJ/kg, kJ/kg, MJ/Nm <sup>3</sup> )
$Y_{gaz}$	: Özgül gaz üretim oranı (Nm <sup>3</sup> -gaz/kg-biyokütle)
$CCE$	: Karbon dönüşüm oranı (%)
$CGE$	: Soğuk gaz verimliliği (%)
$\dot{Q}$	: Enerji akışı (kW)
$\dot{E}_x$	: Ekserji akışı (kW)
$\eta_{En}$	: Enerji verimliliği (%)
$\eta_{Ex}$	: Ekserji verimliliği (%)

## TEŞEKKÜR

Artan nüfus ve gelişen teknolojiyle, enerji olarak dışa bağımlılığı azaltmak artık çoğu ülkenin amacı haline gelmiştir. Ayrıca küresel ısınma ve iklimin farklılaşmasıyla ortaya çıkan endişeler sonucunda yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi artmıştır.

Güneş, rüzgâr ve hidrolik enerjinin yanı sıra biyokütle ana yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Bir katı yakıt olarak taş kömürü ve linyit gibi fosil kökenli yakıtların yerini almaya uygundur ve biyokütle enerjisi ihtiyaca göre katı, sıvı ve gaz formlara dönüştürülerek enerji üretebilmek mümkündür. Bu tez kapsamında biyokütlenin termokimyasal dönüşüm yöntemlerinden olan ve yaygın olarak kullanılan gazlaştırma işleminde çam ve gürgen ağacının dal atıkları değerlendirilerek sabit yataklı aşağı akışlı gazlaştırıcı prototipinin revizyonu yapılmış 3 farklı hava besleme oranında (ER değerinde) elde edilen sentez gazın ısısal verimi saptanmış ve ekserji analizi yapılmıştır.

Yükseköğrenim yaşantım boyunca ve doktora tezimin her aşamasında büyük destek ve yardımlarını gördüğüm, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU'na saygı ve sevgiyle sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda her türlü sorunda desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen, destek olan Dr.Öğr.Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ'a yardımları için teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmamda desteklerini gördüğüm başta Prof.Dr.Türkan AKTAŞ olmak üzere Biyosistem Mühendisliği Bölümündeki tüm öğretim elemanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca, beni her konuda destekleyen, daima yanımda olan aileme en içten sevgilerimi sunarım.

Haziran 2021

Bahar DİKEN  
Biyosistem Yüksek Mühendisi

## 1. GİRİŞ

Dünyadaki hızlı nüfus artışı, teknolojik gelişmeler ve artan üretimle birlikte daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. 2018 yılı istatistiklerine göre Dünyada birincil enerji tüketimi 13.684,9 MTEP, ülkemizde 153,5 MTEP civarındadır [1]. Türkiye Dünyadaki birincil enerji kaynaklarının yaklaşık %1,1'ini tüketmektedir. Bu tüketimin yaklaşık %86'lık bir kısmı fosil kökenli (kömür, petrol, doğalgaz) birincil enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Özellikle enerjide dışa bağımlı olan ülkeler bu ihtiyacı karşılamak için her yıl önemli düzeyde bütçe ayırmaktadır. Fosil kaynaklı yakıtların zamanla tükenen enerji kaynağı olmaları, giderek artan maliyetleri ve yarattığı olumsuz çevresel koşullardan dolayı, günümüzde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde bu kaynakların yerine geçebilecek alternatif enerji kaynaklarına yönelim söz konusudur [2]. Bu alternatif kaynaklar içerisinde yenilenebilir enerji kaynakları önemli bir yer tutmaktadır.

Hidrolik enerji hariç güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle kaynaklı yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı 2018 yılı verilerine göre Dünyada 561,3 MTEP, ülkemizde 8,5 MTEP dolaylarındadır. Ülkemizde hidrolik enerji hariç yenilenebilir enerji kaynaklarının birincil enerji kaynaklarındaki payı %5,5 dolaylarındadır. Bu değer %4,1 olan Dünya ortalamasının bir miktar üzerindedir. Dünyada ve ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının birincil enerji kaynakları içerisindeki payının henüz yeterli düzeyde olmadığı görülmektedir (Çizelge 1.1).

**Çizelge 1.1.** Yenilenebilir enerji kaynaklarının birincil enerji kaynakları içindeki payı [1]

	Top.Birincil En.	Yenilenebilir (A)		Hidrolik (B)		A+B
	(MTEP)	(MTEP)	(%)	(MTEP)	(%)	(%)
Dünya	13.684,9	561,3	4,1	948,8	6,9	11,0
Türkiye	153,5	8,53	5,5	13,5	8,8	14,3

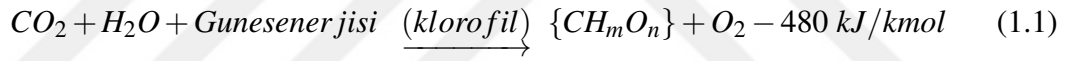
Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması ve buna bağlı olarak yeni teknolojilerin geliştirilmesi, tüm Dünya ülkelerinin olduğu gibi ülkemizin de refah düzeyinin artmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, güneş, rüzgar, jeotermal ve

biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının dönüşüm teknolojilerinin emisyon, toprak ve su kirliliği gibi olumsuz çevresel etkileri, geleneksel enerji kaynaklarına göre yok denecek kadar azdır.

## 1.1. Biyokütle

Biyokütle, yaşamakta olan ya da yakın zamanda yaşamış olan canlı organizmalardan elde edilen, henüz fosilleşmemiş organik kökenli tüm biyolojik malzemelere verilen genel bir addır. Botanik biyokütle, atmosferdeki karbondioksitin ( $CO_2$ ) klorofil ve su varlığında güneş enerjisiyle karbonhidrata dönüştürülmesiyle oluşur. Diğer biyolojik türler, botanik veya diğer biyolojik türleri tüketerek büyürler.

Bitkiler, fotosentez adı verilen bir işlemle güneş enerjisini emerler. Belirli dalga boylarına sahip güneş ışığının varlığında, yeşil bitkiler elektron ve proton elde etmek için suyu parçalar ve bunları  $CO_2$ 'yi glikoza dönüştürmek için kullanır ve oksijeni ( $O_2$ ) atmosfere salarlar. Bu işlem aşağıdaki kimyasal tepkimeyle ifade edilmektedir [3];



Yukarıdaki fotosentez reaksiyonunda oluşan  $\{CH_mO_n\}$  organik bitki materyalidir ve glikoz ( $C_6H_{12}O_6$ ) oluşumu için temel biçim olarak kabul edilir.

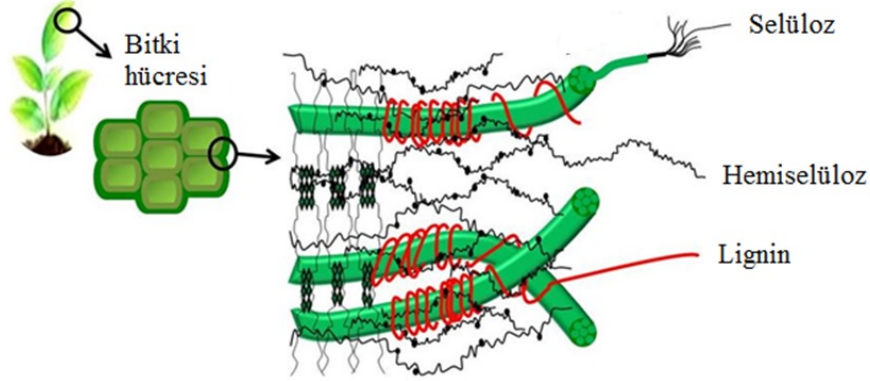
Biyokütle, sürdürülebilir bir şekilde üretildiği ve kullanıldığı sürece, fosil yakıt enerjisine kıyasla sera gazı (GHG) emisyonlarını azaltma potansiyeli yüksek bir enerji taşıyıcısıdır [4].

Biyokütle kaynakları farklı kriterlere göre sınıflandırılabilir. Ancak, genellikle odunsu (meşe, akçaağaç, kavak vb.), odunsu olmayan (tahıllar, otsu bitkiler), bitkisel lifler (keten, kenevir vb.), biyolifler (algler, su sümbülü, vb.) ve bitkisel olmayan (hayvansal, endüstriyel atıklar, kentsel atıklar vb.) diğer yenilenebilir kaynaklar ana başlıkları altında sınıflandırılmaktadır [5]. Küresel ölçekte enerji dönüşümüne uygun biyokütle miktarları 5.10 PJ dolayındadır. Bunun yaklaşık 2.53 PJ'lük kısmı tarımsal ormancılık ürünleri ve odunsu biyokütledir [6].

Biyokütlenin bileşimi fosil yakıtlar ya da diğer inorganik kökenli enerji kaynaklarından daha karmaşıktır. Doğal biyokütlenin nem içeriği, organik ve inorganik madde içeriği çok farklılıklar göstermektedir. Biyokütlenin enerjiye dönüşüm yöntemlerinin belirlenmesinde önemli olan fizikokimyasal özellikleri; biyokimyasal bileşimi (selüloz, hemiselüloz, lignin gibi odunsu, sakkaridler, lipitler ve proteinler gibi odunsu olmayan), nem içeriği, mineral madde içeriği (majör elementler, iz elementler, besin elementleri, tuzlar), organik maddenin bileşimi (*C, H, O, N* ve *S* miktarları), fiziksel özellikler (yoğunluk, dayanıklılık vb.) gibi özelliklerdir.

Biyokütle nem ve katı madde olarak iki ana bölümden oluşmaktadır. Katı madde ise organik ve inorganik bileşenleri içermektedir. Organik bileşenler uçucu katılar ve sabit karbondan oluşmaktadır. Biyokütlenin inorganik içeriği genellikle yanmasından sonra kalan kül kütlesi cinsinden tanımlanır. Kül içeriği bir ağaç dokusunda %0.3-0.5 civarında iken, biyokütlenin yapısına bağlı olarak diğer biyokütle kaynaklarında %10'u aşabilmektedir [7].

Bilindiği gibi odunsu biyokütle kaynaklarının büyük bir kısmını oluşturan bitki hücreleri, hayvan hücrelerinden farklı olarak, hücre zarının haricinde hücre duvarı (hücre çeperi) ile çevrilidir. Hücre çeperi bitkilerin odunsu karakteri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Odunsu biyokütle kimyasal olarak *selüloz*, *hemiselüloz* ve *lignin* olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır (Şekil 1.1). *Selüloz* hücre çeperinde bulunan ana bileşendir ve kuru madde ağırlığının en az %40'ını en fazla %45'ini oluşturmaktadır. Bitkinin yapısını koruma rolüne sahiptir, ayrıca bazı bakteri, mantar ve alglerde de, hatta bazı hayvanlarda da hücre duvarının bir bileşeni olarak bulunabilir. Suda çözünmeyen bir biyopolimerdir. *Hemiselüloz*, pentoz (ksiloz, arabinoz), heksozlar (mannoz, glikoz, galaktoz) ve şeker asit polimerlerinden oluşan kimyasal olarak heterojen polisakkarittir. *lignin*, vasküler bitkilerin, eğrelti otlarının ve kulüp yosunlarının hücre duvarlarında yaygın olarak bulunan oldukça karmaşık bir aromatik polimerdir. Hücre duvarlarını doldurma ve bitkinin polisakarit bileşenleri için mikrobiyal ataklardan koruyucu bir kaplama görevi görmektedir [8].



**Şekil 1.1.** Odunsu biyokütlenin hücre duvarının yapısı [9]

Biyokütlenin odunsu olmayan kimyasal yapısını *sakkaritler*, *lipitler* ve *proteinler* oluşturmaktadır. Şeker veya karbonhidrat olarak da bilinen sakkaritler, en bol bulunan biyolojik moleküllerdir ve biyokimyasal işleme yoluyla alkollere dönüştürülebildikleri için biyoyakıt üretiminde en yararlı biyokütle bileşikleridir. *Sakkaritler* sadece karbon, hidrojen ve oksijen olmak üzere üç elemente sahip polihidroksillenmiş aldehytlerdir. Kimyasal formülü  $(CH_2O)_{n \geq 3}$  olarak belirtilir. *Lipitler*, biyodizelin doğrudan üretimi için kullanılabilen, bitkilerde ve hayvanlarda doğal olarak bulunan başlıca organik bileşiklerdir. Suda çözünmez olmakla birlikte kloroform, hidrokarbonlar veya alkol gibi sulu olmayan çözücülerde çözünür olma gibi ortak fiziksel özelliklerine göre gruplandırılırlar. *Proteinler*, biyolojik hücrelerin çalışması için ihtiyaç duyduğu amino asitlerden oluşan moleküllerdir. Proteinin yapısını oluşturabilecek 20 tip amino grup asit vardır. Proteinler bu 20 tip amino grup asitten herhangi birine sahip olabilir, bu da çok sayıda olası protein molekülü oluşturur [10]. Fermantasyon bazlı biyoyakıt üretiminde, proteinler azot bakımından zengin, genellikle hayvan yemi olarak veya arazi uygulamalarında gübre olarak kullanılan bir yan üründür. Termal işleme teknolojilerinde, proteinlerdeki amin gruplarının ısı işlemi üzerinde olumsuz etkileri vardır, çünkü azotun bir kısmı asidik gaz olarak gelişir ve biyokütle pirolizi, gazlaştırma veya yanma sırasında birincil kirleticilerden biri olarak işlev görür ve ayrıca aşındırıcı özelliği nedeniyle sistem üzerinde olumsuz etkiler yaratır [11].

Biyokütlenin yakıt olarak özellikleri ve kalitesi, temel olarak biyokütlenin türüne ve uygulanan ön işlem teknolojilerine bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir. Önemli fiziksel parametreler parçacık boyutları, hacim ve enerji yoğunluğu, alt ve üst ısı değer ve nem içeriğidir.

Biyokütle yakıtlarındaki uçucu madde miktarı kömürlerdekenden daha yüksektir ve genellikle kuru baza göre %70 ile %86 arasında değişir. Bu yüksek miktardaki uçucunun bir sonucu olarak, biyokütle yakıtının büyük bir kısmı, homojen gaz fazı yanma reaksiyonları gerçekleşmeden önce buharlaşır; kalan kömür daha sonra heterojen yanma reaksiyonlarına maruz kalır. Bu nedenle, uçucu madde miktarı katı yakıtların termal ayrışmasını ve yanma davranışını güçlü bir şekilde etkilemektedir.

Biyokütlenin karakterizasyonu temel olarak üç grup analiz ile belirlenmektedir. Bunlardan birincisi nem içeriği, uçucu madde miktarı, sabit karbon miktarı ve kül içeriğini belirlemek için yapılan kısa (proximate) analizler, diğeri kuru maddenin kütleli yüzdesi olarak karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve kükürt (S) miktarlarının saptandığı nihai (elementel, ultimate) analizler ve en sonuncusu ise ısı değerinin saptanmasına yönelik analizdir.

İnsanoğlunun ateşi keşfinden bu yana, biyokütle binlerce yıldır ana enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Günümüzde hala dünya enerji arzına %10'dan fazla katkıda bulunmaktadır ve dünyada en fazla kullanılan dördüncü enerji kaynağıdır [12]. Kırsal yaşam alanlarında, biyokütle hala ısıtma ve pişirme için kullanılan ana enerji kaynağıdır. Asya ve Afrika'daki gelişmekte olan ülkelerde toplam enerji tüketiminin üçte birinden fazlası biyokütleyle dayanmaktadır. Biyokütlenin en önemli avantajlarından birisi de kömür, petrol veya doğal gaz gibi fosil yakıtların aksine dünyanın her yerinde bulunabilmesidir [13].

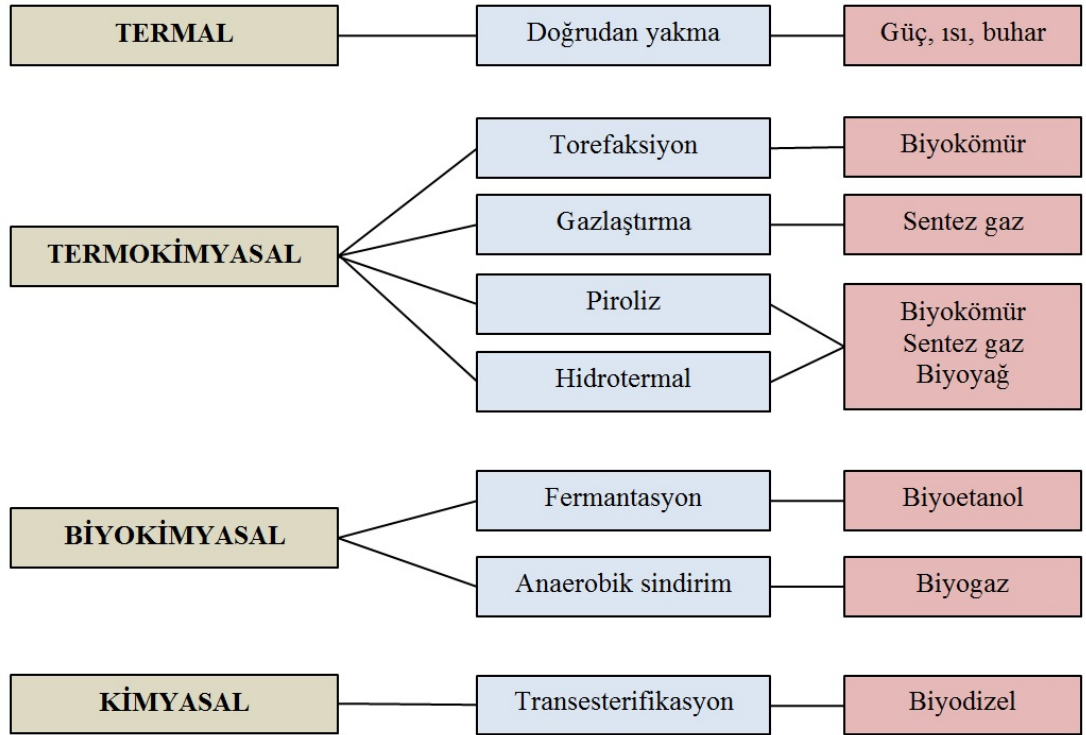
Biyokütle enerjisinin, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına göre en büyük avantajlarından birisi depolanabilir olması ve istenildiği zamanda bir enerji kaynağı olarak kullanılabilmesidir. Bu nedenle, dünyanın dört bir yanındaki gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülke, biyokütlenin ulusal enerji arzına



payına yönelik hedefler belirlemiş ve biyokütlenin bir enerji kaynağı olarak arzını teşvik etmek için politikalar geliştirmiştir.

## 1.2. Biyokütle enerjisi dönüşüm yöntemleri

Hacimli ve uygunsuz biyokütle formu, biyokütlenin enerji kaynağı olarak yaygınlaşmasının önündeki en büyük engeldir. Gaz veya sıvı yakıtların aksine, biyokütlenin mevcut haliyle, nakliye, taşıma, depolama güçlükleri nedeniyle, doğrudan enerji kaynağı olarak kullanılması zordur. Bu nedenle boyut küçültme (parçalama) ve yoğunlaştırma (pelet, biriket vb.) gibi fiziksel ön işlemlerin yanı sıra kimyasal ve termal ön işlemlerin de uygulanması gereklidir. Ayrıca, biyokütlenin doğrudan kullanımının zorluklarını aşmak için sıvı ve gaz formuna getirecek dönüştürme yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu amaçla uygulanan dönüştürme teknolojilerini *termal*, *termokimyasal*, *biyokimyasal* ve *kimyasal* dönüşüm teknolojileri olmak üzere 4 ana başlıkta toplamak mümkündür (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Biyokütlenin enerjiye dönüşüm teknolojileri

Termal ve termokimyasal dönüşüm teknolojilerinde biyoyakıt olarak tüm lignoselülozik biyokütle kaynakları kullanılmaktadır. Biyokimyasal dönüşüm teknolo-

jilerinde mevcut durumuyla lignoselülozik biyokütle kaynaklarının kullanılması oldukça zordur. Bu dönüşüm teknolojilerinde daha çok lignin içermeyen biyokütle kullanılır. Lignin içeren biyokütlenin kullanılabilmesi için mutlaka ön işlemler gereklidir. Kimyasal dönüşüm teknolojilerinde ise bitkisel ve atık organik kökenli yağlar transesterifikasyon ile biyodizele dönüştürülmektedir.

### 1.3. Gazlaştırma teknolojisi

Gazlaştırma işlemi, biyokütlenin sınırlı oksijen kaynağıyla ya da  $CO_2$  ve su buharı gibi uygun oksidantlar ile yanabilen sentez bir gaza dönüştürülmesidir. Biyokütlenin gazlaştırılması genellikle yüksek sıcaklıklarda ( $\sim 800^\circ C$ ) gerçekleşmektedir ve elde edilen sentez gaz %12-20  $H_2$  (hidrojen), %17-22  $CO$  (karbon monoksit), %2-3  $CH_4$  (metan), %9-15  $CO_2$  (karbondioksit),  $H_2O$  (su buharı),  $N_2$  (azot) ve katran buharı gibi kirletici maddelerin karışımından oluşmaktadır. Sentez gazdaki bileşenlerin oranları biyokütlenin cinsi, gazlaştırma ortamı, gazlaştırıcının tasarımı ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Gazlaştırma ürünü olan sentez gaz doğrudan yakılarak ısı enerjisi elde edilebildiği gibi, gaz motorlarında elektrik enerjisi elde etmek amacıyla da kullanılmaktadır [14].

#### 1.3.1. Gazlaştırma işleminin yararları

Biyokütlenin gazlaştırma işlemleri ilk olarak, katı atıkların çöp sahalarında bertarafı,  $CH_4$  emisyonunu azaltmak ve organik atıklardan daha yüksek değerli ürünler elde etmek amacıyla başlamıştır. Aynı zamanda yeraltı suyu kirlenme riskini de azaltmaktadır. Sürecin önemli ekonomik faydalarından bazıları aşağıda listelenmiştir [15], [16];

- Ucuz ve bertarafı maliyetli atıklar ekonomik olarak katma değere sahip ürünlere dönüştürülebilmektedir,
- Yüksek oranda yakıt esnekliği sağlamaktadır,
- Sentez gaz ayrıca gübre, metanol ve benzin üretimi için bir hammadde olarak kullanılabilir,

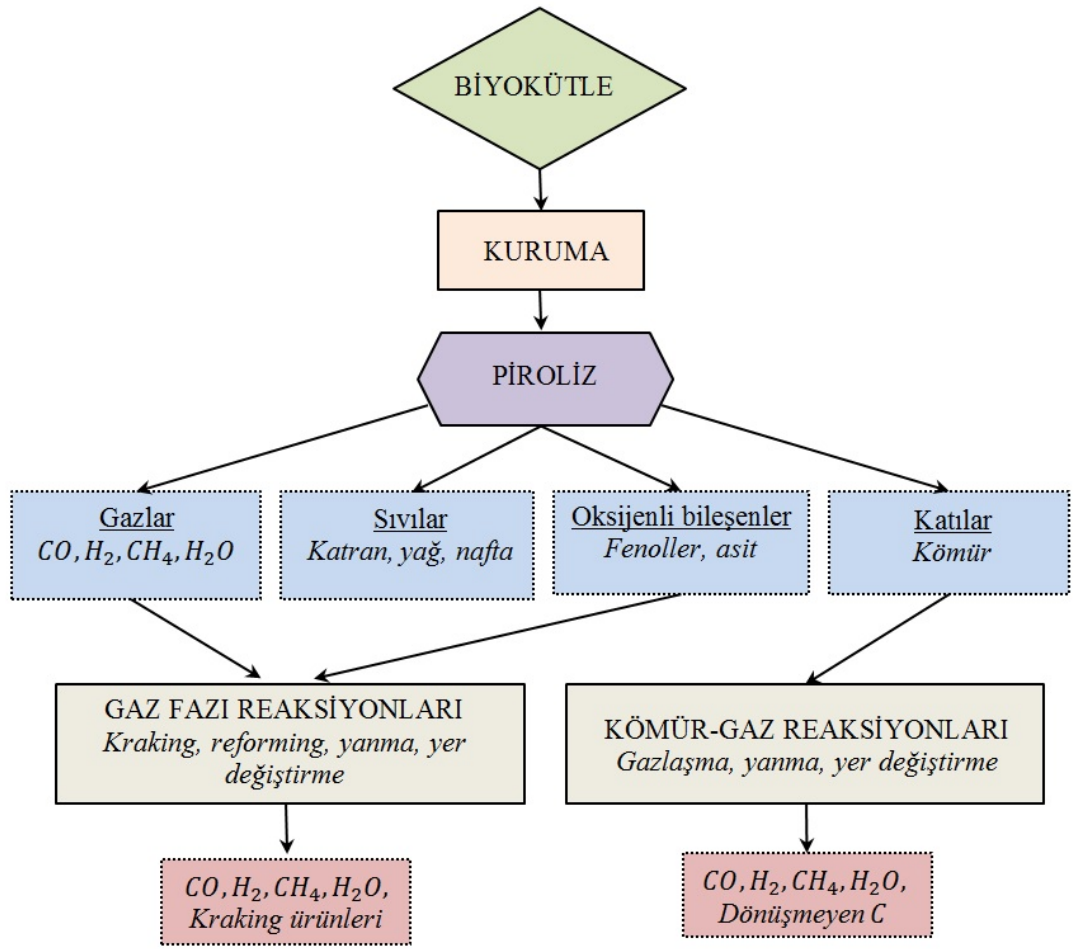
- Pahalı ithal doğal gazla bağımlılığı azaltmaktadır,
- Özellikle kırsal alanlarda elektrik enerjisi üretimi için kullanıldığında katı ve sıvı yakıtlı güç sistemlerine göre daha uygun ve ekonomiktir,
- Güç ünitelerinde kullanıldığında katı yakıtlara göre baca gazlarında daha az  $CO_2$ ,  $SO_2$  ve  $NO_x$  emisyonları oluşmaktadır.

### 1.3.2. Gazlaştırıcı ortam

Gazlaştırıcı ortam katı karbon ve daha ağır hidrokarbonlarla reaksiyona girerek bunları  $CO$  ve  $H_2$  gibi düşük moleküler ağırlıklı gazlara dönüştürmektedir. Gazlaştırma için kullanılan başlıca gazlaştırıcı maddeler oksijen, buhar ve havadır [16]. Ayrıca, bu maddelerin hava+buhar, oksijen+buhar gibi karışımları da gazlaştırma ajanı olarak kullanılmaktadır. Hidrojenin (hidro-gazlaştırma) ve buhar+sentez gazın (katalitik gazlaştırma) gazlaştırma ortamı olarak kullanıldığı yöntemler de bulunmaktadır. Katalitik gazlaştırma ile doğrudan sentetik doğal gaz elde edilmektedir [17]. Gazlaştırıcı ortam seçimi, sentez gazın ısı değerini önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin oksijen yerine hava kullanılırsa, sentez gazdaki nitrojen oranı fazla olacağından ısı değeri düşecektir. Elde edilen sentez gazın ısı değerinin düşük olmasına rağmen, kolay temin edilmesi ve maliyetinin düşük olması nedeniyle en fazla tercih edilen gazlaştırma maddesi (ortamı) havadır.

### 1.3.3. Gazlaştırma işleminin aşamaları

Gazlaştırma, bir dizi fiziksel dönüşüm ve kimyasal reaksiyonları içeren karmaşık bir işlemdir. Gazlaştırmadaki işlem adımlarını ön ısıtma+kuruma, piroliz ve yanma+kömür gazlaşması olmak üzere üç temel aşamada tanımlamak mümkündür. Şekil 1.3'de bu aşamalar ile oluşan ürünler şematik olarak verilmiştir [16]. Bu aşamalar sıklıkla seri olarak modellenmesine rağmen, aralarında keskin bir sınır yoktur ve çoğu zaman örtüşmektedirler. Kurutma, piroliz ve endotermik reaksiyonlar için gerekli ısı enerjisi, gazlaştırıcıda izin verilen belirli miktarda (kısmi) ekzotermik yanma reaksiyonundan sağlanmaktadır.



**Şekil 1.3.** Gazlaştırma aşamaları ve oluşan ürünler [16]

#### *Kuruma aşaması*

Belirli bir nem düzeyine sahip biyokütle, reaktöre beslendiğinde kısmi yanma bölgesinden ve harici ısıtmadan gerçekleşen ısı transferi yardımıyla kuruma bölgesinde kurumaktadır [17], [18]. Reaktöre gelen biyokütle içerisindeki nem içeriği %5 ile %35 arasında değişmektedir. 100-200 °C arasında sıcaklığa sahip kuruma tabakasında biyokütlerde bulunan doğal nem ve yüzey nemi buharlaşarak nem içeriği %5 dolaylarına düşürülmektedir [19]. Kuruma bölgesinden uzaklaşan nem kısmi yanma bölgesindeki buharla birleşmektedir. Buharın bir kısmı reaksiyonlarda kullanılırken, geri kalan kısmı sentez gazın içinde kalmaktadır. Aynı zamanda bazı aşındırıcı organik asitler de kuruma tabakasında biyokütleden ayrılmaktadır.

Kuruma hızı kullanılan reaktörün tipine bağlıdır. Nemin buharlaşması için gerekli gizli ısı (2242 kJ/kg) enerji gereksinimini önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu

nedenle gazlaştırılacak biyokütlenin nem oranı ne kadar düşükse gazlaştırma verimi de o ölçüde yüksek olmaktadır [18].

#### *Piroliz aşaması*

Piroliz aşaması 200-700 °C sıcaklık aralıklarında hava ya da başka bir oksitleyici madde (oksidant) olmadan gerçekleşmektedir. Bu aşamada biyokütlede bulunan oksijen, daha fazla sıvı hidrokarbon üreterek büyük ölçüde azaltılmaktadır. Bu bölgede biyokütlede bulunan büyük molekülü selüloz, hemiselüloz ve lignin orta büyüklükteki moleküllere ve biyokömüre dönüşmektedir. Bazı orta büyüklükteki molekül de ikincil piroliz reaksiyonları ile metan, etan, etilen, hidrojen, karbondioksit ve karbon monoksit gibi daha küçük moleküllere indirgenmektedir [18].

Pirolizin önemli bir ürünü, işlemden üretilen yoğunlaşabilir buharın yoğunlaşmasıyla oluşan katrandır. Yapışkan bir sıvı olan katran, gazlaştırma ürününün (sentez gaz) endüstriyel kullanımında büyük zorluklar yaratmaktadır. Bu nedenle oluşan katranın uygun yöntemlerle gazdan arındırılması gerekmektedir [16].

#### *Gazlaşma aşaması*

Gazlaşma aşaması, reaktördeki yakıt, buhar, karbondioksit, oksijen ve hidrokarbonlar arasındaki kimyasal reaksiyonları ve ayrıca yeni oluşan gazlar arasındaki kimyasal reaksiyonları içermektedir. Bunların içinde kömür gazlaştırma reaksiyonları en önemlisidir. Biyokütlenin pirolizi yoluyla üretilen biyokütle kömürün tamamı saf karbon değildir. Hidrojen ve oksijen içeren belirli miktarda hidrokarbon da içermektedir [16].

Biyokütle kömürü genellikle kömürün yüksek sıcaklıkta karbonizasyonu yoluyla üretilen kok kömüründen daha gözenekli (%40–50) ve reaktiftir. Bu nedenle, reaksiyon davranışı kömür, linyit veya turbadan türetilen kömürlerden farklıdır [20].

Gazlaşma aşaması biyokütlenin kısmi yanmasının gerçekleştiği kısmi oksidasyon aşaması ve piroliz aşamasında oluşan ürünler ile biyokömürün tepkimeye girerek sentez gazı oluşturduğu indirgeme aşaması olmak üzere iki aşamaya ayırmak mümkündür.

### *Kısmi oksidasyon aşaması*

Bu aşamada heterojen ve oldukça karmaşık ekzotermik reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Hava, buhar, oksijen gibi gazlaştırma ortamları biyokömür, küçük gaz molekülleri, katran ve buhar ile tepkimeye girmekte, sıcaklık 1200-1500 °C civarına hatta bazı durumlarda 1800 °C'ye kadar çıkmaktadır. Bu aşamada gerçekleşen bazı önemli kimyasal reaksiyonlar Çizelge 1.2'de verilmiştir.

**Çizelge 1.2.** Kısmi oksidasyon aşamasında meydana gelen temel reaksiyonlar [18]

Reaksiyonlar	$\Delta H$ (kJ/kmol)
$C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$	-123
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-409
$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	-283
$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	-242
$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$	-803
$NH_3 + 3/4 O_2 \rightarrow 1/2 N_2 + 3/2 H_2O$	-383
$H_2S + 3/2 O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$	-563

Piroliz aşamasında oluşan ürünlerin oksidasyon ile karbondioksit ve karbon monoksit dönüşmesinin yanı sıra, kısmi oksidasyon aşamasının bir diğer önemli fonksiyonu da diğer aşamalar için gerekli olan ısı enerjisini sağlamaktır.

### *İndirgeme aşaması*

Esas gazlaşma olarak da adlandırılan indirgeme aşamasında  $CO_2$  ve su buharı ( $H_2O$ ), biyokömür ve diğer bileşenlerle reaksiyona girerek yanıcı gazlar olarak daha çok  $H_2$  ve  $CO$  içeren sentez gazı oluşturmaktadırlar. Bu tabakadaki endotermik reaksiyonlarla biyokömürdeki ve diğer gazlardaki duyulur ısı enerjisi sentez gaza transfer edilmektedir. İndirgeme aşamasında meydana gelen temel reaksiyonlar Çizelge 1.3'de verilmiştir.

Boudouard ve su gaz reaksiyonları biyokömürü  $H_2$  ve  $CO$  gibi sentez gazdaki iki yanıcı temel gaza dönüştüren endotermik reaksiyonlardır ve indirgeme işleminde sıcaklığın düşmesine neden olmaktadır. Su-gaz değişimi reaksiyonu ile sentez gazın  $H_2$  oranı artmaktadır.

**Çizelge 1.3.** İndirgeme aşamasındaki temel reaksiyonlar [18], [21]

Reaksiyon adı	Reaksiyonlar	$\Delta H$ (kJ/kmol)
Boudouard	$C + CO_2 \leftrightarrow 2 CO$	+172
Su-gaz	$C + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO$	+131
Su-gaz değişimi	$CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2$	-42
Buhar reforming	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow 3 H_2 + CO$ $CH_4 + 2 H_2O \leftrightarrow 4 H_2 + CO_2$	+206 +165
Hidro-gazlaştırma	$C + 2 H_2 \leftrightarrow CH_4$	-75
Metan oluşumu	$CO + 3 H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-206
Diğer	$NH_3 + 1/2 N_2 \leftrightarrow 1/2 N_2 + 3/2 H_2$ $SO_2 + 32 H_2 \leftrightarrow H_2S + 2 H_2O$	+46 -207

#### 1.3.4. Gazlaştırma reaktörleri

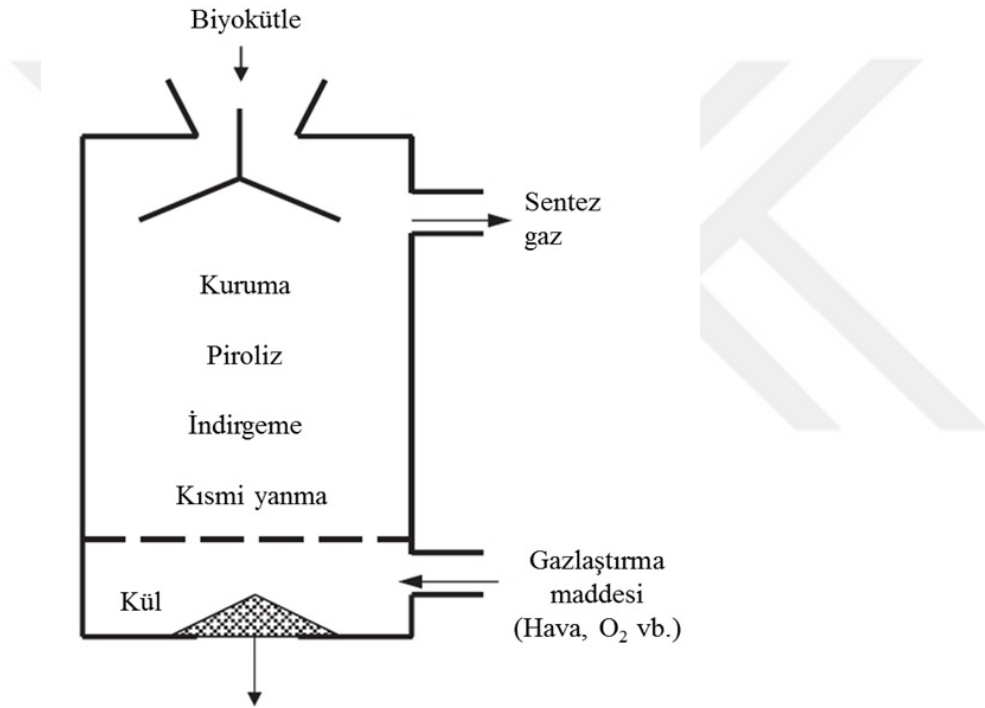
Gazlaştırma reaktörleri gazlaştırma maddesinin (oksidantının) cinsi (hava, oksijen, buhar, buhar+hava vb.), sıcaklığa, basınca (atmosferik ya da basınçlı), gazın taşınma yönüne (yukarı akışlı, aşağı akışlı, çapraz akışlı, akışkan yataklı vb.) ve ısı sağlama yöntemine (dolaylı ya da doğrudan ısıtma) göre sınıflandırılmaktadır. Doğrudan gazlaştırma (ototermal gazlaştırma), gazlaştırma maddesinin biyokütleyi kısmen oksitlediği ve gazlaştırma için gerekli ısıyı sağladığı durumlarda gerçekleşmektedir. Dolaylı gazlaştırma da biyokütle pirolizi ve gazlaştırma bir reaktörde gerçekleştirilirken, kısmi yanma başka bir reaktörde gerçekleşmektedir. Düşük sıcaklıklarda doğrudan gazlaştırma (<900 °C) sabit yataklı, kabarcıklı ve sirkülasyonlu akışkan yataklı reaktörlerde gerçekleşirken, yüksek sıcaklıkta (>1300 °C) doğrudan gazlaştırma işlemi sürüklenmiş (zorlamalı) akışlı reaktörde gerçekleşmektedir [22].

##### *Sabit yataklı gazlaştırıcılar*

Sabit yataklı gazlaştırma reaktörleri geleneksel olarak kullanılan ve yaklaşık 1000 °C sıcaklıklarda gazlaştırma yapan reaktörlerdir. Bu tip reaktörlerde biyokütle reaktöre üst taraftan beslenmektedir. Gazlaştırma işlemi reaktör içerisinde bulunan bir ızgaranın üzerinde sabit yatakta gerçekleşmektedir. Üretilen sentez gaz biyokütle

içerisinden geçerek dışarıya çıkmaktadır. Gazlaştırma maddesinin (oksidantın) reaktör içindeki hareket yönüne göre *yukarı akışlı*, *aşağı akışlı*, *çapraz akışlı* ve *açık tip* olarak sınıflandırılmaktadır.

Yukarı akışlı gazlaştırıcılar yapısal olarak en basit tiptir. Biyokütle ile üretilen gazın akış yönü ters (karşı akış) yöndedir (Şekil 1.4). Biyokütle aşağıya doğru hareket ederken kuruma ve piroliz tabakalarından geçer. Piroliz tabakasında ortaya çıkan biyokömür ve gazlar, daha sonra indirgeme tabakasında  $H_2$  ve  $CO$  gibi yamcı gazlara dönüşmektedir. Kısmi yanma bölgesinde ortaya çıkan ısı enerjisi ise yukarıya doğru hareket eden hava ve gazla birlikte piroliz ve kuruma tabakasına taşınmaktadır.



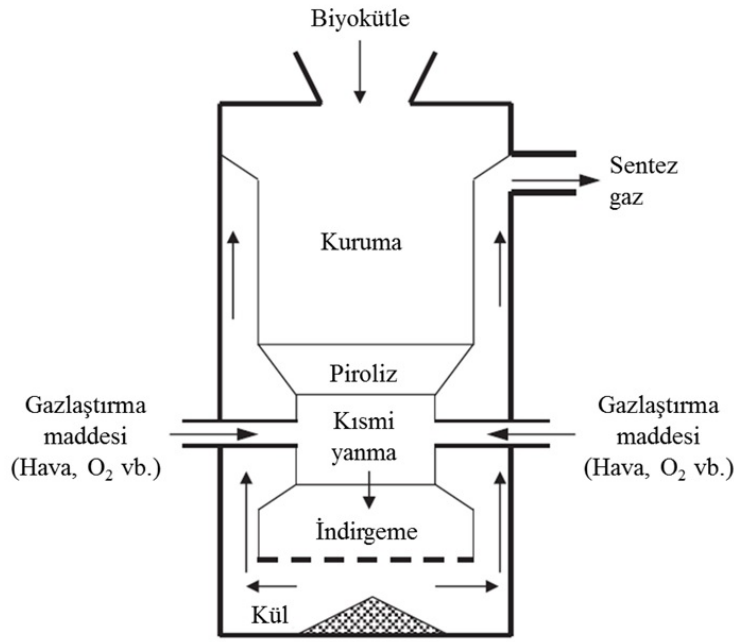
**Şekil 1.4.** Yukarı akışlı gazlaştırıcı [16]

Yukarı akışlı gazlaştırıcılar nispeten daha yüksek nem (%60'a kadar) ve kül (%25'e kadar) içeriğine sahip biyokütleyi gazlaştırabilmektedir. Sentez gaz reaktörü terk ederken düşük sıcaklığa sahip olduğundan ısısal verimi nispeten yüksektir [23]. Ancak gaz kısmi yanma bölgesinden geçmediği için katran üretimi oldukça fazladır. Bu nedenle çevresel kirlenmeye neden olmaktadır [17]. Bu tip gazlaştırıcılar genellikle kırsal alanlarda pişirme fırınlarında ya da büyük işletmelerde kömürden gazolin elde etmek amacıyla küçük ölçekli olarak kullanılmaktadır.



Aşağı akışlı gazlaştırıcılar genellikle küçük ölçekli güç üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Boğazlı ve boğazsız olmak üzere iki temel tipi bulunmaktadır. Boğazlı tiplerde kesit alanı daraltıldıktan sonra tekrar genişletilmektedir (Şekil 1.5). Kısmi yanma tabakasının daraltılmasıyla yüksek sıcaklık homojen bir şekilde dağılmakta ve piroliz bölgesinden gelen katran daha kolay parçalanmaktadır. Boğazlı tip reaktörlerde bu nedenle katran oluşumu daha azdır. Ancak, boğazlı tip reaktörlerde reaktör boyunca düzgün akış ve sıcaklık sağlanamadığından büyük ölçekli olarak yapılmaları sakınca yaratmaktadır. Boğazsız tip reaktörlerin en önemli avantajı reaktör içinde biyokütlenin akışının kolay olması ve birikmeler olmamasıdır [16].

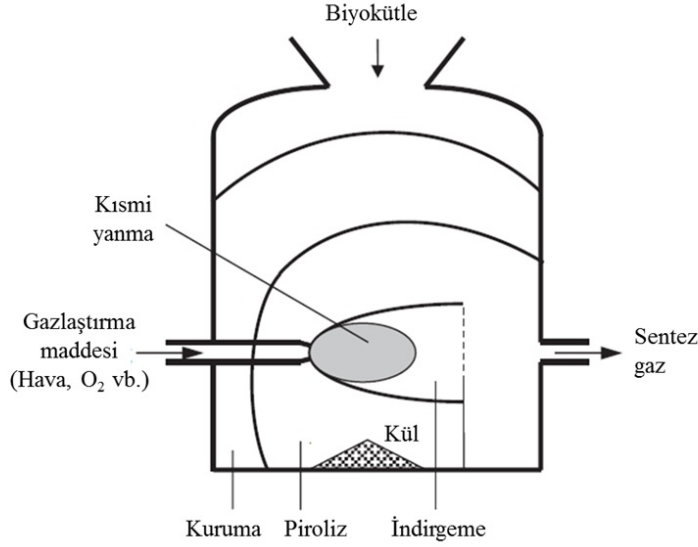
Bununla birlikte düşük katran içermesi aşağı akışlı gazlaştırıcıların en olumlu yanlarıdır. Katran sıcak külün içinden geçerken büyük oranda parçalanmaktadır. Ayrıca, reaktör yapısının ve gazlaştırma işleminin basitliğinden dolayı ilk yatırım masrafları düşüktür [24].



**Şekil 1.5.** Boğazlı tip aşağı akışlı gazlaştırıcı [16]

Çapraz akışlı gazlaştırıcıda biyokütle reaktöre üst kısımdan girmekte ve aşağıya doğru hareket etmektedir. Gazlaştırma maddesi reaktörün bir tarafından girmekte ve üretilen sentez gaz diğer tarafından çıkmaktadır. Gazlaştırma maddesi ve gazın hareketi yatay düzlemde olmaktadır. Kısmi yanma bölgesi gazlaştırma maddesinin

girişinde oluşmakta, bu bölgede sıcaklık 1500 °C'ye kadar ulaşmaktadır. İndirgeme, kuruma ve piroliz tabakaları kısmi yanma bölgesinin etrafında oluşmaktadır (Şekil 5.4). Reaktörden çıkan sentez gazın sıcaklığı 800-900 °C civarındadır (Şekil 1.6).

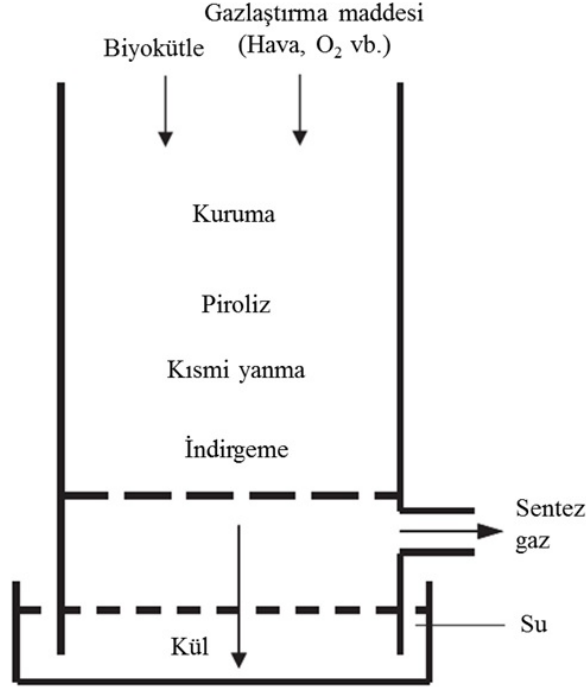


**Şekil 1.6.** Çapraz akışlı gazlaştırıcı [16]

Çapraz akışlı gazlaştırıcılarda düşük termal kapasiteye sahip nispeten küçük bir reaksiyon bölgesi olduğundan diğer tüm sabit yataklı gazlaştırıcılara kıyasla daha hızlı tepki süresi sağlamaktadırlar. Bu nedenle doğrudan bir gaz motoru çalıştırmak için kullanıldığında yük değişikliklerine iyi yanıt vermektedirler [16]. Bu gazlaştırıcıların en olumsuz yanları yüksek sıcaklıkta gaz çıkış nedeniyle ısı kayıplarının olması, yüksek kül ve katran içeren biyokütle için uygun olmamalarıdır.

Açık tip gazlaştırıcıda reaktörün üst kısmı açıktır. Üst kısımdan biyokütle ile birlikte gazlaştırma maddesi (hava, buhar, O<sub>2</sub> vb.) girmektedir. Gazlaştırma maddesinin reaktöre girişi vakum ile sağlanmaktadır (Şekil 1.7). Açık tip gazlaştırıcılar düşük yoğunluğa ve yüksek kül içeriğine sahip, çeltik kavuzu gibi biyokütlelerin gazlaştırılması amacıyla tasarlanmıştır. Ayrıca, reaktörün alt kısmına külün tutulduğu su haznesi yerleştirilmiştir. Bu gazlaştırıcılar boğazsız aşağı akışlı gazlaştırıcı reaktörlerin bir alt tasarımı olarak düşünülebilir. Çünkü benzer şekilde biyokütle ve gazlaştırma maddesi aynı yönde birlikte aşağıya doğru hareket etmektedir

[18]. Bu sistemin en önemli sakıncalarından birisi vakum pompasının içinden geçen sentez gazdaki katranın pompa kanatlarına yapışarak pompayı kısa sürede bozmasıdır.



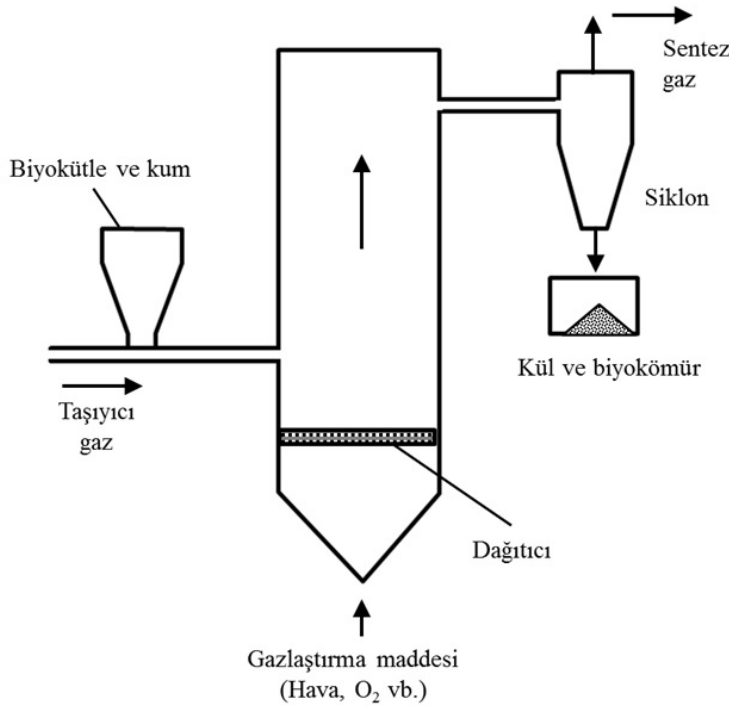
Şekil 1.7. Açık tip gazlaştırıcı [16]

#### *Akışkan yataklı gazlaştırıcılar*

Akışkan yataklı gazlaştırıcılar biyokütlenin gazlaştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tasarım ve işlem kömür gazlaştırmasına benzemektedir. Bu gazlaştırıcılarda granül yapıdaki yatak malzemeleri, sabit yataklı gazlaştırıcılara kıyasla düzenli bir sıcaklık dağılımı ve daha iyi katı gaz teması ile yeterli ısı transferi sağlamaktadır [23]. Ek olarak orta ve büyük ölçekli üniteler olarak tasarlanabilirler. Önemli sakıncalarından birisi, yatak malzemesi olarak yaygın olarak kullanılan silika parçacıklarının biyokütledeki inorganik bileşenlerle reaksiyona girmesi ve düşük kaynama noktalı silikatların oluşumuna yol açmasıdır. Bu silikatlar yüksek sıcaklıklar altında eriyerek ve daha sonra biyokütle partiküllerini birbirine bağlayan ve akışkanlaştırma durumunu durduran yapışkan bir tabaka oluşturmaktadır. Akışkan yataklı gazlaştırıcılar *kabarcıklı*, *sirkülasyonlu* ve *çift akışkan yataklı* olmak üzere üç temel gruba ayrılmaktadır.

Kabarcıklı kışkan yataklı gazlaştırıcıda gazlaştırma maddesi reaktörün alt kısmından delikli akışkan plaka ve nozullardan oluşan dağıtıcı ile eşit olarak verilmektedir. Biyokütle ile kum karışımı bir helezon ve taşıyıcı gaz yardımıyla reaktöre iletilir ve taşıyıcı gaz ile birlikte reaktör içinde yukarıya doğru hareket eder (Şekil 1.8). Bu arada dağıtıcı üzerinde oluşan kabarcıklar yukarıya doğru büyüyerek biyokütlenin hareketine yardımcı olur. Sentez gaza dönüşüm esnasında kısmi yanma ve piroliz aşamalarında oluşan gaz ve buharlar gazlaştırma maddesiyle tepkimeye girerek sentez gazı oluşturmaktadır. Reaktörde bekleme süresi çok kısadır ve sıcaklık 700-900 °C arasında değişmektedir [18].

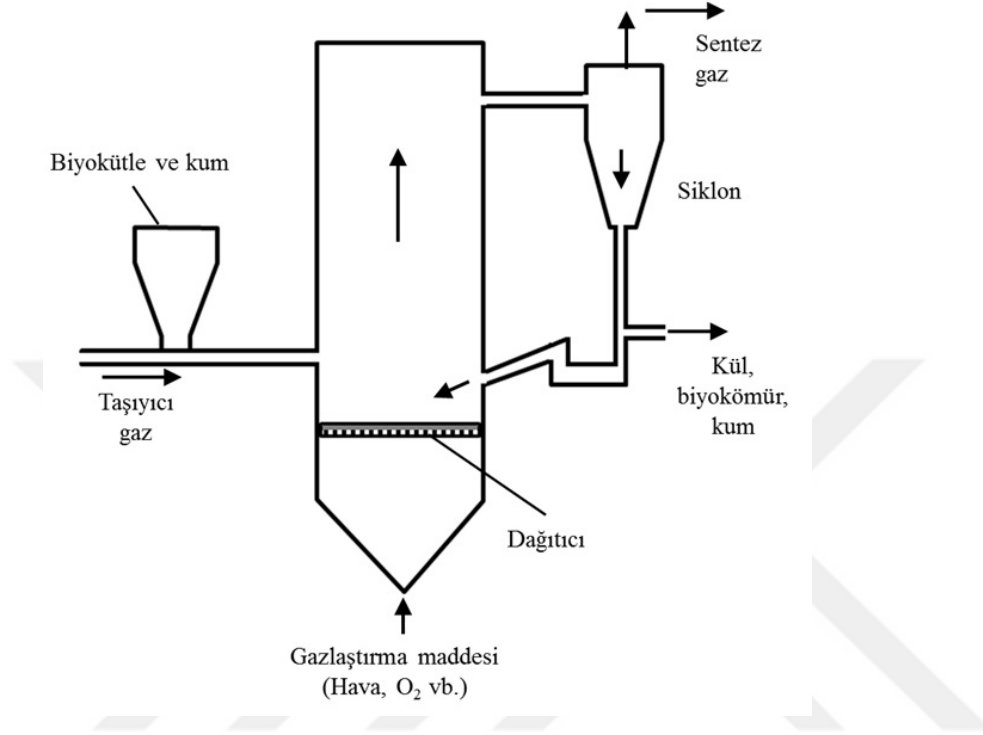
Siklonlar genellikle, sürüklenen inert yatak malzemesi parçacıklarının yanı sıra kül ve kömürü geri dönüştürmek için akışkanlaştırılmış yataklı reaktörden sonra konumlandırılır. Katranın yüksek sıcaklıktaki yatak malzemesi ile doğrudan teması sayesinde sentez gazdaki katran içeriği düşük olmaktadır. [23]



**Şekil 1.8.** Kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcı [18]

Sirkülasyonlu gazlaştırma reaktörleri yüksek verimli olmaları, farklı biyokütle çeşitlerine kolay adaptasyonları ve yüksek verimleri nedeniyle orta ve büyük ölçekli sistemlerde tercih edilen sistemler haline gelmiştir (Şekil 1.9). Bu reaktörlerde sıcak

yatak malzemesi ve katı biyokömür reaktör içerisinde sirkülasyona tabi tutulmaktadır [25]. Bu gazlaştırma reaktörleri kabarcıklı akışkan yataklara göre daha fazla akışkan ve türbülans modunda çalışmaktadırlar. Çalışma sıcaklığı biyokütlenin türüne göre 800-1000 °C arasında değişmektedir ve düşük katran üretimi vardır.

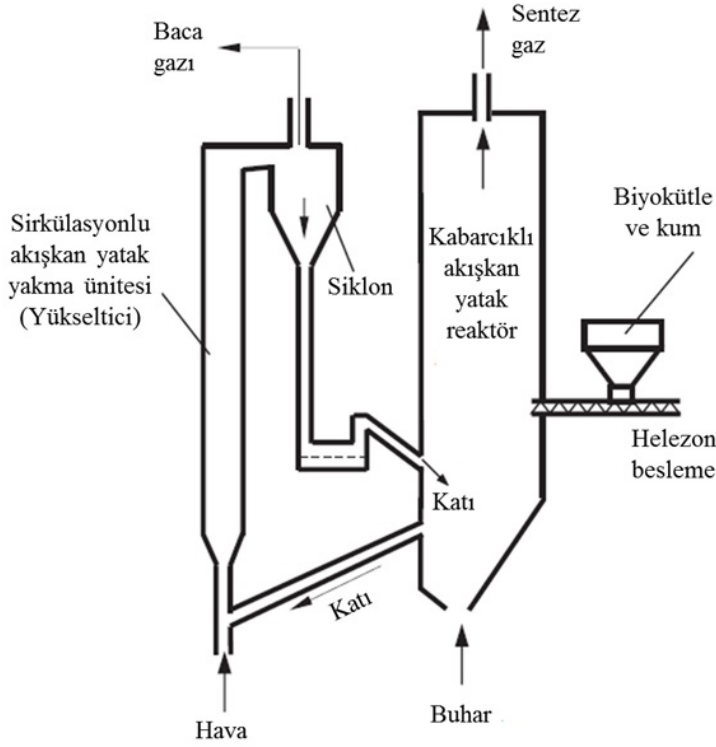


Şekil 1.9. Sirkülasyonlu akışkan yataklı gazlaştırıcı [18]

Çift akışkan yataklı gazlaştırıcılarda düşük maliyeti ve kolay temin edilmesi yüzünden gazlaştırma işlemlerinde gazlaştırma maddesi olarak genellikle hava kullanılmaktadır. Ancak, havada bulunan yüksek orandaki azot kaçınılmaz olarak sentez gazın birim hacmindeki ısıl değerinin düşük olmasına neden olmaktadır. Saf O<sub>2</sub> kullanarak bu sorun giderilebilir ama bu da maliyeti arttıran önemli bir faktördür. Azotun neden olduğu bu sorunu çözmek için çift akışkan yataklı gazlaştırıcılar geliştirilmiştir (Şekil 1.10)

Çift akışkan yataklı gazlaştırıcıda kalıntı biyokömürün yakılarak yükseltildiği sirkülasyonlu akışkan yatak bir yakma ünitesi ile piroliz ve biyokömür gazlaştırma işleminin gerçekleştiği kabarcıklı akışkan yatak reaktör bulunmaktadır. Isı taşıyıcı olan inert bir yatak malzemesi iki reaktör arasında dolaşmaktadır. Kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırma reaktöründe gazlaştırma maddesi olarak önceden ısıtılmış

buhar kullanılmaktadır. Gazlaştırma sıcaklığı 700-900 °C arasında değişmektedir [22]. Gazlaştırma reaktöründe ortaya çıkan katran ve kalıntı biyokömür yakma ünitesine taşınır ve burada hava ile yakılarak yükseltgenir. Azotun büyük bir kısmı baca gazıyla birlikte siklonda ayrılmaktadır. Böylece düşük katran ve azot içeriğine ve yüksek ısıl değere sahip sentez gaz elde edilmektedir. Bununla birlikte sabit yataklı gazlaştırıcılara kıyasla sentez gazda daha fazla toz bulunmaktadır. Ayrıca, yatırım ve işletme maliyetleri daha yüksektir.

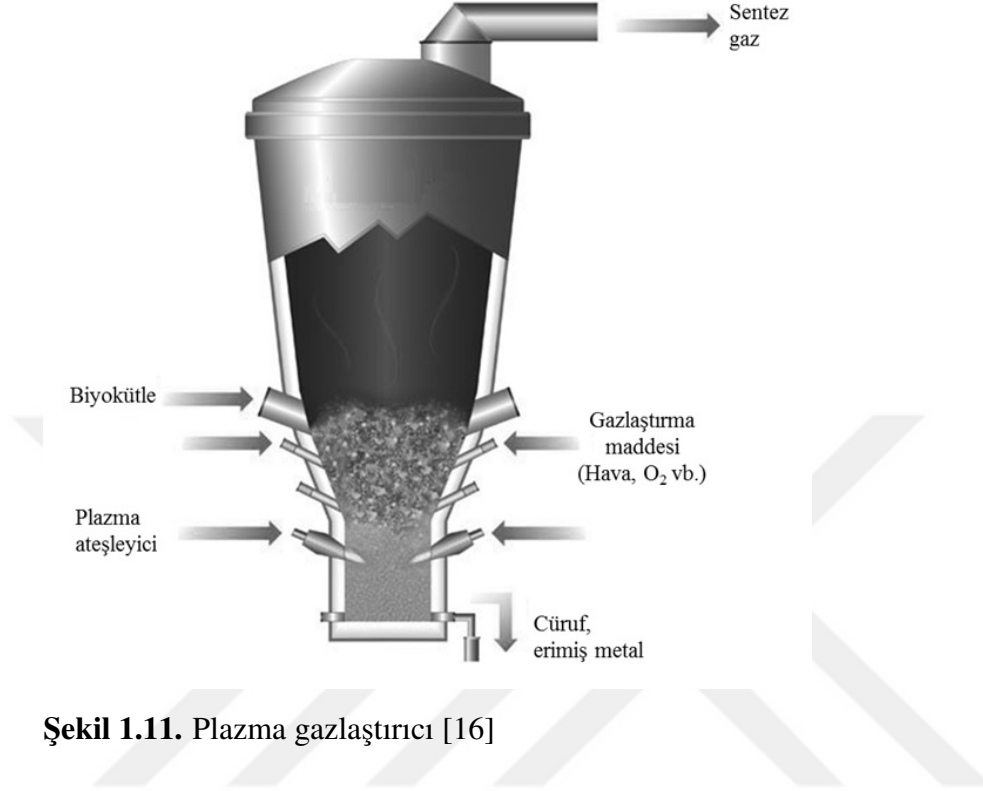


**Şekil 1.10.** Çift akışkan yataklı gazlaştırıcı [18]

### *Plazma gazlaştırıcı*

Plazma gazlaştırma (plazma pirolizi olarak da bilinir), biyokütlenin, 3000 °C veya hatta daha yüksek bir sıcaklıkta gazın temel bileşenlerine (hidrojen ve karbon monoksit gibi) dönüştürüldüğü özel bir gazlaştırma işlemidir. Ayrıca gazlaştırma işlemi sırasında erimiş metal ve cüruf da oluşmaktadır (Şekil 1.11). Plazma ateşleyicilerde iki elektrot arasında bir elektrik arkı oluşturularak çalışmaktadır. Biyokütle birkaç milisaniye içerisinde işleme tabi tutularak 1000-1200 °C sıcaklıkta sentez gaz elde edilmektedir. Biyokütlenin plazma gazlaştırılması, son derece düşük

katran üretimi ve çevreye az etkisi olan temiz ve gelecek vaat eden bir teknoloji olarak görülmektedir. Ancak, yüksek çalışma sıcaklığı ve biyokütlede fazla klor bulunması reaktörün ömrünü kısaltmaktadır [16].



Şekil 1.11. Plazma gazlaştırıcı [16]

### 1.3.5. Sentez gazın temizlenmesi ve kullanımı

Gazlaştırma ile elde edilen gaz ürün, içten yanmalı motorlarda (ICE), mikro-gaz türbinlerinde (GT), yakıt hücrelerinde (FC), sentez gaz üretiminde, FT-hidrokarbonlar (FT: Fisher-tropsch sentezi) veya metanol elde edilmesi gibi farklı uygulamalar için kullanılmaktadırlar. Öte yandan elde edilen ham gaz; parçacıklar, katran, alkali metaller, *HCl* gibi klor bileşikler, amonyak ve *HCN* gibi nitrojen bileşikler, *H<sub>2</sub>S* ve *COS* gibi kükürt bileşikler dahil olmak üzere bir dizi yapı ve kirleticileri içermektedir. Gazın farklı uygulamalarda sistemlere zarar vermemesi için temizlenmesi çok önemlidir. Kullanılan biyokütlenin orijinal kimyasal bileşimi ve çalışma koşulları, gaz içerisinde oluşan yapı ve kirleticilerinin konsantrasyonlarını belirlemektedir. Biyokütleden elde edilen gaz için tipik konsantrasyon aralığı katran için 1–150 g/Nm<sup>3</sup>, *NH<sub>3</sub>* için 500–30.000 ppm ve *H<sub>2</sub>S* için 20-200 ppm aralığındadır [26].

Ürün gazındaki istenmeyen yan ürünleri ve kirleticileri gidermek için, ilk yapılması gereken kullanılan biyokütlenin özelliklerinin ve gazlaştırıcının tasarımının ve kullanımının optimize edilmesidir. Gaz üretildikten sonra yapılacak işlemler ise örneğin aşağı akışlı sistemler baz alındığında fiziksel (yıkayıcılar ve filtreler) veya katalitik stratejilere dayanan ve sıcak gazın temizlenmesini de kapsayacak uygulamaları içermektedir. Gazın temizlenmesi amacıyla kullanılmakta olan pek çok uygulama bulunmaktadır.

#### **1.4. Tezin amacı**

Biyokütlenin gazlaştırılması, hava, saf oksijen, buhar ya da karışımı olabilen kontrollü bir miktarda oksidan kullanılarak yüksek sıcaklıkta biyokütlenin içerdiği karbonun kısmi oksidasyonu ile gerçekleştirilmektedir. Ürün gazının verimi ve bileşimi, biyokütlenin cinsi, gazlaştırıcı tipine ve gazlaştırıcıda kullanılan gazlaştırma maddesi, sıcaklık ve içindeki kalma süresine bağlıdır.

Bu çalışmanın ana amacı, biyokütlenin termokimyasal dönüşüm yöntemlerinden olan ve yaygın olarak kullanılan gazlaştırma işleminde, gazlaştırma maddesi olarak farklı oranlarda havanın kullanıldığı koşullarda gazlaştırma performansının değerlendirilmesidir. Çalışmada eşdeğer hava katsayısı (ER) ile sentez gaz birleşimdeki gaz oranları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Gazlaştırma işleminin kimyasal enerji ve ekserji verimliliklerinin saptanması, aralarındaki farkların değerlendirilmesi de çalışmanın bir diğer amacıdır. Biyokütle kaynağı olarak çam ve gürgen ağaçlarının dal kalıntılarının peletlerinin kullanıldığı bu tez, Giriş, Kaynak Özetleri, Materyal ve Yöntem, Araştırma Bulguları ile Tartışma ve Sonuç olmak üzere 5 ana bölümden oluşmaktadır.



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çam ve karışık sert ağaç yongalarının gazlaştırılması, çeşitli gaz akış hızlarında pilot ölçekli bir sistemde gerçekleştirilmiştir. Biyokütle tüketimi 17-30 kg/h arasında değişen gazlaştırma işleminde elde edilen sentez gazın ısı değeri  $6 \text{ MJ/Nm}^3$  dolayında olmuştur. Her iki biyokütle sentez gazının  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  ve  $H_2$  içerikleri sırasıyla %20, %12, %3 ve %19 olarak ölçülmüştür. Sistemin verimliliğinin daha yüksek akış hızlarında arttığı belirtilmiştir [27].

Elektrik üretimi için küçük bir gaz motoru sistemi ile birleştirilen aşağı çekişli bir gazlaştırıcıda odunsu biyokütle gazlaştırmasından sentez gazı üretiminin özellikleri araştırılmıştır. Gazlaştırıcıdan sentezleme gazı sıcaklıkları  $700-1000 \text{ }^\circ\text{C}$  seviyesinde tutulmuştur. Gazlaştırma için hava oranı  $ER=0.3$  ve  $ER=0.35$  olduğunda, sentez gazının ısı değeri  $1100-1200 \text{ kcal/Nm}^3$  ve soğuk gaz verimi %69-72 olarak bulunmuştur. Ham sentez gazındaki katran konsantrasyonu yaklaşık  $3.9-4.4 \text{ g/Nm}^3$ 'tür. Safılaştırmadan sonra gaz motorunda sentez gazı yanması sonucunda, egzoz gazında HC konsantrasyonunun  $200 \text{ ppm}$ 'in ve  $NO_x$  konsantrasyonu  $40 \text{ ppm}$ 'in altında olmuştur [24].

Odun talaşı ve ayçiçeği tohumu peletleri, gazlaştırma maddesi olarak hava ile çalışan  $200 \text{ kW}$ 'lık aşağı akışlı bir gazlaştırıcıda test edilmiştir. Araştırmacılar, peletlenmiş biyokütlenin gazlaştırılması esnasında oldukça yüksek ve dengesiz basınç düşüşleri olduğunu gazlaştırıcı üretkenliğinin ve stabilitesinin düştüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca, mikro partikül kalıntılarının oluşması, ıslak kül giderme sistemlerinin çalışmasını tehlikeye atmıştır. Ancak özgül gaz üretiminin ( $2,2-2,4 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ) ve soğuk gaz verimi (%67,7-70,0) oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir. Peletlenmiş biyokütlenin, kömür vb. diğer hammadde ile gazlaştırılmasında tamamlayıcı bir yakıt olarak kullanılması önerilmiştir [28].

Isıl değeri  $18.50 \text{ MJ/kg}$  olan köklerinden ayrılmış çay çalılarının gazlaştırılması sonucunda üretilen sentez gazın ısı değerleri ve  $4.2 \text{ MJ/Nm}^3$ , soğuk gaz verimi %65 olarak bulunmuştur. Basit ekonomik analiz, gazlaştırıcı ve çay kurutma teknolojisinin, toplam termal enerji ihtiyacının %28'inin biyokütle gazlaştırma ile ikame edilmesi

durumunda, orta ölçekli bir çay fabrikasında (yılıda 990 t çay işleyen) yıllık 21.067 \$ tasarruf ile ekonomik olarak uygun bir seçenek olabileceğini göstermiştir [29].

Otomatik termal yukarı akışlı gazlaştırma sisteminde, hava ve hava buhar karışımı kullanılarak biyokütle peletlerinin gazlaştırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hava kullanılan gazlaştırma sırasında  $4.4 \text{ MJ/Nm}^3$  ısı değer elde edilirken, hava-buhar gazlaştırma da  $4,5 \text{ MJ/Nm}^3$  ısı değer elde edilmiştir. Hava gazlaştırma ve hava buharı gazlaştırma katran üretimi sırasıyla  $21.2 \text{ g/Nm}^3$  ve  $26.2 \text{ g/Nm}^3$  olmuştur. Soğuk gaz verimi ise sırasıyla %91 ve %91.4 olarak gerçekleşmiştir. Hava-buhar gazlaştırmada karbon dönüşümü yaklaşık %91.5'e ulaşırken, hava ile gazlaştırmada karbon dönüşümü oranı %84.3 olarak hesaplanmıştır [30].

Güney Hindistan'ın kırsal köylerinde bol miktarda bulunan hindistan cevizi kabuğu ve kauçuk tohum kabuğu karışımları ile  $50 \text{ kW}_{th}$  aşağı akışlı gazlaştırıcı üzerinde teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Teorik çalışmalar için iki tabakalı kinetik modelleme uygulanmıştır. Araştırmacılar, kauçuk tohumu kabuğunun ve hindistancevizi kabuğunun çeşitli bileşimlerle karıştırılmasının, odunsu biyokütle ile aynı performansı verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, hava eşdeğerlik oranı 0,2 ile 0,3 arasında tutulduğunda performans parametrelerinin maksimum değerlere ulaştığı belirtilmiştir [31].

Farklı operasyonel parametrelerin (sıcaklık, besleme havası/stokiyometrik hava, besleme buharı/karbon oranı ve nem beslemesi) etkisini değerlendirmek için termodinamiğin ikinci kanuna (ekserji analizi) dayalı proses performansının termodinamik göstergeleri kullanılmıştır. Göz önüne alınan tüm operasyonel parametreler arttığında, gazlaştırma işleminin ekserji verimliliğinin azaldığı belirtilmiştir [32].

Gazlaştırma sistemlerinin tasarım parametreleri gazlaştırma performansını etkileyen önemli bir faktördür. Aşağı akışlı gazlaştırıcılar düşük katran üretmeleri nedeniyle biyokütle gazlaştırma işlemi için en uygun özelliklere sahiptirler. Bununla birlikte düşük yoğunluklu biyokütlenin gazlaştırılmasında köprülenme ve ızgarayı bloke etme gibi sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, biyokütlenin nem içeriğinin düşük olması gerekmektedir [33].

Aşağı akışlı bir gazlaştırıcının biyokütle gazlaştırma verimi üzerinde boğaz boyutunun etkisi araştırılmıştır. Biyokütle kaynağı olarak okaliptüs ve nehir demirhindisi (leucaena) kullanılmıştır. Aşağıya doğru gazlaştırıcı 30 cm çapında ve 250 cm yüksekliğindedir. Yanma bölgesi için boğaz boyutu sırasıyla 10, 15, 20 ve 25 cm olarak değiştirilmiştir. Biyokütle tüketimi 10 kg/h, biyokütle boyutu 5-10 mm çapında ve nem içeriği %15'ten az olarak tutulmuştur. Yanma odasına hava akış hızı 1-5 m<sup>3</sup>/h aralığında ayarlanmıştır. Deneysel sonuçlar, hava akış hızı arttıkça gazlaştırıcı verimliliğinin arttığını göstermiştir. En yüksek gazlaştırma verimi 20 cm boğaz boyutunda ve 5 m<sup>3</sup>/h hava akış hızında elde edilmiştir. Ortalama soğuk gaz verimi demirhindi için %35,30 ve okaliptüs için %43,36 olarak hesaplanmıştır. Isıl değeri, okaliptüs ve leucaena için sırasıyla 3.84 MJ/Nm<sup>3</sup> ve 4.87 MJ/Nm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir [34].

Aşağı akışlı gazlaştırıcıda hammadde olarak çeltik sapları %100 sap ve %15 oranında kömür tozu ile karıştırılmış peletler gazlaştırılmıştır. Gazlaştırma işleminde elde edilen verilere göre, kömür katkılı çeltik sapı peletleri için sentez gaz ısıl değerinde artış gözlenmiştir. Bu peletlerin ısıl değeri, 3,69 MJ/Nm<sup>3</sup> ile 3,71 MJ/Nm<sup>3</sup> arasında değişmiştir. Yüksek silisyum içeriğine sahip olan çeltik sapı peletleri 800 °C ve daha yüksek sıcaklık değerlerinde camlaşma riski taşıdığından dolayı daha yüksek gazlaşma hızlarına çıkılamamıştır. Peletlenmemiş çeltik sapı için %37,14 gibi düşük bir soğuk gaz verimi elde edilmiştir. Aynı şekilde elde edilen sentez gazın ısıl değeri de oldukça düşük (1.94 MJ/Nm<sup>3</sup>) bulunmuştur[35].

İki farklı sıcaklıkta (250 °C ve 350 °C) torefaksiyon işlemi görmüş çeltik kavuzu peletlerinin gazlaştırılmasında ekserji analizleri yapılmıştır. Araştırmacılar, peletlerin kimyasal ekserjilerinin artmasına rağmen uçucu gazlardaki enerji kaybı ve elektrik enerjisi tüketiminin artmasından dolayı gazlaştırma işleminde ısıl verimin düştüğünü belirtmişlerdir. Isıl verimler 250 °C ve 350 °C torefaksiyon sıcaklıklarında sırasıyla %30 ve %21 olmuştur [36].

Kentsel katı atıkların gazlaştırılması amacıyla yakıt tüketim oranı (FCR) 100 kg/h olan aşağı akışlı gazlaştırma sistemi tasarlanmıştır. Bu araştırmada belirli oranlarda katı atık (0, %20, %40) parçalanmış kuru çim ile karıştırılarak gazlaştırma performansına bakılmıştır. Araştırmacılar, en uygun ER değerinin 0,20-0,22 aralığında,

sentez gaz üretim oranı ve soğuk gaz veriminin sırasıyla  $1,6 \text{ Nm}^3/\text{kg-}\%65$ ,  $1,5 \text{ Nm}^3/\text{kg-}\%55,2$  ve  $1,4 \text{ Nm}^3/\text{kg-}\%64,4$  olduğunu belirtmişlerdir [37].

Çeltik saplarının gazlaştırılması için tasarlanmış 70 kW çıkış gücüne sahip boğazsız tip aşağı akışlı gazlaştırıcıda farklı hava giriş yollarının gazlaştırma performansına etkileri araştırılmıştır. Araştırmacılar, hava girişinin doğrudan kor bölgesine verilmesi yerine reaktörün üst tarafından verilmesinin daha iyi sonuçlar sağladığını belirtmişlerdir. Hava girişinin üst taraftan verilmesi ile  $5,07 \text{ MJ/Nm}^3$  sentez gaz ısı değeri ve  $\%65,4$  ısı değeri elde edilmiştir [38].

Eşdeğerlik oranının (ER) aşağı akışlı gazlaştırıcıların performansı üzerine etkilerini belirlemek için yapılan çalışmada  $\%70$  ve  $\%30$  oranında linyit ile talaş karıştırılarak gazlaştırma işlemi yapılmıştır. Araştırmada  $0,24-0,39$  ER aralığında 7 farklı ER değerinde gazlaştırma işlemi yapılmıştır. Yakıt tüketim oranı  $0,54 \text{ kg/h}$  ile  $11,1 \text{ kg/h}$ , hava besleme oranı ise  $0,59 \text{ kg/h}$  ile  $19,5 \text{ kg/h}$  arasında değişmiştir. Araştırmacılar yüksek alt ısı değerinin  $4,91 \text{ MJ/Nm}^3$  ve sentez gaz üretim veriminin  $2,99 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  ile  $ER=0,39$  değerinde elde edildiğini belirtmişlerdir [39].

Aşağı akış gazlaştırıcılarının farklı hammaddeler üzerindeki uyumluluğunu anlamak için, pirinç kabuğu, talaş ve bunların karışımı (kütle olarak 1: 1) ile beslenen sabit yataklı bir aşağı akışlı gazlaştırıcının performansı karşılaştırılmıştır. Gazlaştırma, değişen eşdeğerlik oranıyla ( $0,15$ ,  $0,20$  ve  $0,25$ ) ile gerçekleştirilmiştir. Gazlaştırma havası, ızgaranın  $330 \text{ mm}$  üzerinde bulunan üç açıklıktan debimetre vasıtasıyla reaktöre enjekte edilmiştir. Optimum eşdeğerlik oranlarında üretici gazın alt ısı değerleri, pirinç kabuğu, talaş ve karışım için sırasıyla  $3,13 \text{ MJ/Nm}^3$ ,  $2,69 \text{ MJ/Nm}^3$  ve  $0,35 \text{ MJ/Nm}^3$  ve soğuk gaz verimi  $\%72,73$ ,  $\%69,27$  ve  $\%82,08$  olarak saptanmıştır [40].

Aşağı akışlı gazlaştırıcının bazı modifikasyonlarla kombinasyonuna dayalı tasarım çalışmaları yapılmıştır. Termal kapasitesi  $5 \text{ kW}$  olarak belirlenen gazlaştırıcının boyutlandırılmasında ampirik ilişkiler ve spesifik gaz üretim hızı, biyokütle akış hızı, boğaz çapı vb. ile ilgili bazı deneysel veriler kullanılmıştır. Üretilen sentez gazlarını saflaştırmak için gaz gidericinin reaktörüne bir siklon ayırıcı, bir hava soğutma ünitesi ve bir filtre ünitesi eklenmiştir. Gazlaştırıcının besleme oranı,

odun parçaları (10-70mm) için 1.25 kg/h ve odun talaşları (2-5 mm) için 2.1 kg/h'dir. Her iki ağaç kalıntısı için üretilen sentez gaz, istikrarlı mavi alevlerle yanmış ve sentez gazın içinde minimum katran yüzdesi gözlemlenmiştir. Araştırmacılar üretilen sentez gazlarının sadece ısı amaçlı (pişirme vb) değil, aynı zamanda elektrik üretmek için de içten yanmalı motorlarda güvenle kullanılabilceğini belirtmişlerdir [41].

Gazlaştırma maddesi olarak  $CO_2$  kullanılan bir araştırmada boudouard reaksiyonu yoluyla  $CO_2$ 'yi  $CO$ 'ya dönüştürmek ve sonuç olarak karbon oranını arttırmanın amaçlandığı araştırmada, kombine ısı ve güç sistemlerinin motorundan egzoz gazından yararlanılmıştır. Bu amaçla 2 kg/h yakıt tüketim hızına sahip mikro ölçekli aşağı akışlı gazlaştırıcı kullanılmıştır. Araştırmacılar, gazlaştırma maddesi olarak hava+ $CO_2$  kullanımına göre soğuk gaz veriminin %10-25 arasında daha fazla, ayrıca karbon dönüşüm oranının yalnızca hava kullanılmasına göre çok daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [42].

Gibbs serbest enerji minimizasyonuna dayanan stokiyometrik olmayan bir denge modeli kullanılarak pirinç kabuğunun hava ile gazlaştırma simülasyonu yapılmıştır. 600-1000 °C sıcaklık aralığında ve 0.15-0.55 ER değerleri aralığında gaz bileşimini hesaplamak için FACTSAGE 6.3 yazılımı kullanılmıştır. Araştırmacılar sentez gazın kimyasal ekserjisinin soğuk gaz veriminin %89,90-94,85'ine katkıda bulunduğunu, soğuk gaz verimliliği ve enerji verimliliği çalışma koşullarında sırasıyla %25,19-70,71 ve %23,11-62,24 aralığında değiştiğini gözlemlemişlerdir [43].

Aşağı akışlı bir gazlaştırıcıda biyokütlenin gazlaştırılması üzerinde denemeler yapılmıştır. Spesifik biyokütle tüketimi, tüm gaz akış hızları için ortalama 0.462 kg/s'lik bir değerle sabit tutulmuştur. Üretilen gaz akış hızı arttıkça çeşitli bölgelerin sıcaklığı da artmıştır. Oksidasyon bölgesinin sıcaklığı, gaz akış hızı ile doğru orantılı olarak artarak 580 °C'den 725 °C'ye kadar yükselmiştir. Aynı zamanda  $CO$  ve  $H_2$ 'nin hacim yüzdesi ve buna bağlı olarak gazın ısı değeri gaz akış hızı arttıkça bir miktar yükselmiştir. Gazlaştırıcı verimliliği %69.57 ile %74.48 arasında değişmiştir [44].

Aşağı akışlı gazlaştırma sisteminde çeltik kavuzları ve odun peletleri kullanılarak, hem deneysel hem de sayısal yöntemler kullanılarak farklı hava kütle akış hızları altında gazlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yanma bölgesindeki numunenin

sıcaklığını ve bileşimini tahmin etmek için kimyasal denge modellemesi kullanılmıştır. Ayrıca, indirgeme bölgesini simüle etmek için sonlu kinetik modelleme kullanılmıştır. İndirgeme bölgesi simülasyonunun başlangıç sıcaklığı ve bileşimi, yanma bölgesinden alınan kimyasal denge sonuçlarından elde edilmiştir. Çeltik kavuzunun alev yayılma hızı, aynı hava akış hızında odun peletinden yaklaşık beş kat daha fazla bulunmuştur. Her iki yakıtın tepe sıcaklığı da benzer değerlere sahip olduğu saptanmıştır. İndirgeme bölgesinde öngörülen sıcaklık, yüksek gaz sıcaklığı nedeniyle bölgenin üstünde yüksek kinetik aktivite göstermiştir. Araştırmacılar öngörülen sıcaklığın, deneysel test sonuçlarıyla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir [45].

Pilot ölçekli sabit yataklı 18 kW güce sahip gazlaştırıcıda mısır koçanları gazlaştırılmıştır. Araştırmacılar mısır koçanı parça boyutlarına bağlı olarak soğuk gaz veriminin %33,7 ile %37 aralığında değiştiğini belirtmişlerdir [46].

Biyokütle kaynağı olarak çim peletinin iki farklı seviyede aşağı akışlı gazlaştırıcıda gazlaştırma performansı araştırılmıştır. Araştırmada eşdeğerlik oranı  $ER = 0.29$  ve  $ER = 0.36$  olarak belirlenmiştir. Deneme süresince kor bölgesindeki sıcaklık 700-800 °C arasında değiştiği gözlenmiştir. Her iki eşdeğerlik oranında sentez gazın ısı değeri 3,83 MJ/Nm<sup>3</sup> ve 3,93 MJ /Nm<sup>3</sup> olmuştur. Gazlaştırma sonucu elde edilen termal verimlilik ise sırasıyla %39 ve %50 olarak hesaplanmıştır. Araştırmacılar  $ER=0,36$  değerinde daha iyi sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir [2].

Enerji ve ekserji analizi yoluyla gazlaştırma sırasında çeltik kavuzu, hindistan cevizi kabuğu, talaş, hindistan cevizi özü, kauçuk tohum kabuğu gibi farklı biyokütlerin performansları test edilmiştir. Bu amaçla biyokütle peletlerinin gazlaştırıcı hammadde olarak değerlendirilip ve karşılaştırmak için yarı-denge modeli (quasi-equilibrium model) geliştirilmiştir. Araştırmacılar talaşın en yüksek enerji ve ekserji verimliliğine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Talaşın 1:0.25 buhar biyokütle oranında enerji verimliliği, ekserji verimliliği ve tersinmez ekserji kaybı (irreversibility) sırasıyla %35.62, %36.98 ve 10.62 MJ/kg olarak bulunmuştur. Ayrıca daha düşük kül içeriğine ve daha yüksek karbon içeriğine sahip biyokütlenin maksimum enerji ve ekserji verimliliğine ulaştığı belirtilmiştir [47].

Aşağı akışlı gazlaştırıcıda 35-40 kg/h yakıt besleme oranında şeker kamışı küspesi ve hindistan cevizi kabukları kullanılarak gazlaştırma denemeleri yapılmıştır. Bu araştırmada, ER değerinin sentez gaz bileşimi, ısıl değeri, sentez gazın verimi, gazlaştırma verimliliği ve katran içeriği üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen verilere göre, biyokütle besleme ve eşdeğerlik oranının gazlaştırıcının performans parametresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koyulmuştur. Şeker kamışı küspesi ve hindistan cevizi kabuklarından üretilen sentez gazın özgül üretim değerleri sırasıyla 3,1 Nm<sup>3</sup>/kg ve 2.97 Nm<sup>3</sup>/kg iken, aynı yakıtlardan üretilen katran miktarı 2.5 g/Nm<sup>3</sup> ve 2.2 g/Nm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. ER 0.17'den 0.22'ye yükseldikçe, karbon monoksit (CO) ve hidrojen (H<sub>2</sub>) konsantrasyonu sırasıyla %14'ten %17.9'a ve %7.5'ten %9.6'ya yükselmiştir. Bununla birlikte, sentez gazın alt ısıl değeri 4,4 MJ/Nm<sup>3</sup>'den 5.4 MJ/Nm<sup>3</sup>'e arttığı belirtilmiştir [48].

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Gazlaştırma denemelerinde kullanılan biyokütle materyalleri

Gazlaştırma denemelerinde biyokütle materyalleri olarak çam ve gürgen ağaçlarının dal artıkları kullanılmıştır. Materyal Hatay ilinde faaliyet gösteren Defne Pelet Firmasından peletlenmiş olarak temin edilmiştir. Pelet çapları ortalama 6 mm'dir. Peletlerin kısa (proximate) ve nihai analizleri (ultimate) özel bir laboratuvarında yaptırılmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Çam ve gürgen peletlerinin kısa ve nihai analiz sonuçları

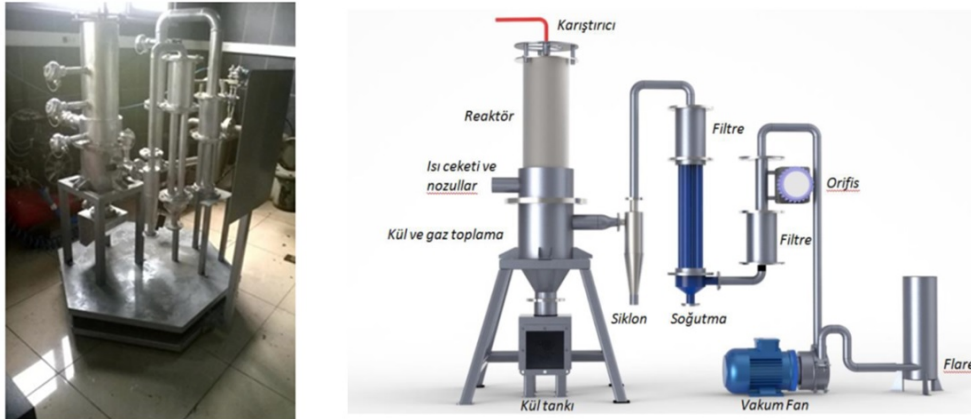
Analiz	Çam	Gürgen
Alt ısııl değer (MJ/kg)	16,65	16,54
Üst ısııl değer (MJ/kg)	17,93	18,05
Pelet yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1159,5	1062,8
Nem (%)	7,79	8,46
Kül içeriği (%)	1,15	1,19
Uçucu madde (Orjinal baz, %)	75,65	75,47
Uçucu madde (Kuru baz, %)	82,03	81,34
Sabit karbon içeriği (%)	15,41	15,88
Karbon (%)	44,30	44,69
Hidrojen (%)	5,67	5,59
Azot (%)	0,21	0,30
Oksijen (%)	40,88	39,74

##### 3.1.2. Gazlaştırma ünitesi

Denemelerde kullanılan gazlaştırma ünitesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü gazlaştırma laboratuvarında bulunan pilot ölçekli gazlaştırma ünitesinin revizyonu ile yeniden tasarlanmıştır. Mevcut gazlaştırıcı hava girişinin reaktörün üst kısmındaki açıklıktan vakum pompası ile sağlandığı, aşağı akışlı ve sabit yataklı tiptir. Reaktör kapasitesi yaklaşık 7 kg biyokütle alacak şekilde tasarlanmıştır. Reaktör çapı 170 mm,



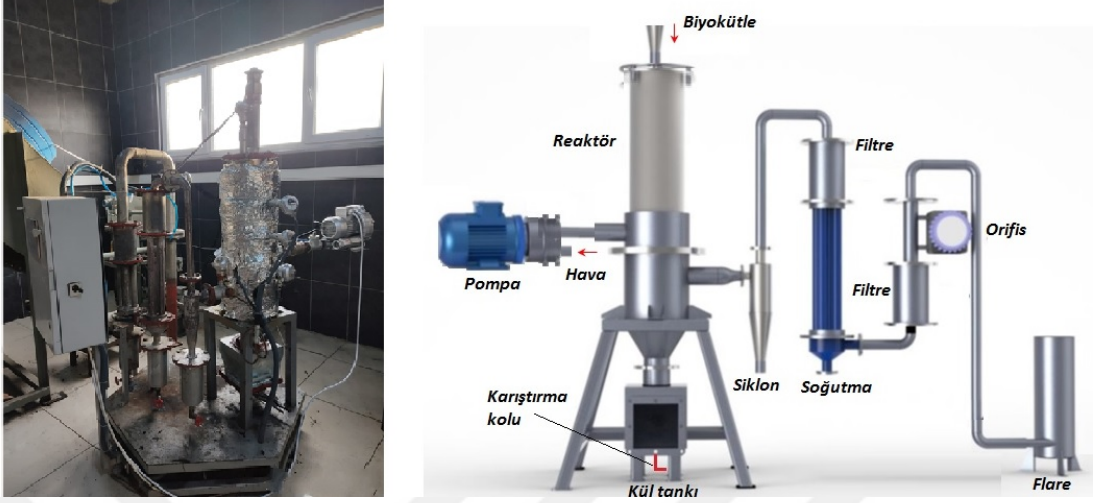
yüksekliği 750 mm'dir. Reaktör silindiri yüksek sıcaklığa ve korozyona dayanıklı 5 mm kalınlıkta paslanmaz çelik (AISI310S) malzemedendir. Reaktörün alt kısmında kül toplama ünitesi bulunmaktadır. Reaktörden çıkan gaz önce bir siklon ayırıcıdan geçmekte, daha sonra filtrelerden geçerek temizlenmektedir. Gaz içinde bulunan katran siklon ayırıcı ve birinci filtrenin altındaki soğutma ünitesinden alınmaktadır. Vakum pompasının çıkışında gaz analizleri yapmak için örnek alma tapası bulunmaktadır (Şekil 3.1). Sistem gazlaştırma sırasında kütle kaybını ölçmek için hassas bir tartım cihazının üstüne monte edilmiştir. Mevcut gazlaştırma ünitesinde reaktörden çıkan gaz vakum pompasından geçmektedir. Bu durum gaz içerisinde bulunan katran vb. kirletici parçacıkların pompa elemanlarına yapışmasına ve bir müddet sonra pompada tamir edilmesi güç arızalar çıkmasına neden olmaktadır. Bu sakıncaları gidermek için sisteme hava girişinin doğrudan yanma bölgesine bir pompa ile basılmasını sağlayacak düzenleme yapılmıştır.



**Şekil 3.1.** Gazlaştırma ünitesinin revizyon öncesi görünümü [35]

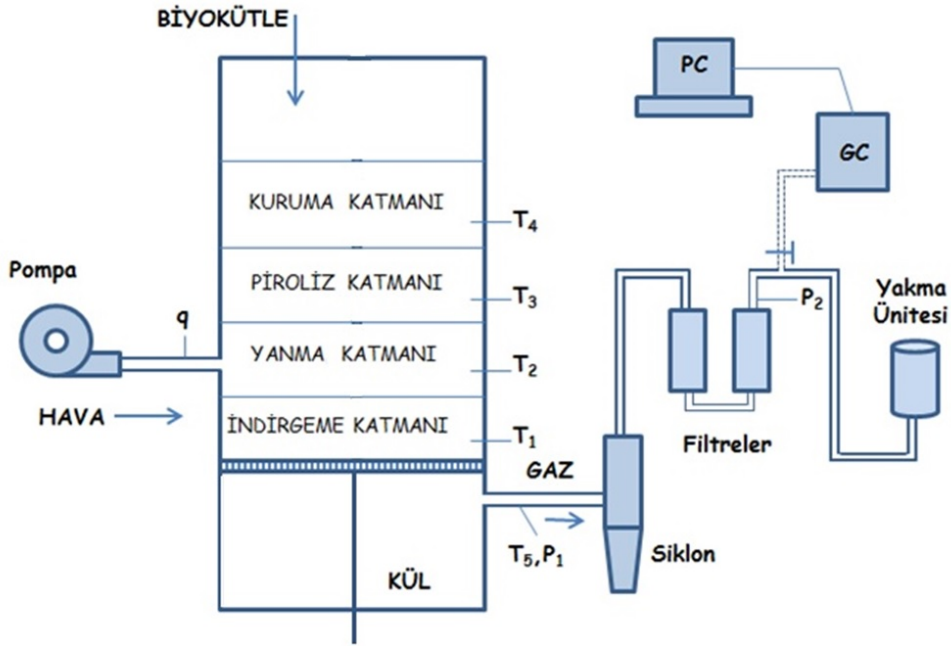
Gazlaştırma işlemi sırasında havanın doğrudan yanma bölgesine verilebilmesi için, mevcut sistemdeki vakum pompası iptal edilmiştir. Bunun yerine havayı doğrudan kor bölgesine basan hava pompası monte edilmiştir. Değişken devirli hava pompasının devri otomasyon sisteminden ayarlanıp sisteme istenen debide hava verilmesi sağlanmıştır. Reaktörün üst kısmına hava sızdırmazlığını sağlayan bir kapak monte edilmiştir. Kapağın üzerinde biyokütlenin beslenmesini sağlayan doldurma mekanizması bulunmaktadır. Ayrıca, daha uzun süreli gazlaştırma rejimi sağlayabilmek için kül tankının kapasitesi artırılmıştır. Mevcut sistemdeki üstten

karıştırma düzeneği iptal edilerek, ızgaraya alttan bağlantılı karıştırma düzeneği monte edilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Denemelerde kullanılan yeniden tasarlanmış gazlaştırma ünitesi

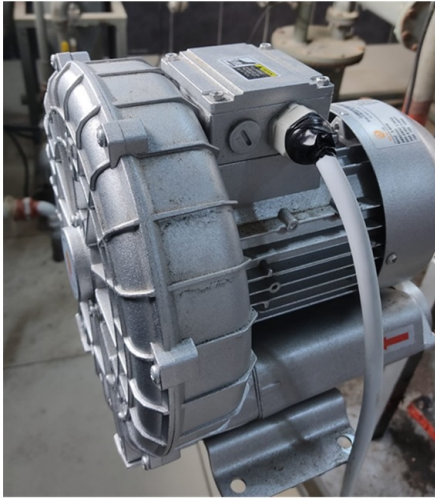
Reaktörün kurutma, piroliz, indirgeme, kor bölgelerinde ve gaz çıkış noktasında K tipi sıcaklık sensörleri, reaktörün gaz çıkışında ve filtrelerden sonra basınç sensörleri bulunmaktadır. Bu sensörlerden alınan veriler gazlaştırma süresince otomasyon sisteminde kaydedilmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Sensörlerin gazlaştırma sistemi üzerindeki yerleşimleri

### 3.1.3. Hava pompası

Hava pompası reaktörün yanma bölgesine doğrudan hava basacak şekilde yerleştirilmiştir. Hava reaktör içinde bulunan tuyers (hava kanalcığı) ile doğrudan yanma bölgesine verilmektedir. Pompa trifaze akımla çalışmaktadır. Anma gücü 0,4 kW'tır ve maksimum 130 m<sup>3</sup>/h debiye sahiptir (Şekil 3.4). Hava pompasının devri elektronik sistemin üzerine yerleştirilen bir invertör yardımıyla kontrol edilmektedir.



Şekil 3.4. Hava pompası

### 3.1.4. Gaz kromatografi cihazı (GC)

Gazlaştırma işleminde üretilen sentez gazın bileşiminde bulunan  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  ve  $N_2$  gazlarının hacimsel yüzdelerini saptamak için Biyosistem Mühendisliği gazlaştırma laboratuvarında bulunan AGILANT 7890B marka gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır. Gaz çıkış bölgesinden şırınga yardımıyla alınan gaz örneği GC cihazına manuel olarak verilmiştir. Cihaza ait online data analiz yazılımı kullanılarak gaz içeriklerinin sonuçları kaydedilmiştir. Cihazın pnömatik valflerin sağlıklı çalışabilmesi için kuru hava tüpü ve GC ölçümlerinde kullanılan taşıyıcı gaz olarak da yüksek saflıkta Argon kullanılmıştır (Şekil 3.5). Her ölçüm periyodundan önce GC cihazı temizleme modunda çalıştırılmış ve kalibrasyonu yapılmıştır.



**Şekil 3.5.** Gaz kromatografi cihazı, kuru hava ve argon gazı tüpleri

### **3.1.5. Filtre malzemeleri**

Gazlaştırma sonucu elde edilen sentez gazın içerisinde bulunan katran ve küçük partiküllerin tutulması için iki aşamalı filtrasyon işlemi yapılmıştır. Filtre malzemesi olarak paslanmaz çelik rulo teller ve bir miktar ponza taşı kullanılmıştır. Yapılan ön denemelerde bu malzemelerin partikülleri başarıyla tuttuğu görülmüştür (Şekil 3.6).

### **3.1.6. Hava hızı ölçüm cihazı (anemometre)**

Hava hızı pompa emiş ağzına özel bir aparatla yerleştirilen Extech Marka 45158 Model Mini higro-termo anemometre ile ölçülmüştür. Anemometre 0-28 m/s aralığında  $\pm\%3$  duyarlılıkta hız ölçümü yapabilmektedir. Cihaz aynı zamanda -18 ile 50 °C aralığında hava sıcaklığı, %10-95 aralığında bağıl nem ölçümü de yapabilmektedir (Şekil 3.7).



**Şekil 3.6.** Filtre malzemeleri



**Şekil 3.7.** Mini higro-termo anemometre

### **3.1.7. Kontrol paneli**

Gazlaştırma işlemi esnasında sensörlerden gelen verileri görüntüleyerek kaydetmek amacıyla dijital ve analog giriş/çıkış kanalları bulunan PLC kontrollü ölçüm, kontrol ve otomasyon sistemi kullanılmıştır. Sistemin kontrol paneli dijital bir ekrana sahiptir. Ayrıca panel üzerinde, hava pompasına güç sağlayan elektrik motorunun değişken devri için bir sürücü de bulunmaktadır. Çalışma esnasında gelen verileri kaydetmek için USB giriş soketi de bulunmaktadır. Sistem gazlaştırma rejimine girdiğinde bu sokete flash bellek takılarak kayıt işlemi başlatılmaktadır.

Sensörlerden gelen veriler \*.csv uzantılı excel dosyalarına gazlaştırma rejimi bitinceye kadar birer dakika arayla ayrı ayrı kaydedilmektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Kontrol paneli [35]

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Denemelerin yürütülmesi

Gazlaştırma işlemleri her bir biyokütle örneği için 3 farklı eşdeğerlik oranında ( $ER=0,25$ ,  $ER=0,30$  ve  $ER=0,35$ ) gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön denemelerde sisteme hava sağlayan hava pompasını çalıştıran elektrik motoru farklı hız kademelerinde çalıştırılmış ve gazlaştırma işlemi için en uygun olan hız aralıkları seçilmiş ve ER değerleri Bölüm 3.2.8’de belirtilen yöntemle göre hesaplanmıştır. Planlanan ER değerlerinde gerekli hava akış ve yakıt tüketim oranları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Belirlenen hava besleme oranlarına göre pompayı çalıştıran elektrik motorunun frekans ayarları yapılmış ve hava hızları ayarlanmıştır.

### 3.2.2. Gazlaştırma İşlemi

**Çizelge 3.2.** Gazlaştırma işleminin yapılacağı ER değerlerinde kütlese hava ve biyokütle akış oranları

Kütle akışı (kg/h)	Gürgen			Çam		
	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35
$\dot{m}_{hava}$	11,40	14,29	19,03	11,27	14,12	19,03
$\dot{m}_{biyokutle}$	8,05	8,60	9,71	8,00	8,44	9,66

Gazlaştırma işlemine başlarken ilk önce reaktöre 1,5 kg pelet konulmuş ve üstten çam parçaları yardımıyla tutuşturularak üst kapak sıkıca kapatılmıştır. Fan 10-15 HZ frekans aralığında çalıştırılarak sıcaklığın yükselmesi beklenmiştir. Kontrol ekranında kor bölgesindeki sıcaklık ( $T_1$ ) 50 °C civarına geldiğinde frekans 40 HZ dolaylarına getirilmiştir. Kor bölgesi sıcaklığı 220-250 °C dolaylarına geldiğinde frekans 5 HZ civarına düşürülerek üst kapak açılmış ve reaktör doluncaya kadar pelet yüklemesi yapılmış ve kapak sıkıca kapatılmıştır. Bu işlemden sonra çalışma frekansı denemenin yapılacağı düzeye çıkartılmış ve kor bölgesinin sıcaklığı gazlaştırma reaksiyonlarının başladığı 700 °C'ye çıkıncaya kadar beklenmiştir. Bu sıcaklık seviyesinden sonra sıcaklık, kütle kaybı ve basınç verilerinin alınması için kontrol sistemine flash bellek takılmıştır. Sistem gazlaştırma rejiminde iken gaz çıkış hattındaki gaz örneği alma noktasından ikişer dakika aralıklarla özel bir şırınga ile gaz örnekleri alınmıştır. Bu işlem reaktörde yaklaşık 4 kg pelet kütlesi kalıncaya kadar sürdürülmüştür. Bu aşamadan sonra flash disk çıkartılarak kayıt işlemi sonlandırılmıştır.

### 3.2.3. Gaz analizleri

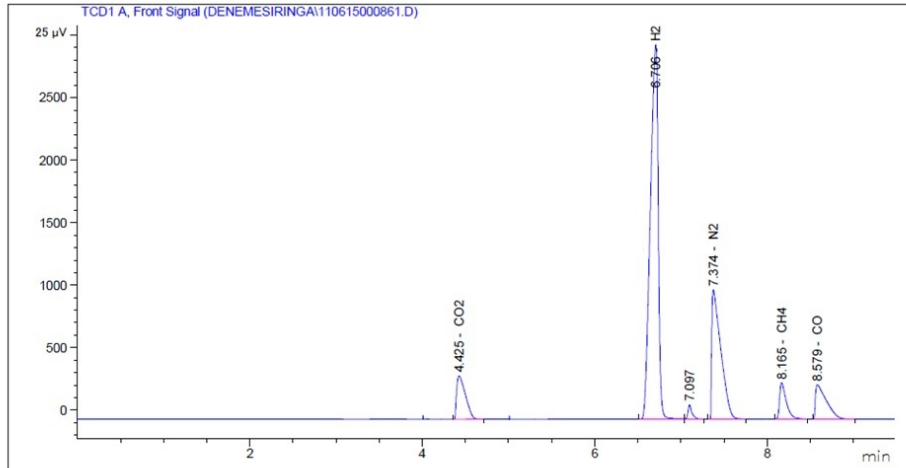
Şırınga ile alınan gaz örneklerinin kimyasal analizleri Agilent 7890B GC gaz kromatografi cihazında yapılmıştır. Her bir deneme için gazlaştırma reaksiyon süresine bağlı olarak gaz çıkış hattından şırınga ile alınan 8-10 gaz örneğinin gaz bileşimlerinin analizleri yapılmıştır. Gaz sızmalarını önlemek için gaz örneğinin alındığı şırıngalar streç ile sarılarak izole edilmiştir. Sentez gazın kimyasal analizlerinde gazın bileşiminde bulunan  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  ve  $N_2$  gazlarının hacimsel yüzdeleri saptanmıştır.

Sentez gazların alt (LHV) ve üst (HHV) ısıl değerlerinin hesaplanmasında, her bir gazlaştırma denemesinde alınan gaz örneklerindeki gaz bileşimlerinin ortalama değerleri alınmıştır.

Şekil 3.9’da şırınga ile gaz örneklerinin nasıl alındığı gösterilmiştir. Gaz kromatografi cihazı ile yapılan gaz analizinin sonuç raporu örneği Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Şırınga ile gaz örneklerinin alınması



Normalized Percent Report						
	RetTime [min]	Type	Area [25 µV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp Name
Sorted By : Signal	4.425	BB	2443.22949	4.91680e-2	13.168	CO2
Calib. Data Modified : 1/4/2021 2:10 PM	6.706	BV	1.90974e4	7.39110e-3	15.472	H2
Multiplier : 1.0000	7.374	BB	7573.21240	6.20076e-2	51.477	N2
Dilution : 1.0000	8.165	BB	1553.10168	1.60258e-2	2.728	CH4
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs	8.579	BB	2395.02002	6.53349e-2	17.153	CO
Signal 1: TCD1 A, Front Signal	Totals :				100.000	

Şekil 3.10. Gaz analizi sonuç raporu



### 3.2.4. Gazlaştırma havasının hızının ölçülmesi

Sisteme giren havanın hızı Extech Marka 45158 Model Mini Termo-anemometre ile ölçülmüştür. Bu cihaz aynı zamanda sisteme giren havanın sıcaklığını da ölçmektedir. Ölçümler esnasında ölçüm cihazı, pompa hava emiş hattına hazırlanan özel bir aparat yardımıyla yerleştirilmiştir (Şekil 3.11). Gazlaştırma esnasında belirli aralıklarla hava hızı ve sıcaklık değerleri kaydedilerek bu değerlerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.11. Hava hızı ölçümü

### 3.2.5. Gazlaştırma havasının kütle akış oranının hesaplanması

Gazlaştırma havasının kütle akış oranı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır;

$$\dot{m}_{hava} = 3600 * v_h * A_k * \rho_{hava} \quad (3.1)$$

Burada,  $\dot{m}_{hava}$  (kg/h) gazlaştırma havasının kütleli akış oranı,  $v_h$  (m/s) pompa emiş hattındaki hava hızı ve  $A_k$  (m<sup>2</sup>) emiş hattının kesit alanıdır ve  $\rho_{hava}$  (kg/m<sup>3</sup>) gazlaştırma havasının yoğunluğudur.

Havanın yoğunluğu gazlaştırma esnasında sisteme giren havanın sıcaklık ve manometre ile ölçülen basıncına bağlı olarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır [49];

$$\rho_{hava} = \frac{P * M_{hava}}{R_u * T} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte;  $P$  (kPa) havanın basıncı,  $M_{hava}$  (28,97 kg/kmol) havanın molekül ağırlığı,  $R_u$  (8,314 kJ/kmol.K) üniversal gaz sabiti ve  $T$  (K) havanın sıcaklığıdır.

### 3.2.6. Gaz üretim oranının hesaplanması

Gazlaştırma esnasında reaktörden birim zamanda eksilen kütle biyokütle içindeki uçucucu maddeler (gaza dönüşen kısım) ve katrandan oluşmaktadır. Katranın gaz örneği alma noktasına kadar gazdan ayrıldığı ve sistemde kaldığı kabul edilerek sistemdeki toplam kütle kaybının gaza dönüştüğü kabul edilmiştir. Kütlesele gaz üretim oranı aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır [2], [38];

$$\dot{m}_{gaz} = \dot{m}_{kk} + \dot{m}_{hava} \quad (3.3)$$

Burada;  $\dot{m}_{gaz}$  (kg/h) kütlesele gaz üretim oranı,  $\dot{m}_{kk}$  (kg/h) gazlaştırma esnasında kütlesele kayıp oranıdır ve gazlaştırma süresince eksilen kütlenin gazlaştırma süresine oranlanmasıyla hesaplanmıştır.

Kütlesele gaz üretim oranı aşağıdaki bağıntı yardımıyla normal koşullardaki hacimsel gaz üretim oranına dönüştürülmüştür;

$$\dot{v}_{gaz} = \frac{\dot{m}_{gaz}}{\rho_{gaz}} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki eşitlikte,  $\dot{v}_{gaz}$  (Nm<sup>3</sup>/h) normal koşullardaki hacimsel gaz üretim oranı,  $\rho_{gaz}$  (kg/Nm<sup>3</sup>) gazın normal koşullardaki yoğunluğudur.

Gazın normal koşullardaki yoğunluğu aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır [50];

$$\rho_{gaz} = \frac{1}{22,4} * \sum_i \frac{M_i * X_i}{100} \quad (3.5)$$

Burada;  $\rho_{gaz}$  kg/Nm<sup>3</sup> sentez gazın yoğunluğu,  $M_i$  (kg/kmol) sentez gazdaki her bir gaz bileşeninin molekül ağırlığı,  $X_i$  (%) her bir gaz bileşeninin hacimsel oranlarıdır.

### 3.2.7. Biyokütle tüketim oranının hesaplanması

Gazlaştırma esnasında biyokütle tüketim oranı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır [38];

$$\dot{m}_{biyokutle} = \dot{m}_{kk} + \dot{m}_{char} + \dot{m}_{katran} \quad (3.6)$$

Burada;  $\dot{m}_{biyokutle}$  (kg/h) biyokütle tüketim oranı,  $\dot{m}_{char}$  ve  $\dot{m}_{katran}$  (kg/h) sırasıyla kütleli char ve katran üretim oranlarıdır.

Char ve katran üretim oranı gazlaştırma sonrasında kül tankında ve katran toplama noktalarında biriken miktarların gazlaştırma süresine oranlanmasıyla bulunmuştur.

### 3.2.8. Hava eş değerlik oranının (ER) hesaplanması

Gazlaştırma havasının eş değerlik oranı (ER) gazlaştırma işleminde performansı etkileyen önemli bir parametredir. ER değeri aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır [51];

$$ER = \frac{\dot{m}_{hava}}{\dot{m}_{biyokutle} * SR_m} \quad (3.7)$$

Burada;  $ER$  hava eşdeğerlik oranı,  $SR_m$  (kg-hava/kg-biyokütle) kütleli stokiyometrik hava oranıdır.

Kütleli stokiyometrik hava oranı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır [2], [51];

$$SR_m = 0,311 * HHV_b \quad (3.8)$$

Yukarıdaki eşitlikte;  $HHV_b$  (MJ/kg) biyokütlenin üst ısıl değeridir.

### 3.2.9. Sentez gazın ısıl değerinin hesaplanması

Sentez gazın LHV ve üst HHV değerleri bileşiminde bulunan yanıcı gazların ısıl değerlerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Gaz analizleri sonucu sentez gazda bulunan yanıcı gazların ( $CO$ ,  $H_2$  ve  $CH_4$ ) hacimsel oranları saptanmış ve aşağıdaki bağıntı yardımıyla alt ısıl değerleri saptanmıştır [18], [38];

$$LHV_{gaz} = 126 * X_{CO} + 107,94 * X_{H_2} + 358,68 * X_{CH_4} + 635,46 * X_{C_nH_m} \quad (3.9)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $LHV_{gaz}$  (kJ/Nm<sup>3</sup>) sentez gazın alt ısı değeri,  $X_i$  (%) sentez gazın bileşiminde bulunan gazların molar fraksiyonlarıdır.  $X_{C_nH_m}$  sentez gaz içinde eser miktarda bulunan  $C_2H_4$  ve  $C_2H_6$  gazlarının molar fraksiyonunu temsil etmektedir ve çoğu zaman ihmal edilmektedir.

Sentez gazın üst ısı değeri de aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır [2];

$$HHV_{gaz} = 126 * X_{CO} + 127,6 * X_{H_2} + 397,6 * X_{CH_4} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $HHV_{gaz}$  (kJ/Nm<sup>3</sup>) sentez gazın üst ısı değeridir.

### 3.2.10. Özgül gaz üretiminin saptanması

Biyokütlenin cinsine ve gazlaştırma işlemine bağlı olarak değişen bu değer, birim biyokütleden elde edilen gaz miktarını ifade etmektedir. Gaz üretim miktarı, gazlaştırma esnasında biyokütle tüketim ve hacimsel gaz üretim oranlarına bağlı olarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır [2], [38];

$$Y_{gaz} = \frac{\dot{v}_{gaz}}{\dot{m}_{biyokutle}} \quad (3.11)$$

Yukarıdaki eşitlikte,  $Y_{gaz}$  (Nm<sup>3</sup>-gaz/kg-biyokütle) özgül gaz üretim değeridir.

### 3.2.11. Karbon dönüşüm verimliliğinin saptanması

Karbon dönüşüm verimi, biyokütle içinde bulunan karbonun gazlaştırma işlemi sırasında sentez gaza geçen oranını ifade etmek amacıyla kullanılmaktadır. Karbon dönüşüm oranının yüksek olması gazlaştırma işleminin başarısını arttırmaktadır. Aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır [52], [53];

$$CCE = \left( \frac{12 * Y_{gaz} * (X_{CO} + X_{CO_2} + X_{CH_4})}{22,4 * X_{C_{Biyokutle}}} \right) * 100 \quad (3.12)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $CCE$  (%) karbon dönüşüm verimliliği,  $X_{C_{Biyokutle}}$  (%) biyoküttele bulunan karbonun kütle oranıdır.

### 3.2.12. Soğuk gaz verimliliğinin saptanması

Gazlaştırma işleminin soğuk gaz verimliliği (Cold-Gas efficiency) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır [16];

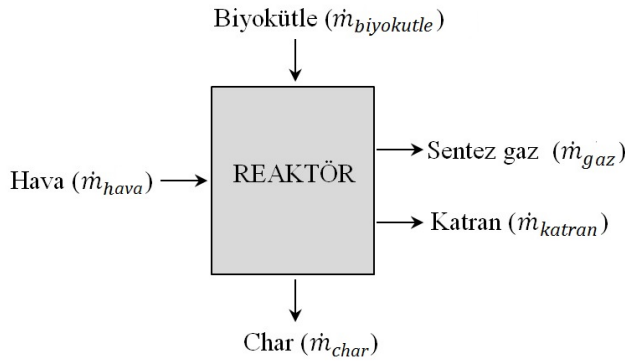
$$CGE = \frac{LHV_{gaz} * \dot{v}_{gaz}}{LHV_{biyokutle} * \dot{m}_{Biyokutle}} \quad (3.13)$$

Burada;  $CGE$  (%) gazlaştırma işleminin soğuk gaz verimliliği ve  $LHV_{Biyokutle}$  (kJ/kg) biyokütlenin alt ısı değeridir.

### 3.2.13. Kütle ve enerji denkleği hesaplamaları

Gazlaştırma işlemlerindeki kütle denkleği hesaplamaları Şekil 3.12'deki diyagrama göre aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır [36];

$$(\dot{m}_{biyokutle} + \dot{m}_{hava})_{giren} = (\dot{m}_{gaz} + \dot{m}_{char} + \dot{m}_{katran})_{cikan} \quad (3.14)$$



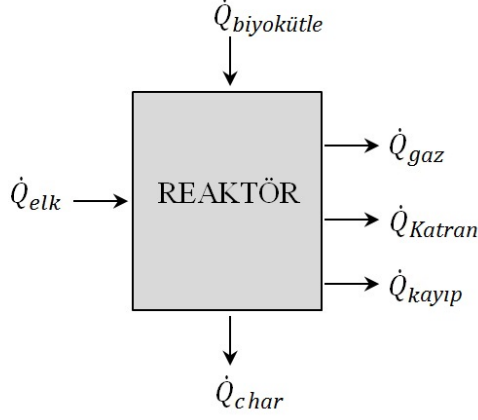
Şekil 3.12. Gazlaştırma işleminin kütle denkleği diyagramı

Enerji denkleği aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [36], [54];

$$(\dot{Q}_{biyokutle} + \dot{Q}_{elk})_{giren} = (\dot{Q}_{gaz} + \dot{Q}_{char} + \dot{Q}_{katran} + \dot{Q}_{kayip})_{cikan} \quad (3.15)$$

Burada;  $\dot{Q}_{biyokutle}$  (kW) biyokütle enerji akışı,  $\dot{Q}_{elk}$  (kW) hava pompasını çalıştıran elektrik motorunun gücü,  $\dot{Q}_{gaz}$  (kW) sentez gazın enerji akışı,  $\dot{Q}_{char}$  (kW) char enerji akışı ve  $\dot{Q}_{katran}$  (kW) katranın enerji akışı ve  $\dot{Q}_{kayip}$  kaybolan enerjidir.

Hesaplamalarda, sentez gazın kinetik ve potansiyel enerjisi ile çok küçük bir değer olduğu için fiziksel enerjisi ihmal edilmiştir. Gazlaştırma işleminin enerji denkleği diyagramı Şekil 3.13'de verilmiştir.



**Şekil 3.13.** Gazlaştırma işleminin enerji denklik diyagramı

Sentez gazın kimyasal enerjisi akışı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır [54];

$$\dot{Q}_{gaz} = \frac{\dot{m}_{gaz} * LHV_{gaz}}{3600 * \rho_{gaz}} \quad (3.16)$$

Burada;  $LHV_{gaz}$  (kJ/Nm<sup>3</sup>) 3.9 no'lu eşitlik,  $\rho_{gaz}$  (kg/Nm<sup>3</sup>) 3.5 no'lu eşitlik kullanılarak hesaplanan değerlerdir.

Biyokütlenin kimyasal enerji akışı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır [54];

$$\dot{Q}_{biyokutle} = \frac{\dot{m}_{biyokutle} * LHV_{biyokutle}}{3600} \quad (3.17)$$

Char'ın kimyasal enerji akışı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır;

$$\dot{Q}_{char} = \frac{\dot{m}_{char} * LHV_{char}}{3600} \quad (3.18)$$

Burada;  $LHV_{char}$  (kJ/kg) char'ın alt ısıl değeridir ve 28000 kJ/kg olarak alınmıştır [55].

Katranın kimyasal enerji akışı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır;

$$\dot{Q}_{katran} = \frac{\dot{m}_{katran} * LHV_{katran}}{3600} \quad (3.19)$$

Burada;  $LHV_t$  (kJ/kg) katranın alt ısıl değeridir. Bu değer literatürden yararlanarak 23000 kJ/kg olarak alınmıştır [56].

### 3.2.14. Ekserji denkliği hesaplamaları

Ekserji denkliği hesaplamalarında aşağıdaki kabullenmeler yapılmıştır [57], [58];

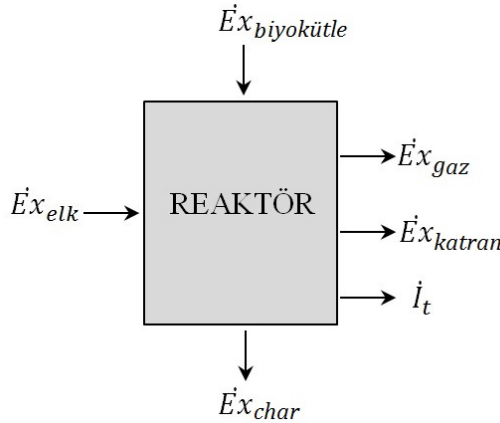
- Gazlaştırma sisteminde kararlı akış vardır,
- Potansiyel, kinetik ve fiziksel ekserjiler ihmal edilmiştir,
- Referans koşulları  $T_0=298,15$  K ve  $P=101,3$  kPa'dır,
- Sentez gaz ideal gaz olarak kabul edilmiştir.

Ekserji denkliği aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir;

$$(\dot{E}x_{biyokutle} + \dot{E}x_{elk})_{giren} = (\dot{E}x_{gaz} + \dot{E}x_{char} + \dot{E}x_{katran} + \dot{I}_t)_{cikan} \quad (3.20)$$

Burada;  $\dot{E}x_{biyokutle}$  (kW) biyokütlenin ekserji akışı,  $\dot{E}x_{elk}$  (kW) hava pompasını çalıştıran elektrik motorunun ekserjisi (Elektrik motorunun gücü),  $\dot{E}x_{gaz}$  (kW) sentez gazın ekserji akışı,  $\dot{E}x_{char}$  (kW) charın ekserji akışı,  $\dot{E}x_{katran}$  (kW) katranın ekserji akışı ve  $\dot{I}_t$  tersinmez olarak kaybolan ekserjidir (Irreversibility).

Gazlaştırma işleminin ekserji denkliği diyagramı Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Gazlaştırma işleminin ekserji denklik diyagramı

Biyokütlenin, char ve katranın ekserji akışları aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır [57];

$$\dot{E}x_{biyokutle} = \beta * \dot{m}_{biyokutle} * LHV_{biyokutle} \quad (3.21)$$

$$\dot{E}x_{char} = \beta * \dot{m}_{char} * LHV_{char} \quad (3.22)$$

$$\dot{E}x_{katran} = \beta * \dot{m}_{katran} * LHV_{katran} \quad (3.23)$$

Yukarıdaki eşitliklerde;  $\dot{E}x_{biyokutle}$  ve  $\dot{E}x_{char}$  (kW) ve  $\dot{E}x_{katran}$  (kW) biyokütlenin, charın ve katranın ekserji akışları,  $\beta$  biyokütlenin elementel bileşimine bağlı olarak hesaplanan korelasyon faktörüdür.

Korelasyon faktörü ( $\beta$ ) biyokütle için aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır [57];

$$\beta = \frac{1,0414 + 0,0177 * (H/C) - 0,3328 * (O/C) * [1 + 0,0537 * (H/C)]}{1 - 0,4021 * (O/C)} \quad (3.24)$$

Burada;  $O$ ,  $H$  ve  $C$  değerleri biyokütlerdeki oksijen, hidrojen ve karbonun molar fraksiyonlarıdır.

Sentez gazın kimyasal ekserjisi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır [59];

$$\dot{E}x_{ch_{gaz}} = \frac{\dot{m}_{gaz}}{M_{gaz}} * \left( \sum_i y_i * ex_{ch_{gaz}} + R_u * T_0 * \sum_i y_i * \ln y_i \right) \quad (3.25)$$

Yukarıdaki eşitlikte;  $\dot{E}x_{ch_{gaz}}$  (kW) sentez gazın kimyasal ekserjisi,  $\dot{m}_{gaz}$  (kg/s) gaz üretim oranı,  $M_{gaz}$  (kg/kmol) sentez gazın molekül ağırlığı,  $ex_{ch_{gaz}}$  (kJ/kmol) sentez gazdaki her bir gaz bileşeninin özgül kimyasal ekserjisi,  $R_u$  (8.314 kJ/kmolK) universal gaz sabiti,  $T_0$  (K) normal koşullardaki sıcaklık (288 K) ve  $y_i$  sentez gazdaki her bir gaz bileşeninin molar fraksiyonudur.

Sentez gazın bileşiminde bulunan gazların özgül kimyasal ekserjileri ( $ex_{ch_g}$ ) termodinamik tablolardan bulunarak kullanılmıştır.

### 3.2.15. Gazlaştırma sisteminin enerji ve ekserji verimliliklerinin hesaplanması

Gazlaştırma sisteminin enerji ve ekserji verimlilikleri aşağıdaki bağıntılarla hesaplanmıştır [36], [38];

$$\eta_{En} = \frac{\dot{Q}_{gaz} + \dot{Q}_{char} + \dot{Q}_{katran}}{\dot{Q}_{biyokutle} + \dot{Q}_{elk}} \quad (3.26)$$



$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{E}x_{gaz} + \dot{E}x_{char} + \dot{E}x_{katran}}{\dot{E}x_{biyokutle} + \dot{E}x_{elk}} \quad (3.27)$$

Tersinmez olarak kaybolan ekserji (irreversibilty) aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$\dot{I}_t = (\dot{E}x_{biyokutle} + \dot{E}x_{elk}) - (\dot{E}x_{gaz} + \dot{E}x_{char} + \dot{E}x_{katran}) \quad (3.28)$$

Burada;  $\dot{I}_t$  (kW) tersinmez olarak kaybolan ekserjidir.

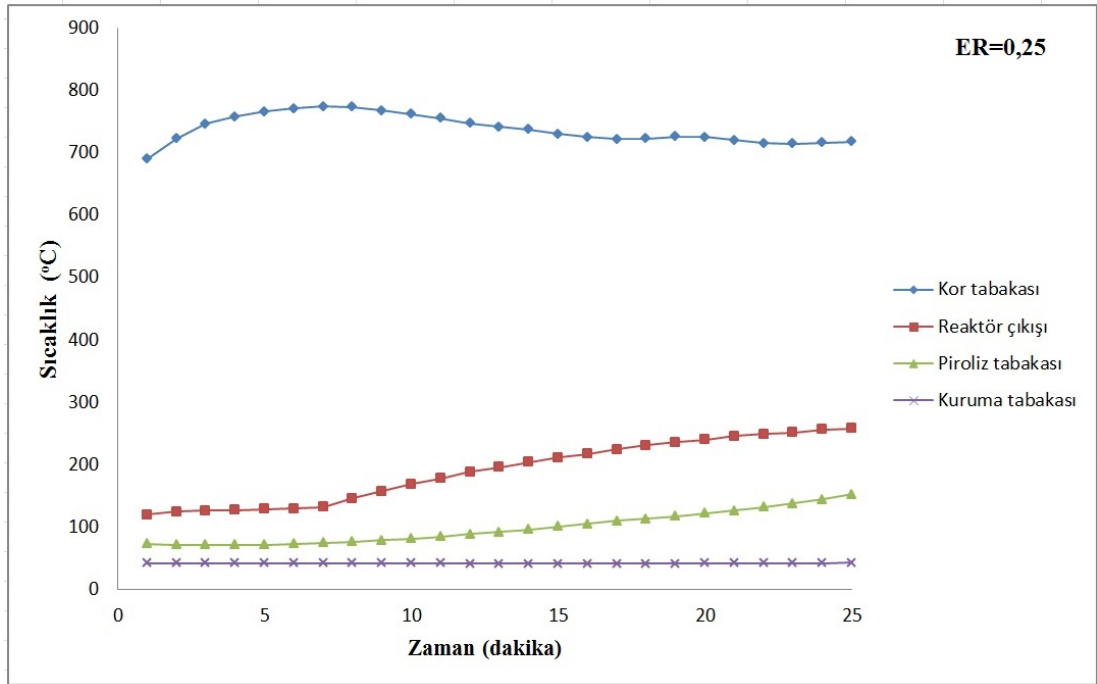
### 3.2.16. Verilerin değerlendirilmesi

Denemeler sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve grafiklerin oluşturulması amacıyla Excel programı kullanılmıştır. Ayrıca, enerji ve ekserji analizleri için yine Excel programında hazırlanan makrolardan yararlanılmıştır.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Gazlaştırma sıcaklıkları

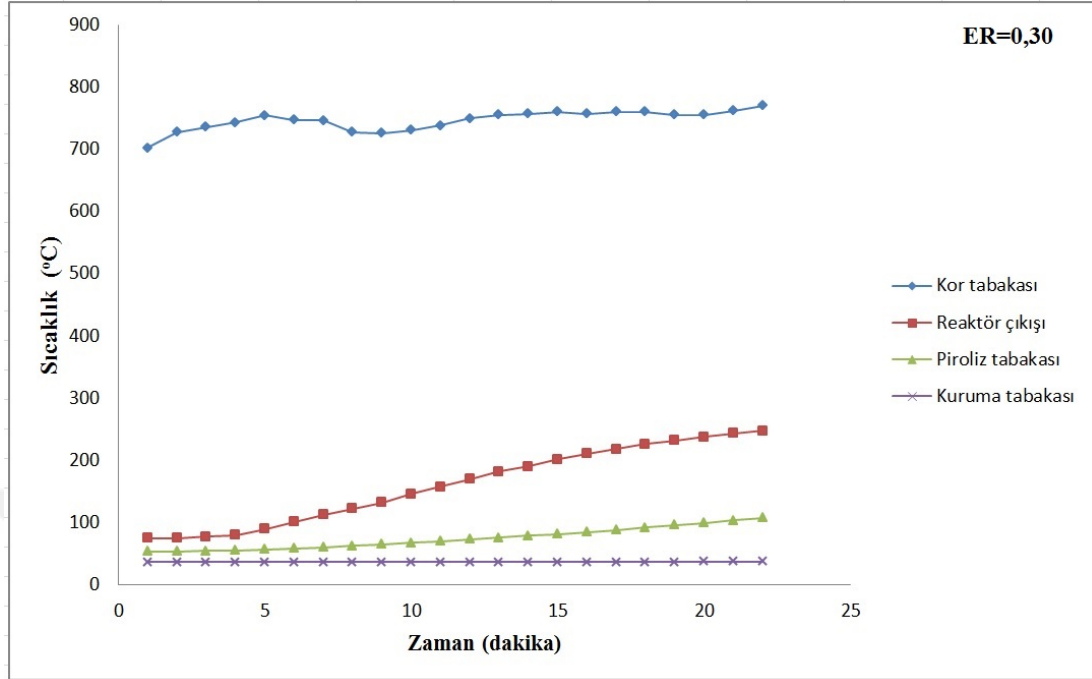
Gürgen peletlerinin ER=0,25 eşdeğerlik oranında gazlaştırılması esnasında kurutma, piroliz, reaktör çıkışı ve kor bölgesindeki sıcaklık değişimleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Başlangıçta 700 °C’nin biraz altında olan kor bölgesi sıcaklığı gazlaştırma rejimi boyunca 700-800 °C arasında değişmiştir. Ortalama kor bölgesi sıcaklığı 737,2 °C civarlarında olmuştur. Reaktör çıkışında sentez gazın sıcaklığı ortalama 190,2 °C, piroliz tabakasındaki ortalama sıcaklık 99,2 °C ve kurutma tabakasındaki ortalama sıcaklık 42,5 °C olmuştur.



Şekil 4.1. Gürgeç peletlerinin ER=0,25 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi

Gürgeç peletlerinin ER=0,30 değerinde gazlaştırılması esnasında kurutma, piroliz, reaktör çıkışı ve kor bölgesindeki sıcaklık değişimleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Kor bölgesi sıcaklığının gazlaştırma rejimi boyunca 700-800 °C arasında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama kor bölgesi sıcaklığı 746,4 °C civarlarında olmuştur. Reaktör

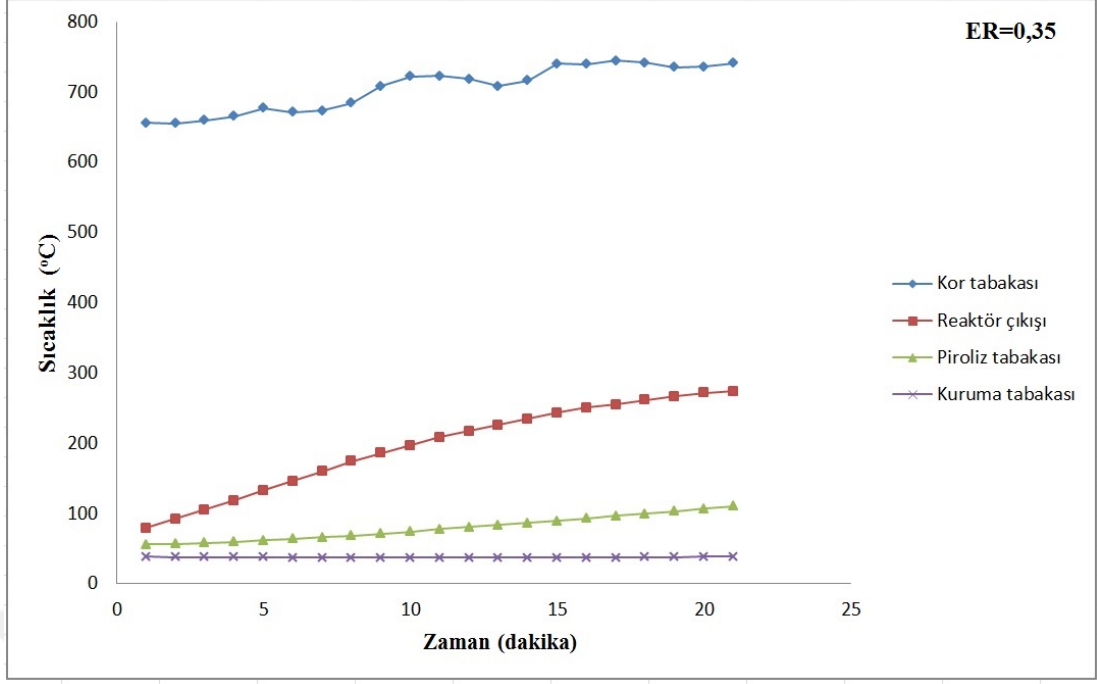
çıkışında sentez gazın sıcaklığı ortalama 160,6 °C, piroliz tabakasındaki ortalama sıcaklık 74,9 °C ve kurutma tabakasındaki ortalama sıcaklık 37,0 °C olmuştur.



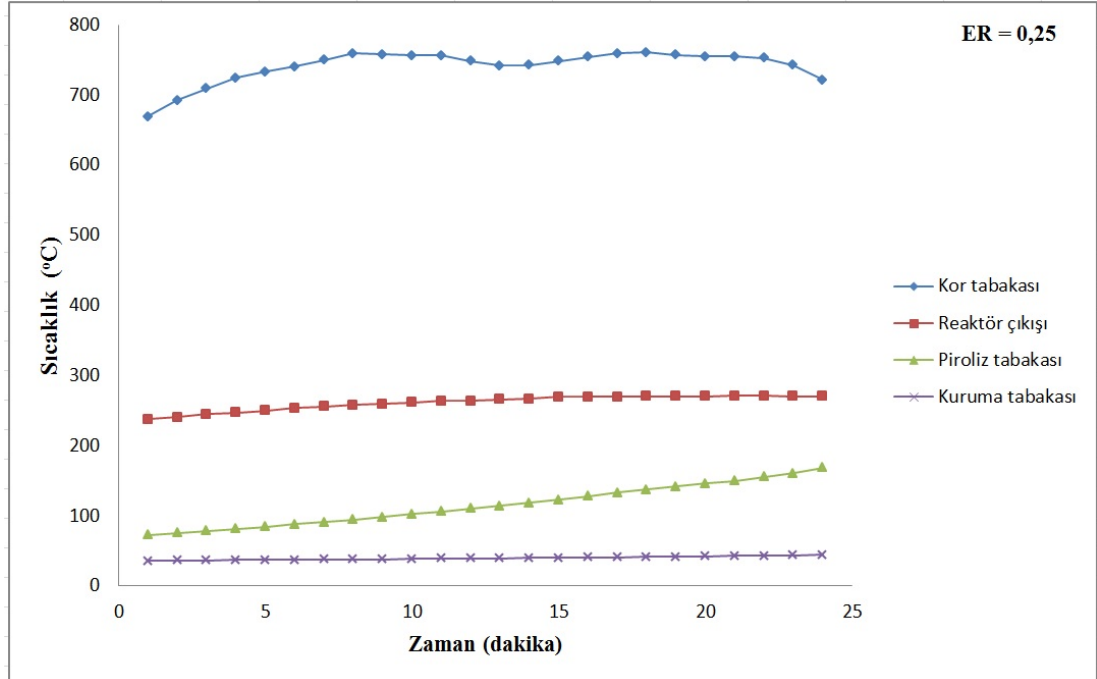
**Şekil 4.2.** Gürgeç peletlerinin ER=0,30 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi

Gürgeç peletlerinin ER=0,35 değerinde gazlaştırılması esnasında kurutma, piroliz, reaktör çıkışı ve kor bölgesindeki sıcaklık değişimleri Şekil 4.3’de verilmiştir. Kor bölgesi sıcaklığının gazlaştırma rejimi boyunca 650-800 °C arasında değişmiştir, ancak değişimin daha çok 650-700 °C arasında seyrettiği görülmüştür. Ortalama kor bölgesi sıcaklığı 705,6 °C civarlarında olmuştur. Reaktör çıkışında sentez gazın sıcaklığı ortalama 195,3 °C, piroliz tabakasındaki ortalama sıcaklık 79,3 °C ve kurutma tabakasındaki ortalama sıcaklık 37,6 °C olmuştur.

Çam peletlerinin ER=0,25 değerinde gazlaştırılması esnasında kurutma, piroliz, reaktör çıkışı ve kor bölgesindeki sıcaklık değişimleri Şekil 4.4’de verilmiştir. Başlangıçta 650 °C’ nin biraz üzerinde olan kor bölgesi sıcaklığı daha sonra gazlaştırma rejimi boyunca 650-800 °C arasında değişmiştir. Ortalama kor bölgesi sıcaklığı 741,2 °C civarlarında olmuştur. Reaktör çıkışında sentez gazın sıcaklığı ortalama 261,3 °C, piroliz tabakasındaki ortalama sıcaklık 115,0 °C ve kurutma tabakasındaki ortalama sıcaklık 39,6 °C olmuştur.



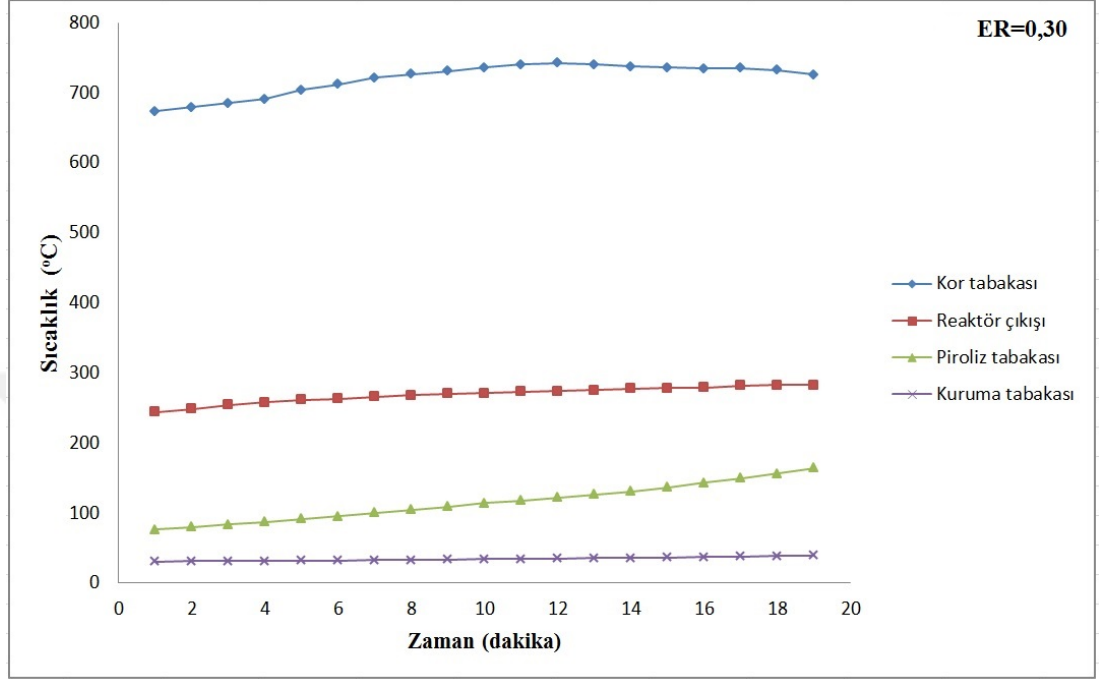
Şekil 4.3. Gürgeen peletlerinin ER=0,35 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi



Şekil 4.4. Çam peletlerinin ER=0,25 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi

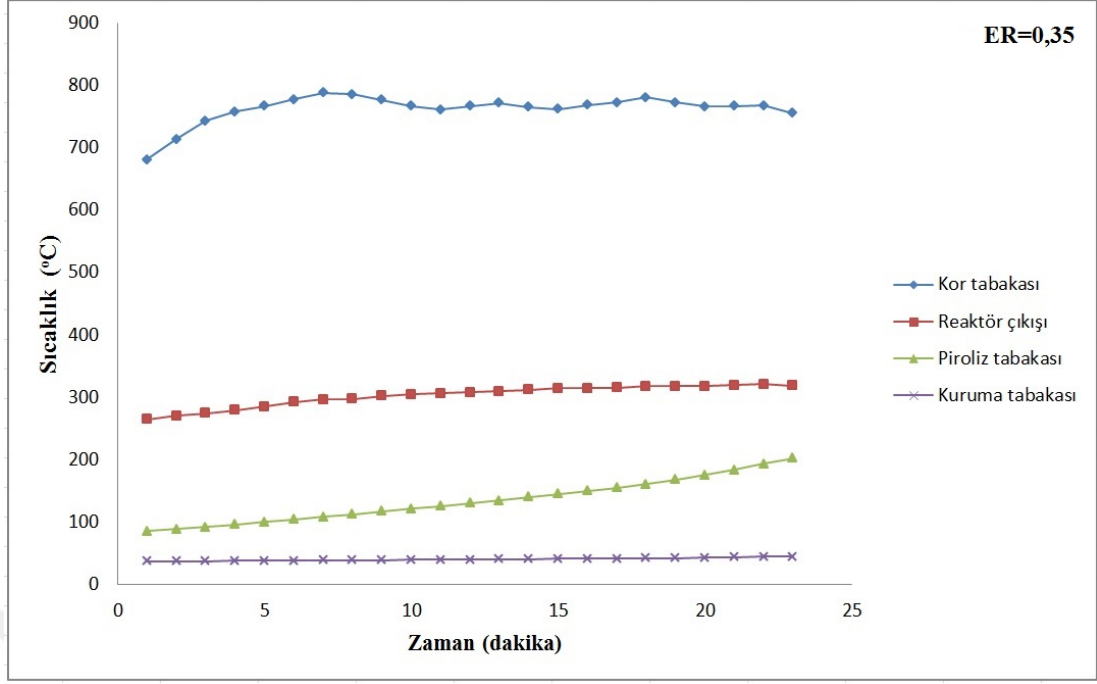
Çam peletlerinin ER=0,30 değerinde gazlaştırılması esnasında kurutma, piroliz, reaktör çıkışı ve kor bölgesindeki sıcaklık değişimleri Şekil 4.5’da verilmiştir.

Kor bölgesi sıcaklığı gazlaştırma rejimi boyunca 700 °C dolaylarında seyretmiştir. Ortalama kor bölgesi sıcaklığı 720,4 °C civarlarında olmuştur. Reaktör çıkışında sentez gazın sıcaklığı ortalama 268,9 °C, piroliz tabakasındaki ortalama sıcaklık 115,3 °C ve kurutma tabakasındaki ortalama sıcaklık 34,3 °C olmuştur.



**Şekil 4.5.** Çam peletlerinin ER=0,30 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi

Çam peletlerinin ER=0,35 gazlaştırılması esnasında kurutma, piroliz, reaktör çıkışı ve kor bölgesindeki sıcaklık değişimleri Şekil 4.6'de verilmiştir. Kor bölgesi sıcaklığı gazlaştırma rejimi boyunca 700-800 °C arasında değişmiştir. Ortalama kor bölgesi sıcaklığı 762,2 °C civarlarında olmuştur. Reaktör çıkışında sentez gazın sıcaklığı ortalama 302,9 °C, piroliz tabakasındaki ortalama sıcaklık 134,8 °C ve kurutma tabakasındaki ortalama sıcaklık 40,8 °C olmuştur. Tüm gazlaştırma denemelerinin ortalamaları dikkate alındığında gürgen gazlaştırmasında kor bölgesinin ortalama sıcaklığı 738,7 °C, çam gazlaştırmasında 730 °C dolayında olmuştur.



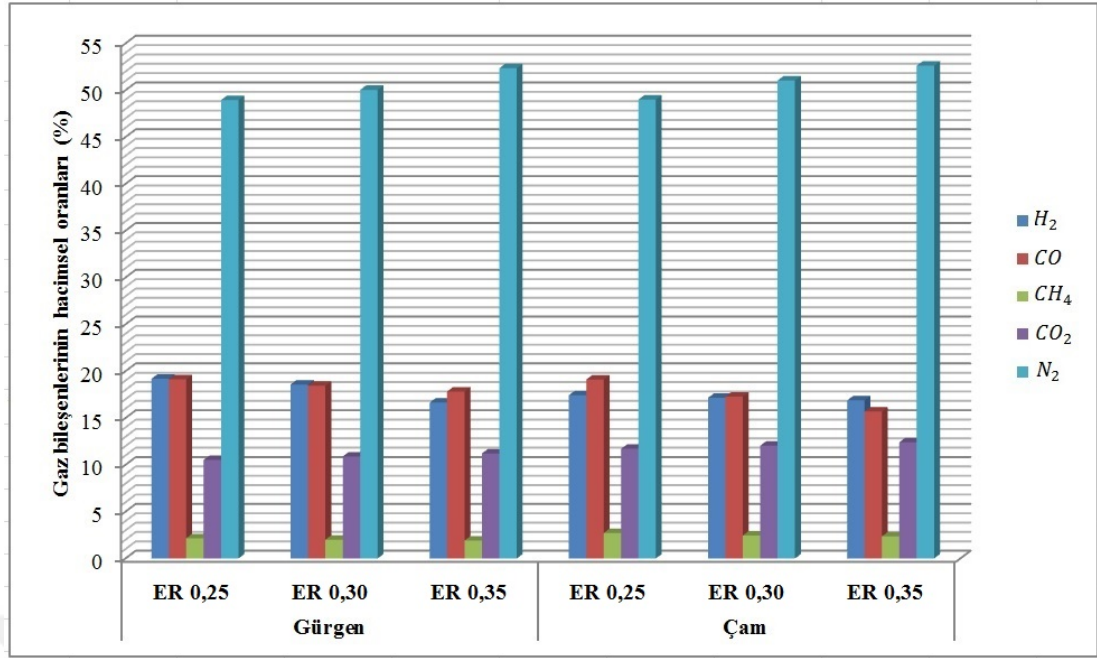
Şekil 4.6. Çam peletlerinin ER=0,35 değerinde gazlaştırmasında farklı tabakalardaki sıcaklıklarının değişimi

#### 4.2. Üretilen sentez gazın bileşenleri

Gürgen ve çam peletlerinin üç farklı ER değerinde gazlaştırılması sonucu elde edilen sentez gazların bileşenleri Çizelge 4.1’de ve grafiksel olarak Şekil 4.7’de verilmiştir. Her iki biyokütlede de ER değerlerinin artmasıyla üretilen sentez gaz içerisinde yanıcı gazlar olarak bilinen  $H_2$ ,  $CO$  ve  $CH_4$  gazlarının oranları azalmıştır. Buna karşılık  $CO_2$  ve  $N_2$  oranlarında artış olmuştur. Çam peletlerinden elde edilen sentez gazlarda tüm ER değerlerinde  $CH_4$  oranı gürgen peletlerine göre daha yüksek olurken,  $H_2$  ve  $CO$  oranları ise gürgen peletlerinde daha yüksek olmuştur.

Çizelge 4.1. Sentez gaz bileşenleri (%V)

Gaz	Gürgen			Çam		
	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35
$H_2$	19,20	18,59	16,66	17,44	17,16	16,89
$CO$	19,14	18,45	17,84	19,11	17,29	15,70
$CH_4$	2,17	2,01	1,92	2,72	2,45	2,36
$CO_2$	10,53	10,90	11,22	11,72	12,05	12,42
$N_2$	48,96	50,05	52,36	49,01	51,05	52,63



Şekil 4.7. Sentez gaz bileşenlerinin hacimsel oranları

### 4.3. Hacimsel gaz üretim oranları

Üretilen sentez gazların bileşimine bağı olarak mol kütleleri yardımıyla, üretilen sentez gazın normal koşullardaki hacimsel üretim oranını belirlemek amacıyla, normal koşullardaki yoğunlukları hesaplanmıştır ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. ER değerlerinin artmasıyla birlikte gaz yoğunluklarının da bir miktar arttığı görülmüştür. Çam peletlerinden elde edilen sentez gazların yoğunlukları (ort. 1,123 kg/Nm<sup>3</sup>) gürgen peletlerine göre (ort. 1,106 kg/Nm<sup>3</sup>) daha fazla olmuştur.

Çizelge 4.2. Sentez gazların mol kütlesi ve yoğunlukları

ER	Gürgeu		Çam	
	M (kg/kmol)	$\rho_{gaz}$ (kg/Nm <sup>3</sup> )	M (kg/kmol)	$\rho_{gaz}$ (kg/Nm <sup>3</sup> )
0,25	24,53	1,091	25,01	1,117
0,30	24,67	1,101	25,17	1,123
0,35	25,23	1,126	25,31	1,130
Ort.	24,81	1,106	25,83	1,123

Sentez gazın normal koşullardaki yoğunlukları dikkate alınarak hesaplanan normal koşullardaki hacimsel gaz üretim oranları Çizelge 4.3’de verilmiştir. ER

değerlerinin artmasıyla birlikte her iki biyokütle ile üretilen sentez gazların hacimsel oranları artış göstermiştir. Hacimsel gaz üretim oranı gürgen peletlerinde daha yüksek olmuştur.

**Çizelge 4.3.** Hacimsel gaz üretim oranları (Nm<sup>3</sup>/h)

Biyokütle	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35	Ortalama
Gürgen	17,10	20,01	24,66	20,59
Çam	16,55	19,33	24,54	20,14

#### 4.4. Biyokütlenin ısı ve özgül ekserji değerleri

Gürgen ve çam peletlerinin alt ve üst ısı değerleri ile özgül ekserji değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir. Değerler her iki biyoküttele de birbirine yakın olmuştur. Yakıtın kalitesini belirleyen  $\beta$  katsayısından dolayı özgül ekserji değerleri daha yüksek bulunmuştur.

**Çizelge 4.4.** Biyokütlelerin ısı ve özgül ekserji değerleri

Biyokütle	$\beta$	LHV (MJ/kg)	HHV (MJ/kg)	Ex (MJ/kg)
Gürgen	1,130	16,54	18,05	18,69
Çam	1,133	16,65	17,93	18,86

#### 4.5. Sentez gazların özgül enerji ve ekserji değerleri

Gürgen ve çam peletlerinden üretilen sentez gazlara ait kütleli ısı ve özgül ekserji değerleri Çizelge 4.5’da, normal koşullardaki hacimsel ısı ve özgül ekserji değerleri Çizelge 4.6’de verilmiştir. Sentez gazların ısı ve özgül ekserji değerleri ER değerlerinin artmasıyla azalmıştır. Her iki biyoküttele de elde edilen sentez gazların özgül ekserji değerleri ısı değerlerinden daha düşük olmuştur. Sentez gazların ısı ve özgül enerji değerlerinin gürgen peletlerinden elde edilen sentez gazlarda biraz daha yüksek olduğu görülmüştür.



**Çizelge 4.5.** Sentez gazların kütleli ısı ve özgül ekserji değerleri (MJ/kg)

ER	Gürgen			Çam		
	LHV	HHV	Ex	LHV	HHV	Ex
0,25	4,83	5,25	4,72	4,72	5,12	4,63
0,30	4,59	5,00	4,49	4,37	4,76	4,29
0,35	4,21	4,57	4,11	4,12	4,49	4,04
Ort.	4,54	4,94	4,44	4,40	4,79	4,32

**Çizelge 4.6.** Sentez gazların hacimsel ısı ve özgül ekserji değerleri (MJ/Nm<sup>3</sup>)

ER	Gürgen			Çam		
	LHV	HHV	Ex	LHV	HHV	Ex
0,25	5,27	5,73	5,14	5,27	5,72	5,17
0,30	5,06	5,50	4,94	4,92	5,37	4,82
0,35	4,74	5,14	4,64	4,65	5,08	4,57
Ort.	5,02	5,46	4,91	4,95	5,38	4,85

#### 4.6. Gazlaştırma işleminde kütleli akış oranları ve dengesi

Her iki pelet örneğine ait farklı ER değerlerinde gazlaştırma sistemindeki kütleli akış oranları Çizelge 4.7’de verilmiştir. ER değerlerinin artması sisteme giren hava miktarlarının artışıyla gerçekleştiğinden kütleli akış oranları da artmıştır. Aynı zamanda artan hava miktarı reaktör içindeki reaksiyonları ve doğrudan yanma olayını arttırdığından biyokütle tüketim oranları da artmıştır. Gazlaştırma işlemlerinde tüm ER değerlerindeki kütleli akış oranları çam ve gürgen peletlerinde çok fazla farklılık göstermemiştir.

#### 4.7. Özgül gaz üretimi

Gürgen ve çam peletlerinin farklı hava hızlarında gazlaştırılması sonucunda elde edilen özgül gaz üretim değerleri Çizelge 4.8’de verilmiştir. Özgül gaz üretimi ER değeriyle birlikte artış göstermiştir. Çam ve gürgen peletlerinden elde edilen sentez gazların özgül gaz üretimleri birbirlerine çok yakın olmuştur.

**Çizelge 4.7.** Gazlaştırma sisteminde kütleli akış oranları ve dengesi

Kütle akışı (kg/h)	Gürgen			Çam		
	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35
$\dot{m}_{hava}$	11,40	14,29	19,03	11,27	14,12	19,03
$\dot{m}_{biyokutle}$	8,05	8,60	9,71	8,00	8,44	9,66
<b>Toplam giren</b>	<b>19,45</b>	<b>22,89</b>	<b>28,74</b>	<b>19,27</b>	<b>22,56</b>	<b>28,69</b>
$\dot{m}_{gaz}$	18,65	22,04	27,78	18,48	21,72	27,33
$\dot{m}_{char}$	0,71	0,76	0,85	0,70	0,74	0,85
$\dot{m}_{katran}$	0,09	0,09	0,11	0,09	0,09	0,11
<b>Toplam çıkan</b>	<b>19,45</b>	<b>22,89</b>	<b>28,74</b>	<b>19,27</b>	<b>22,56</b>	<b>28,69</b>

**Çizelge 4.8.** Özgül gaz üretimi (Nm<sup>3</sup>-gaz/kg-biyokütle)

Biyokütle	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35	Ortalama
Gürgen	2,12	2,33	2,54	2,33
Çam	2,07	2,29	2,54	2,30

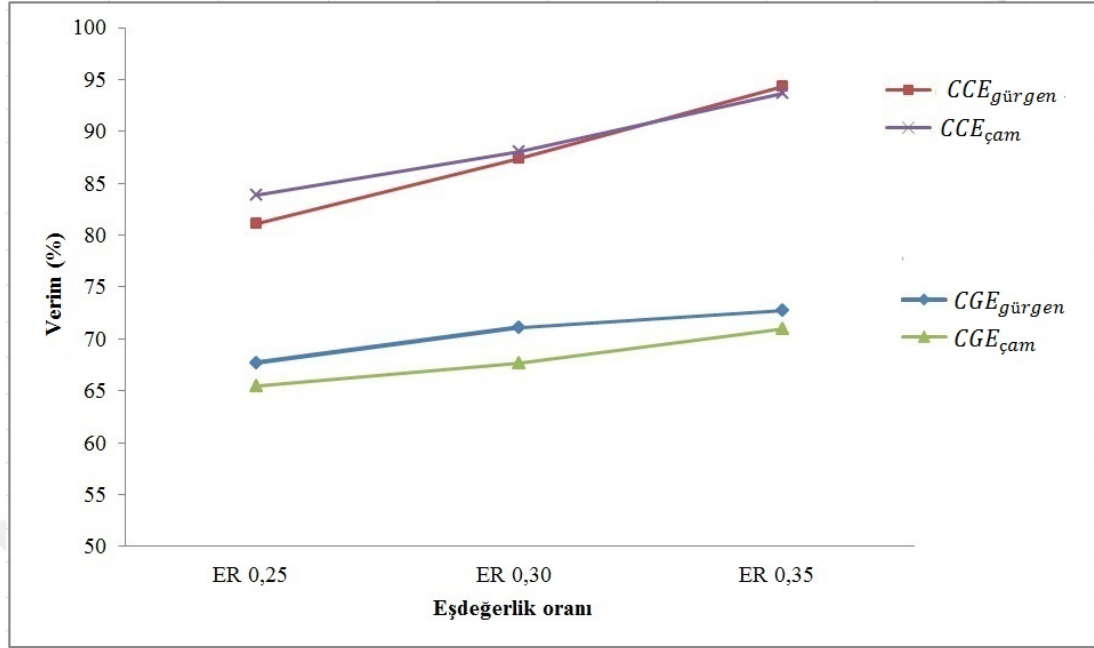
#### 4.8. Soğuk gaz ve karbon dönüşüm verimleri

Gürgen ve çam peletlerinin gazlaştırılmasında elde edilen soğuk gaz (CGE) ve karbon dönüşüm (CCE) verimleri Çizelge 4.9’da verilmiştir. ER değerinin artmasıyla üretilen gaz miktarları da artış gösterdiğinden her iki verim değerleri de artmıştır. Karbon dönüşüm verimi çam peletlerinde elde edilen sentez gazlarda daha yüksek olurken, soğuk gaz verimi gürgen peletlerinde daha yüksek olmuştur.

**Çizelge 4.9.** Gazlaştırma işleminde soğuk gaz ve karbon dönüşüm verimleri (%)

ER	Gürgen		Çam	
	CGE	CCE	CGE	CCE
0,25	58,47	81,10	56,70	83,89
0,30	61,48	87,44	58,60	88,09
0,35	62,96	94,28	61,58	93,67
Ort.	60,97	87,61	58,96	88,55

Gürgen ve çam peletlerinden elde edilen sentez gazlarda soğuk gaz ve karbon dönüşüm verimlerinin ER değerlerine bağlı olarak değişimleri Şekil 4.8’de görülmektedir.



**Şekil 4.8.** Soğuk gaz (CGE) ve karbon dönüşüm (CCE) verimlerinin ER değerleriyle değişimi

#### 4.9. Gazlaştırma işlemlerinde enerji akışı ve dengesi

Gazlaştırma sisteminin enerji akışı ve dengesi Çizelge 4.10'da verilmiştir. ER değerleriyle birlikte sistemdeki enerji akışı da artmıştır. Gürgen ve çam peletlerinin gazlaştırılmasında enerji akışları birbirine yakın olmuştur. ER=0,35 değerinde gürgen peletlerinin gazlaştırılmasında 49,99 kW ve çam peletlerinde 45,03 kW ile maksimum enerji akışı gerçekleşmiştir. Enerji kayıpları ER değeri arttıkça azalmıştır.

#### 4.10. Gazlaştırma işlemlerinde ekserji akışı ve dengesi

Gürgen ve çam peletlerinin farklı hava besleme oranlarında ekserji akışı ve dengesi Çizelge 4.11'de verilmiştir. Her iki pelet örneğinde de ekserji akışları ER değerleriyle birlikte artmıştır. Ancak, kayıp ekserji değeri (irreversibility) ER değerleriyle paralellik göstermemiştir. Maksimum tersinmez ekserji kaybı gürgen peletlerinin gazlaştırılmasında 11,45 kW ile ER=0,35, çam peletlerinde 12,28 kW ile

**Çizelge 4.10.** Gazlaştırma sisteminde enerji akışı ve dengesi

Enerji akışı (kW)	Gürgen			Çam		
	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35
$\dot{Q}_{biyokutle}$	36,97	39,52	44,62	37,01	39,02	44,66
$\dot{Q}_{elk}$	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
<b>Toplam giren</b>	<b>37,34</b>	<b>39,89</b>	<b>44,99</b>	<b>37,38</b>	<b>39,39</b>	<b>45,03</b>
$\dot{Q}_{gaz}$	25,03	28,12	32,47	24,23	26,39	31,72
$\dot{Q}_{char}$	5,51	5,89	6,65	5,48	5,77	6,61
$\dot{Q}_{katran}$	0,57	0,60	0,68	0,56	0,59	0,68
$\dot{Q}_{kayıp}$	6,24	5,28	5,19	7,11	6,63	6,03
<b>Toplam çıkan</b>	<b>37,34</b>	<b>39,89</b>	<b>44,99</b>	<b>37,38</b>	<b>39,39</b>	<b>45,03</b>

ER=0,25 değerlerinde gerçekleşmiştir. Tüm ER değerlerinde gazlaştırma sistemindeki ekserji akışı enerji akışlarından daha fazla olmuştur.

**Çizelge 4.11.** Gazlaştırma sisteminde ekserji akışı ve dengesi

Ekserji akışı (kW)	Gürgen			Çam		
	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35
$\dot{E}x_{biyokutle}$	41,78	44,67	50,43	41,93	44,19	50,59
$\dot{E}x_{elk}$	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
<b>Toplam giren</b>	<b>42,15</b>	<b>45,04</b>	<b>50,08</b>	<b>42,30</b>	<b>44,56</b>	<b>50,96</b>
$\dot{E}x_{gaz}$	24,43	27,46	31,75	23,75	25,89	31,15
$\dot{E}x_{char}$	5,74	6,13	6,92	5,70	6,01	6,88
$\dot{E}x_{katran}$	0,57	0,60	0,68	0,56	0,59	0,68
$\dot{I}_t$	11,42	10,84	11,45	12,28	12,07	12,25
<b>Toplam çıkan</b>	<b>42,15</b>	<b>45,04</b>	<b>50,08</b>	<b>42,30</b>	<b>44,56</b>	<b>50,96</b>

#### 4.11. Gazlaştırma sisteminin enerji ve ekserji verimlilikleri

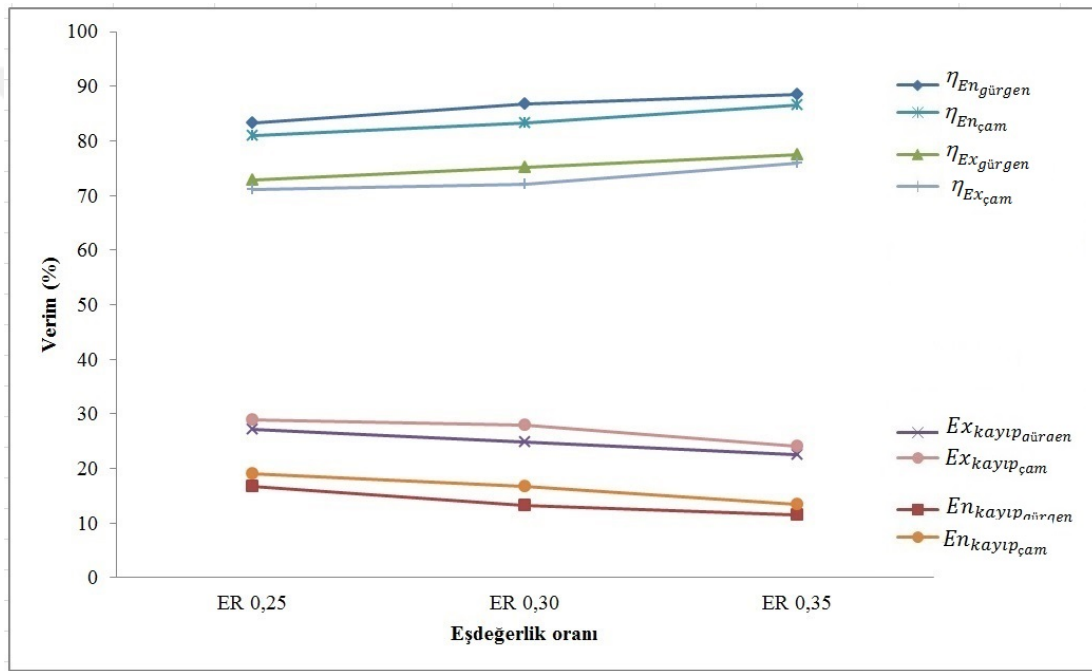
Biyokütelerin gazlaştırılmasının işleminde gazlaştırma sisteminin enerji, ekserji verimlilikleri ile kayıp oranları Çizelge 4.12’de verilmiştir. ER değerlerinin artmasıyla enerji ve ekserji verimlilikleri de artmıştır. Ancak, tüm ER değerlerinde gazlaştırma sisteminin enerji verimlilikleri ekserji verimliliklerinden daha yüksek olmuştur.

Enerji ve ekserji verimleri ile kayıp oranlarının ER değerlerine bağlı olarak değişimleri Şekil 4.9’da verilmiştir. Görüldüğü gibi enerji ve ekserji verimleri ER değeriyle birlikte artarken, kayıp oranları azalmıştır. Ayrıca, ekserji kayıp oranlarının

**Çizelge 4.12.** Gazlaştırma sisteminin enerji ve ekserji verimliliği

Verim (%)	Gürgen			Çam		
	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35	ER 0,25	ER 0,30	ER 0,35
$\eta_{En}$	83,30	86,80	88,50	81,00	83,20	86,60
$\eta_{En_{kayıp}}$	16,70	13,20	11,50	19,00	16,80	13,40
$\eta_{Ex}$	72,90	75,09	77,50	71,00	72,09	76,00
$\eta_{Ex_{kayıp}}$	27,10	24,91	22,50	29,00	27,91	24,00

(irreversibility) enerji kayıp oranlarından daha fazla olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.9.** Gazlaştırma sisteminin enerji ve ekserji verimliliklerinin ER değerleriyle değişimi

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Gürgen ve çam peletlerinin farklı hava eşdeğerlik oranlarında (ER=0,25, ER=0,30 ve ER=0,35) gazlaştırıldığı bu çalışmada, kor bölgesinin sıcaklığı 650 °C ile 800 °C arasında değişmiştir. Awais ve ark. [48], maksimum yanabilir gaz konsantrasyonunun 650 °C ile 980 °C kor bölgesi sıcaklık aralıklarında sağlandığını belirtmişlerdir. Aydın ve ark. [60] çam kozalağı gazlaştırma için deneysel çalışmalar sırasında çeşitli hava eşdeğer oranları (0.14-0.37) ve atmosferik basınç altında 701-1046 °C sıcaklık aralığında hava ile gazlaştırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Tuğ [50] yaptığı tez çalışmasında kor bölgesindeki sıcaklığın ER parametresine bağlı olarak 612 °C ile 857 °C, Diken ve Kayışoğlu [2] 800 °C ile 900 °C arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen kor bölgesi sıcaklıklarının önceki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Gürgen ve çam peletlerinin gazlaştırılmasında üretilen sentez gazların bileşimleri ER değerlerinden önemli ölçüde etkilenmiştir (Çizelge 4.1 ve Şekil 4.7). Her iki pelet örneğinde de sentez gazlardaki  $H_2$ ,  $CO$  ve  $CH_4$  gibi yanıcı gaz bileşenlerinin hacimsel oranları ER değerleriyle birlikte azalırken,  $CO_2$  ve  $N_2$  gazlarının hacimsel oranları artmıştır. Pandey ve ark. [61] biyokütlenin gazlaştırılmasında ER değerlerinin artmasıyla reaktöre giren hava miktarının arttığını, bu nedenle gazlaştırma reaksiyonlarında doğrudan yanma olayının artarak sentez gazdaki  $CO_2$  oranını arttırdığını ve  $CO$  oranını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, yüksek ER değerlerinde  $H_2$  ve  $CH_4$  gazlarının oranlarının azaldığını, yine artan hava miktarı nedeniyle  $N_2$  oranlarının arttığını da belirtmişlerdir. Biyokütlenin gazlaştırılması ile ilgili daha önce yapılan birçok çalışmada ER değerlerinin artmasıyla sentez gazdaki  $H_2$ ,  $CO$  ve  $CH_4$  gazlarının hacimsel oranlarının azaldığı,  $CO_2$  ve  $N_2$  gazlarının hacimsel oranlarının arttığı belirtilmiştir [32], [62], [63]. Beohar ve ark. [64] 3,7 m/s ile 6,4 m/s hava hızları aralıklarında yaptıkları çalışmalarında hava hızının sentez gaz bileşimini önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Hava hızındaki artışla birlikte yakıtın oksidasyonunun arttığını ve karbondan daha yüksek  $CO_2$  üretimini ve  $CO$ 'nun  $CO_2$ 'ye daha fazla dönüşüm gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Biyokütlenin gazlaştırılmasında gazın ısı değerinin belirlenmesinde önemli rol oynayan  $CH_4$

oranı aşağı akışlı gazlaştırıcılarda %2 ile %5 arasında değişmektedir [16]. Gürgen peletlerinin gazlaştırılmasında  $ER=0,35$  değerinde  $CH_4$  gazının hacimsel oranı %1,92 olmasına rağmen, bu çalışmada üretilen sentez gazlardaki  $CH_4$  oranının belirtilen sınırlar içinde kaldığını söylemek mümkündür. Sentez gazdaki  $CO$  oranları gürgen peletlerinde daha yüksek,  $CH_4$  oranları daha düşük olmuştur.

Gürgen ve am peletlerinin ısıl ve özgül ekserji değerleri arasındaki fark yok denecek kadar az bulunmuştur (izelge 4.4). Dhaundiya ve Atsu [65] sert odunsu yapıya sahip akasya ağacı peletlerinin gazlaştırılması ile ilgili olarak yaptıkları çalışmada, biyokütlenin alt ısıl değerinin 18,70 MJ/kg, st ısıl değerinin 19,97 MJ/kg olduğunu belirtmişlerdir. Ptasinski ve ark. [66] saman, işlenmiş ağaç, işlenmemiş ağaç ve çim peletlerinin enerji ve ekserji değerlerini saptamışlardır. Araştırıcılar, alt ısıl,  $\beta$  ve özgül ekserji değerlerinin sırasıyla saman peletlerinde 14,62 MJ/kg, 1,128 ve 16,51 MJ/kg, işlenmiş ağaç peletlerinde 15,29 MJ/kg, 1,119 ve 17,13 MJ/kg, işlenmemiş ağaç peletlerinde 14,82 MJ/kg, 1,122 ve 16,63 MJ/kg, çim peletlerinde 13,10 MJ/kg, 1,125 ve 14,76 MJ/kg olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada gazlaştırma amacıyla kullanılan am ve gürgen peletlerinin enerji ve özgül ekserji değerlerinin odunsu biyokütlenin değerlerine yakın olduğunu söylemek mümkündür.

Her iki biyokütlenin gazlaştırılmasından da elde edilen sentez gazların enerji ve özgül ekserjileri  $ER$  değerlerinin artmasıyla azalmıştır (izelge 4.5).  $ER$  değerlerinin artmasıyla sisteme giren hava miktarının artması reaktördeki doğrudan yanma olayını arttırmaktadır. Bu durum gazlaştırma reaksiyonlarındaki enerjinin büyük kısmının ısı enerjisi olarak kaybolmasına, gazdaki  $CO_2$  ve  $N_2$  oranlarının artmasına ve sentez gazın ısıl ve özgül ekserji değerinin düşmesine neden olmaktadır [61]. Elder ve Groom [27] am ve talaş peletlerini gazlaştırdıkları çalışmalarında, gazlaştırma işleminde artan hava miktarına paralel olarak elde edilen sentez gazın ısıl değerinin azaldığını belirtmişlerdir. Ismail ve Abd El-Salam [67] odun peletinin gazlaştırılmasında  $ER$  değerlerine bağlı olarak alt ısıl değerleri 5,10 MJ/Nm<sup>3</sup> ve 7,06 MJ/Nm<sup>3</sup> aralığında bulmuşlardır. Okaliptus dallarının gazlaştırılmasında alt ısıl değer 4,87 MJ/Nm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır [34]. Demirtaş [68] palmiye budama atıklarının gazlaştırılmasında ortalama alt ve st ısıl değerlerin sırasıyla 3,92 MJ/Nm<sup>3</sup> ve 4,28 MJ/Nm<sup>3</sup> olduğunu belirtmiştir. Diken ve Kayışoğlu [2] im peletlerinin gazlaştırılmasında ortalama alt ısıl

değerin  $3,88 \text{ MJ/Nm}^3$ , üst ısıl değer  $4,22 \text{ MJ/Nm}^3$  olduğunu belirtmişlerdir. Aktaş ve ark. [35] çeltik peletlerinin gazlaştırılmasında sentez gazın alt ısıl değerini  $1,94 \text{ MJ/Nm}^3$  olarak hesaplamışlar ve bu değer diğer biyokütle kaynaklarına göre oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir. McKendry [69] biyokütlenin gazlaştırılmasında oksidant olarak hava kullanılması durumunda elde edilen sentez gazın ısıl değerinin  $4-6 \text{ MJ/Nm}^3$  arasında değiştiğini belirtmiştir. Bu çalışmada da elde edilen sentez gazların ısıl değerleri bu sınırlar arasında olmuştur (Çizelge 4.6). Ayrıca, gürgen peletlerinden elde edilen sentez gazların özgül enerji ve ekserji değerleri biraz daha yüksek bulunmuştur.

Gazlaştırma esnasında hava besleme oranına paralel olarak artan ER değerleriyle biyokütle tüketim oranlarının her iki pelet örneğinde de arttığı saptanmıştır (Çizelge 4.7). Tinaut ve ark. [70] tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, araştırmacılar gazlaştırma işleminde biyokütlenin boyutlarının da önemli olduğunu ve biyokütle boyutları arttıkça yakıt tüketim oranının düştüğünü belirtmişlerdir. Hava besleme, hızı dolayısıyla ER değerleri arttıkça gaz üretim oranlarının da arttığı görülmüştür. Ancak, iki pelet örneği arasındaki fark önemli olmamıştır. Gaz üretim oranı reaktör boyutlarına ve uygulanan yöntemle bağlı olarak değişebilmektedir. Demirtaş [68] palmye gazlaştırmasında  $ER=0,44$  ve  $ER=0,53$  eşdeğerlik oranlarında gaz üretim oranlarının sırasıyla  $9,57 \text{ Nm}^3/\text{h}$  ve  $12,09 \text{ Nm}^3/\text{h}$  olduğunu belirtmiştir. Kumar ve Randa [71] yaptıkları çalışmada, gaz üretim oranının  $12,62 \text{ Nm}^3/\text{h}$  dolayında olduğunu belirtmiştir.

Gürgen ve çam peletlerinin özgül gaz üretimleri de ER değerinin artmasıyla birlikte artmıştır (Çizelge 4.8). . Ismail ve Abd El-Salam [67] yaptıkları çalışmada odun peletlerini gazlaştırmışlardır. ER değerlerinin  $0,2$ 'den  $0,35$ 'e artışıyla özgül gaz üretiminin  $1,59 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 'dan  $2,1 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 'a çıktığını belirtmişlerdir. Gunarathne ve ark. [72] kauçuk ağaçlarının odun parçacıklarını aşağı akışlı bir gazlaştırıcıda gazlaştırmışlar ve özgül gaz üretim oranını  $2,84 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  ile  $2,91 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  arasında bulmuşlardır. Demirtaş [68] yaptığı çalışmada  $ER=0,45$  ve  $ER=0,55$  eşdeğerlik oranlarında palmye budama atıklarında özgül gaz üretiminin sırasıyla  $2,46 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  ve  $2,83 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  olduğunu belirtmiştir. Diken [73] çim peletinin gazlaştırılmasında özgül gaz üretim oranını  $1,57 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  ile  $1,96 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  arasında bulmuştur. Bu çalışmada



elde edilen ortalama özgül gaz üretim değerleri gürgen peletleri için  $2,33 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ , çam peletleri için  $2,30 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler biyokütlenin gazlaştırılması ile ilgili yapılan önceki çalışmalarda elde edilen değerler ile uyum göstermektedir.

Her iki biyoküttelede de soğuk gaz verimleri ER değeri ile birlikte artış göstermiştir. Gürgen peletlerinden elde edilen sentez gazların soğuk gaz verimleri daha yüksek olmuştur (Çizelge 4.9 ve Şekil 4.8). Chishty ve ark. [74] biyokütle gazlaştırma ile ilgili yaptıkları araştırmada soğuk gaz verimini %65 ile %75 arasında bulmuşlardır. Nobre ve ark. [53] farklı biyokütleleri gazlaştırdıkları çalışmada soğuk gaz veriminin %43,3 ile %76,7 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Aydın ve ark. [60] yaptıkları çalışmada çam kozalağı gazlaştırmasında soğuk gaz veriminin  $ER=0,28$  değerinde %78,0 olduğunu belirtmişlerdir. Kumar ve Randa [71] çam iğnesi gazlaştırılması çalışmasında eşdeğerlik 0,25 eşdeğerlik oranında soğuk gaz verimini %65 olarak hesaplamışlardır. Aktaş ve ark. [35] aşağı akışlı gazlaştırıcıda çeltik saplarının gazlaştırılmasında soğuk gaz veriminin %55,11 olduğunu belirtmişlerdir. Gazlaştırma işleminde soğuk gaz verimi biyokütlenin cinsine ve işlem yöntemine göre değişmekle birlikte, genel olarak %50 ile %80 arasında değişmektedir. Bu araştırmada elde edilen soğuk gaz verimlilikleri önceki çalışmalarda elde edilen sınır değerler arasında, hatta yüksek olan değerlere daha yakın olmuştur.

Karbon dönüşüm verimleri de ER değerleriyle birlikte artış göstermiştir (Çizelge 4.9 ve Şekil 4.8). Bu duruma ER değerleriyle birlikte artan hava miktarı neden olmuştur. Hava miktarı arttıkça doğrudan yanma oranı, dolayısıyla gaza karışan  $CO_2$  oranı da artmaktadır [62]. Ahmad ve ark. [75] odun talaşını gazlaştırdıkları araştırmada ortalama karbon dönüşüm verimini %89,6 olarak bulmuşlardır. Araştırmacılar ayrıca, en yüksek karbon dönüşüm veriminin %92,6 ile  $ER=32$  değerinde elde edildiğini, ER değeri düştükçe gazlaştırma reaksiyonuna giren oksijen miktarı azaldığından karbon dönüşüm veriminin azaldığını belirtmişlerdir. Kramb ve ark [76] akışkan yataklı gazlaştırıcıda  $780 \text{ }^\circ\text{C}$  ve  $840 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de çam talaşının gazlaştırma işleminde karbon dönüşüm oranlarını sırasıyla %95,9 ve %97,8 olarak hesaplamışlardır. Atnaw ve ark. [77] aşağı akışlı gazlaştırıcıda palmye yapraklarını gazlaştırmada  $ER=0,37$ 'lik eşdeğerlik oranında %93,0 karbon dönüşüm

oranı hesaplamışlardır. Bu araştırmada en yüksek karbon dönüşüm verimi %94,28 değeri ile gręen peletlerinin gazlaştırılmasında elde edilmiştir.

Her iki pelet örneğinde de gazlaştırma sistemindeki enerji ve ekserji akışları ER değerleriyle birlikte artmıştır (izelge 4.10 ve izelge 4.11). Toplam enerji akışı gręen peletlerinin gazlaştırılmasında 37,34 kW'dan 44,99 kW'a, am peletlerinde 37,38 kW'dan 45,03 kW'a yükselmiştir. Ekserji akışı ise gręen peletlerinde 42,15 kW'dan 50,80 kW'a, am peletlerinde 42,30 kW'dan 50,96 kW'a çıkmıştır. Ekserji akışı her iki pelet örneğinde de enerji akışından daha yüksek olmuştur.

Gazlaştırma işlemlerinde tüm ER değerlerinde ekserji verimleri enerji verimlerinden daha düşük olmuştur (izelge 4.12 ve Şekil 4.9). Biyokütlenin gazlaştırılması işleminde kimyasal reaksiyonlar ve oksidasyon nedeniyle sistemin ekserji verimleri enerji verimlerinden düşük olmaktadır [78]. Elder ve Groom [27] kereste ve am peletlerini gazlaştırdıkları araştırmada, 40 m<sup>3</sup>/h to 70 m<sup>3</sup>/h hava akış oranları aralığında enerji verimliliğinin sırasıyla 68%-76% ve 70%-72% arasında değiştiğini, hava akış oranı ile birlikte enerji verimlerinin arttığını belirtmişlerdir. Zhang ve ark. [79] ER=0,25 ve ER=0,35 aralığında odun talaşı, am talaşı ve eltik kavuzunu gazlaştırmışlar, ER değeri ile birlikte enerji ve ekserji verimlerinin arttığını belirtmişlerdir. Xiang ve ark. [80] biyokütlenin gazlaştırılmasında artan ER değeriyle birlikte sentez gazın ısıl değerinin düşmesine rağmen, üretilen gaz miktarı arttığı için sistemin enerji ve ekserji verimliliklerinin yükseldiğini belirtmişlerdir. Rovas ve Zabaniotou [81], zeytin çekirdeği, şeftali çekirdeği ve üzüm atıkları için akışkan yataklı gazlaştırıcı ekserji analizini yapmışlardır. Zeytin, şeftali ve üzüm atıklarının gazlaştırılmasında ekserji verimliliğini sırasıyla %74.65, %68.75 ve %61.35 olarak hesaplanmışlardır. Manatura ve ark. [36], eltik kabuğunu aşağı akışlı gazlaştırıcıda gazlaştırdıkları çalışmalarında, ortalama enerji verimliliğinin %68,0, ekserji verimliliğinin %46,0 olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca torefaksiyon işlemi görmüş eltik kabuğu peletlerinin enerji ve ekserji verimlerinin işlem görmemiş peletlerden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Venugopal ve ark. [43] yaptıkları çalışmada enerji verimliliği %25,19-70,71 aralığında ve ekserji verimliliğini %23,11-62,24 aralığında bulmuşlardır. Araştırmacılar, ekserji verimliliklerinin enerji verimliliğinden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Dhaundiya ve Atsu [65] farklı

piroliz sıcaklıklarında gazlaşmanın ekserji analizlerini yapmışlardır. Araştırmacılar, odun talaşının pirolizinde elde edilen gazın 600 °C sıcaklıkta kimyasal ortalama ekserji verimliliğinin %75,8, 400 °C sıcaklıkta %65,0 olduğunu belirtmişlerdir. Singh ve Sekhar [82] yaptıkları çalışmada, kauçuk tohum kabukları ve hindistan cevizi kabuklarının çeşitli bileşimlerle karıştırılmış biyokütle gazlaştırmasında eşdeğerlik oranı 0,20 ile 0,30 arasında tutularak performans parametrelerinin maksimum değerleri elde edildiğinin sonucuna varmışlardır. Bu çalışmada ortalama enerji ve ekserji verimleri sırasıyla gürgen peletlerinin gazlaştırılmasında %86,2 ve %75,2, çam peletlerinde %83,6 ve %73,03 olmuştur. Artan ER miktarlarıyla üretilen gaz miktarları da arttığında enerji ve ekserji kayıp oranları azalma eğilimi göstermiştir (Şekil 4.9).

Sonuç olarak çam ve gürgen peletlerinin farklı hava besleme oranlarında gazlaştırıldığı bu çalışmada elde edilen performans değerlerinin daha önce odunsu biyokütle gazlaştırmalarında elde edilen değerlerle uyum gösterdiğini, hatta ısı değer ve gazlaştırma sisteminin verimliliğinin daha önceki çalışmalarda elde edilen değerlerin üst sınırında olduğunu söylemek mümkündür. Gazlaştırma işleminde hava besleme oranı ve buna bağlı olarak değişen ER değerleri gazlaştırma performansı etkileyen önemli bir parametre olmuştur. Araştırma sonucuna göre gürgen ve çam peletlerinin ER=35 hava eşdeğerlik oranında gazlaştırılmasında en yüksek performans değerlerinin elde edildiğini söylemek mümkündür. Araştırmadan elde edilen en önemli sonuçlardan birisi de gürgen ve çam peletlerinin gazlaştırılması sonucu diğer biyokütle kaynaklarına kıyasla yüksek olarak nitelendirilebilecek sınıra yakın enerji değerine sahip sentez gaz elde edilmesi olmuştur. Ülkemizde özellikle orman alanlarının yoğun olduğu bölgelerde gürgen ve çam ağaçlarının budama atıklarının doğrudan yakılması yerine, gazlaştırılarak elde edilen sentez gazın çevrim ünitelerinde (CHP, ORC vb.) kullanılıp elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülmesi, ülke ekonomisine katkı sağlayacağı gibi, aynı zamanda CO<sub>2</sub> emisyonlarının azalmasına da katkı sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] BP, “BP Statistical Review of World Energy,” Tech. Rep., 2019, p. 61.
- [2] B. Diken and B. Kayışoğlu, “A research on the determination of the gasification performance of grass pellets,” *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, vol. 17, no. 1, pp. 24–36, 2020.
- [3] U. Desideri and F. Fantozzi, “Biomass combustion and chemical looping for carbon capture and storage,” in *Technologies for converting biomass to useful energy*, E. Dahlquist, Ed., Taylor&Franchis Group, 2013, pp. 129–173.
- [4] H. Hartmann and V. Lenz, “Biomass Energy Heat Provision in Modern Small-Scale Systems,” in *Energy from Organic Materials (Biomass)*, M. Kaltschmitt, Ed., 2nd ed., Springer, 2019, pp. 532–586.
- [5] M. Kassim, M. Syakir, N. Aprila, and R. Dungani, “Irradiation Pretreatment of Tropical Biomass and Biofiber for Biofuel Production,” in *Radiation effects in materials*, W.A. Monterio, Ed., First, 2016, ch. 13, pp. 328–356.
- [6] D. Woolf, J. E. Amonette, F. A. Street-Perrott, J. Lehmann, and S. Joseph, “Sustainable biochar to mitigate global climate change,” *Nature Communications*, vol. 1, no. 5, 2010.
- [7] T. Lestander, “Chemical composition of biomass,” in *Biomass as an energy source*, E. Dahlquist, Ed., 3rd ed., London: CRC Press, 2012, ch. 2, pp. 35–56.
- [8] B. C. Saha, “Hemicellulose bioconversion,” *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 30, no. 5, pp. 279–291, 2003.
- [9] K. Ratanakhanokchai, R. Waeonukul, P. Pason, C. Tachaapaikoon, K. Lay, K. Sakka, A. Kosugi, and Y. Mori, “Paenibacillus curdlanolyticus Strain B-6 Multienzyme Complex: A Novel System for Biomass Utilization,” in *Biomass Now - Cultivation and Utilization*, vol. 394, 2013, pp. 369–394.
- [10] I. Kögel-Knabber, “The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter,” *Soil Biology & Biochemistry*, vol. 34, pp. 139–162, 2002.
- [11] Y.-X. Huo, K. Cho, J. Rivera, E. Monte, C. Shen, Y. Yan, and J. Liao, “Conversion of proteins into biofuels by engineering nitrogen flux,” *Nature Biotechnology*, vol. 29, pp. 346–351, 2011.
- [12] R. Saidur, G. Boroumandjazi, S. Mekhilef, and H. A. Mohammed, “A review on exergy analysis of biomass based fuels,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1217–1222, 2012.

- [13] B. Buragohain, P. Mahanta, and V. S. Moholkar, "Biomass gasification for decentralized power generation: The Indian perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 73–92, 2010.
- [14] Z. A. B. Z. Alauddin, P. Lahijani, M. Mohammadi, and A. R. Mohamed, "Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2852–2862, 2010.
- [15] K. Kundu, A. Chatterjee, T. Bhattacharyya, R. Madhuka, and K. Ajit, "Thermochemical Conversion of Biomass to Bioenergy: A Review," in *Prospects of Alternative Transportation Fuels*, A. Singh, R. Agarwal, A. Agarwal, A. Dhar, and M. Shukla, Eds., 1st ed., Springer, 2018, ch. 11, pp. 235–268.
- [16] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Kidlington, Oxford, UK.: Elsevier Inc., 2010.
- [17] J. Rezaiyen and N. Cheremisionof, *Gasification Technologies*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005, p. 330.
- [18] T. Kan and V. Strezov, "Gasification of Biomass," in *Biomass processing technologies*, W. Strezov and T. Evans, Eds., First, Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015, ch. 4, pp. 81–122.
- [19] M. Puig-Arnabat, J. C. Bruno, and A. Coronas, "Review and analysis of biomass gasification models," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2841–2851, 2010.
- [20] H. Risnes, L. Sørensen, and J. Hustad, "CO<sub>2</sub> reactivity of chars from wheat, spruce, and coal," in *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*, A. Bridgwater, Ed., Blackwell Science, 2001, pp. 61–72.
- [21] R. Jenkins, "Thermal Gasification of Biomass- A Primer," in *Bioenergy Biomass to Biofuels*, A. Dahiya, Ed., London, UK: Elsevier Ltd, 2015, pp. 261–286.
- [22] K. Göransson, U. Söderlind, J. He, and W. Zhang, "Review of syngas production via biomass DFBGs.," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 482–492, 2011.
- [23] P. Mckendry, "Energy production from biomass ( part 1 ): overview of biomass," *Bioresource Technology*, vol. 83, no. July 2001, pp. 37–46, 2002.
- [24] Y. I. Son, S. J. Yoon, Y. K. Kim, and J. G. Lee, "Gasification and power generation characteristics of woody biomass utilizing a downdraft gasifier," *Biomass & Bioenergy*, vol. 35, pp. 4215–4220, 2011.
- [25] M. Morris, L. Waldheim, A. Faaij, and K. Stahl, "Status of large-scale biomass gasification and prospect," in *Handbook of Biomass Gasification*, H. Knoef, Ed., Netherlands: BTG Biomass Technology Group, 2005.
- [26] Y. Zhang, B. Li, H. Li, and B. Zhang, "Exergy analysis of biomass utilization via steam gasification and partial oxidation," *Thermochimica Acta*, vol. 538, pp. 21–28, 2012.
- [27] T. Elder and L. H. Groom, "Pilot-scale gasification of woody biomass," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 8, pp. 3522–3528, 2011.

- [28] M. Simone, F. Barontini, C. Nicoletta, and L. Tognotti, "Gasification of pelletized biomass in a pilot scale downdraft gasifier," *Bioresource Technology*, vol. 116, pp. 403–412, 2012.
- [29] P. P. Dutta and D. C. Baruah, "Gasification of tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) shrubs for black tea manufacturing process heat generation in Assam, India," *Biomass and Bioenergy*, vol. 66, pp. 27–38, 2014.
- [30] J. H. Kihedu, R. Yoshiie, and I. Naruse, "Performance indicators for air and air-steam auto-thermal updraft gasification of biomass in packed bed reactor," *Fuel Processing Technology*, vol. 141, pp. 93–98, 2016.
- [31] V. C. Jeya Singh and S. J. Sekhar, "Performance studies on a downdraft biomass gasifier with blends of coconut shell and rubber seed shell as feedstock," *Applied Thermal Engineering*, vol. 97, pp. 22–27, 2016.
- [32] M. E. Echegaray, C. M. Castro, G. D. Mazza, and R. A. Rodriguez, "Exergy analysis of syngas production via biomass thermal gasification," *International Journal of Thermodynamics*, vol. 19, no. 3, pp. 178–184, 2016.
- [33] A. A. Susastriawan, H. Saptoadi, and Purnomo, "Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, no. May 2016, pp. 989–1003, 2017.
- [34] S. Bunchan, T. Poowadin, and K. Trairatanasirichai, "A Study of Throat Size Effect on Downdraft Biomass Gasifier Efficiency," *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 745–750, 2017.
- [35] T. Aktaş, S. Dalmiş, S. Tuğ, F. Dalmiş, B. Kayisoğlu, S. Dalmiş, S. Tuğ, F. Dalmiş, and B. Kayisoğlu, "Development and testing of a laboratory type gasifier for gasification of paddy straw," *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, vol. 14, no. 2, pp. 119–128, 2017.
- [36] K. Manatura, J. H. Lu, K. T. Wu, and H. T. Hsu, "Exergy analysis on torrefied rice husk pellet in fluidized bed gasification," *Applied Thermal Engineering*, vol. 111, pp. 1016–1024, 2017.
- [37] P. R. Bhoi, R. L. Huhnke, A. Kumar, N. Indrawan, and S. Thapa, "Co-gasification of municipal solid waste and biomass in a commercial scale downdraft gasifier," *Energy*, vol. 163, pp. 513–518, 2018.
- [38] I. S. Dalmiş, B. Kayisoğlu, S. Tuğ, T. Aktaş, M. M. R. Durgut, and F. Taşçi Durgut, "A prototype downdraft gasifier design with mechanical stirrer for rice straw gasification and comparative performance evaluation for two different airflow paths," *Tarim Bilimleri Dergisi*, vol. 24, no. 3, pp. 329–339, 2018.
- [39] D. S. Upadhyay, A. K. Sakhiya, K. Panchal, A. H. Patel, and R. N. Patel, "Effect of equivalence ratio on the performance of the downdraft gasifier – An experimental and modelling approach," *Energy*, vol. 168, pp. 833–846, 2019.
- [40] A. A. Susastriawan, H. Saptoadi, and Purnomo, "Comparison of the gasification performance in the downdraft fixed-bed gasifier fed by different feedstocks: Rice husk, sawdust, and their mixture," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 34, no. April, pp. 27–34, 2019.

- [41] P. Akhator, A. Obanor, and E. Sadjere, "Design and development of a small-scale biomass downdraft gasifier," *Nigerian Journal of Technology*, vol. 38, no. 4, p. 922, 2019.
- [42] D. Antolini, S. S. Ail, F. Patuzzi, M. Grigante, and M. Baratieri, "Experimental investigations of air-CO<sub>2</sub> biomass gasification in reversed downdraft gasifier," *Fuel*, vol. 253, no. May, pp. 1473–1481, 2019.
- [43] D. Venugopal, L. Thangavelu, and N. Elumalai, "Energy, Exergy, and Sustainability Analysis of Rice Husk Air Gasification Process," *Thermal Science*, vol. 23, pp. 549–560, 2019.
- [44] R. K. Pal, "Gasification of cotton stalk in a downdraft gasifier," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 0, no. 0, pp. 1–13, 2019.
- [45] K. Wasinarom and J. Charoensuk, "Experiment and numerical modeling of stratified downdraft gasification using rice husk and wood pellet," *BioResources*, vol. 14, no. 3, pp. 5235–5253, 2019.
- [46] L. V. Martínez, J. E. Rubiano, M. Figueredo, and M. F. Gómez, "Experimental study on the performance of gasification of corncobs in a downdraft fixed bed gasifier at various conditions," *Renewable Energy*, vol. 148, pp. 1216–1226, 2020.
- [47] S. Rupesh, C. Muraleedharan, and P. Arun, "Energy and exergy analysis of syngas production from different biomasses through air-steam gasification," *Frontiers in Energy*, vol. 14, no. 3, pp. 607–619, 2020.
- [48] M. Awais, W. Li, A. Munir, M. Mubashar, and M. Ajmal, "Experimental investigation of downdraft biomass gasifier fed by sugarcane bagasse and coconut shells," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 11, pp. 429–444, 2021.
- [49] M. El-Said, V. Bhuse, and A. Arendsen, "An Empirical Study to Investigate the Effect of Air Density Changes on the DSRC Performance," *Procedia Computer Science*, vol. 114, pp. 523–530, 2017.
- [50] S. Tug, "Çeltik Saplarının Gazlaştırılması için Mekanik Karıştırıcılı Aşağı Akışlı Prototip Bir Gazlaştırıcı Tasarımı," Doktora Tezi, Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ., 2016.
- [51] X. Zhu and R. Venderbosch, "A correlation between stoichiometrical ratio of fuel and its higher heating value," *Fuel*, vol. 84, pp. 1007–1010, 2005.
- [52] K. E. Anyaoha, R. Sakrabani, K. Patchigolla, and A. M. Mouazen, "Co-gasification of oil palm biomass in a pilot scale downdraft gasifier," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1888–1896, 2020.
- [53] C. Nobre, A. Longo, C. Vilarinho, and M. Goncalves, "Gasification of pellets produced from blends of biomass wastes and refuse derived fuel chars," *Renewable Energy*, vol. 154, pp. 1294–1303, 2020.
- [54] B. Jenkins, L. Baxter, and T. Miles, "Combustion properties of biomass," *Fuel Processing Technology*, vol. 54, pp. 17–46, 1998.

- [55] V. Kirsanovs, D. Blumberga, K. Karklina, I. Veidenbergs, C. Rochas, E. Vigants, and G. Vigants, "Biomass Gasification for District Heating," *Energy Procedia*, vol. 113, pp. 217–223, 2017.
- [56] I Demiral and S. Cemrek Kul, "Kestane kabuğunun Pirolizi ile Elde Edilen Ürünlerin Karakterizasyonu," *Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 125–134, 2015.
- [57] J. Szargut, *Exergy Method*. Boston: WIT Press, 2005, p. 189.
- [58] I Lewandowski and A Kicherer, "Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus xgiganteus*," *European Journal of Agronomy*, vol. 6, pp. 163–177, 1996.
- [59] R. Karamarkovic and V. Karamarkovic, "Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures," *Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 537–549, 2010.
- [60] E. S. Aydın, O. Yücel, and H. Sadikoglu, "Experimental Study On Hydrogen Rich Syngas Production Via Gasification Of Pine Cone Particles And Wood Pellets In A Fixed Bed Downdraft Gasifier," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 32, pp. 17 389–17 396, 2019.
- [61] B. Pandey, Y. K. Prajapati, and P. N. Sheth, "CFD analysis of biomass gasification using downdraft gasifier," *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 4107–4111, 2020.
- [62] P. N. Sheth and B. V. Babu, "Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier," *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 12, pp. 3127–3133, 2009.
- [63] H. Olgun, S. Ozdogan, and G. Yinesor, "Results with a bench scale downdraft biomass gasifier for agricultural and forestry residues," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 572–580, 2011.
- [64] H. Beohar, B. Gupta, V. Sethi, M. Pandey, and H. Parmar, "Effect of air velocity, fuel rate and moisture content on the performance of updraft biomass gasifier using fluent tool," *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 2, no. 5, pp. 3622–3627, 2012.
- [65] A. Dhaundiya and D. Atsu, "Exergy analysis of a pilot-scale reactor using wood chips," *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, p. 123 511, 2021.
- [66] K. J. Ptasiński, M. J. Prins, and A. Pierik, "Exergetic evaluation of biomass gasification," *Energy*, vol. 32, no. 4, pp. 568–574, 2007.
- [67] T. Ismail and M. Abd El-Salam, "Parametric studies on biomass gasification process on updraft gasifier high temperature air gasification," *Applied Thermal Engineering*, vol. 112, pp. 1460–1473, 2017.
- [68] G. Demirtas, "Palmye Budama Atıklarının Gazlaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2019, p. 35.
- [69] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies," *Bioresource Technology*, vol. 83, no. 1, pp. 55–63, 2002.



- [70] F. Tinaut, A. Melgar, J. F. Perez, and A. Horrillo, "Effect of biomass particle size and air superficial velocity on the gasification process in a downdraft fixed bed gasifier. An experimental and modelling study," *Fuel Processing Technology*, vol. 89, no. 11, pp. 1076–1089, 2008.
- [71] A. Kumar and R. Randa, "Experimental analysis of a producer gas generated by a chir pine needle (leaf) in a downdraft biomass gasifier," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 4, pp. 122–130, 2014.
- [72] Gunarathne D., Jatunarachchi S.S., Senanayake N.S., and Wei B., "The Effect of Throat Diameter on the Performance a Downdraft Biomass Gasifier," *International Journal of Energy Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 171–175, 2013.
- [73] B. Diken, "Çim peletlerinin gazlaştırılma performansının saptanması üzerine bir araştırma," Ph.D. dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ., 2017.
- [74] M. A. Chishty, K. Umeki, M. Risberg, A. Wingren, and R. Gebart, "Numerical simulation of a biomass cyclone gasifier: Effects of operating conditions on gasifier performance," *Fuel Processing Technology*, vol. 218, no. April, p. 106 861, 2021.
- [75] M. Ahmad, Z. Alauddin, S. Soid, M. Mohamed, Z. Rizman, M. Rasat, M. Razab, and M. Amini, "Performance and Carbon Efficiency Analysis of Biomass Vvia Stratified Gasifier," *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 20, pp. 9533–9537, 2015.
- [76] J. Kramb, J. Konttinen, A. Gómez-Barea, A. Moilanen, and K. Umeki, "Modeling biomass char gasification kinetics for improving prediction of carbon conversion in a fluidized bed gasifier," *Fuel*, vol. 132, pp. 107–115, 2014.
- [77] S. Atnaw, S. Sulaiman, and S. Yusup, "Syngas production from downdraft gasification of oil palm fronds," *Energy*, vol. 61, pp. 491–501, 2013.
- [78] M. K. Cohce, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Energy and exergy analyses of a biomass-based hydrogen production system," *Bioresourc Technology*, vol. 102, no. 18, pp. 8466–8474, 2011.
- [79] Y. Zhang, B. Li, H. Li, and H. Liu, "Thermodynamic evaluation of biomass gasification with air in autothermal gasifiers," *Thermochimica Acta*, vol. 519, no. 1-2, pp. 65–71, 2011.
- [80] X. Xiang, G. Gong, C. Wang, and N. Cai, "Exergy analysis of updraft and downdraft fixed bed gasification of village-level solid waste," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 221–233, 2020.
- [81] D. Rovas and N. Zabaniotou, "Exergy Analysis of a Small Gasification – ICE Integrated System for CHP Production Fueled with Mediterranean Agro-Food Processing Wastes: The SMART-CHP," *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 510–517, 2015.
- [82] V. Singh and S. Sekhar, "Performance studies on a downdraft biomass gasifier with blends of coconut shell and rubber seed shell as feedstock," *Applied Thermal Engineering*, vol. 97, pp. 22–27, 2016.