

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOJENERASYON TESİSLERİNDE KÖMÜR İLE BİYOKÜTLE  
KULLANIMININ KAZAN VERİMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Şakir BERBER**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Danışman

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Eş Danışman

Doç. Dr. Tolga TANER

Şubat, 2020

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOJENERASYON TESİSLERİNDE KÖMÜR İLE BİYOKÜTLE  
KULLANIMININ KAZAN VERİMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Şakir BERBER tarafından hazırlanan tez çalışması 17.02.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı Proses Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

Doç. Dr. Tolga TANER  
Aksaray Üniversitesi  
Eş-Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Zeynep Dürriye BİLGE, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ebru MANÇUHAN, Üye

Marmara Üniversitesi

---

---

---

Danışmanım Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Kojenerasyon Tesislerinde Kömür ile Biyokütle Kullanımının Kazan Verimine Etkisinin İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Şakir BERBER

İmza



*Aileme  
ve  
biricik eşime*

## TEŞEKKÜR

---

Fosil yakıtların rezervlerinin sınırlı olması, çevre ve insan sağlığına zararları gibi nedenlerden ötürü dünya ülkeleri bu kaynaklara alternatif olabilecek temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimiyle ilgili çalışmalar yürütmektedir. Buna ilave olarak; enerji maliyetlerinin her geçen gün artması ve dolayısıyla enerji kaynaklarındaki çeşitliliğin artırılmasının mecburi olduğu günümüzde, yenilenebilir enerji kaynaklarından ne kadar ve nasıl verimli faydalanabileceğimiz hususunda araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada da kojenerasyon tesislerinde kömürün yanında ilave yakıt olarak daha temiz ve çevreci yakıt olan biyokütle kullanılması durumunda kazan verimlerinde meydana gelen değişimler teorik olarak incelenmeye çalışılmıştır.

Tez çalışmamda ve tezden üretilen konferans bildirisi çalışmamda desteğini esirgemeyen ve çalışmalarına yön veren danışmanım Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ'a ve eş danışmanım Doç. Dr. Tolga TANER'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında yardım ve desteğini hiç esirgemeyen sevgili eşime ve son olarak hayatımın her aşamasında yanımda olan ve sevgilerini her an hissettiğim geniş aileme sonsuz teşekkürler.

Şakir BERBER

# İÇİNDEKİLER

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xiii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Giriş</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Özeti .....	1
1.2 Tezin Amacı .....	7
1.3 Hipotez .....	8
<b>2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları</b>	<b>10</b>
2.1 Hidroelektrik Enerji .....	10
2.2 Güneş Enerjisi .....	11
2.3 Rüzgâr Enerjisi .....	13
2.4 Jeotermal Enerji .....	14
2.5 Biyokütle Enerjisi .....	15
2.6 Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye/Dünya Enerji Piyasalarındaki Yeri ve Önemi .....	17
<b>3 Kojenerasyon Sistemi ile Enerji Üretimi</b>	<b>20</b>
3.1 Kojenerasyon Sistemi Hakkında Genel Bilgiler .....	20
3.1.1 Temel Bileşenleri ve Konfigürasyonları .....	20
3.1.3 Kojenerasyon Sisteminin Ekonomik ve Çevresel Faydaları .....	25
3.2 Kojenerasyon Sistemlerinin Verimliliğinin Hesaplanma Metotları .....	26
3.2.1 Sistem Verimliliğinde Kullanılan Terimler .....	26
3.2.2 Toplam Sistem Verimliliği .....	27
3.2.3 Efektif Elektrik Verimliliği .....	28
<b>4 Biyokütle Yakıtlı Kojenerasyon Tesislerinde Enerji Üretimi</b>	<b>29</b>
4.1 Biyokütle Yakıtlı Kojenerasyon Tesisinin Yapısı .....	29

4.1.1	Önişlem Ünitesi.....	29
4.1.2	Biyokütle Dönüşüm Ünitesi .....	30
4.1.3	Enerji Üretim Ünitesi.....	31
4.2	Biyokütle Yakıtlı Kojenerasyon Tesislerinin Ekonomisi.....	38
<b>5</b>	<b>Biyokütle Yakıtlı Kojenerasyon Tesisi Proje Tasarımı ve Verim Analizleri</b>	<b>42</b>
5.1	Tesisin Kurulumuna ve Konfigürasyonuna İlişkin Genel Bilgiler .....	42
5.2	Tesis Sahası Seçimi .....	43
5.3	Bir Biyokütle Olarak Odunun Karakteristiği ve Seçimi .....	43
5.4	Tesis Üniteleri.....	45
5.4.1	Kazan Ünitesi Seçimi.....	45
5.4.2	Buhar Ünitesi Seçimi.....	47
5.4.3	Jeneratör Ünitesi Seçimi .....	50
5.4.4	Diğer Ekipmanlara İlişkin Bilgiler .....	51
5.5	Tesisin Verimlilik Hesaplamaları.....	53
<b>6</b>	<b>Biyokütle Yakıtlı Enerji Üretim Tesislerinin Verimliliği</b>	<b>57</b>
6.1	Biyokütlenin Nem Miktarının, Isıl Verime ve Enerji Yoğunluğuna Etkisi .....	57
6.2	Biyokütlelere Uygulanan Ön İşlem Yöntemleri .....	59
6.3	Biyokütle Kurutucuları Çalışma Prensibi .....	60
6.4	Biyokütle Yakıtlı Enerji Üretim Tesislerinde Kurutma İşlemi.....	64
6.5	Yanma Analizi .....	67
6.6	Enerji Analizi ve Ekserji Analizi.....	75
6.7	Verim Hesapları .....	77
<b>7</b>	<b>Sonuç ve Öneriler</b>	<b>88</b>
	<b>KAYNAKÇA</b>	<b>91</b>
	<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>99</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

$c_p$	Sabit basınçta özgül ısı, kJ/kg.K
$E$	Enerji, kJ
$\dot{E}_x$	Birim zamandaki toplam ekserji, kW
$g$	Yer çekimi ivmesi, m/s <sup>2</sup>
$h$	Entalpi, kJ/kg
$h_0$	Ölü hal (çevre) entalpisi, kJ/kg
$h_{fg}$	Suyun buharlaşma entalpisi, kJ/kg
$H_u$	Yakıtların alt ısıl değeri, kJ/kg
$I$	Tersinmezlik, kW
$m$	Kütle, kg
$\dot{m}$	Kütleli debi, kg/s
$M_a$	Mol kütlesi, kg/kmol
$n$	Mol miktarı, kmol
$Q$	Isı enerjisi, Joule
$\dot{Q}$	Birim zamandaki ısı geçişi, kW
$P$	Güç, Watt
$P_0$	Ölü hal (çevre) basıncı, bar
$P_{O_2}^{00}$	Oksijenin kısmi basıncı, bar
$\bar{R}$	Molar universal gaz sabiti, kJ/kmol.K
$s$	Birim kütle için entropi, kJ/kg.K
$s_0$	Ölü hal (çevre) entropisi, kJ/kg.K
$\dot{S}$	Birim zamandaki entropi, kW/K
$T$	Sıcaklık, K
$T_0$	Ölü hal (çevre) sıcaklığı, K
$V$	Hız, m/s
$W$	Elektrik enerjisi, joule
$\dot{W}$	Birim zamanda yapılan iş, kW
$x$	Mol oranı
$z$	Yükseklik, m
$\varepsilon_0$	Kimyasal ekserji, kJ/kmol
$\varepsilon_{ee}$	Efektif elektrik verimliliği



$\eta_{\eta_0}$	Toplam sistem verimliliği
$\lambda$	Hava fazlalık katsayısı
$\psi$	Ekserji verimi
$\nabla$	Yüzde baca kaybı
$\Delta$	Değişim
$\eta$	Termal verim
$\varphi$	Katı yakıtlar için ekserji/ısıl değer oranı
$\nu$	Sitokiyometrik katsayı
$\Sigma$	Toplam
$b$	Biyokütle
$bg$	Bacagazı
$bh$	Buhar
$\ç$	Çıkan
$e$	Elektrik
$f$	Akışkan
$fuel$	Yakıt
$g$	Giren
$g$	Global
$i$	İdeal
$k$	Kazan
$kh$	Kontrol hacmi
$m$	Mekanik
$ort$	Ortalama
$r$	Reel
$s$	Soğutma suyu
$t$	Termal
$ter$	Termodinamik
$th$	Isıl
$\ddot{u}$	Üretilen
$y$	Yakıt
$yn$	Yanma

## KISALTMA LİSTESİ

---

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CHP	Kombine Isı-Güç Üretimi
DOE	Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
EPA	Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
ETKB	Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
HRGS	Isı Geri Kazanımlı Buhar Jeneratörü
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IGCC	Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrimi
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
IRR	İç Getiri Oranı
KM	Kuru Madde
LHV	Alt Isıl Değer
MCFC	Eriyik Halde Karbonat Kullanan Yakıt Hücresi
MITI	Japonya Uluslararası Sanayi ve Ticaret Bakanlığı
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
OKM	Organik Kuru Madde
ORC	Organik Rankine Çevrimi
PAFC	Fosforik Asit Yakıt Hücresi
PEMFC	Proton Değişim Zarına Sahip Yakıt Hücresi
SOFC	Katı Oksitli Yakıt Hücresi
SSD	Süper Isınmış Buhar Kurutucu
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Hidroelektrik santralin işleyiş sistemi .....	10
Şekil 2.2 Şebekeden bağımsız çalışan fotovoltaik pilin çalışma prensibi .....	12
Şekil 2.3 Yatay rüzgâr türbini bileşenleri .....	13
Şekil 2.4 Binary tipindeki tesisin elektrik üretim süreci .....	15
Şekil 2.5 Biyogaz üretim süreci .....	17
Şekil 2.6 Dünya'daki yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllara göre tüketimi .....	18
Şekil 2.7 Türkiye'deki yenilenebilir enerji yakıtlı tesislerin dağılımı .....	19
Şekil 3.1 Topping cycle tipindeki kojenerasyon konfigürasyonu .....	21
Şekil 3.2 Bottoming cycle tipindeki kojenerasyon konfigürasyonu .....	22
Şekil 3.3 Dünya elektrik üretimindeki enerji (TWh) akışı .....	25
Şekil 4.1 Biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesisinin temel çalışma prensibi .....	29
Şekil 4.2 Buhar türbini ile çalışan kojenerasyon döngüsü .....	32
Şekil 4.3 Basit çevrim konfigürasyonundaki gaz türbini bileşenleri .....	35
Şekil 4.4 Pistonlu türbin ile çalışan biyokütle yakıtlı kojenerasyon sistemi .....	36
Şekil 4.5 Stirling motor ile çalışan biyokütle yakıtlı kojenerasyon sistemi .....	38
Şekil 5.1 Hareketli ızgaralı kazan (travelling grate boiler) .....	46
Şekil 5.2 ORC teknolojisi ile çalışan biyokütle yakıtlı kojenerasyon sistemi .....	48
Şekil 5.3 ORC teknolojisinin bileşenleri .....	48
Şekil 5.4 ORC jeneratörü .....	51
Şekil 5.5 Hava soğutmalı kondenserin tüp demeti .....	52
Şekil 5.6 Pnömatik kül taşıma sistemi .....	52
Şekil 5.7 Tesis akış şeması .....	54
Şekil 6.1 Odunun nem oranının ısı değer ve enerji yoğunluğu ile karşılaştırılması .....	59
Şekil 6.2 Doğrudan ısıtmalı tek geçişli döner kurutma sisteminin çalışma prensibi .....	61
Şekil 6.3 Doğrudan ısıtmalı tek geçişli döner kurutma sistemi .....	62
Şekil 6.4 Dolaylı ısıtmalı döner boru demetli kurutma sisteminin çalışma prensibi .....	63
Şekil 6.5 Dolaylı ısıtmalı döner boru demetli kurutma sistemi .....	64

<b>Şekil 6.6</b> Buhar akışını gösteren 12,5 MW kurulu güçteki enerji üretim tesisi tasarımı.....	65
<b>Şekil 6.7</b> Basit bir buhar kazanı.....	77
<b>Şekil 6.8</b> Biyokütle karışım oranının kazan enerji verimine etkisi.....	80
<b>Şekil 6.9</b> Biyokütle karışım oranının kazan ekserji verimine etkisi.....	80
<b>Şekil 6.10</b> Biyokütle karışım oranının yanma sıcaklığı üzerine etkisi .....	81
<b>Şekil 6.11</b> Biyokütle karışım oranının enerji kaybına etkisi.....	82
<b>Şekil 6.12</b> Biyokütle karışım oranının ekserji kaybına etkisi .....	83
<b>Şekil 6.13</b> Biyokütle karışım oranının CO <sub>2</sub> emisyonuna etkisi.....	84
<b>Şekil 6.14</b> Biyokütle karışım oranının SO <sub>x</sub> ve NO <sub>x</sub> emisyonuna etkisi .....	84
<b>Şekil 6.15</b> Biyoatık ile kömürün birlikte yakılmasının CO ve SO <sub>2</sub> emisyonuna etkisi .....	85
<b>Şekil 6.16</b> Odun talaşı ile kömürün birlikte yakılmasının CO ve SO <sub>2</sub> emisyonuna etkisi .....	86

## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 2.1</b> Biyokütle ve kullanım alanlarına ilişkin örnekler.....	16
<b>Tablo 3.1</b> Kojenerasyon teknolojilerinin kapasite aralığı ve verimlilik analizi.....	23
<b>Tablo 4.1</b> Çeşitli kapasitelerdeki biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerinin uygulama alanları ve teknolojileri.....	31
<b>Tablo 5.1</b> Biyokütle kompozisyonu .....	45
<b>Tablo 5.2</b> Tesisin belirli noktalardaki nominal değerleri.....	54
<b>Tablo 6.1</b> Kurutucu ilavesinden önce buhar akışına ilişkin değerler .....	66
<b>Tablo 6.2</b> Kurutucunun tesis verimliliğine etkisi .....	66
<b>Tablo 6.3</b> Linyit için hesap sonuçları .....	69
<b>Tablo 6.4</b> Biyokütle (çam talaşı) için hesap sonuçları.....	70
<b>Tablo 6.5</b> Hesaplamalarda kullanılan yakıtların ısı değer sonuçları.....	70
<b>Tablo 6.6</b> Biyokütle ile kömürün birlikte yakıldığı çalışmalardaki yakıtların ısı değer sonuçları.....	71
<b>Tablo 6.7</b> Tesis bileşenlerine ilişkin ekserji-enerji değerleri .....	79
<b>Tablo 6.8</b> Biyokütle karışım oranına göre kazan enerji veriminin değişimi .....	80
<b>Tablo 6.9</b> Biyokütle karışım oranına göre kazan ekserji veriminin değişimi .....	81
<b>Tablo 6.10</b> Biyokütle karışım oranına göre yanma sıcaklığının değişimi .....	81
<b>Tablo 6.11</b> Biyokütle karışım oranına göre enerji kaybındaki değişim .....	82
<b>Tablo 6.12</b> Biyokütle karışım oranına göre ekserji kaybındaki değişim .....	83
<b>Tablo 6.13</b> Biyoatık ile kömürün birlikte yakılmasının kazan verimine etkisi .....	85
<b>Tablo 6.14</b> Odun talaşı ile kömürün birlikte yakılmasının kazan verimine etkisi .	85
<b>Tablo 6.15</b> Biyoatık ile kömürün birlikte yakılmasının CO ve SO <sub>2</sub> emisyonuna etkisi .....	86
<b>Tablo 6.16</b> Odun talaşı ile kömürün birlikte yakılmasının CO ve SO <sub>2</sub> emisyonuna etkisi .....	86

## **Kojenerasyon Tesislerinde Kömür ile Biyokütle Kullanımının Kazan Verimine Etkisinin İncelenmesi**

Şakir BERBER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Eş-Danışman: Doç. Dr. Tolga TANER

Enerji, günümüzde tüm ülkelerin en vazgeçilmez ihtiyaçlarından. Bundan dolayı enerji üretimi ve tüketimi ülkeler için çok önem arz etmektedir. Özellikle enerjide dışa bağımlı olan ülkemiz için bu çok daha önemlidir. Yerli ve temiz enerji kaynakları kullanılarak dışa bağımlılık azaltılabilir. Bu kaynaklardan birisi de biyokütle enerjisidir. Biyokütle enerjisi hem tarımı destekleyecek hem de biyokütle atıkları değerlendirilerek enerji üretimine katkı sağlayacaktır. Ülkemizde özellikle biyokütlenin doğrudan yakılarak değerlendirilmesi yoluna gidilmektedir. Bu şekildeki kullanım, hem enerjinin verimsiz kullanımına neden olmakta, hem de çevre açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bundan dolayı, ticari olmayan klasik biyokütle enerji üretiminin giderek azaltılması ve modern biyokütle enerji üretimine başlanarak bu üretimin artırılması gerekmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde dünya genelinde daha çok biyokütlenin kömürün yanında ikincil yakıt olarak kullanıldığı birlikte yakma sistemlerinin olduğu görülmektedir. Bu şekilde biyokütlenin bazı dezavantajları ortadan kaldırılmaktadır. Bu tez çalışmasında, linyit ile çam talaşının birlikte kullanılması durumu için kazan verimleri incelenmiş ve literatürdeki bulgular teyit edilmiştir. Biyokütlenin (çam

talaşının) yüzdesel olarak 5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında linyit ile kazanda yakılması durumu için kazan enerji ve ekserji verimleri hesaplanmış ve grafik halinde verilmiştir. Yapılan hesaplamalarda kazan verimlerinde çok az oranda düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Biyokütle karışım oranı arttıkça; kazan enerji veriminin %85'ten %84'e düştüğü, kazan ekserji veriminin ise %45'ten %43'e düştüğü görülmüştür. Ayrıca, çıkan emisyonlar incelenmiştir. Biyokütle karışım oranı arttıkça; CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> emisyonlarının yaklaşık %30 azaldığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Biyokütle, linyit, enerji ve ekserji verimi



# Investigation of the Coal and Biomass Fuels Effects on Boiler Efficiency in Cogeneration Power Plants

Şakir BERBER

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Co-advisor: Assoc. Prof. Dr. Tolga TANER

Energy is one of the most indispensable needs of all countries today. Therefore, energy production and consumption are of great importance for countries. This is especially important for our country which is dependent on foreign sources in energy. By using domestic and clean energy sources, external dependence can be reduced. One of these sources is biomass energy. Biomass energy will both support agriculture and contribute to energy production by evaluating biomass waste. In our country, biomass is directly burned and evaluated. Such use leads to inefficient use of energy and has negative consequences for the environment. Therefore, classical non-commercial biomass energy production needs to be gradually reduced and modern biomass energy production should be started and increased. When the literature studies are examined, it is seen that there are co-combustion systems where more biomass is used as secondary fuel beside coal. In this way, some disadvantages of biomass are eliminated. In this thesis, boiler efficiencies were investigated for the use of lignite and wood shavings together and the findings in the literature were confirmed. Boiler energy and exergy efficiencies were calculated and graphed for the burning of biomass (pine shavings) with lignite in the ratio of 5, 10,



15, 20, 25, 30 percent. In the calculations made, it was observed that the boiler efficiency decreased very little. As the biomass mixing ratio increases; it was observed that boiler energy efficiency decreased from 85% to 84%, and boiler exergy efficiency decreased from 45% to 43%. Also, emissions were investigated. As the biomass mixing ratio increases; it has been observed that CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> emissions are reduced by approximately 30%.

**Keywords:** Biomass, lignite, energy and exergy efficiency



### 1.1 Literatür Özeti

Elektrik enerjisi, enerji arz güvenliğinin tedarikinde esastır. Ancak, sera gazı emisyonlarını azaltma ihtiyacının yanı sıra yüksek maliyetli ve sınırlı fosil yakıt kaynakları, dünyanın enerji bazlı ekonomilerinde yenilenebilir kaynakları cazip hale getirmiştir. Özellikle 1990'lı yılların başından itibaren yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi anlaşılmış; 1997 yılında Kyoto Protokolü'nün imzalanmasının akabinde süreç hız kazanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, potansiyeli çok büyük olan bir enerji kaynağı olup; dünya enerji talebini fazlasıyla karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının gelecekteki küresel enerji portföyündeki payının artacağı ve dünya enerji portföyünün de önemli bir bölümünü kapsayacağı düşünülmektedir.

Da Rosa; sadece Amerika Birleşik Devletleri'nin (ABD) günlük kendi başına tükettiği petrol ve türevleri miktarının 7,3 milyon varil olduğunu ve bu miktarın yaklaşık olarak 1,2x10<sup>9</sup> litre veya 0,7x10<sup>9</sup> kg'a tekabül ettiğini belirtmiştir. Bu durum, Amerika'daki araçların her gün 610 bin ton CO<sub>2</sub> formunda karbon veya 220 milyon ton karbonun atmosfere salınımına sebep olduğunu gösterir. Aynı durum kömür ve doğalgaz için de geçerlidir (Da Rosa, 2015). Yalnızca bu değerler dahi, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin ne denli ehemmiyetli olduğunu göstermektedir.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün sayfasında yer alan ve sürekli güncellenen bilgiye göre; Haziran 2019 tarihi itibarıyla yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak elektrik üreten tesislerin toplam kurulu gücü 38.907,9 MW'tır (ETKB, 2019a). Ayrıca yine söz konusu internet sitesinde, Türkiye'nin her bir yenilenebilir enerji kaynağının potansiyelini tüm Türkiye bazında, bölgesel, illere ve hatta ilçelere göre belirleyen atlaslar ile özellikle

tezin odaklandığı biyokütle yakıtı için *“Türkiye Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası”* yer almaktadır (ETKB, 2019b).

Bununla birlikte; *“Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun”* kapsamında işletilen *“Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM)”* ile yenilenebilir enerji kaynaklarının desteklenmesinde uygulanan/uygulanması gereken politikalar ve teşvik yöntemleri açıklanmıştır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının yakıt olarak kullanıldığı tesislerden elde edilen elektrik enerjisinin alım garantisi, enerji yatırımcılarının dikkatini çekmektedir.

Gökçol vd., Türkiye'nin çok sayıda yenilenebilir enerji kaynağına sahip olduğunu, ancak bunların teknik ve ekonomik nedenlerle yeterince değerlendirilmediğini ifade etmişlerdir. Türkiye'nin tüm enerji talebini özellikle biyokütle olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayabileceğini öne sürmüşlerdir. Biyokütlenin Türkiye'de bol miktarda olması nedeniyle önemli bir pay oluşturduğu belirtilerek; biyokütle gibi doğal enerji kaynakları yeterince ve verimli bir şekilde değerlendirilirse, yabancı ülkelere olan enerji bağımlılığı çarpıcı biçimde azalacağını göstermişlerdir (Gökçol vd., 2009).

Ellabban vd.; dünya elektrik enerjisi tedarikinde yenilenebilir enerji kaynaklarının payını ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımlarını iyileştirmeye dair bilimsel gelişmeleri tespit etmişlerdir. Bununla birlikte; yenilenebilir enerji kaynaklarına ilişkin gelecek beklentilerini de ifade etmişlerdir (Ellabban vd., 2014).

Literatür çalışmaları incelendiğinde biyokütle yakıtlı ve/veya biyokütle ile birlikte kömür kullanılarak yanma ile ilgili çok sayıda çalışmalar olduğu görülebilir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir. Burada verilen çalışmalar, sırasıyla genel çalışmalar, deneysel çalışmalar, modelleme yapılan çalışmalar, enerji ve ekserji ile ilgili çalışmalar ve ekonomik çalışmaları içermektedir.

Gustavsson ve Johansson; biyokütleden enerji üretiminde en etkili yöntemin kojenerasyon sistemi olduğunu belirlemiştir. Kojenerasyon sistemi, biyokütleyi ısıya ve elektriğe dönüştürmenin en verimli yoludur (Gustavsson ve Johansson, 1994).

Tillman, biyokütle ve kömürün birlikte yakılması üzerine incelemeler yapmıştır. Ortak yakma teknoloji seçeneklerinin kısa tarifini yaptıktan sonra, ABD'deki biyokütle/kömür enerji santrallerindeki deneyimlerini anlatmıştır. Çalışmasında biyokütlenin yanma süreci, gaz emisyonları ve kazan verimliliği üzerine etkisi, her santral için verilmiştir (Tillman, 2000).

Sami vd., kömürün biyokütle ile birlikte yakılmasıyla ilgili literatür çalışması yapmışlardır. İncelemenin ilk bölümünde, kömür ve biyokütle yanması ile ilgili temel kavramlar özetlenmiştir. Daha sonra ortak kullanım teknolojisinin seçenekleri verilmiştir. Ardından, birlikte yakma ile ilgili çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar sunulmuştur (Sami, 2001).

McKendry; yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütlenin, üçüncü dünya ülkelerinde yaygın olarak kullanılmakta iken; günümüzde Batı dünyasında da sıklıkla kullanılan bir enerji türü haline geldiğini belirtmiştir. Geleneksel fosil yakıtlı enerji kaynaklarının yerine, yüksek enerji üretimi sağlayabilen uygun biyokütle türlerinin tanımlanmasına odaklanmıştır. McKendry'e göre; gereken biyokütle türü büyük ölçüde, enerji dönüşüm süreci ve enerjinin gerekli olduğu form ile belirlenir (McKendry, 2002).

Demirbaş, yaptığı çalışmada çeşitli biyokütle yakıtlarının fiziksel ve kimyasal yanma ve kül özelliklerini kömürün özellikleriyle karşılaştırmıştır. Kömür ve biyokütle yanmasındaki temel farklılıkları, biyokütle yanma teknolojilerini, ortak kullanım için teknoloji seçenekleri ve ortak yakma ile ilgili tanımlardaki temel farklılıkları da incelemiştir. Ayrıca birlikte yakma, gazlaştırma ve piroliz mekanizmaları hakkında detaylı bilgiler vermiştir (Demirbaş, 2003).

Dong vd.; mikro veya küçük ölçekli biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerinin uygulanmasının hem İngiltere'de hem de dünyanın geri kalanında büyük bir pazar potansiyeline sahip olduğunu tespit etmiştir. Söz konusu potansiyel; çevreyi koruma, ekonomik kalkınmayı destekleme ve iklim değişikliğini kontrol altına alma gibi unsurlarla birlikte değerlendirildiğinde daha da önem kazanmaktadır. Her ne kadar, küçük ölçekli ve mikro ölçekli biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesisi sistemleri, enerji, çevre, ekonomi, vb. konularda kilit rol oynasa da söz konusu teknolojinin halen araştırma geliştirme aşamasında olduğunu belirtmişler ve mevcut aşamadaki

benzer teknolojilerin, henüz farklı endüstriyel sektörlerin taleplerini karşılayamaz durumda olduğunu ifade etmişlerdir. Yakın gelecekte, yeni nesil bağımsız küçük ölçekli ve mikro ölçekli biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerinin ticarileştirilmesi için gereken çalışmaların hız kazanması gerekmektedir (Dong vd., 2009).

Başka bir çalışmada, biyokütle teknolojilerinin değerlendirilmesinde temel parametreler sunulmuştur. Avrupa'da uygulanan ortak yakma teknolojilerinin bir değerlendirmesi yapılmış ve dolaylı birlikte yakmanın en iyi teknoloji olduğunu ve bunun ardından toz haline getirilmiş yakıtta doğrudan birlikte yakmanın, akışkan yataklı kazanda olduğu tespit edilmiştir (Almansour vd., 2010).

Salomón vd.; 1-20 MW aralığındaki küçük ölçekli biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesisi uygulamaları için olası alternatiflerin, geleneksel Rankine çevrimi, gaz türbini, içten yanmalı motorlar, yakıt hücreleri ve mikrotürbin teknolojileri olduğunu belirtmişlerdir. Söz konusu teknolojiler içerisinde, Rankine çevriminin, her tür biyokütle ile kullanılabilmesi özelliğinde dolayı, öne çıktığını ileri sürmüşlerdir (Salomón vd., 2011).

Patumaswad ve Cliffe, laboratuvar ölçeğindeki akışkan yataklı kazanda, yüksek nemli belediye katı atıklarının kömür ile birlikte yakılması konusunda deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma, %20'ye varan neme sahip belediye atıklarının başarıyla yakılabileceğini ortaya koymuştur. Nem ve kül içeriğinin yanma verimi üzerindeki birleşik etkisi de incelenmiş ve kül içeriğinin etkisinin nem içeriğinden daha belirgin olduğu görülmüştür (Patumaswad ve Cliffe, 2002).

Casaca ve Costa, toz haline getirilmiş biyokütlenin doğalgaz ile birlikte yanmasının kirletici emisyonları ve partikül yanması üzerindeki etkisini çalışmışlardır. Sonuçlarda, biyokütlenin doğalgaz ile birlikte yakılmasının, biyokütlenin yakıtı bağlı azot içeriği düşük olmadığı sürece NO<sub>x</sub> emisyonları üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Ayrıca, büyük partikül boyutlarındaki biyokütle yakıtlarının partikül yanma performansı üzerinde zararlı bir etkisinin olmadığı da görülmüştür (Casaca ve Costa, 2003).

Kruczek vd., değişen yakıt tipi, partikül büyüklüğü, yanma sıcaklığı ve fazla hava oranı ile laboratuvar ölçeğinde deney yapmışlardır. Bu çalışmanın sonuçları,

biyokütle ilavesinin yanma sürecini arttırdığını göstermiştir. Karışımdaki biyokütle oranındaki bir artış, NO<sub>x</sub> ve SO<sub>x</sub> emisyonlarının azalmasına da neden olmuştur (Kruczek vd., 2006).

Belediye katı atıklarının (BKA) ve kömürün tezgâh üstü kabarcıklı akışkan yataklı kazanda birlikte yakılması üzerine bir başka çalışma Demirbaş tarafından yapılmıştır. Kömür ve BKA'nın temel özellikleri ile kül özellikleri arasındaki farklılıkları tartıştıktan sonra, BKA'nın kömür ile birlikte yakılmasının gaz emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmıştır (Demirbaş, 2008).

Backreedy vd., 1MW'lık bir yakıcıda toz haline getirilmiş kömür ve çam ağacının birlikte yanmasını modellemişlerdir. Bu çalışma için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kullanılmıştır. Model ile, biyokütle partikül büyüklüğü ve şeklinin harmanlanmış kömürün yanması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Modelleme sonuçları aynı büyüklükte kömür partiküllerine kıyasla 200 mikron küçük bir ahşap partikülün hızlı bir şekilde yandığını göstermiştir (Backreedy vd., 2005).

Dong vd., gazlaştırmaya dayalı biyokütleli, 600 MW kapasiteli pulverize kömür kazanı için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizi yapmışlardır. Simülasyon sonuçlarından, ürün gazı en düşük ölçekli brülöre enjekte edildiğinde NO<sub>x</sub> emisyonlarında yaklaşık %50-70 oranında bir düşüş meydana geldiği görülmüştür (Dong vd., 2010).

Amos, enerji üretim tesislerinde, daha kuru yakıt kullanılmasının, daha yüksek kazan verimi, daha düşük hava emisyonları ve kazanın daha efektif çalışması olmak üzere yakma kazanlarına önemli faydalar sağladığını ifade etmişlerdir (Amos, 1998).

Martín vd., düşük dereceli kömür karışımlarının çam cipsi ile birlikte atmosferik akışkan yataklı kazanda yanma analizini yapmışlardır. Ekserjetik verimleri ve tersinmezlikleri, dokuz deney için hesaplanmıştır. Ekserji verimliliğinin %31 ile %35 arasında değiştiği ve egzoz gazının çıkış sıcaklığının düşürülmesiyle tesisin performansının iyileştirilebileceği tespit edilmiştir. Akışkanlaştırma hızının ekserji verimliliği üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı, bununla birlikte yatak sıcaklığı ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir (Martín vd., 2006).

Zuwala ve Sciazko tarafından, teğetsel olarak ateşlenen pulverize bir kazanın enerji analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, %6,6'lık kütle payındaki biyoatıktan veya %9,5 kütle payındaki odun talaşından oluşan kömür ve biyokütle karışımının birlikte yakılmasının kazan verimi üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, yanma koşulları, yalnızca kömür kullanmaktan daha kötü bir sonuç vermiştir. Ayrıca, hesaplanan emisyon verileri, biyokütle ile birlikte yakmanın CO ve SO<sub>2</sub> emisyonlarını azalttığını göstermiştir (Zuwala ve Sciazko, 2010).

Pang ve Mujumdar; odun yongaları, talaş, çimen ve tarımsal artıkları formundaki biyokütlelerin, %50'den %150'ye kadar nem içerdiğini ve enerji verimliliğini artırmak, enerji ürün kalitesini iyileştirmek ve enerji dönüşümü sırasında emisyonları azaltmak için kurutulması gerektiğini ifade etmişlerdir. Biyokütle kurutmasında potansiyel olarak çeşitli kurutucu tipleri ve kurutma teknolojileri kullanılabilir (Pang ve Mujumdar, 2010).

Naik vd., biyokütle yakıtlı elektrik üretim tesislerinin ekserji analizini yaparak; kazan, türbin ve kondenserin ekserji kayıplarını incelemiştir (Naik vd., 2012).

Gebreegziabher vd.; odun artıklarını yakıt olarak kullanan 12,5 MW kurulu gücündeki biyokütle yakıtlı enerji üretim tesisinin, yakıt ve enerji dengesi modelini sunarak, tesisin enerji verimliliğini simüle etmişlerdir. En fazla verimliliği elde etmek için, tesis modeli çeşitli kurutma yöntemlerine tabi tutulmuş ve biyokütlenin uygun şekilde kurutulması ile birlikte enerji verimliliğinde büyük iyileşme sağlanabileceği gösterilmiştir. Sıcak hava kurutucusu ve süper ısıtılmış bir buharlı kurutucunun birleştirilmesi ile elde edilen teknolojiden tedarik edilen enerji verimliliğinin, biyokütlenin kurutulmadığı duruma göre tedarik edilen enerji verimliliğine göre yaklaşık %10 oranında fazla olduğu tespit edilmiştir (Gebreegziabher vd., 2014).

Başkaya, ekserji analizinin, enerji ile ilgili tesis değerlendirmesi için, enerji kalitesini gösteren ve enerji kayıplarının yerlerini, türlerini ve gerçek büyüklüklerini belirleyen faydalı bir araç olduğunu ifade etmiştir. Kojenerasyon tesislerindeki ekserji kaybının temel nedenlerini ve söz konusu yöntemin kullanılmasının temel nedenlerini araştırmıştır (Başkaya, 2017).

Basu vd., Doğu Kanada'daki 150 MW'lık bir toz haline getirilmiş kömür yakıtlı enerji santralının üç ortak yakma seçeneğinin hepsini (doğrudan, dolaylı, gazlaştırmaya dayalı) inceleyerek ekonomik bir analizini yapmıştır. Bu analizde iç getiri oranını (IRR) belirlemek için sermaye ve işletme maliyetleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda bu üç seçenek için CO<sub>2</sub> azaltma maliyeti de hesaplanmıştır. Bu çalışmada dolaylı yakma uygulanması için gereken sermaye yatırımı en yüksek olmakla birlikte, belirsizlik riski en düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir (Basu vd., 2011).

De ve Assadi, biyokütle ile birlikte kömür yakılmasının ekonomisini araştırmak için model üzerinde çalışmışlardır. Model, ısı ve kütle dengeleri için pilot tesis test sonuçlarına dayanmaktadır. Bu model sayesinde, ek maliyetler ve ek özel maliyetler tahmin edilmiştir. Aynı zamanda, biyokütlenin yanması için iyileştirme uygulamalarının ekonomikliğini değerlendirmek de mümkün olmuştur (De ve Assadi, 2009).

## **1.2 Tezin Amacı**

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin, elektrik enerjisi ihtiyacı da günden güne artmaktadır. Kömür ve doğalgaz gibi sınırlı fosil yakıtlara dayalı enerji üretim tesisleri, yine Türkiye gibi ülkelerde yerinde tedarik edilemeyip ithalat gerektirdiğinden maliyeti oldukça yüksektir ve gittikçe artan bir eğilim içerisindedir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak dizayn edilen enerji üretim tesislerinin önemi günden güne artmaktadır. Biyokütle gibi, atık malzemelerin kullanılarak değerlendirildiği ve atmosfere zehirli gaz salınımının azaltıldığı tesislerin, enerji arzındaki yerinin artırılması gerekmektedir. Özellikle, kojenerasyon teknolojisi kullanılarak tasarlanan tesisler, elektrik enerjisi üretimine olanak sağlamakla birlikte, tesislerde ihtiyaç duyulan ısı enerjisini de tedarik edebildiğinden, söz konusu tesislerin hem verimli hem de ekonomik olarak çalışmasına olanak sağladığının gösterilmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte, söz konusu tesislere kurutucu ünitelerinin eklenmesinin, tesisin verimliliğini daha da artırdığı gösterilmek istenmiştir.



### 1.3 Hipotez

Enerji arz güvenliğini sağlamak üzere, dış bağımlılığı azaltmak ve enerji tedarikinde yakıt çeşitliliğini artırmak gerekmektedir. Ayrıca, Avrupa Birliğine uyum süreci içerisinde karbon emisyonlarını azaltmaya ilişkin önlemler de alınması gerekmektedir. Rüzgâr ve güneş gibi mevsimsel şartlara göre daha değişken olan yenilenebilir enerji kaynakları yerine, işletmelerin kendi bünyesindeki ya da yakın mesafeden tedarik edilebilen atıkların kullanıldığı kojenerasyon tesislerinin artması, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtların kullanımını önemli ölçüde azaltabilir.

Biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerinin tasarımının, fosil yakıtlı kojenerasyon tesisleri ile benzer olduğu ve günümüz teknolojik gelişmeleri ile birlikte kolaylıkla dizayn edilebileceği gösterilmiştir. Biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerinin, düşük verimlilik oranları ile çalışması gibi enerji yatırımcılarını tedirgin eden hususların sebepleri tespit edilmiştir. Söz konusu tesislere, kurutucu ünitesi ilavesi ile verimliliklerinin artırılacağı araştırılmıştır.

Ayrıca ülkemizde, çoğunlukla ekonomik olmayan bir yöntem olan biyokütlenin doğrudan yakılarak değerlendirilmesi yoluna gidilmektedir. Oysa ticari olmayan klasik biyokütle enerji üretiminin giderek azaltılması ve modern biyokütle enerji üretimine başlanarak bu üretimin artırılması gerekmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde dünya genelinde daha çok biyokütlenin kömürün yanında ikincil yakıt olarak kullanıldığı birlikte yakma sistemlerinin olduğu görülmektedir. Bu şekilde biyokütlenin bazı dezavantajları ortadan kaldırılmaktadır. Örneğin; biyokütle içerisindeki yüksek nem miktarı yanma verimini düşürmektedir. Bu durumda biyokütlenin kurutulması gerekir.

Literatür çalışmalarında biyokütlenin kömür ile birlikte kullanılması durumu için birçok karışım oranı mevcuttur.

Fernando, kömür yakıtlı santrallerde biyokütlenin yüksek oranlarda kullanımının kirlenme, korozyon ve kül oluşumuna etkisini incelemiştir. Kömür-biyokütle birlikte yakma sisteminde maximum karışım oranının %50 olması gerektiğini, daha

yüksek oranların kazanda korozyona ve kirliliğe neden olduğunu bildirmiştir (Fernando, 2012).

Demirbaş, yaptığı çalışmada biyokütlenin kömür ile %20'lere kadar karıştırılması durumunun kazan verimini artırdığı, yakıt maliyetini düşürdüğü, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> gibi zararlı gaz emisyonlarını azalttığını belirtmiştir (Demirbaş, 2003).

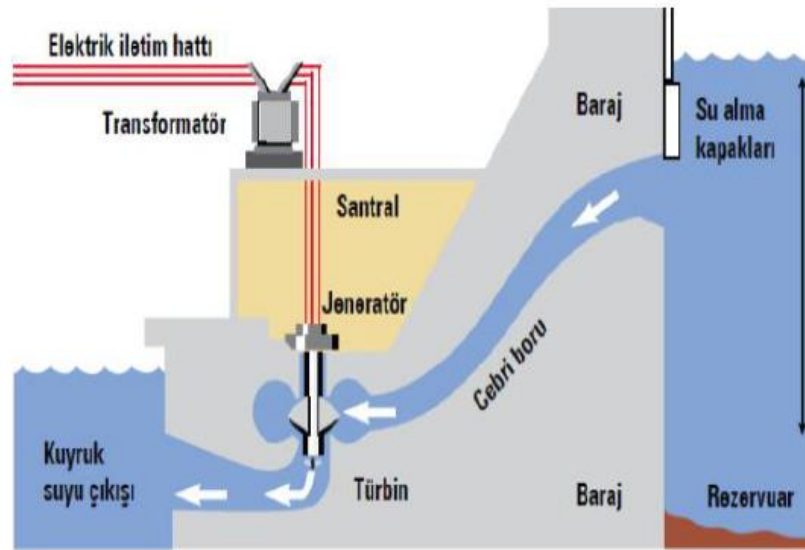
Chao vd., laboratuvar ölçekli pulverize yakıt yakan yanma reaktöründe biyokütle ile kömürün yakılmasının parçacıklı madde ve polisilik aromatic hidrokarbon emisyonu üzerine etkisini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Elde edilen birim enerji başına minimum kirletici emisyonu açısından %10 ile %30 arası karışım oranındaki çalışma aralığının optimum olduğunu bulmuşlardır (Chao vd., 2008)

Literatürdeki çalışmaları değerlendirerek yapılan tez çalışmasında biyokütlenin kömür ile birlikte %30'lara kadar karıştırılarak yakılması durumunda yanma veriminde önemli düşüşlerin olmadığı görülmüştür. Biyokütlenin (çam talaşının) yüzdesel olarak 5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında linyit ile kazanda yakılması durumu için kazan enerji ve ekserji verimleri hesaplanmış ve grafik halinde verilmiştir. Hesaplamalar sonucunda kazan verimlerinde çok az oranda düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Ülkemizde de linyit ile odun talaşının kazanlarda birlikte yakılarak kullanılması yöntemiyle birçok biyokütle atıkları değerlendirilebilir. Bu şekilde hem tarım desteklenmiş hem de organik atıklar değerlendirilmiş olur. Kömür ile çalışan mevcut enerji santrallerine yapılacak ilave ile biyokütle kolaylıkla kullanılmaya başlanabilir. Dolayısıyla biyokütle-kömür karışımı kojenerasyon enerji santralleri diğer ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de kolaylıkla yapılabilir.

## 2.1 Hidroelektrik Enerji

Hidroelektrik enerji, yeryüzünde devamlı surette ve döngüsel olarak çeşitli fazlarda bulunan suyun enerjisi ile elde edilmektedir. Havzalarda biriktirilen suyun yüksek bir noktadan akıtılması neticesinde türbinlerin döndürülmesi sağlanır ve akabinde türbinlerle senkronize çalışan jeneratörlerde elektrik enerjisi üretilir. Suyun düşüş hızı ve debisi türbinlerin dönüş hızını doğrudan etkiler (Gupta, 2012). Hidroelektrik santralin işleyiş sistemi Şekil 2.1’de yer almaktadır.



**Şekil 2.1** Hidroelektrik santralin işleyiş sistemi (Hydroelectric power water use, 2017)

Hidroelektrik tesislerin çevreye olan olumsuz etkisi az olmakla birlikte; söz konusu tesisler için yapılan setler suyun debisini azaltarak erozyon ihtimalini düşürdüğünden, dolaylı olarak çevreye müspet etkilerinin de olduğu değerlendirilebilir.

Kurulum ve işletim maliyetinin diğer enerji üretim tesislerine oranla azlığı, zehirli gaz salınımının olmaması ve tarımsal faaliyetlerde sıklıkla kullanılması nedeniyle;

enerji üretiminde en sık kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı türü hidroelektrik enerjidir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (International Renewable Energy Agency, IRENA) 2019 yılı Yenilenebilir Enerji Kaynakları Raporu'na göre; 2018 yılı sonu itibarıyla, dünya çapındaki yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretiminde toplam kapasite 2.351 GW olup; bu miktardaki en büyük paya 1.172 GW kapasite ile hidroelektrik enerjiye dayalı tesisler sahiptir.

Dünya çapındaki hidroelektrik enerjiye dayalı elektrik üretim tesislerinde toplam kapasitenin %28'i Çin'e aittir. Çin'i sırasıyla %9 ile Brezilya, %7'lik dilimlerle Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Kanada takip etmektedir. Türkiye için ise bu oran %2,5'tur (IRENA, 2019a).

## **2.2 Güneş Enerjisi**

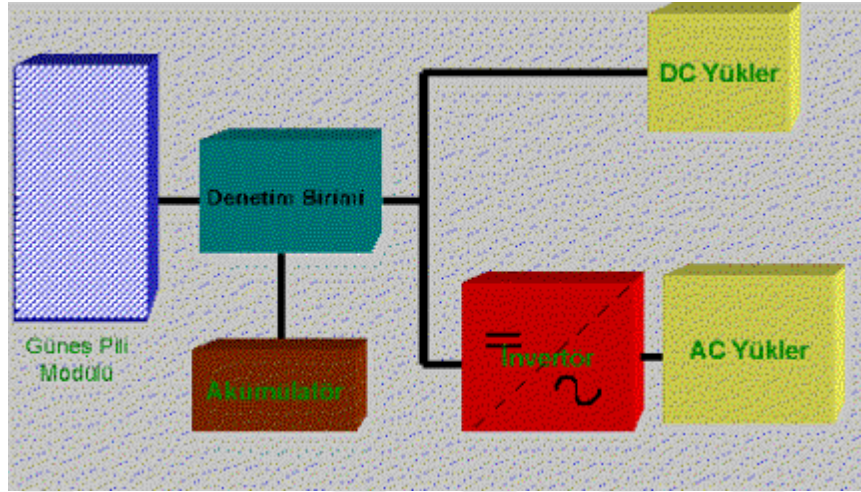
Yeryüzündeki en büyük enerji kaynağı olan güneşin enerjisinin temelinde, güneşin çekirdeğinde yer alan hidrojenin 15 milyon derece sıcaklıkta eriyerek helyuma dönüşmesi bulunmaktadır. Bir diğer deyişle; güneş enerjisi, nükleer füzyon ile güneşin çekirdeğinde ortaya çıkan ışın enerjisidir. Güneşin yüzeyindeki sıcaklık ortalama 5700 °C'dir. Güneşin yüzeyinde oluşan bu ışın uzaya dağılır ve bir kısmı dünya yüzeyine ulaşır ve dünya yüzeyine ulaşan bu kısmi ışın güneş enerjisine dayalı enerji üretim tesislerinde yakıt olarak kullanılır (Parker, 2004).

Yeryüzündeki mevcut en temiz enerji çeşidinin güneş enerjisi olduğu söylenebilir. Aynı zamanda, güneşten ortalama günlük olarak dünya enerji arzının 8 yılına eşit olan bir ışımanın dünyaya ulaşması; güneşin, sürekli devam eden ve en bol enerji kaynağı olduğunun ispatıdır (Göksu, 2008).

Güneş enerjisinden doğrudan ya da dolaylı olarak faydalanılabilir. Doğrudan faydalanma fotovoltaik piller (güneş pilleri) ile olurken; dolaylı faydalanma ısı güneş teknolojileri sayesinde olmaktadır.

Fotovoltaik piller güneş ışığını direkt olarak elektrik enerjisine çevirmektedir. Elektrik enerjisinin çevresel faktörlerden dolayı götürülmesinde zorluk çekilen yerleşim alanlarında (örneğin; yangın gözetleme kuleleri, petrol boru hatları, vericiler, küçük köy ve mezralar) kolayca uygulanabilmesi açısından tercih

edilmektedir. Şekil 2.2’de elektrik şebekesinden bağımsız olarak çalışabilen bir fotovoltaik pilin çalışma prensibi gösterilmektedir.



**Şekil 2.2** Şebekeden bağımsız çalışan fotovoltaik pilin çalışma prensibi (ETKB, 2016)

Dolaylı olarak güneş enerjisinden faydalanılan teknolojilerde ise; öncelikli olarak güneş enerjisinden ısı enerjisi elde edilmekte ve bu enerji direkt olarak veya elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Isıl güneş enerjisi teknolojileri çalışma sıcaklığına göre 3 gruba ayrılabilir;

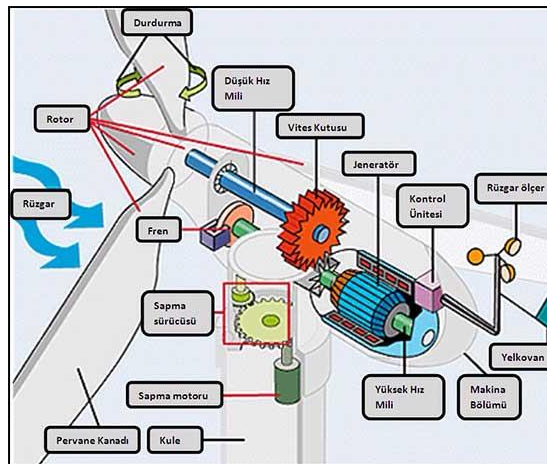
- Düşük sıcaklıktaki teknolojiler (çalışma sıcaklığı  $< 70^{\circ}\text{C}$ ): sıcak su tedarigi, havuz ısıtma sistemleri ve ortam ısıtmasında kullanılır.
- Orta sıcaklıktaki teknolojiler ( $70^{\circ}\text{C} < \text{çalışma sıcaklığı} < 200^{\circ}\text{C}$ ): sıklıkla kullanılan bir teknoloji olmayıp, endüstriyel alanda ve yemek üretiminde kullanılmaktadır.
- Yüksek sıcaklıktaki teknolojiler (çalışma sıcaklığı  $> 200^{\circ}\text{C}$ ): Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan teknolojidir. Daha yüksek sıcaklıklara yoğunlaştırıcı kolektörler ile ulaşılır. Güneş enerjisinin toplandığı düzlemsel kolektörler ve ısınan suyun toplandığı depo arasındaki bağlantı yalıtımlı borular ile sağlanmaktadır. Kontrol paneli ve pompa sistemi süreci tamamlayan diğer ekipmanlardır (Martin, 2017).

## 2.3 Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisinin bir formu olup, rüzgâr türbini vesilesiyle kinetik enerji mekanik güce çevrilir. Mekanik güç doğrudan kullanılabilirdiği gibi (örneğin, su pompaları ve yer değirmenlerinde), jeneratörler sayesinde elektrik enerjisinin oluşmasını da sağlar. Rüzgârdan elde edilen güç, rüzgâr türbininin boyutu ve uzunluğuna bağlıdır. Ayrıca, rüzgâr türbinin kule üzerine yerleştirilmesi, toplanan rüzgâr miktarını artırır. Türbinler üzerinde yer alan kanatlar ise rüzgârın yakalanmasını sağlar (Earnest, 2014).

Rüzgâr türbinleri yüzyıl öncesinden kullanılmaya başlanan bir teknolojiye sahiptir. 1830'lu yılların başında, Amerika Birleşik Devletleri'nde, ilk elektrik jeneratörünün tasarlanmasının akabinde rüzgâr enerjisinden elektrik üretilmeye başlanmıştır. Ancak, günümüzde kullanılan modern teknolojinin ilk adımları 1891 yılında Danimarka'da inşa edilen 22,8 metre uzunluğundaki yatay eksenli rüzgâr türbinleri ile atılmış olup; söz konusu tesis 1897 yılında işletmeye geçmiştir. (IRENA, 2019)

Rüzgâr enerjisinin kaynak kullanım ölçeği nedeniyle birçok rüzgâr türbini yan yana inşa edilir (Akgün, 2008). Bir rüzgâr türbininde kullanılan ana ekipmanlar; jeneratör, kule, hız dönüştürücüleri, birtakım elektrik-elektronik elemanlar ve pervane olarak sıralanabilir. Yatay rüzgâr türbinin diğer bileşenleri Şekil 2.3'te detaylı olarak gösterilmiştir, ayrıca söz konusu şekil türbinin çalışma prensibi hakkında da fikir vermektedir.



Şekil 2.3 Yatay rüzgâr türbini bileşenleri (AutoMOD Teknoloji, 2019)

Gelişen teknoloji imkânları doğrultusunda rüzgâr enerjisinin kurulum maliyeti azaldığından, yenilenebilir enerji kaynakları arasında tercih edilir bir noktaya gelmiştir. Ayrıca diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının yakıt olarak kullanıldığı tesislere göre nispeten daha basit bir teknolojiye sahiptir, kullanım ömrü dolan veya günümüze göre teknolojileri eskiyen türbinlerin sökülerek aynı alan içerisinde yenilerinin inşa edilmesi mümkündür. Diğer taraftan, rüzgâr enerjisine dayalı tesislerinin; kuş ölümlerine sebep olması, çalışması esnasında oluşan gürültü ve alıcılarda parazitlere neden olması gibi birtakım dezavantajları da vardır.

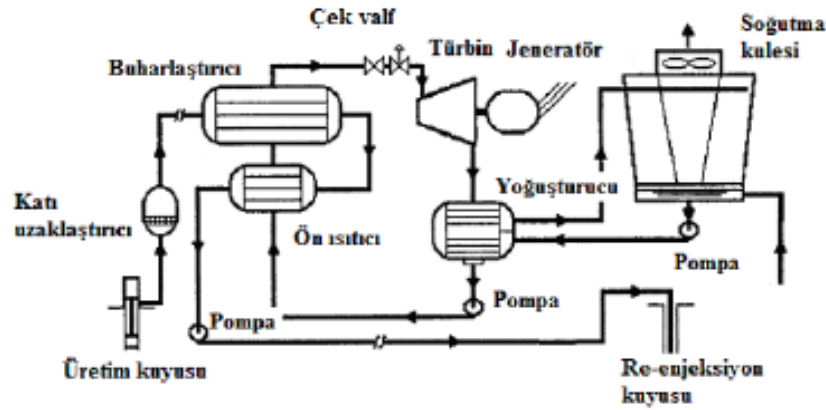
## **2.4 Jeotermal Enerji**

Jeotermal enerji, birçok ülkede binlerce yıldır ısınma ve yemek pişirme gibi temel ihtiyaçların karşılanması amacıyla kullanılmaktadır. Temelde, dünyanın iç ısısında türetilmiş bir enerji türüdür. Yer kabuğunun altında yer alan akışkanları içermektedir. Yeryüzünün binlerce kilometre altında ve hatta magma tabakasının da altında bulunur. Jeotermal enerji, sıcaklığı devamlı surette 20 dereceyi aşan ve çevresinde bulunan diğer yer altı sularına oranla çok miktarda mineral, tuz ve gaz ihtiva eden sıcak su ile buhardır. Sıcaklığı; 20 ila 70 °C arasındaki jeotermal akışkan düşük sıcaklıklı, 70 ila 150 °C arasındaki jeotermal akışkan orta sıcaklıklı ve 150°C'dan fazla olan jeotermal akışkan yüksek sıcaklıklı olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Elektrik üretiminde yakıt olarak kullanılan jeotermal akışkanlar yüksek sıcaklıklı olanlardır. Diğer gruplara dâhil olanlar ise, ısıtmacılıkta kullanılır (DPT, 1996).

Dünya çapında ilk olarak jeotermal enerjiye dayalı elektrik üretim tesisi, 1904 yılında İtalya'da inşa edilmiştir (Birleşik Krallık Yenilenebilir Enerji Web sitesi, 2015).

Kuru buhar, flaş ve binary olmak üzere üç çeşit jeotermal enerjiye dayalı üretim tesisi tipi vardır. Kuru buhar sistemi en eski yöntemdir ve yeraltından çıkarılan buhar doğrudan türbinlere gönderilir. Flaş tipindeki tesislerde; yer kabuğunun altındaki yüksek basınçlı sıcak suyun, soğutma sistemleri ile alçak basınçlı suya çevrilmesi neticesinde türbinlerin döndürülmesi sağlanır. Binary (ikili) tipindeki tesislerde ise; suyun, kendisinden daha düşük kaynama noktasındaki ikincil bir akışkanın içerisinde geçirilmesi neticesinde söz konusu akışkanın buharlaşması

sağlanır ve böylelikle türbinler çalıştırılır. Birçok jeotermal enerjiye dayalı üretim tesisi binary tipindedir ve ilerleyen teknolojik imkânlar çerçevesinde gelecekteki birçok tesisin bu tipte olacağı düşünülmektedir. Şekil 2.4'te Binary tipindeki basit bir elektrik üretim tesisinin elektrik üretim aşamaları gösterilmektedir (Kıvanç ve Serpen, 2011).



**Şekil 2.4** Binary tipindeki tesisin elektrik üretim süreci (Kıvanç ve Serpen, 2011)

## 2.5 Biyokütle Enerjisi

5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun'da; biyokütle; *“organik atıkların yanı sıra bitkisel yağ atıkları, tarımsal hasat artıkları dahil olmak üzere, tarım ve orman ürünlerinden ve bu ürünlerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen katı, sıvı ve gaz halindeki yakıtlar”* olarak tanımlanmaktadır. Bir diğer deyişle, biyokütle; bitkilerden ve hayvanlardan elde edilen organik materyallerdir. Biyokütller fotosentez yoluyla güneşten enerji depolarlar, bir biyokütle yandığında, biyokütlenin içerisinde yer alan kimyasal enerji açığa çıkar.

Enerji bitkinin içerisinde, karbonhidrat, hidrokarbon ve esterler olarak depolanır. Bitkinin içerisinde yer alan karbonhidratlar; şeker ve şekerin nişasta, selüloz, hemiselüloz gibi polimerleridir. Hidrokarbonlar; alkin hidrokarbon, izopren ve C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>'in polimerleri olan poliizoprenler (terpen) formunda bulunur. Esterler ise; hidrokarbonlardan çok daha farklı bir kimyasal yapıya sahip olan bitkisel yağlardır. (Da Rosa, 2015).



Enerji üretim tesislerinde kullanılan biyokütleler doğrudan yakılabildiği gibi, sıvı ya da gaz halinde yakıt haline getirilebilir.

Yapraklar, bitkinin ana fotosentez organları olduğu için, bitkinin diğer organlarına göre daha fazla protein ve mineral içerir. Dolayısıyla yapraklar, metan ve karbondioksit karışımı olarak; anaerobik sindirim metodu ile biyogaza dönüştürülebilir (Da Rosa, 2015).

Aşağıda biyokütleye ve kullanım alanlarına ilişkin olarak tablo 2.1’de birkaç örnek yer almaktadır:

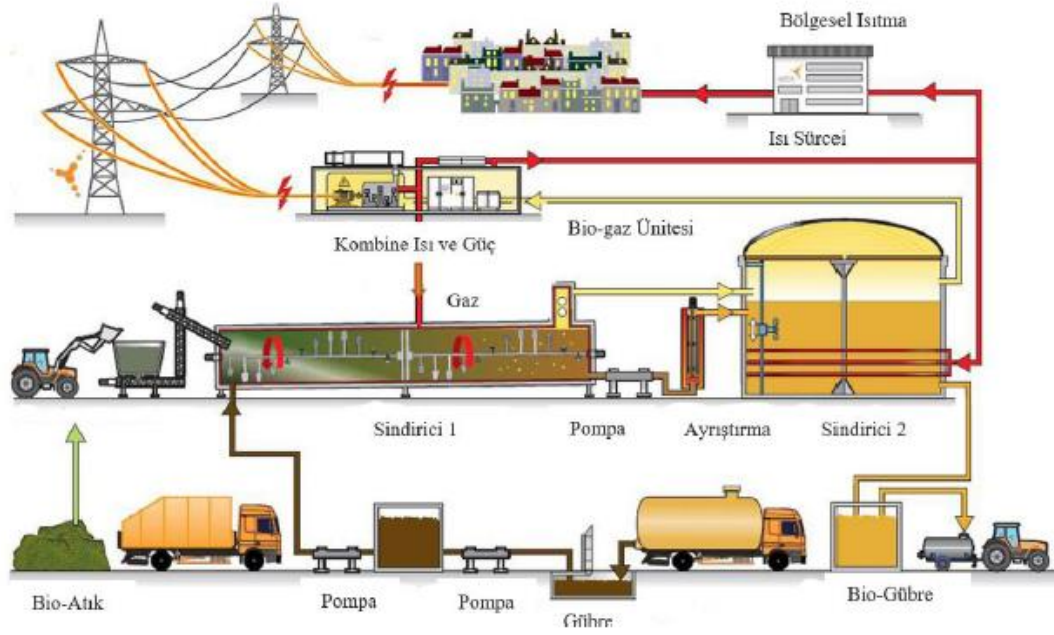
**Tablo 2.1** Biyokütle ve kullanım alanlarına ilişkin örnekler

Biyokütle türü	Form	Kullanım Alanları
Odun/işlenmiş odun	Katı	Bina ısıtılması Endüstriyel ısınmaya gereksinim duyan üretim süreci Elektrik enerjisi üretimi
Tarım artıkları	Katı/ sıvı	Yakıt
Yemek artıkları ve çöpler	Gaz	Elektrik enerjisi üretimi
Hayvan gübresi	Katı/gaz	Yakıt

Biyokütlenin kullanımı, “geleneksel” ve “modern” olarak ikiye ayrılabilir. Geleneksel biyokütlerde, ağaç/hayvan artıklarının yakılması neticesinde kimyasal enerji ortaya çıkar ve söz konusu enerji ısı enerjisine dönüştürülür. Günümüzde halen, ağaç kalıntıları ve hayvan gübresi, ısıtma ve pişirme gibi temel ihtiyaçların karşılanması amacıyla 2-4 milyar insan tarafından kullanılmaktadır. Dünyada, öncelikli enerji ihtiyacının %4-17’si biyokütleden sağlanırken, gelişmekte olan ülkelerde bu oran %30-40’ı, hatta bazılarında %90’ı bulmaktadır. Modern biyokütle ise, biyokütlenin bazı işlemlerle etanol, metan ve biodizel yakıtlarına dönüştürülmesi ile elde edilir (Kakaç, 2006).

Gübre artıklarından elde edilen biyogaz, %55-65 arasında metan, %35-45 arasında karbondioksit ve %1’den daha az nitrojen; tarımsal atıklardan elde edilen biyogaz, %60-70 arasında metan, %30-40 arasında karbondioksit ve %1’den daha az nitrojen; yemek artıklarında elde edilen biyogaz ise %45-55 arasında metan, %30-40 arasında karbondioksit ve %5-15 oranında nitrojen içerir (Jönsson vd., 2003).

Biyogazın üretim aşaması ve tüketim süreci Şekil 2.5'te ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Biyogaz üretim süreci (Bektaş ve Gülmez, 2016)

Dünyadaki toplam sürdürülebilir biyokütle enerji potansiyeli yaklaşık 100 EJ/a (odunsu biyokütle payı 41,6 EJ/a) ( $EJ=10^{18}$ ) olup; söz konusu değerler, toplam küresel enerji tüketiminin yaklaşık %30'una (odunsu biyokütle payı %12,5) tekabül eder. Kuzey Amerika, Latin Amerika, Afrika, Avrupa ve hatta Eski SSCB'de halen büyük oranda biyokütle potansiyellerinin mevcut olduğu bilinmektedir (Thrän ve Kaltschmitt, 2002).

Biyokütlenin doğrudan yakıldığı üretim tesislerine ilişkin bilgilere tezin ilerleyen bölümlerinde ayrıntılı olarak yer verilecektir.

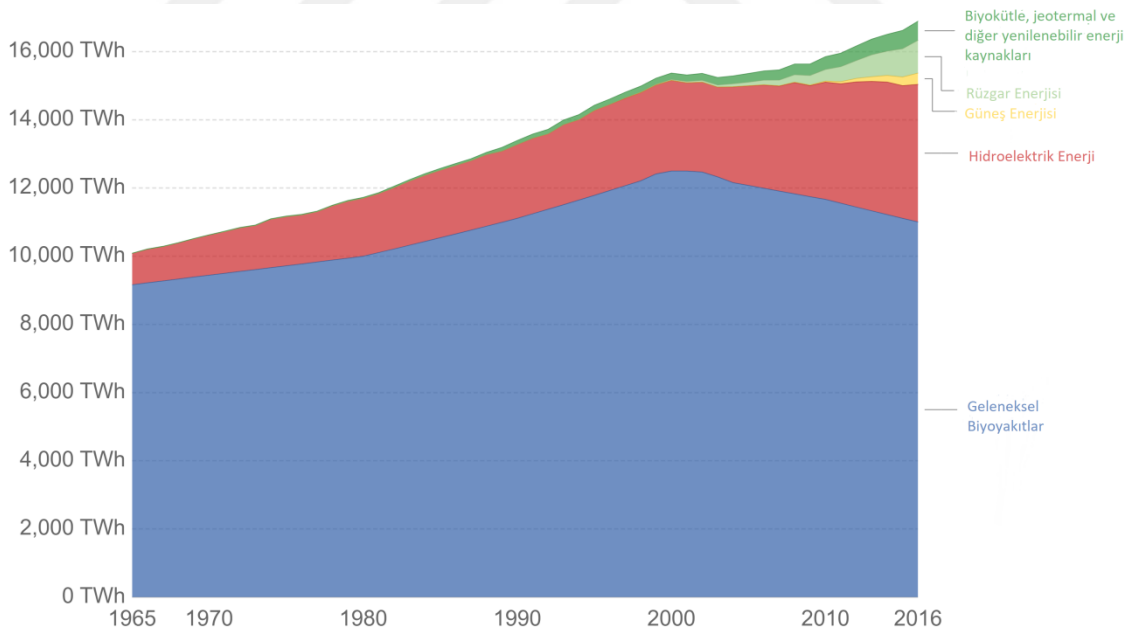
## 2.6 Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye/Dünya Enerji Piyasalarındaki Yeri ve Önemi

Yerel doğal zenginlikler ve temiz enerji olarak sınıflandırılan yenilenebilir enerji kaynaklarının, fosil yakıtların dışa bağımlılık ve doğaya zarar verme gibi olumsuz özelliklerine sahip olmadığından dolayı, dünya çapında önemi artmıştır ve artmaya devam eden bir eğilim içerisinde. Bilhassa, 20. yüzyılın sonlarına doğru çevre bilincinin öneminin artmasının akabinde fosil kaynakların ne denli doğaya zarar

vererek sera gazı emisyonlarına sebep olduğu anlaşılmış olup; yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim hız kazanmıştır.

Bu çerçevede; dünya çapındaki enerji politikaları, enerji arzına sınırsız bir enerji kaynağı olan yenilenebilir enerji kaynaklarının katkısını artıracak şekilde revize edilmiştir. Nitekim fosil yakıtlarda meydana gelen talep artışı neticesinde ortaya çıkan fiyat artışları ve sonlu bir enerji kaynağı olmasının da yenilenebilir enerji kaynaklarının teşvik edilmesi gerekliliğini ön plana çıkarmıştır.

Dünya’da en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı türü, geleneksel amaçlı kullanılan biyokütle tüketimini dikkate almazsak, 2017 yılı itibarıyla 16.893,54 TWh’lik toplam tüketimin 4036,07 TWh’ini kapsayan hidroelektrik enerjidir. Bunu sırasıyla; 959,53 TWh’lik tüketimle rüzgâr enerjisi, 333,05 TWh’lik tüketimle güneş enerjisi takip etmektedir. 561,67 TWh’lik tüketim ise diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, gelgit enerjisi, hidrojen enerjisi vb. türlere aittir. Söz konusu tüketimlerin yıllara göre dağılımı Şekil 2.6’da verilmiştir (Smil, 2017).

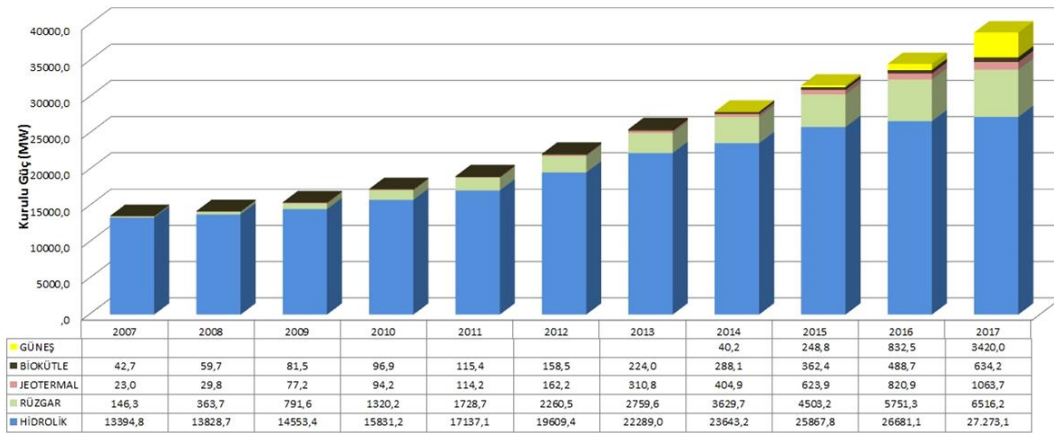


**Şekil 2.6** Dünya’daki yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllara göre tüketimi (Smil, 2017)

Türkiye’yi ele alacak olursak; T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın (Bakanlık) verilerine göre; “2018 yılında elektrik üretimimizin, %37,3’ü kömürden, %29,8’i

doğal gazdan, %19,8'i hidrolik enerjiden, %6,6'sı rüzgârdan, %2,6'sı güneşten, %2,5'i jeotermal enerjiden ve %1,4'ü diğer kaynaklardan" sağlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını yakıt olarak kullanan enerji üretim tesislerinin günümüz itibarıyla kurulu gücü toplamda 38.907,9 MW'tır. Bakanlığın Yenilenebilir Enerji Kaynakları Genel Müdürlüğü'nden elde edilen veriler doğrultusunda 2017 yılındaki yenilenebilir enerji kaynaklarının türlerine göre dağılımı gösterilmiştir (Şekil 2.7).

Şekil 2.7'den de anlaşılacağı üzere, yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimi arasındaki dağılım Dünya ile Türkiye arasında benzerlik göstermekte ve hidroelektrik enerjiye dayalı tesislerinin en büyük paya sahip olduğu görülmektedir. Toplam 38.907,2 MW'lık yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı tesislerin 6516,2 MW'lık kısmı hidroelektrik enerjiye ait olup; bunu sırasıyla 6516 MW ile rüzgâr enerjisi ve 3420 MW ile güneş enerjisi takip etmektedir.



**Şekil 2.7** Türkiye'deki yenilenebilir enerji yakıtlı tesislerin dağılımı (ETKB, 2017)

Ülkemizde de dünyada olduğu gibi, yenilenebilir enerji kaynakları tüketen elektrik üretimi tesisleri teşvik edilmektedir. Bu kapsamda; 5346 sayılı, "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun" çıkartılmıştır. Söz konusu Kanun çerçevesinde, ilgili tesislere "Yenilenebilir Enerji Kaynak Belgesi (YEK Belgesi)" verilmesi öngörülmüş ve YEK Belgesine sahip olan tesislere fiyat garantileri ile birtakım mali muafiyetler getirilmiştir.

## Kojenerasyon Sistemi ile Enerji Üretimi

### 3.1 Kojenerasyon Sistemi Hakkında Genel Bilgiler

Kojenerasyon sistemi enerji verimliliğini artıran bir sistem olup, elektrik üretimi yapılırken diğer yandan açığa çıkan ısı ile kullanışlı bir termal enerji elde edilir. Örneğin, açığa çıkan buhar veya sıcak su, ortam ısıtmasında/soğutmasında ve endüstriyel süreçlerde kullanılabilir.

Kojenerasyon sistemi, bir ünite olarak mevcut yerleşkenin içerisine inşa edilebileceği gibi, tek başına enerji üretim tesisi olarak da kurulabilir. Ancak tipik kullanım yerleri hem elektrik hem de ısı ihtiyacını karşılamak üzere hâlihazırda bulunan alanlardır. Örneğin bu alanlar; ticari binalar olabileceği gibi, meskenler, enstitüler, okullar, hastaneler ve çoğunlukla fabrikalardır. Enerji üretimi esnasında açığa çıkan enerjinin üçte ikisinin atmosferde kaybolduğu düşünüldüğünde, kojenerasyon sistemlerinin, verimliliği artırmak adına son derece faydalı ve kullanışlı bir elektrik üretim süreci olduğu ortaya çıkmaktadır. Ekonomik olarak alternatiflerinin yokluğundan dolayı özellikle 1900'lü yılların başında Amerika Birleşik Devletleri'nde, sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır (Askarov, 2010). Günümüzde ise, ekonomik avantajlarından dolayı birçok işletme kojenerasyon sistemlerine rağbet etmektedir.

#### 3.1.1 Temel Bileşenleri ve Konfigürasyonları

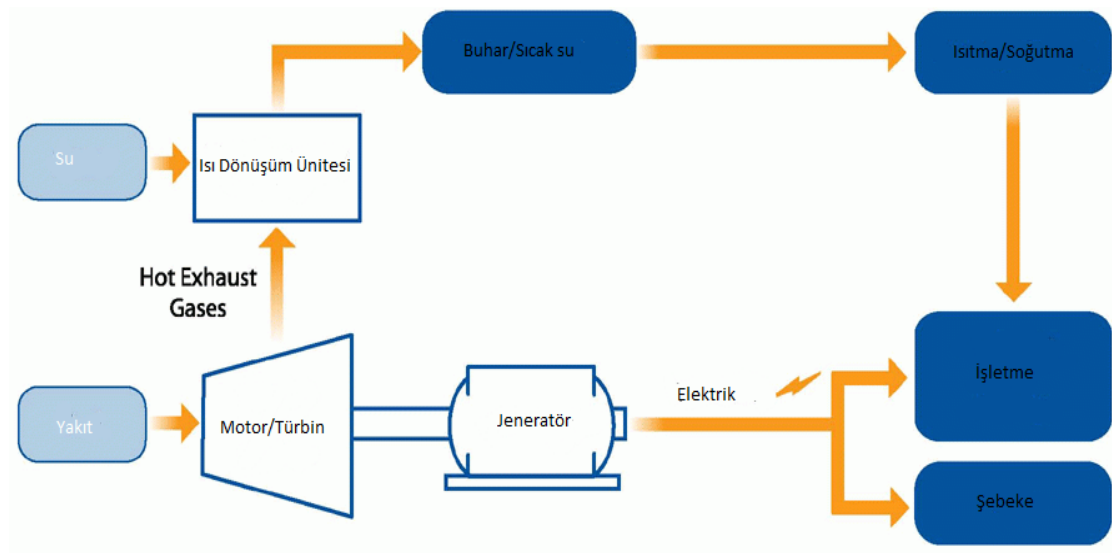
Kojenerasyon sistemleri, aşağıda yer alan ekipmanlardan bir ya da birkaçına sahiptir:

- Buhar jeneratörü veya kazanı
- Gaz türbini jeneratörü
- Buhar türbini jeneratörü
- Dizel motorlu jeneratör
- Isı dönüşümlü buhar jeneratörü

Ekipmanlardan hangi/hangilerine sahip olunduğu, kojenerasyon sisteminin konfigürasyonunu belirler (Ballegooyen, t.y.). Yaygın olarak kullanılan konfigürasyonlar ise;

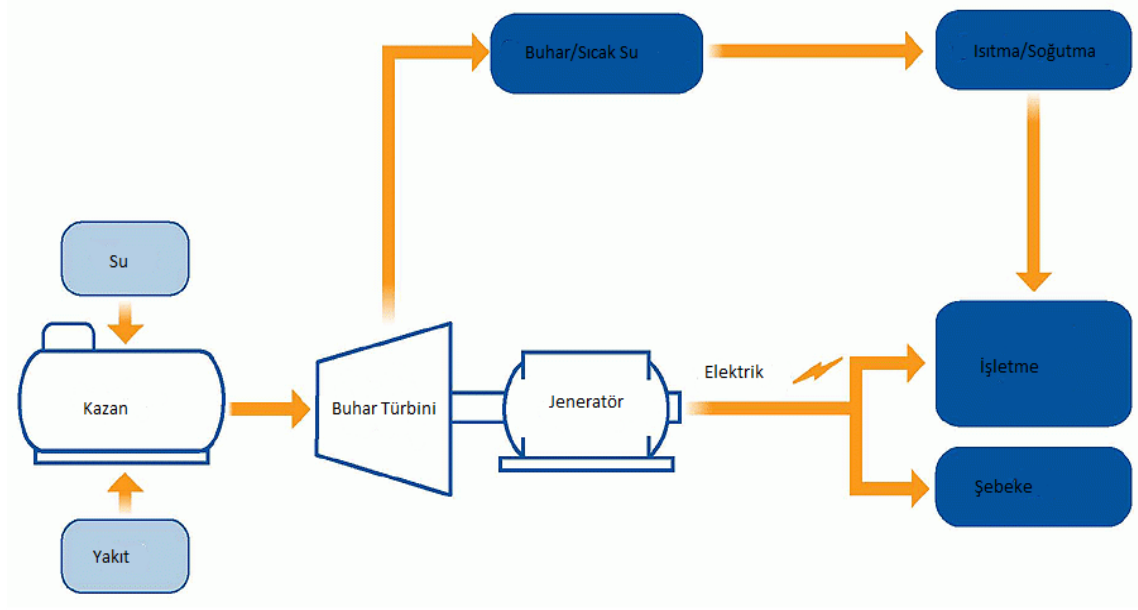
- Türbin veya motor ile birlikte ısı dönüşümlü buhar jeneratörü (“Topping cycle” olarak da adlandırılır.)
  - Buhar türbini ile birlikte buhar kazanı (“Bottoming cycle” olarak da adlandırılır.)
- olup Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir.

Topping cycle tipindeki konfigürasyonlarda türbin veya motor kullanılarak elektrik veya mekanik enerji açığa çıkartılır. Açığa çıkan enerji şebekeye veya işletmeye sevk edilir. Açığa çıkan ısı ise sıcak su, ortam ısıtma/soğutması için kullanılır (Otis, 2015).



**Şekil 3.1** Topping cycle tipindeki kojenerasyon konfigürasyonu (ABD Enerji Bakanlığı Departmanı, 2017)

Bottoming cycle tipindeki konfigürasyonlarda ise; yakıt ilk başta yüksek sıcaklıktaki ısı bir endüstriyel sürece tabi tutulur. Geriye kalan kısmi ısı ise atık ısı kazanına/ buhar türbine sevk edilerek enerji üretiminde kullanılır. Üretilen enerji şebekeye aktarılır veya işletme kendi bünyesinde kullanır (Otis, 2015).



**Şekil 3.2** Bottoming cycle tipindeki kojenerasyon konfigürasyonu (ABD Enerji Bakanlığı Departmanı, 2017)

### 3.1.2 Kojenerasyon Sisteminin Tipik Uygulamaları

Birden çok bileşenden oluşan kojenerasyon sistemleri, genellikle enerjiyi tedarik eden ünitelerine göre isimlendirilirler. Kojenerasyon teknolojileri büyük oranda 5'e ayrılır:

1. İçten yanmalı (Pistonlu) motorlar
2. Buhar türbinleri
3. Gaz türbinleri
4. Mikrotürbinler
5. Yakıt hücreleri

Bütün teknolojilerin temelinde kimyasal yakıtı elektrik enerjisine dönüştürmek yatar. Yakıttan tedarik edilen enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülemeyen kısmı ısı olarak açığa çıkar. Yakıt hücreleri haricindeki diğer teknolojiler, ısı motorlarının bir çeşidi olarak sınıflandırılabilir. Isı motorları, yakıtı yakar ve açığa çıkan ısının bir kısmı elektrik üretiminde kullanılırken; kalan kısmı sürece yine dâhil olur. Yakıt hücrelerinde ise; yakıttaki enerji elektrokimyasal metotla elektriğe dönüştürülür. Ancak, söz konusu teknolojide, ısı üreten dönüşüm sürecinin verim azlığı mevcuttur (EPA, 2017).

Tablo 3.1’de yukarıda bahsedilen kojenerasyon teknolojilerinin kapasite ve verimlilik aralığı ile söz konusu teknolojilerden elde edilebilecek maksimum verim görülmektedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere pistonlu motor teknolojisinde maksimum verim %95 ile en fazla orana sahipken; en büyük kapasitede tesis gaz türbinleri ile inşa edilebilir. Keza aynı şekilde, kapasite aralığı en fazla olan teknoloji türü de yine gaz türbinleridir.

**Tablo 3.1** Kojenerasyon teknolojilerinin kapasite aralığı ve verimlilik analizi (Beith, 2011)

Kojenerasyon Teknolojisi	Kapasite aralığı	Verimlilik aralığı (%)	Maksimum verim (%)
Pistonlu motorlar	5 kW- 10 MW	25-40	95
Buhar türbinleri	500 kW- 100 MW	15-40	75
Gaz türbinleri	2 MW- 500 MW	20-45	80
Mikrotürbinler	30 kW- 250 kW	25-30	75
Yakıt hücreleri	5 kW- 1 MW	30-40	75

### 3.1.2.1 İçten Yanmalı (Pistonlu) Motorlar

Her ne kadar diğer tüm teknolojilere oranla daha fazla tercih edilse de düşük kapasiteli olduklarından toplam kurulu güçlerdeki oranı azdır. Söz konusu teknoloji, otomobillerde, kamyonlarda, trenlerde, acil güç sistemlerinde, taşınabilir güç sistemlerinde, çiftlik ve bahçe ekipmanlarında yaygın olarak kullanılır. 100 yıldan uzun süredir kullanılan pistonlu motorlar çok küçük boyutlarda olabileceği gibi, 18.000 haneye güç tedarik edecek büyüklükte de yapılabilir. Yüksek üretim seviyeleri sayesinde, pistonlu motorlar, düşük maliyetli güvenilir bir seçenektir. Son 30 yılda teknolojik gelişmeler neticesinde; pistonlu motorların hem verimliliği artırılmış hem de karbon emisyon miktarları düşürülmüştür. Pistonlu motorlardan açığa çıkan ısının karakteristiği, sıcak su üretimi için idealdir (EPA, 2017).

### 3.1.2.2 Buhar Türbinleri

Günümüzde çoğunlukla katı yakıtlı kazan, endüstriyel atık ısı veya gaz türbinlerinde tedarik edilen ısı (kombine çevrim teknolojilerinde) sistemlerinde kullanılır. Buhar türbinleri, talep edilen yapıya göre ve tek kademeli geri basınç veya yoğuşmalı türbinlerden yüksek güç aralıkları için tasarlanan karmaşık yapıdaki çok aşamalı türbinlere kadar olan performans spesifikasyonlarına göre geniş bir aralıkta dizayn



edilebilirler. Endüstriyel uygulamalarda, güvenilirlik ve maliyet gibi nedenlerden dolayı daha basit yapıda tasarlanırlar (EPA, 2017).

### **3.1.2.3 Gaz Türbinleri**

Jet uçaklarında ve birçok aeroderivatif gaz türbinlerinde kullanılan teknolojinin aynısına sahiptir. İlk uygulamaları, aynı motorların çeşitli versiyonlarıdır. Gaz türbinleri de geniş aralıklarda dizayn edilebilir olup; mikrotürbinlerden yapılabildiği gibi yüksek kapasiteli merkezi enerji üretiminde de kullanılabilir. En ekonomik uygulama aralığı, 5 MW'tan başlayıp yüzlerce MW'a kadar ulaşmaktadır. Türbinde açığa çıkan yüksek sıcaklıktaki ısı, yüksek basınçtaki buhar üretimini sağlar ve bu durum gaz türbinini, endüstriyel üretimde, daha tercih edilir bir noktaya taşır (EPA, 2017).

### **3.1.2.4 Mikrotürbinler**

Daha öncede belirtildiği üzere çok küçük gaz türbinleridir. Son 30 yıl içerisinde hem sabit hem de taşınabilir güç kaynakları olacak şekilde geliştirilmiştir. Mikrotürbinlerin temeli, dizel motorların turboşarj tasarımındaki, motorun giriş havasını sıkıştırarak motor egzoz sıcaklığından kaynaklı enerjiyi elde etmek için kullanılan teknolojiye dayanmaktadır. Mikrotürbinler temiz yanan, mekanik olarak basit ve kompakt bir yapıya sahiptir. 1900'lü yıllardan beri gelişim gösteren ve rekabet oranı yüksek olan bu teknoloji, tek bir türbin sistemi ile 250 kW'lık kapasiteye ulaşabildiği gibi, birçok türbinden oluşan sistemleri 1.000 kW kapasiteye kadar çıkabilmektedir (EPA, 2017).

### **3.1.2.5 Yakıt Hücreleri**

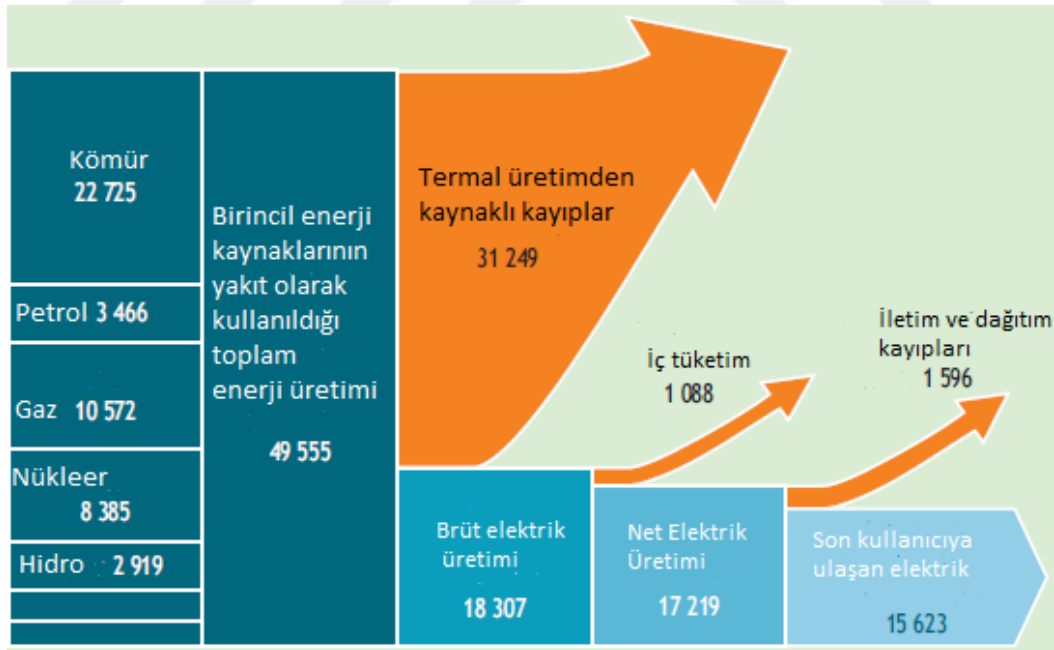
Hidrojenin kimyasal enerjisini suya ve elektriğe dönüştürmek için elektrokimyasal veya pil benzeri bir yapı kullanır. Kojenerasyon uygulamalarında, ısı genellikle sıcak su veya düşük basınçlı buhar olarak geri kazanılır. Isının kalitesi, yakıt hücrelerinin tipiyle ve işlem sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Yakıt hücrelerinin kullandığı hidrojen, doğalgazdan, hava gazından, metanolden ve diğer hidrokarbon içeren yakıtlardan tedarik edilir. Yakıt hücreleri tabii olduğu elektrokimyasal sürece göre sınıflandırılırlar. Yakıt hücrelerinin maliyeti, düşük hacimli özel üretim metotları nedeniyle fazla olsa da düşük karbon emisyonu, sessiz çalışması ve piyasa

sübvansiyonları gibi birtakım sebeplerden dolayı söz konusu teknoloji talep görmektedir (EPA, 2017).

### 3.1.3 Kojenerasyon Sisteminin Ekonomik ve Çevresel Faydaları

Güvenilir ve uygun fiyatlı enerji kaynakları ekonomik istikrar ve kalkınma için temeldir. Enerji arzının talebi karşılamaması; enerji fiyatlarında artış, iklim değişikliği tehdidi ve enerji güvenliğinde yıkıma sebebiyet verebilir. Birincil enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması, söz konusu olumsuz etkilerin önüne geçer. Kojenerasyon sistemleri bu amaca ulaşmada kanıtlanmış bir teknoloji sunar.

Fosil yakıtlardan enerji üretmede verimliliğin dünya ortalaması yıllardır %35-37 aralığında bulunmaktadır. Günümüz teknolojik imkânları ile bu oran %45'lere çıkarılmak istense de bu tam olarak başarılabilmiş değildir. Kojenerasyon sistemlerinde ise, kullanılan yakıtın %75-80'i ve hatta daha verimli tesislerde %90'ı kullanışlı bir enerjiye dönüştürülür. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2008 yılı raporuna göre, aşağıda yer alan Şekil 3.3'ten de anlaşılacağı üzere geleneksel yöntemlerle üretilen enerjinin (TWh) üçte ikisi kayba uğrayarak; enerji üretimin maliyetini düşürmeyi ve karbon emisyonu azaltımını olumsuz etkiler.



Şekil 3.3 Dünya elektrik üretimindeki enerji (TWh) akışı (IEA, 2008)

Kojenerasyon sistemleri, sadece elektrik enerjisi üretmekle kalmayıp, kullanışlı bir ısı enerjisi de ürettiğinden dolayı sistemin toplam verimliliğini artırmada önemli rol oynar. Böylelikle, yakıtın daha verimli kullanılması, aynı miktardaki enerji talebinin daha az yakıt ile tedarik edilebilmesini sağlar. Bu çerçevede, Kojenerasyon sistemlerinin düşük karbon enerjili çözümler olduğu söylenebilir.

IEA'nın 2008 ve 2009 yılı raporlarında yer alan bilgiler doğrultusunda; kojenerasyon sistemlerinin, dünya enerji politikalarına yön verenler ve enerji yatırımcıları tarafından önemsendiği ortaya konmaktadır. Kojenerasyon sistemlerinin geniş aralıkta enerji tedariki sağlamasının yanında çevresel ve ekonomik faydaları şunlardır:

- Artan enerji verimliliği oranları,
- Karbondioksit ve diğer zehirli gaz salınımı oranını azaltması,
- İthal edilen yakıtla bağımlılığın azalmasıyla artan enerji güvenliği,
- Son kullanıcı için maliyet tasarrufu,
- İletim ve dağıtım hatlarına bağlantı mecburiyetini azaltması,
- Yerel enerji kaynaklarının kullanımına olanak sağlaması (Biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji gibi),
- Düşük karbonlu geleceğe olanak sağlaması,

olarak sıralanabilir (IEA, 2008-2009-2014).

## **3.2 Kojenerasyon Sistemlerinin Verimliliğinin Hesaplanma Metotları**

Her kojenerasyon tesisi, atıl kalacak ısının yeniden sisteme kazandırılmasına olanak sağlar. Bu çerçevede, yakıttan elde edilen verimlilik artar. Kojenerasyon sistemlerinin verimliliği hesaplanırken genel itibarıyla iki yöntem kullanılır. Söz konusu yöntemler; *toplam sistem verimliliği* ve *efektif elektrik verimliliği*dir.

### **3.2.1 Sistem Verimliliğinde Kullanılan Terimler**

**Toplam yakıt enerjisi girişi ( $Q_{fuel}$ ):** Toplam yakıt girişinin ısı değerini ifade eder. Toplam enerji girişi, kojenerasyon sistemi tarafından kullanılan tüm yakıtların

toplamıdır. Toplam enerji girişi genellikle, tüketilen yakıt miktarı ile yakıtın ısıl değerinin çarpılmasıyla hesaplanır.

**Net kullanılabilir elektrik çıkışı ( $W_e$ ):** Jeneratörün brüt elektrik çıkışından parazitik elektrik kayıplarının çıkartılmasıyla elde edilir. Bir başka deyişle; net kullanılabilir elektrik çıkışı, kojenerasyon sisteminden amaca hitap edecek şekilde üretilen enerjidir. Brüt elektrik çıkışı, jeneratör tarafından üretilen toplam elektriği; parazitik elektrik kayıpları, kojenerasyon sisteminin kendi bünyesinde (örneğin, doğalgazın türbinlerde yakıt olarak kullanımından önce sıkıştırılması için gereksinim duyulan elektrik gibi) tükettiği enerjiyi ifade eder.

**Net kullanılabilir ısı çıkışı ( $\sum Q_{th}$ ):** Kojenerasyon sisteminden çıkan brüt termal ısıdan, kullanılmayan ısının çıkartılmasıyla elde edilir. Bir başka deyişle, net kullanılabilir ısı, kojenerasyon sisteminden bir amaca hitap edecek şekilde üretilen ısıdır. Kojenerasyon sistemlerinin, saatte ortalama 10.000 pound buhar ürettiği bir senaryoda, bunun %90'nı ortam ısıtmasında ve kalan %10'u soğutma kulesinde kullanılır. Söz konusu senaryoda, sistemin net kullanılabilir ısı çıkışı; saatte 9.000 pounddur.

### 3.2.2 Toplam Sistem Verimliliği

Toplam sistem verimliliği; kojenerasyon tesislerinin verimliliğın, söz konusu işletmede diğer geleneksel yöntemlerle enerji üretildiği takdirde (örneğin şebekeden tedarik edilen elektrik ile birlikte kazanlarda üretilen ısı enerjisi) oluşan verimlilikle karşılaştırılmada kullanılır.

Bir kojenerasyon tesisinin toplam sistem verimliliği ( $\eta_{\eta_0}$ ); net kullanılabilir elektrik çıkışı ( $W_e$ ) ile net kullanılabilir ısı çıkışı ( $\sum Q_{th}$ ) toplamının, toplam yakıt enerjisi girişine ( $Q_{fuel}$ ) bölümü ile elde edilir. (Denklem 3.1)

$$\eta_{\eta_0} = \frac{W_e + \sum Q_{th}}{Q_{fuel}} \quad (3.1)$$

Kojenerasyon tesislerinin toplam sistem verimliliğının hesabı, tüketilen yakıtı bağı olarak, tesisten çıkan enerjiyi (elektrik ve ısı) değerlendirir. Kojenerasyon tesislerinin toplam verimliliği yakıt türüne göre %60-80 aralığındadır (ABD Çevre Koruma Ajansı, 2018).

### 3.2.3 Efektif Elektrik Verimliliği

Efektif elektrik verimliliği, kojenerasyon tesislerinde üretilen elektriğin, diğer enerji üretim tesislerinde üretilen elektrikle karşılaştırmak için kullanılmaktadır. Herhangi bir kojenerasyon tesisinde üretilen elektriğin, şebekeden geleneksel yöntemlerle tedarik edilen elektrik ile karşılaştırılması bu duruma örnektir.

Efektif elektrik verimliliği ( $\mathcal{E}_{ee}$ ) aşağıda yer alan denklem vasıtasıyla hesaplanır (Denklem 3.2). Söz konusu denklemde;  $W_e$  net kullanılabilir elektrik çıkışı,  $\sum Q_{th}$  kullanılabilir ısı çıkışı,  $Q_{fuel}$  toplam yakıt enerjisi girişi ve  $\alpha$  ise, kojenerasyon sistemi mevcut olmasaydı, geleneksel yöntemlerle üretilen kullanılabilir ısı enerjisinin verimliliğini ifade etmektedir.

$$\mathcal{E}_{ee} = \frac{W_e}{Q_{fuel} - \sum(Q_{th}/\alpha)} \quad (3.2)$$

Örneğin bir kojenerasyon sistemi, doğalgaz ile çalışıyor ve buhar üretiyorsa,  $\alpha$  geleneksel yapıdaki doğalgaz yakıtlı kazanının verimliliğine eşittir. Tipik bir kazanın verimliliği, doğalgaz yakıtlı kazanlarda %80, biyokütle yakıtlı kazanlarda %75 ve kömür yakıtlı kazanlarda %83'tür.

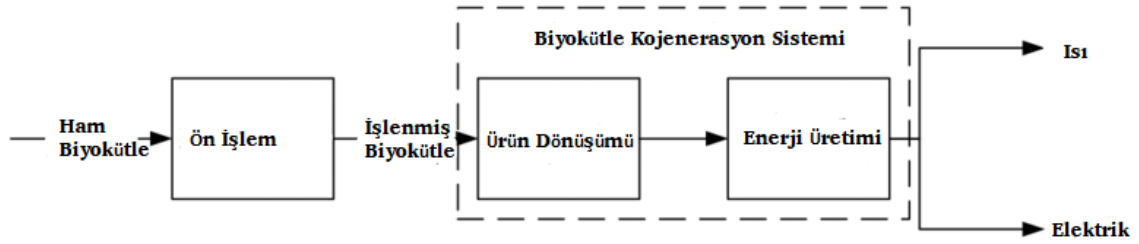
Efektif elektrik verimliliği; yanmalı türbin teknolojisi ile çalışan kojenerasyon tesislerinde %50-70 arasında, pistonlu motorlu teknoloji ile çalışan kojenerasyon tesislerinde ise %70-85 arasındadır (ABD Çevre Koruma Ajansı, 2018).

## Biyokütle Yakıtlı Kojenerasyon Tesislerinde Enerji Üretimi

### 4.1 Biyokütle Yakıtlı Kojenerasyon Tesisinin Yapısı

Biyokütleden enerji üretiminde en etkili yöntem kojenerasyon sistemidir. Kojenerasyon sistemi, biyokütleyi ısıya ve elektriğe dönüştürmenin en verimli yoludur (Gustavsson ve Johansson, 1994).

Biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesisleri genel olarak ön işlem ünitesi, ürünü dönüştüren ünite ve enerji üretimi ünitesinden oluşur. Endüstriyel alanların ve konutların elektrik ve ısı ihtiyacını karşılamak üzere dizayn edilen tesislerin temel yapısı Şekil 4.1’de yer almaktadır (Ling vd., 2018).



**Şekil 4.1** Biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesisinin temel çalışma prensibi (Ling vd., 2018)

#### 4.1.1 Ön İşlem Ünitesi

Ön işlem ünitesi, parçalayıcı ve kurutucu gibi işlemlerle biyokütlenin boyutunu ve nem oranını azaltmak suretiyle, yakıtın daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak üzere çalışan ünedir. Kazanlarda yakılan biyokütle, buhar türbinlerinin çalışması için gerekli olan buharı tedarik eder.

Biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerinde, biyokütlelere uygulanabilen ön işlem türleri hakkında detaylı olarak ilerleyen bölümlerde yer verilecektir.

#### 4.1.2 Biyokütle Dönüşüm Ünitesi

Elektrik ve ısı üretimi sağlayabilmek için biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesi gereklidir. Biyokütlerde var olan enerjinin elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülmesi iki şekilde sağlanır:

- Biyokütleyi doğrudan yakma yöntemi
- Biyokütleyi gazlaştırma yöntemi

**Doğrudan yakma yöntemi;** tesis biriktirme kazanları, akışkanlı yatak kazanları ve birlikte yakma gibi spesifik teknolojileri içerir.

Biyokütlenin kazanlarda yakılması neticesinde açığa çıkan yüksek basınçlı buhar, enerji üretimini tedarik eden buhar türbinini çalıştırmada kullanılır. Birçok uygulamada, türbinden çıkan orta sıcaklık ve basınçtaki buhar, ortam ısıtılması/soğutulması gibi ısı enerjisi gereksinimlerini karşılamak üzere kullanılır.

Birlikte yakma yönteminde ise biyokütle; mevcut tesisin kazanında bir miktar kömür ile karıştırılarak yakılır. Yeniden bir biyokütle yakıtlı tesis inşa etmenin maliyeti göz önünde bulundurulduğunda ekonomik bir yöntem olduğu söylenebilir. Nitekim mevcut birçok elektrik üretim tesisinin ekipmanları, çok fazla modifikasyona ihtiyaç duymadan, birlikte yakma yöntemi ile çalışan biyokütle yakıtlı tesislere dönüştürülebilir. Ayrıca bu yöntemle, kömür yakmadan dolayı açığa çıkan SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> vb. zehirli gazların atmosfere salınımını azaltma imkânı doğar.

**Biyokütlenin gazlaştırılması yöntemi;** katı biyokütlenin ısıtıldığı bir ortamda, uçucu gazlara dönüştürülmesiyle sağlanır. Açığa çıkan sentez gazı veya sentetik gaz temizlenip filtrelendikten sonra basit ya da kombine çevrim tipindeki gaz türbininde yakılır. Daha küçük tesislerde sentetik gaz, pistonlu motorlarda, mikro türbinlerde, Stirling motorlarında ya da yakıt hücrelerinde yakılabilir. Gazlaştırma teknolojisi, biyokütleden kalan yan ürünlerin kullanılabilirdiği kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisinde, elektrik ve ısı üretiminin yanı sıra kimyasal geri kazanımı da sağlayarak verimliliği artırıp yatırım maliyetini düşürdüğünden dolayı sıklıkla tercih edilir.

Biyokütle yakıtlı tesisler, genellikle 50 MW altında kapasiteye sahip olarak çalışabilirler. 100-1.000 MW arasında çalışabilen kömür yakıtlı tesislerle karşılaştırıldığında çalışma kapasitesinin düşük olduğu söylenebilir (EPA, 2017).

#### 4.1.3 Enerji Üretim Ünitesi

Biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerinin enerji üretim ünitesi, buhar türbinleri, gaz türbinleri (mikrotürbinler de bu gruba dâhildir), içten yanmalı (pistonlu) motorlar, yakıt hücreleri ve Stirling motor teknolojilerine dayanır.

Çeşitli kapasitelerdeki biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerin kullanıldığı uygulama alanları ve teknolojileri Tablo 4.1’ de yer almaktadır.

**Tablo 4.1** Çeşitli kapasitelerdeki biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerinin uygulama alanları ve teknolojileri (ETIP, 2017)

Güç Aralığı	Uygulama Alanı	Teknoloji
50 kW- 1 MW	Çok katlı konutlar Oteller Yerel ısıtma sistemleri	İçten yanmalı motorlar Buhar türbinleri
1- 10 MW	Hastaneler Ticari işletmeler Bölgesel ısıtma sistemleri	Buhar türbinleri Buhar motorları
10- 50 MW	Merkezi ısıtma sistemleri Sanayi siteleri	Buhar türbinleri
50- 300 MW	Merkezi ısıtma sistemleri Sanayi siteleri Enerji tesisleri	Buhar türbinlerinde biyokütlenin doğrudan veya fosil yakıtlarla birlikte yakılması

##### 4.1.3.1 Buhar Türbini Teknolojisi

Termodinamik bir makine olan buhar türbinleri, yüksek sıcaklık ve basınçtaki buharı kullanarak jeneratörü çalıştırıp elektrik üretme prensibi ile çalışır. Isının bir yan ürün olarak üretildiği gaz türbinleri ve pistonlu motorların aksine; buhar türbinlerinde, elektrik üretimi, ısı üretiminin yan ürünü olarak sağlanır.

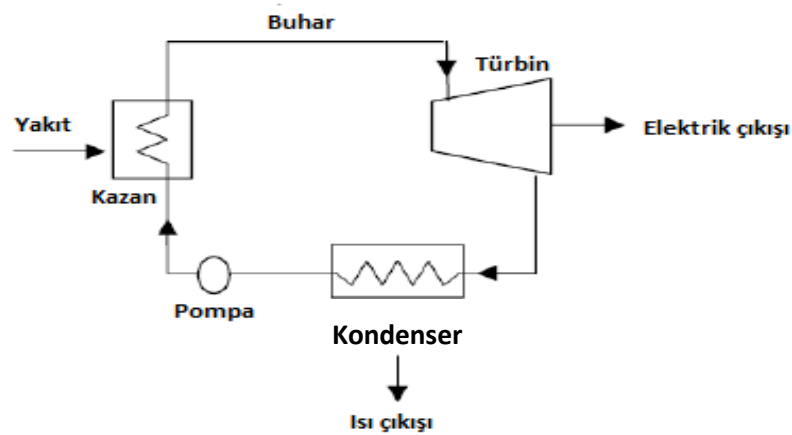
Buhar türbinleri ayrı bir ısı kaynağına ihtiyaç duyarak, yakıtı doğrudan elektrik enerjisine dönüştüremez. Kazandan türbine transfer edilen yüksek sıcaklıktaki buhar, türbini ve jeneratörü çalıştırmak için kullanılır. Buhar türbininin söz konusu



farklı fonksiyonu, doğalgazdan, tüm kömür tipleri, ağaç kalıntıları, tarımsal artıklar gibi katı yakıtlara kadar birçok yakıt türü ile çalışmasına olanak sağlar. Bütün kojenerasyon sistemi uygulamalarında, alçak basınçtaki buhar, türbinden çıkartılarak ya doğrudan ya da termal enerjinin diğer formları şeklinde kullanılır (EPA, 2017).

Buhar gücü döngüsü içeren her sistemde, temelde amaçlanan durum ya da ısı kaybı gibi nedenlerle istenilen miktarda ısı enerjisinin üretilmediği gibi durumları içeren, “kuramsal” veya “ideal” proseslerin olması muhtemeldir. Buhar kazanı için ideal proses; suyun buhar fazına geçtiği, tersinir sabit basınç altında yapılan işlem neticesinde, tersinir adyabatik buhar üretilmesi ile olur. Buhar türbini için ideal proses; buharın tersinir adyabatik olarak genişlemesidir. Kondenser için ideal proses; tersinir sabit basınç altındaki ısı gönderimi esnasında, doymuş sıvı oluşuncaya kadar buharın yoğuşmasıdır. Pompa için ideal proses; sıvının başlangıç basıncı altında tersinir adyabatik olarak sıkıştırılmasıdır. Dört sürecin her birinin ideal olduğu durumda, döngü de ideal olur ve “Rankine Çevrimi” olarak adlandırılır (Nag, 2014).

Şekil 4.2’de Rankine çevriminin termodinamik döngüsü gösterilmiştir. Rankine çevriminde sıvı haldeki su, kazanlarda yüksek basınçlı buhara dönüştürülür ve söz konusu buhar, türbini besler. Türbin kanatlarının dönmesini sağlayan buhar, jeneratörlerde elektrik üretilmesi için gerekli gücü tedarik eder. Kondenser ve pompa, türbinden çıkan buharı yakalayarak kazanı besler ve böylelikle döngü tamamlanmış olur.



**Şekil 4.2** Buhar türbini ile çalışan kojenerasyon döngüsü (EPA, 2017)

Birçok farklı türde buhar türbini olup, aşağıda örnekleri yer almaktadır:

- Yoğuşmalı buhar türbini (Şekil 4.2) enerji ihtiyacı duyan tesislerde kullanılır. Basınçlı buharın, düşük basınçta genişletilmesi neticesinde oluşan buhar/sıvı su karışımı kondensere yönlendirilir.
- Ekstraksiyon türbinleri; bina ısıtılması için kullanılır. Orta basınçtaki buharın bir kısmının mahfazalardan çıkartılması suretiyle çalışır.
- Geri basınçlı türbinler; tüm buhar akışını, döngü içerisinde ya da tesiste istenilen basınç altında tüketir.

Buhar türbinleri birçok alanda kullanılabilen ve yüzyıllardır kullanılan en eski teknolojiye sahip türbinlerdir. Buhar türbinlerinin teknolojisi, yüksek verimlilik ve düşük maliyet gibi özellikleriyle pistonlu motorların önüne geçmiştir. Buhar türbinlerinin kapasitesi, 50 MW'tan yüzlerce MW'a kadar ulaşmakta olup; bilhassa kojenerasyon tesislerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### 4.1.3.2 Gaz Türbini Teknolojisi

Gaz türbinleri, buhar türbinlerine alternatif bir teknoloji olarak geliştirilmiştir. İlk olarak, doğalgaz ve temiz sıvı yakıtlı tesislerde kullanılan söz konusu teknoloji; günümüzde biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerinde kullanılmaya başlanmıştır. Gaz türbini teknolojisi kullanan tesislerin, verimlilik oranları yüksek ve yatırım maliyetlerinin düşük olması enerji yatırımcılarının dikkatini çekmektedir. Bununla birlikte gaz türbinlerinde, çevrimin pik sıcaklık noktası, 1260 °C'lere ulaşabilmekte ve maksimum 540°C'lere kadar ulaşabilen buhar türbinlerine göre termodinamik avantajının fazla olduğu görülmektedir (Williams ve Larsson, 1996).

Gaz türbinlerinin çalışma kapasite aralığı 30 kW'dan (mikrotürbinlerde), 250 MW'a kadar ulaşabilmektedir.

Gaz türbinleri çeşitli konfigürasyonlarda çalışabilmekte olup; birkaç örnek aşağıda yer almaktadır:

- **Basit çevrim;** tek bir gaz türbinin enerji ürettiği çevrimlerdir.

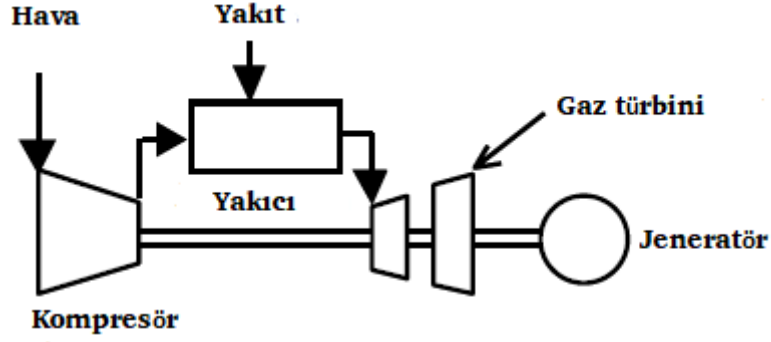
- **Kojenerasyon;** ısı eşanjörüne/ısı geri kazanımına sahip basit çevrimli gaz türbininde ısının türbinden, buhar ya da sıcak su gibi kullanışlı bir termal enerji olarak çıkartılması suretiyle çalışır.
- **Kombine çevrim;** yüksek sıcaklıktaki buhardan ısı üretimi ve buhar türbinlerine ilave güç tedarik etmek için kullanılır.

Basit çevrimli gaz türbinlerinde, oluşan sıcak gaz doğrudan prosese dâhil olur veya “ısı geri kazanımlı buhar jeneratörleri (HRGS)” yardımı ile açığa çıkan ısı buhar/sıcak su üretiminde kullanılır. Buhar türbini egzozu, oksijen yoğunluklu olduğundan; ateşleme yapılarak ilave yanma yapabilme imkânı doğar. HRGS’den bir buhar brülörü yardımı ile %90 ve üzerinde düşük ısı verimliliğiyle buhar üretimi tedarik edilebilir (Goldstein vd., 2003).

Gaz türbini teknolojilerinin çalışma prensibi, “Brayton çevrimi” olarak adlandırılan termodinamik çevrime dayanır. Brayton çevriminde, atmosferik hava sıkıştırılır, ısıtılır ve genişletilir. Kompresör tarafından tüketilmeyen ve türbinden tedarik edilen shaft gücü, elektrik enerjisi üretiminde kullanılır. Türbinden elde edilen ve kondenserde tüketilen enerji mutlak sıcaklıkta sisteme ulaşır. Gaz türbini teknolojilerinin veriminin yüksek olmasının altında yatan temel neden budur. Endüstriyel gaz türbini üreticileri, performans ve maliyet açısından en ekonomik makineyi tasarlamaya çalışmaktadır (Goldstein vd., 2003).

Günümüzde Brayton çevriminin birçok varyasyonu kullanılmaktadır. Yakıt tüketimi, basınçlı havanın rejeneratör kullanılarak türbin egzozundan gelen ısıyla ön ısıtılmasıyla azaltılabilir; kompresör çalışması düşürülebilir, giriş havasının önceden soğutulmasıyla net güç artırılabilir ve egzoz, kombine çevrim teknolojisinde ilave güç üretmek için kazandaki buharı ısıtmada kullanılabilir.

Basit çevrim tipindeki gaz türbininin bileşenleri Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



**Şekil 4.3** Basit çevrim konfigürasyonundaki gaz türbini bileşenleri (Goldstein vd., 2003)

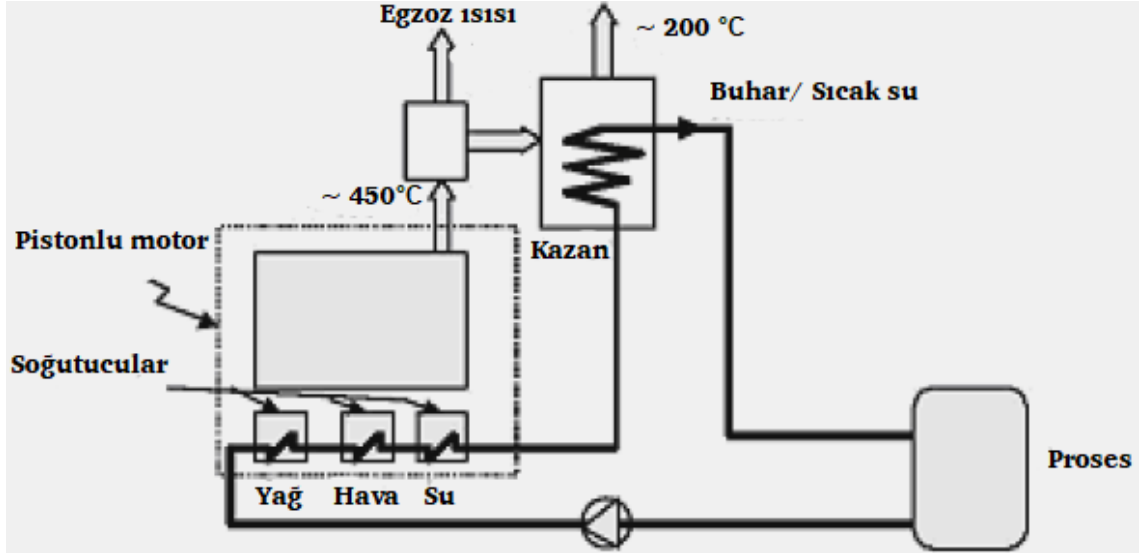
#### 4.1.3.3 İçten Yanmalı (Pistonlu) Motor Teknolojisi

Pistonlu motorlar, dizel motorlar gibi, ısı geri kazanımlı kazan ile buhar türbinine ısı tedarik ederek; elektrik ve ısı üretilmesini sağlar. Pistonlu motorlardan ısı geri kazanımı 4 kaynak vasıtasıyla olur. Söz konusu kaynaklar aşağıda sıralanmıştır:

- Egzoz gazları,
- Motor ceketini soğutmak için kullanılan su,
- Soğutma için kullanılan yağ,
- Soğutma için kullanılan turboşarj.

Sıralanan ilk iki kaynak kullanım kolaylığı açısından yaygın olarak tercih edilir. Çalışma verimliliğine bağlı olarak motordan kaynaklanan ısı kaybı, ortalama olarak egzoz gazının yarısına (400–500 °C) eşit olup; genellikle, buhar üretimi, seramik ve tuğla yapımı ile hayvan yemi kurutmada kullanılır. Motoru soğutmak için kullanılan sudaki ısı kaybı (yaklaşık %20-30 civarında bir kayıp), suyun ön ısıtma yöntemi ile ısıtılması veya sıcak hava üretimi ile azaltılabilir (Hindistan Yenilenebilir Enerji Bakanlığı, 2016).

Kaynaktan çıkan ısı, düşük basınçlı buhara ihtiyaç duyan bazı endüstriyel işlemlerde (cerrahi ekipmanlar ile giysileri sterilize etmek için hastanelerde ve yiyecek endüstrisinde) kullanılabilir.



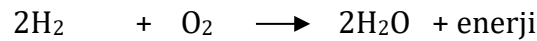
**Şekil 4.4** Pistonlu türbin ile çalışan biyokütle yakıtlı kojenerasyon sistemi  
(Hindistan Yenilenebilir Enerji Bakanlığı, 2016).

Pistonlu motor ile çalışan kojenerasyon tesislerinin verimliliği %95'e kadar ulaşmakta ve pistonlu motorlar birkaç kW'tan MW'lara ulaşan geniş bir kapasite aralığında çalışabilmektedir (Beith, 2011).

#### 4.1.3.4 Yakıt Hücreleri Teknolojisi

Yakıt hücreleri teknolojisinin en önemli özelliği herhangi bir skalada, hatta çok küçük ölçeklerde dahi, kojenerasyon sistemi ile enerji üretebilmesidir. Biyokütle, ihmal edilebilir düzeydeki ya da sıfır düzeyindeki SO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyonu ve yakıt hücrelerinin yüksek verimlilikte çalışabilme kabiliyeti (içten yanmalı motorların iki katı düzeyinde); bu iki teknolojinin kombinasyonunun temiz ve verimli bir elektrik üretim tesisi olmasına olanak sağlar (McIlveen-Wright vd., 2003).

Yakıt hücrelerinde yakıtın içerisindeki oksijen, elektrik üretimini tedarik ederken, yan ürün olarak kullanışlı ısı açığa çıkar. Aşağıda yer alan karşılaştırmalı denklemler yakıt hücresinin çalışma prensibini izah eder (Mekhilef vd., 2012).



Yakıt herhangi bir yanma işlemine tabi tutulmadığı için, yakıt hücreleri herhangi bir hareketli parçaya sahip olmayan ve sessiz çalışacak şekilde dizayn edilirler. Birçok

uygulama alanı olan yakıt hücreleri, kişisel bilgisayarlarda (50-100 Watt), taşıtlarda (50-85 Watt), elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilir (0,2-2 MW) (Mekhilef vd., 2012).

Diğer taraftan; maliyetinin fazla ve dayanıklılığın az olması, yakıt hücresi ticarileşmesinin önündeki en büyük zorluklardır. Yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlara göre çok daha pahalıya mal olduğu halde, kapasite bakımından benzer performansı uzun süreler boyunca sağlayamaz. Ayrıca, yakıt hücrelerinin boyutu, ağırlığı, ısı ve su yönetimi, uygulama aşamasında zorluğa sebebiyet verir.

Yakıt hücreleri, birçok bileşenden oluşur ama sistemin ana parçası pillerdir. Piller çok ince yapıdaki düz yakıt hücresinin katmanlar halinde yığın oluşturması ile meydana gelir. “Yakıt hücresi” bütün bir yığını ifade etmekte kullanılırken, “yakıt pili” tek bir katmanı ifade eder. Tek bir hücre küçük kapasitelerde elektrik üretse de, yüzlerce katmanın bir araya gelmesi ile ihtiyacı karşılayacak miktarda enerji üretimi sağlar. Tek bir yakıt hücresi, bir elektrolit ve iki katalizör kaplı elektrottan oluşur (gözenekli bir anot ve katot). Günümüz imkanları ile, yakıt hücrelerinin teknolojisinin geliştirilmesi halen devam etse de temel çalışma prensibi değişmemekte ve halen elektrolitler kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan 4 tip yakıt hücresi çeşidi olup; söz konusu hücreler:

- Fosforik asit yakıt hücresi (PAFC)
- Proton değişim zarına sahip yakıt hücresi (PEMFC)
- Eriyik halde karbonat kullanan yakıt hücresi (MCFC)
- Katı oksitli yakıt hücresi (SOFC)

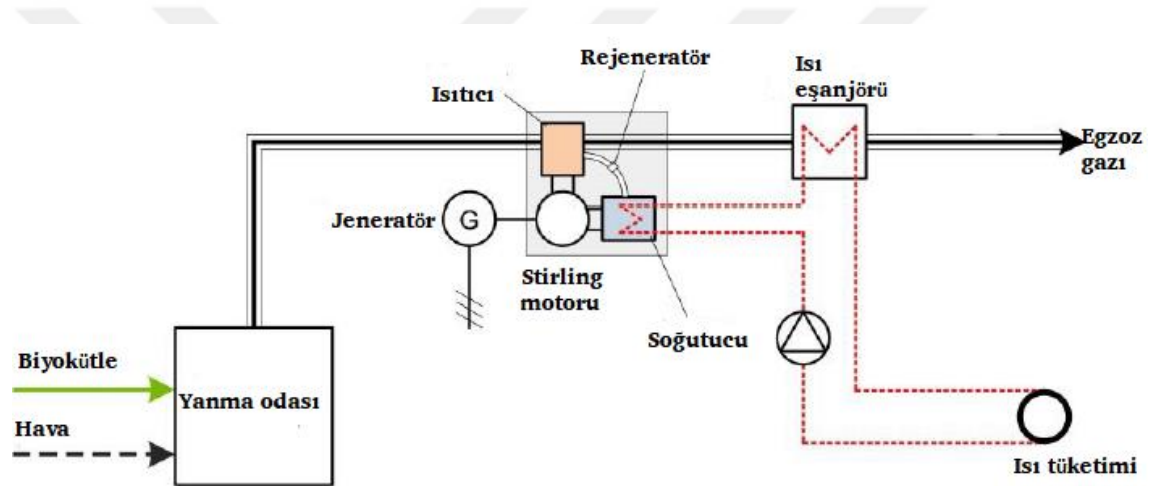
Günümüzde sadece, PAFC ve MCFC, biyogaz yakıtlı tesislerde kullanılır (EPA, 2017).

#### **4.1.3.5 Stirling Motor Teknolojisi**

Stirling motorları, biyokütleyi yakmak için kullanılan kazanlarla birlikte son derece çevreci ve verimli bir şekilde, ısı ve elektrik enerjisi tedarik etmeye olanak sağlar. Her ne kadar Stirling motorları, doğalgaz yakıtlı tesisler için piyasaya hali hazırda arz edilmiş olsa da biyokütle yakıtlı tesisler için halen teknolojik gelişme aşamasındadır.

Stirling motorunun çalışma prensibi, kapalı bir termodinamik çevrime dayanır. Basıncı bir gaz (hava, helyum veya hidrojen) periyodik olarak sıkıştırılır ve çeşitli sıcaklık seviyelerinde genişletilir (Padinger vd., 2019).

Çalışma gazı, biyokütlenin yanmasından kaynaklı sıcak baca gazında olduğu gibi, harici bir ısı kaynağı tarafından ısıtılarak genişletilir. Genleşen çalışma gazı, Stirling motorunun güç pistonunu çalıştırır ve biyel kolu üzerinden jeneratöre bağlı shaftı döndürür. Netice itibarıyla, çalışma gazının genişlemesinin ardından elektrik enerjisi üretilmiş olur. Genleşmenin akabinde; çalışma gazı, bir ısı eşanjöründe soğur ve piston tarafından sıkıştırılır. Kapalı devre çalışan Stirling motorunun prosesi tekrar baştan başlar (Padinger vd., 2019).



**Şekil 4.5** Stirling motor ile çalışan biyokütle yakıtlı kojenerasyon sistemi (Padinger vd., 2019)

Stirling motorunun elektrik enerjisi verimliliği, %15 ila 35 arasında değişmekte olup; elektrik gücü çıkışı 0,6 ila 50 kWe aralığındadır (Alanne ve Saari, 2004).

## 4.2 Biyokütle Yakıtlı Kojenerasyon Tesislerinin Ekonomisi

Mikro veya küçük ölçekli biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesisi uygulamaları dünya enerji piyasasında büyük bir pazar potansiyeline sahiptir. Söz konusu potansiyel; çevreyi koruma, ekonomik kalkınmayı destekleme ve iklim değişikliğini kontrol altına alma gibi unsurlarla birlikte değerlendirildiğinde daha da önem kazanmaktadır.

Her ne kadar, küçük ölçekli ve mikro ölçekli biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerinin sistemleri, enerji, çevre, ekonomi, vb. konularda kilit rol oynasa da, söz konusu teknoloji halen araştırma-geliştirme aşamasındadır ve mevcut aşamadaki benzer teknolojiler, henüz farklı endüstriyel sektörlerin taleplerini karşılayamaz durumdadır. Yakın gelecekte, yeni nesil bağımsız küçük ölçekli ve mikro ölçekli biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesislerinin ticarileştirilmesi için bu gelişimin hız kazanması gerekmektedir (Dong vd., 2009).

Biyokütle yakıtlarının hammaddelerinin çeşitlilik arz etmesi ve söz konusu yakıtı kullanan tesislerin teknolojilerinin çokluğu; biyokütle yakıtlı tesislerin maliyetinin de geniş bir aralığa yayılmasına yol açar. Bu aralık; tarım ve odun atıklarının kullanıldığı doğrudan yanma teknolojisine sahip düşük maliyetli seçeneklerden; katı atıkların kullanıldığı gazlaştırma teknolojisine sahip yüksek maliyetli tesislere kadar ulaşmaktadır. Kazanlardan çıkan sıcak gazın su döngüsü ile oluşturduğu buharın türbinleri döndürmesi ile oluşan bir biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesisi, yapısı itibarıyla basit ve ekonomiktir.

Fosil yakıtlı tesislere göre, biyokütle yakıtlı tesislerin daha düşük kapasitelerde inşa edilmesinin temel nedeni, besleme stokunu uzak mesafelerden taşımanın lojistik maliyetidir. Yatırımcılar açısından, 50 MW ve üzerindeki kapasitede tesis inşa edilmesi tercih edilmez.

50 MW ve altında kapasiteye sahip santrallerde; enerji üretiminde kullanılan çeşitli biyokütlelerin yatırım maliyeti, her bir kilowatt için 600 dolar ila 1.300 dolar arasında değişmektedir (Dornburg ve Faaij, 2001).

Biyokütlenin doğrudan yakıldığı teknolojiye sahip tesislerde; en düşük elektrik maliyeti kilowatt saat başına 0,075 dolar; kombine çevrim teknolojisine sahip tesislerde ise 0.18 dolardır. Düşük kapasiteli tesislerin maliyetleri iyi hesaplanabildiğinden, 1.000 MW ve üzeri kapasiteye sahip üretim tesislerinin kurulabilmesi enerji yatırımcılarını harekete geçirmiştir. Ancak, söz konusu kapasitedeki tesise yetecek kadar biyokütlenin varlığının olmaması ve biyokütlenin tesise transfer edilmesinin maliyeti gibi sebeplerle, 400 MW'dan düşük kapasitede tesisler inşa edilebilmektedir. Biyokütlenin ucuz olarak temin edilebildiği senaryolarda, düşük kapasiteli tesisler en ekonomik model olarak karşımıza



çıkmaktadır. Odun yakıtlı tesisler bu durum için verilebilecek en iyi örnektir (Brown ve Stevens, 2001).

Biyokütlenin gazlaştırıldığı teknolojiye sahip tesisler ise; 50 MW ve altındaki tesisler söz konusu olduğunda, doğrudan yakma teknolojisine göre çok daha maliyetlidir. Örneğin, 25 MW kapasiteye sahip bir tesis için, entegre gazlaştırma kombine çevrim (IGCC) tipindeki tesisin maliyeti \$1600/kW- \$2300/kW iken; buhar türbini ile çalışan doğrudan yanma teknolojisine sahip bir tesisin maliyeti \$1000/kW- \$1500/kW'tır.

Diğer taraftan, gazlaştırma teknolojisi, doğrudan yakma teknolojisine göre birtakım avantajlara da sahiptir. Yüksek enerji dönüşüm verimliliği, gazlaştırma teknolojisinin düşük işletim maliyetine sahip olmasını sağlar. Akışkan yataklı yanma sistemlerinde, elektrik enerjisine dönüşüm verimliliği %35 olup, gazlaştırma teknolojisinde bu oran %45'in üzerindedir. 50 MW'lık bir tesisin işletim maliyeti göz önünde bulundurulduğunda, gazlaştırma teknolojisine sahip tesisler, doğrudan yakma teknolojisine sahip tesislere göre %20 daha ucuzdur. Gazlaştırma teknolojisine sahip 50 MW kapasitedeki bir tesisin işletim maliyeti yıllık 21 milyon dolar, \$0,05/kW'tır (Brown ve Stevens, 2001).

Bununla birlikte; kurutucu ünitesinin çalışması için gerek duyulan ısı, kazan baca gazından veya diğer atık ısı kaynaklarından geri kazanılırsa, verimlilik daha da artar ve tesis daha da ekonomik hale getirilmiş olur.

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (International Renewable Energy Agency, IRENA), "*Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Maliyeti*"ne dair 2018 yılı raporuna göre; global ölçekte biyokütle projelerinin yatırım maliyeti ortalama olarak, \$ 2100/kW civarındadır. 2007 yılındaki maliyetinin \$ 2850/kW olduğu göz önünde bulundurulduğunda, bir maliyet düşüşü yaşandığı söylenebilir. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü'nde (OECD) yer almayan ülkelerde, şeker kamışı ya da diğer tarım/odun atıklarının kullanıldığı düşük maliyetli teknolojiler kullanılmakta olup; söz konusu teknolojinin maliyeti \$ 950/kW \$ 1650/kW arasında değişmektedir. Benzer teknoloji; Avrupa ve Kuzey Amerika'da daha pahalıya mal olmaktadır (IRENA, 2019b).

Kapasite faktörü ülke ve bölge bazında farklılık gösterir; Çin'de %64 kadar düşükken, Kuzey Amerika'da bu oran %83'lere ulaşmaktadır. Biyokütle yakıtı için kapasite faktörü, hammaddenin varlığının mevsimsel olarak değişip değişmediğine ya da yıl boyunca devam edip etmediğine bağlı olarak değişir (IRENA, 2019b).

Dünya enerji politikaları yenilenebilir enerjiye dayalı üretim tesislerinin teşvikine yönelik bir eğilim içerisindedir. Bu kapsamda Türkiye'de de "*Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun*" kapsamında işletilen "*Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM)*" ile yenilenebilir enerji kaynaklarının desteklenmesinde uygulanan/uygulanması gereken politikalar ve teşvik yöntemleri açıklanmıştır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının yakıt olarak kullanıldığı tesislerden elde edilen elektrik enerjisinin alım garantisi, enerji yatırımcılarının dikkatini çekmektedir. Bu durum, tüm yenilenebilir enerji kaynaklarında olduğu gibi, biyokütle yakıtlı tesislerin de amortisman sürelerini kısaltır.

## Biyokütle Yakıtlı Kojenerasyon Tesisi Proje Tasarımı ve Verim Analizleri

---

### 5.1 Tesisin Kurulumuna ve Konfigürasyonuna İlişkin Genel Bilgiler

Biyokütlenin doğrudan yakıldığı kojenerasyon teknolojisine dayanan örnek enerji üretim tesisi projesinin, tesis kurulumuna ve tesisin konfigürasyonlarına ilişkin detaylı bilgileri aşağıda yer almaktadır.

Tesis kapasitesi: 2,3 MW

Yakıt: Odun atıkları

Toplam yıllık yakıt tüketimi: ~16.000 MT/yıl

Teknoloji: Rankine çevrimli (Organic Rankine Cycle, ORC) kojenerasyon sistemi

Su kaynağı: Yer altı suları

Su ihtiyacı: 7 m<sup>3</sup>/hr

Jeneratör voltajı: 11 kV

Çıkış voltajı: 33 kV- 34,5 kV

Kazan tipi: Hareketli ızgaralı kazan

Kondenser tipi: Hava soğutmalı

Çalışma süresi: 330 gün

Amortisman süresi: 7 yıl

İç karlılık oranı: %14,5

## 5.2 Tesis Sahası Seçimi

Tüm enerji tesislerinin tasarımında olduğu gibi, biyokütle yakıtlı tesislerde de öncelikli olarak tesisin kurulacağı sahaya karar verilmesi gerekmektedir. Biyokütle yakıtlı kojenerasyon sistemine dayalı enerji üretim tesisi kurulacak sahaya karar verilirken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlar; sahanın kurulacağı bölgenin mevsimsel sıcaklık değişimi, gün içerisinde ulaştığı minimum ve maksimum sıcaklık değerleri, yıl içerisindeki toplam yağış miktarı ve nemlilik oranlarıdır. Su kaynaklarına ulaşım ve biyokütlenin tedarik edileceği yere uzaklık da diğer hususlardır. Biyokütlenin, tesisin kendi bünyesinden tedarik edildiği tesisler maliyeti düşürmek açısından önem arz eder. Zira devamlı surette yakıtı ihtiyaç duyacak tesisin yakıt lojistik maliyeti sıfırlanır. Ayrıca, projede yeraltı sularının kullanılacak olması, su maliyetinin de olmamasını sağlar.

Bununla birlikte, üretilen elektrik enerjisinin tamamı, tesisin kendi bünyesinde kullanılmayacak ve şebekeye verilecek ise; tesisinin kurulacağı sahanın ana şebekeye bağlandığı noktanın voltajına da dikkat edilmelidir. Proje için, 33 kV ya da 34,5 kV'luk dağıtım hattı gerilim noktasına yakınlık önem arz eder.

Türbin ve kazan üniteleri gibi ana ünitelerin haricinde, tesiste su sistemi, soğutma suyu sistemi, basınçlı hava sistemi, yakıt ve kül taşıma sistemleri ile şalt ve şalt sahası gibi alanlara ihtiyaç olup saha büyüklüğü de ona göre tayin edilmelidir.

## 5.3 Bir Biyokütle Olarak Odunun Karakteristiği ve Seçimi

Odun, sıkıştırmaya dirençli bir lignin matrisinin içine gömülmüş yüksek yoğunluktaki selüloz liflerinin doğal yollarla birleşmesi neticesinde oluşan organik bir malzemedir. Binlerce yıldır hem enerji tedariki amaçlı hem de yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Odunun ana bileşenleri aşağıda yer almaktadır:

- Selüloz  $((C_6H_{10}O_6)_n$  glikoz moleküllerinin polikondensasyon ürünü): kuru haldeki odunun yaklaşık %40-45'ini oluşturur ve destekleyici bir işlevi olup; bitkilerin yapısına mekanik kuvvet kazandırır.

- Hemiselüloz (selülozdan daha farklı kimyasal bileşime sahip bir polisakkarit kompleksi): kuru haldeki odunun yaklaşık %25-35'ini oluşturur ve bitkilerin odunsu kısımlarının çimentolama maddesi işlevini görür.
- Lignin (C<sub>40</sub>H<sub>44</sub>O<sub>6</sub>): kuru haldeki odunun yaklaşık %15-30'unu oluşturur ve odunun yapısına sağlamlık kazandırır.
- Ekstreler: Çok çeşitli bileşiklerden oluşur (reçineler, mumlar, yağlar, nişasta, şeker, pigmentler vb.) ve odunda ihmal edilebilecek miktarda bulunurlar.
- İnorganik malzemeler: küller olarak belirtilir, ağır metaller (Cd, Zn, As, Pb, Cu, vb.) ve diğer S, Cl, N, P, Si, Al, vb. metaller ile birlikte alkalın türlerini içerir.

Termokimyasal dönüşüm işlemlerinde, enerji üretiminde yakıt olarak kullanılan odunun bileşimi, odunun içerisindeki; su, uçucu madde, sabit karbon ve kül miktarı ile tanımlanır. Söz konusu bileşenlerin değerlerinin belirlenmesinde kullanılan laboratuvar analizi, odun yakıtında yer alan farklı fraksiyonların ayrılmasını ve ölçülmesini sağlayan bir dizi deneysel analizden oluşur.

Su içeriği, biyokütlede mevcut olan, biyokütlenin kendisinin yapısından (iç su içeriği) kaynaklanan veya dış çevre koşulları (dış su içeriği) tarafından belirlenebilen su miktarıdır. Yakıttaki su miktarı genellikle, 105°C'deki standart koşullar altında yapılan kurutma işlemi esnasındaki kütle kaybı ile ölçülür (UNI EN 14774 standardı doğrultusunda).

Uçucu maddenin fraksiyonu, yakıttaki karbon, hidrojen, oksijen ve diğer az miktardaki nitrojen ve sülfüründen oluşmaktadır. Söz konusu maddelerin fraksiyonu, yakıtın gazlaştırılması aşamasında buharlaştırılması ile belirlenir. Kuru haldeki bir odun yakıtı için uçucu madde fraksiyonu; %70-86 arasında değişmektedir.

Sabit karbon, ısıtma aşaması sırasında uçucu olmayan ve heterojen reaksiyonlar yoluyla oksitlenen karbonun bir kısmıdır.

Küllerin fraksiyonu ise; odun biyokütle örneğinin, 550°C'de yanması sonucunda kalanların incelenmesi ile belirlenir (UNI EN 14774 standardı doğrultusunda). (Noussan, 2015).

Projede, tablo 5.1’de yer alan kompozisyonda bir biyokütle karışımının kullanılması planmaktadır. Biyokütle için geçerli kabul edilen alt ısıl değer (LHV) ise, 14,6 MJ/kg’dır.

**Tablo 5.1** Biyokütle kompozisyonu (Gimelli ve Luongo, 2012)

<b>Biyokütle Kompozisyonu</b>	<b>İçerik</b>	<b>%</b>
	Su	46,5
	Karbon	33
	Oksijen	17
	Hidrojen	2
	Nitrojen	0,5
	Kül	1
	<b>Toplam</b>	<b>100</b>

## 5.4 Tesis Üniteleri

Standart tipteki bir biyokütle yakıtlı doğrudan yakma teknolojisine sahip tesiste üç adet ana ünite bulunur. Her ne kadar, söz konusu ünitelere yardımcı birçok ekipman/sistem bulunsa da bahsi geçen ana üniteler;

- Kazan ünitesi
- Buhar ünitesi
- Jeneratör ünitesi

olarak sıralanabilir.

### 5.4.1 Kazan Ünitesi Seçimi

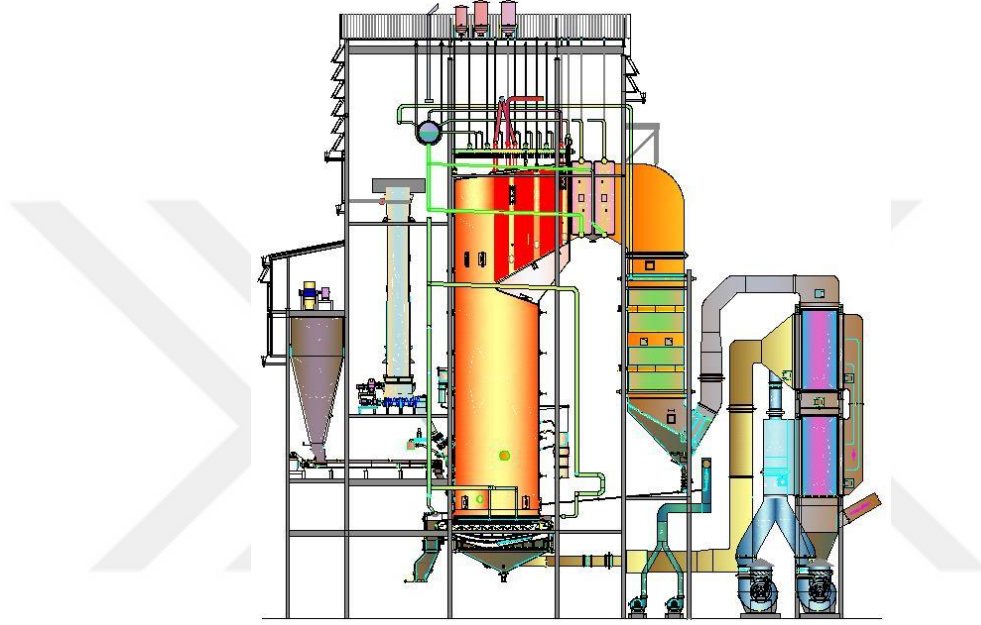
Bir kojenerasyon tesisi için kazan seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar; kazanın birçok yakıt türü ile çalışabilme imkânı ve tüm yıl boyunca sorunsuz çalışabilme özelliğidir. Kış aylarında biyokütlenin varlığının azalmasından ve bazen birlikte yakma yöntemine ihtiyaç duyulabileceğinden kullanılacak kazanın birçok yakıt türünde çalışabilmesi önemlidir. Birçok kazan türü olmasına karşın, hareketli ızgaralı kazan (travelling grate boiler), kapalı mevsimlerde kömür, linyit ve doğalgaz gibi fosil yakıtlarla çalışabilmesinin yanı sıra pirinç kabuğu, odun

yongaları ve pamuk sapı gibi çeşitli biyokütle yakıtlarını ve tarımsal atıkları da yakabilir (Subramanian ve Awasthi, 2010).

Şekil 5.1’de yer alan hareketli ızgaralı kazanın teknik özellikleri;

- Yük kapasitesi 220 TPh, 109 kg/cm<sup>2</sup>
- Maksimum çalışma sıcaklığı 540 °C

olup tesisimiz için elverişlidir.



**Şekil 5.1** Hareketli ızgaralı kazan (travelling grate boiler) (ISGEC, 2019)

Yıl boyunca sağlam ve güvenilir bir çalışmanın yanı sıra, yüksek basınçlı üretim ile birlikte hareketli ızgaralı kazanlar;

- Yüksek çalışma süresine sahip olması
- Yüksek verimliliği
- Düşük güç tüketimi
- Çevre dostu olması
- Düşük işletim maliyeti

gibi özelliklere sahip olduğundan tercih sebebidir.

Bununla birlikte kazan ünitesinin; besleme sistemi, besleme suyu sistemi, ateşleme sistemi, elektrostatik toz filtreleme sistemi ve baca gibi alt sistemlere sahip olması

gerekmektedir. Söz konusu sistemlerin bazıları, çalışmanın *diğer ekipmanlar* kısmında incelenecektir.

Buhar ünitesi seçiminde de ayrıntılı olarak izah edileceği üzere; buhar parametreleri ve ihtiyaç duyulan yakıt miktarı dikkate alındığında 12,5 Tph'lik bir kazanın tesis için yeterli olacağı düşünülmektedir.

#### **5.4.2 Buhar Ünitesi Seçimi**

Günümüzde birçok elektrik üreten tesiste sıklıkla kullanılan çevrim türü Rankine çevrimidir. Rankine çevriminin (organic rankine cycle, ORC), farklı sıcaklık, basınç ve kuruluk oranlarında çalışabilmesi; ürettiği ısı ve iş miktarının fazlalığı söz konusu çevrimin tercih edilmesinde ana sebeplerdir.

Mitsubishi Heavy Industries, Turboden firmasının, ORC teknolojisi ile çalışan kojenerasyon sistemi Şekil 5.2 'de yer almaktadır. Söz konusu sistem, bölgesel ısıtmadan, kereste fabrikalarında kurutma işlemine, yeşil evlerden yüzme havuzlarına ve hatta soğutma işlemlerine kadar birçok alanda hizmet vermekle birlikte; talaş, odun yongası, işlenmiş odun, saman ve pirinç kabuğu gibi her türlü odun artığı ile çalışabilmektedir. Ayrıca Turboden ORC üniteleri, termal yağ ile beslenebildiği gibi talep halinde doymuş buhar ve kızgın su ile de beslenebilecek şekilde dizayn edilmiştir.

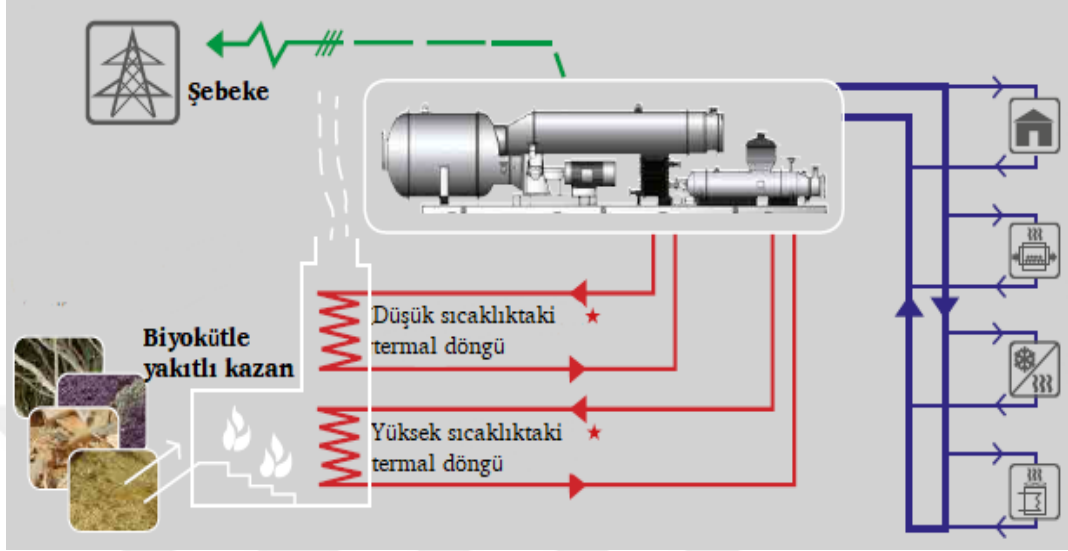
Turboden 22 CHP'nin teknik özellikleri:

- Termal yağ girişi;
  - Isı transfer döngüsündeki giriş/çıkış sıcaklıkları 300/240 °C
  - Toplam ısı gücü girişi 12020 kW
- Sıcak su çıkışı;
  - Sıcak su giriş/çıkış sıcaklıkları 60/90 °C
  - Sıcak su döngüsündeki ısı gücü 9601 kW
- Brüt elektrik enerjisi 2304 kW,
- Brüt elektrik verimliliği %19,2
- İç tüketim 97 kWh
- Net elektrik enerjisi 2207 kW
- Net elektrik verimliliği %18,4



- Biyokütle tüketimi 5779 kg/h
- Çalışma süresi 9-11 ay

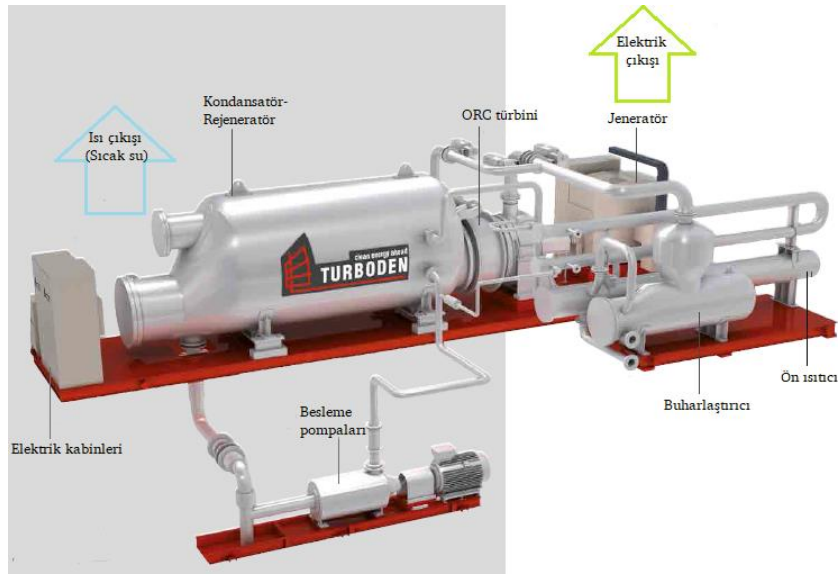
olarak belirlenmiştir.



**Şekil 5.2** ORC teknolojisi ile çalışan biyokütle yakıtlı kojenerasyon sistemi (Mitsubishi Heavy Industries, 2016)

Bahsi geçen ORC teknolojisinde, sistemin bileşenleri; buhar türbini, kondenser (rejeneratör), besleme pompaları, buharlaştırıcı ve ön ısıtıcıdır (Şekil 5.3).

Kullanıcı dostu ve verimli bir şekilde elektrik enerjisi üreten ORC teknolojisine dayanan tesiste üretilen güç 0,2 MW ile 20 MW arasında tasarlanabilmektedir.



**Şekil 5.3** ORC teknolojisinin bileşenleri (Mitsubishi Heavy Industries, 2016)

Çevrim türüne karar verilmesinin akabinde, sistem için en uygun buhar parametrelerine karar verilmesi gerekir. Buhar parametreleri seçiminde dikkate alınması gereken hususlar;

- Çevrimin verimliliği,
- Tesisin kapasitesi,
- Buhar türbini için gerekli olan buhar,
- Buhar üretmek için gerekli olan yakıt miktarı.

Termal çevrimlerde yüksek buhar parametrelerinin verimliliği artırdığı ve türbinin buhar tüketimini azalttığı göz önünde bulundurulduğunda, az yakıt tüketiminin bu yolla tedarik edilebileceği ortaya çıkar. Dolayısıyla yüksek buhar parametrelerinin seçilmesi gerekmektedir.

Diğer taraftan, buhar türbini, kazandan ısı transfer elemanları, yüksek basınçlı ısıtıcı, kazan besleme pompaları, proses boruları, valf vb. ekipmanları aynı buhar parametrelerinde çalışabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Çevrim için, yüksek buhar parametreleri seçildiğinden dolayı; ekipmanların yüksek basınç ve sıcaklık değerlerinde çalışabilmeleri gerekir. Böylelikle; buhar parametreleri, tesisin maliyetini doğrudan etkiler.

Yüksek basınç ve sıcaklıklar, örneğin daha gelişmiş buhar türbinleri ve daha büyük ısı eşanjörü yüzeyleri gibi yüksek yatırım maliyetlerini gerektirecektir. Buhar sıcaklığı için üst sınır, buhar türbininde kullanılan malzeme tarafından belirlenir ve üst sınır, 565°C civarındadır. Türbin kanatlarının uzunluğu da sınırlayıcı bir faktör olacaktır. Yüksek bir basınçta daha küçük bir akış alanına ihtiyaç duyulur ve böylece türbin kanatlarının çok küçük olması gerekmektedir (Bjäreborn ve Akerman, 2010).

Buhar parametrelerini daha da yükseltmek için araştırma ve geliştirme (ar-ge) çalışmaları devam etmektedir. 700°C ve 37,5MPa basınç değerinde ve elektrik üretim verimliliği %50'nin üzerinde olan bir buhar elde edilmeye çalışılmaktadır. Ama karşılaşılan temel problem, bu değerlerde çalışabilecek, yüksek sıcaklığa ve korozyona dayanıklı sert bir malzemenin tedarik edilmesidir. ABD Enerji Bakanlığı (DOE) ve Japonya Uluslararası Sanayi ve Ticaret Bakanlığı (MITI) bu konudaki ar-ge çalışmaları için fon sağlamaktadır. Diğer taraftan, daha da yüksek parametrelerin

elektrik üretimine katkısının azlığından kaynaklı şüpheler de vardır. Elektrik üretimini artıracak olan etkenin buharın basıncından ziyade sıcaklığı olduğuna dikkat edilmesi gerekir. Yeniden ısıtma ya da ikinci kez ısıtma yöntemi ile elektrik üretiminin verimliliğinin artırımı daha fazla etki eder (Kari, 2016).

Projenin tasarım aşamasında belirlenen buhar parametrelerinin, tesisin işletim aşamasında değiştirilmesi oldukça maliyetli ve birçok proje için pratikte imkânsızdır.

430°C sıcaklık ve 48 bar basınç günümüz teknolojik imkânları ve maliyetler düşünüldüğünde düşük kapasitede çalışan bir biyokütle yakıtlı tesis için yeterli olacaktır.

#### **5.4.3 Jeneratör Ünitesi Seçimi**

Türkiye şartlarında, *“Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu’nun Şebeke Yönetmeliği’ne göre; İletim sistemi içindeki dağıtım seviyesi ve iç ihtiyaçlar için gerilim seviyeleri 34,5 kV, 33 kV, 31,5 kV, 15,8 kV, 10,5 kV ve 6,3 kV”* olduğundan jeneratörde oluşan voltajın söz konusu seviyelere ulaştırılması gerekmektedir.

Tesisin başlangıç gücünü tedarik etmek ve jeneratör voltajını şebeke ile senkronize etmek için dizel jeneratörler temin edilebilir. Bir jeneratör de tümüyle elektrik kesintisi durumunda yedek olarak tutulabilir. Düşük kapasitede çalışması planlanan ve voltaj seviyesi 11 kV olacak şekilde tasarlanan bu tesiste, üretilen enerjinin %20’sinin tesisin kendi iç ihtiyaçlarını karşılamak üzere kullanılması; kalan kısmının ise, 33 kV veya 34,5 kV gerilim seviyesi ile şebekeye yönlendirilmesi düşünülmektedir.

Teknik özellikleri;

- Basınçlı sıcak suyu enerjiye çevirebilmesi
- Net elektrik çıkışı 125 kW
- Atık ısı koşulları; giriş sıcaklığı 120,6° C, çıkış sıcaklığı 107,2° C
- Yoğuşturma koşulları sıcaklığı 21,1 ° C
- Yoğuşma yükü 2.423.500 BTU/hr 710,1 kW/hr

olan ORC jeneratörü Şekil 5.4’de yer almaktadır.



**Şekil 5.4** ORC jeneratörü (Triple Green Products, 2020)

#### **5.4.4 Diğer Ekipmanlara İlişkin Bilgiler**

Kondenser, maksimum türbin çıkışı altında beklenen maksimum buhar akış koşulları için tasarlanacaktır. Tesis, hava soğutmalı bir kondenserden oluşacaktır. Ayrıca; kondenserin, türbin ile aynı hizada olacak ve açık havada bulunacak şekilde tesise monte edilmesi gerekmektedir.

Türbinden çıkan egzoz buharı, egzoz buhar kanalı ve buna bağlı olan üst buhar dağıtım kanalları vasıtasıyla kanatlı borulu ısı eşanjörlerine iletilir. Fanın sağladığı soğutma havası kanatçık üzerinden akar, tüpte demetlenir ve yoğuşmadan ısıyı uzaklaştırır (Oberberger, 2002). Hava soğutmalı kondenserler için tasarlanan tüp demeti Şekil 5.5’te yer almaktadır.

Bununla birlikte, hava soğutmalı kondenserler için, tesisin inşa edileceği sahanın meteorolojik verileri de önem arz eder.



**Şekil 5.5** Hava soğutmalı kondenserin tüp demeti (Energyen Corporation, 2015)

Yakıt besleme sistemi, yakıt kazana ulaşana dek kıvrılma olmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Böylelikle; yakıtın, yakıt hattında boğulması önlenir ve yakıtın akış kabiliyeti artar.

Kül taşıma sistemi, yoğun fazlı pnömatik taşıma sistemidir. Uçucu külü işlemek için taşıma sistemi kullanılır. Pnömatik taşıma sistemi teknolojisinin, ince, zor ve aşındırıcı malzemelerin boru hattı boyunca çok düşük bir hızda (2-6 m/s) taşınmasına elverişli bir örneği Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Söz konusu özellik, minimum bakım ihtiyacı ve sisteme uzun ömür sağlayarak; borularda ve dirseklerde minimum aşınma gerçekleştirir. Ayrıca, sıkıştırılmış havanın verimli kullanılması, düşük güç tüketimi ve düşük işletme maliyeti sağlar.



**Şekil 5.6** Pnömatik kül taşıma sistemi (Bevcon Wayors, 2019)

Biyokütlelerde külün miktarı ve kalitesi birçok faktöre bağlıdır, söz konusu faktörlerden bazıları; bitki türü, bitki fraksiyonu, yetiştirme koşulları, dölleme, hasat tarihi seçimi, hasat teknikleri ve dönüşüm sistemleridir. Biyokütlelerde toplam külü azaltmak için geliştirilen yöntemler ve kül kalitesini arttırmaya yönelik çalışmalar halen devam etmektedir. Biyokütle dönüşüm sistemlerinde kül yönetimine bütüncül bir yaklaşım gerekmektedir. Bununla birlikte; biyokütleden elde edilen külün faydalı kullanımlarını sağlayabilmek adına çaba sarf edilmelidir (Bakker ve Elberse, 2005).

Tesiste yanma sonrası oluşan toplam külün, yaklaşık %30'unun taban külü ve yaklaşık %70'inin uçucu kül olacağı düşünülmektedir.

Bacaların büyüklüğü ve yüksekliğinin de biyokütle yakıtı için yeterli kapasitede tasarlanması gerekmektedir. Gaz akışı gereksinimi ve yerel kirlilik kontrol normlarının dikkate alınması gerekmektedir. Benzer büyüklükteki tesisler incelendiğinde, 35-60 metre uzunluğundaki bir baca yeterli olacaktır.

Dağıtım transformatörleri, şalt ve motor kontrol merkezlerinin bulunduğu elektrik ekipman odasının da elektrik enerjisi üretim tesisinde yer alması gerekmektedir.

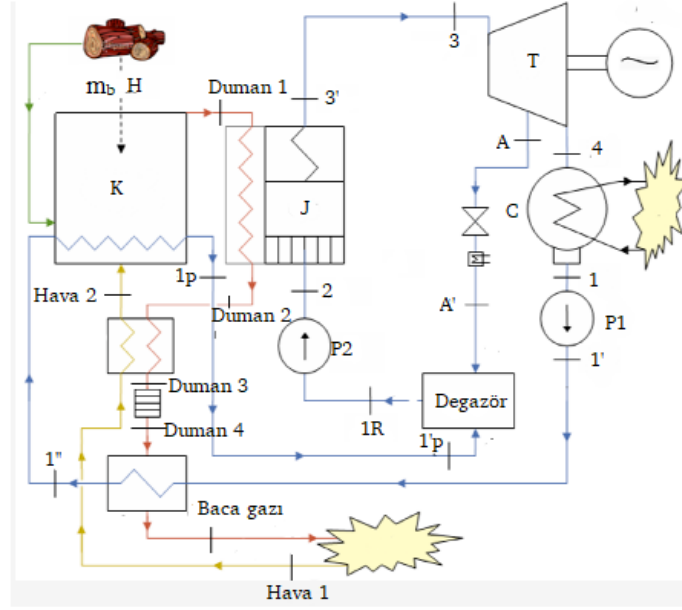
## **5.5 Tesisin Verimlilik Hesaplamaları**

2,3 MW kapasiteli, buhar türbini 430°C sıcaklıkta ve 48 bar basınç altında çalışmaya göre dizayn edilen bir enerji üretim tesisine ait her bir ünite için verimlilik hesapları yapılmıştır.

Biyokütlenin nemlilik oranlarının değişkenliği, biyokütle için geçerli olan alt ısı değerlerinde de tesisin işletimi esnasında sürekli değişmesine yol açar. Dolayısı ile tesisin verimlilik analizleri hesaplanırken deneysel süreçlere dayanan nominal değerler kullanılmaktadır.

Kazan (K), jeneratör (J), türbin (T), yeraltı suyunda kondenser (C) ve baca gazı temizleme sisteminin gösterildiği tesis akış şeması şekil 5.7'de yer almaktadır.

Ayrıca ortam koşullarına ilişkin olarak; suyun termodinamik döngüsü esnasındaki sıcaklık/basınç değerleri ve kazandan çıkan dumanın bacaya kadar ulaşana dek ulaştığı sıcaklık/basınç değerleri ile kütle akışı tablo 5.2'de yer almaktadır.



Şekil 5.7 Tesis akış şeması (Gimelli ve Luongo, 2012)

Tablo 5.2 Tesisin belirli noktalardaki nominal değerleri (Gimelli ve Luongo, 2012)

Şekil 5.7'de yer alan noktalar	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	
Kazandan çıkan gazlar	Duman 1	933,0	0,998
	Duman 2	262,4	0,998
	Duman 3	171,3	0,998
	Duman 4	171,3	0,998
	Baca gazı	110,0	1,004
Termodinamik döngüdeki su	1	24,1	0,030
	1'	24,1	3,000
	1''	80,0	2,000
	1p	97,0	1,500
	1R	111,3	1,500
	2	111,8	55,000
	3	428,7	47,500
	A	296,7	11,000
	A'	284,7	1,500
	4	24,1	0,030
Hava 1	21,7	1,004	
Hava 2	125,0	1,004	

$H = 14,6 \text{ MJ/Kg}$  (Odun karışımının alt ısıl değeri)

$m_b$  = odunun (biyokütlenin) kütlesi

$P_{lim}$  = İdeal termodinamik çevrimin gücü

$P_r$ = Reel termodinamik çevrimin gücü

$P_{t,f}$ = Çevrimdeki akışkanın termal gücü

$P_{u,a}$ = Şafttaki net mekanik güç

$P_{e,net}$ = Üretilen net elektriksel güç

$\eta_i$ = Tesiste yer alan bütün makinelerin verimliliği

$\eta_{lim}$ = İdeal termodinamik çevrimin verimliliği

$\eta_m$ = Mekanik tesis verimi

olduğu kabul edilerek;

Tesisin kazan verimliliği, denklem 5.1'den:

$$\eta_k = \frac{P_{t,f}}{m_b \cdot H} \quad (5.1)$$

Termodinamik çevrimin verimliliği, denklem 5.2'den:

$$\eta_{ter} = \eta_{lim} \cdot \eta_i = \frac{P_r}{P_{t,f}} = \frac{P_{lim}}{P_{t,f}} \frac{P_r}{P_{lim}} \quad (5.2)$$

Mekanik verimlilik, denklem 5.3'ten:

$$\eta_m = \frac{P_{u,a}}{P_r} \quad (5.3)$$

Global verimlilik, denklem 5.4'ten:

$$\eta_g = \eta_k \cdot \eta_{ter} \cdot \eta_m \quad (5.4)$$

Global elektrik verimliliği, denklem 5.5'ten:

$$\eta_{gel} = \frac{P_{e,net}}{m_b \cdot H} \quad (5.5)$$

hesaplanır.

Nominal noktadaki verimlilik değerleri:

$$\eta_k = 0,903$$



$$\eta_{ter} = 0,341$$

$$\eta_m = 0,806$$

$$\eta_g = 0,248$$

$$\eta_{gel} = 0,229$$

olarak hesaplanmıştır.

Dünya Enerji Komisyonu'nun verilerine göre; günümüzde, doğrudan yakma teknolojisine sahip kömür yakıtlı elektrik enerjisi üretim tesislerinin, alt ısı değer kullanılarak hesaplanan enerji üretim verimliliği %46'lara ulaşmakta ve söz konusu verimliliğin önümüzdeki yıllarda %50'nin üzerine çıkması beklenmektedir. Global bazda, enerji üretim tesislerinin verimliliği ortalama olarak doğal gaz için %41 ve kömür için %34'tür (WEC, 2013). Her iki verimlilik ortalaması da biyokütle yakıtlı tesisten elde edilen verimlilik oranından yüksektir. Bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak, hem atık maddelerin kullanılmasına imkân veren, hem de karbon emisyonunu azaltan biyokütlenin kullanıldığı elektrik enerjisi üretim tesislerinin verimliliğini artırmak adına çeşitli yöntemler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu yöntemler, bilhassa kazanda oluşan ekserji kaybını artırmak adına biyokütlenin ısı verimliliğini sabitlemek ve yükseltmek için kurutma teknolojileri olabileceği gibi, çevrim içerisinde enerji tedariki sağlayan buharın yeniden ısıtılması ya da ön ısıtılması gibi teknolojiler olabilir.

## Biyokütle Yakıtlı Enerji Üretim Tesislerinin Verimliliği

---

### 6.1 Biyokütlenin Nem Miktarının, Isıl Verime ve Enerji Yoğunluğuna Etkisi

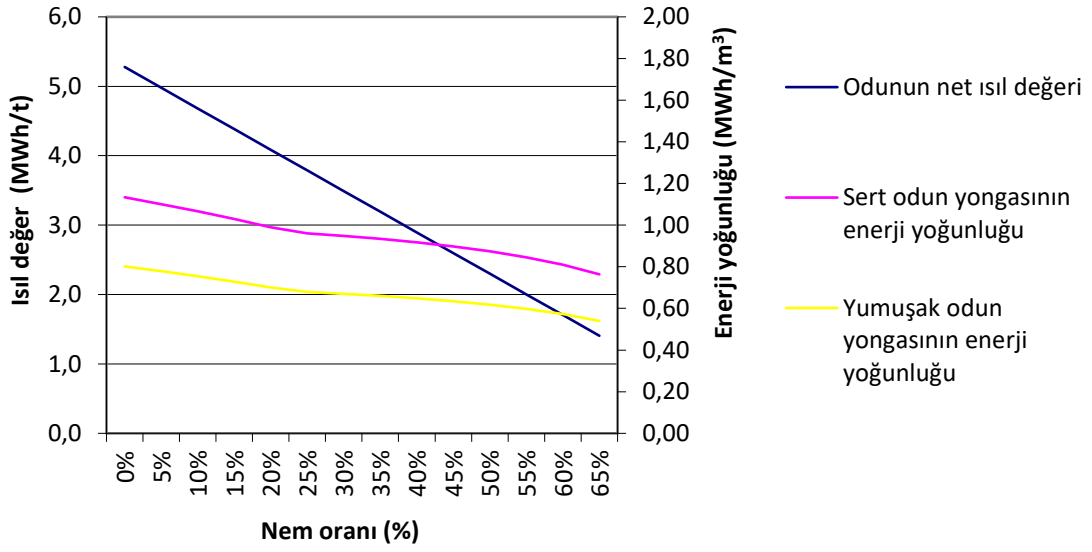
Enerji üretim tesislerinde temelde amaçlanan, tüm diğer tesis tiplerinde olduğu gibi, minimum maliyet ile maksimum verimliliği sağlayabilmektir. Doğrudan yakma teknolojisine sahip enerji üretim tesislerinde, genel itibariyle kurulum maliyetleri açısından çok fazla bir fark olduğu söylenemez. Asıl amaçlanan durum birim yakıttan elde edilen enerji miktarını maksimize etmek olmalıdır.

Biyokütle yakıtlı (odun için değerlendirildiğinde) tesislerde de biyokütlenin seçimi ve karakteristiği talep edilen kapasitedeki enerjiyi tedarik edebilmek adına tesisin yapısında en önemli rolü oynar (Loo ve Koppejan, 2008). Tüm yakma teknolojisine bağlı tesislerde olduğu gibi, burada da yanmayı doğrudan etkileyen, yakıtın nem miktarıdır. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, odun atıkları, karışım halinde kazana gönderildiğinden farklı nem oranlarına ve ısıl değerlere sahip atıkların, verimliliği azaltıp artırması devamlı surette değişkenlik göstermekte olup; söz konusu durum sistemin net verimliliğini düşürür. Öyle ki; biyokütlenin, belirlenen nemlilik sınırları içerisinde kalıp kalmadığını ölçen sensörler geliştirilmiştir. Yakıtın kuruluk oranını artırmak bir yöntem olduğu gibi, birlikte yakma teknolojisine dayalı bir tesis tasarlanarak, ilave yakıt da biyokütleyle karıştırılabilir. Ancak bu durum, mevcut atıkların kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik, sürekli artan fosil yakıt fiyatları ve çevresel faktörler (emisyon) düşünüldüğünde çok fazla tercih edilmez.

Bununla birlikte; daha kuru yakıtla çalışan kazanın optimum sıcaklıkta çalışmasına elverişli bir durum oluşur ve tesisin toplam verimliliği artar ve kazanda meydana gelen ekserji kayıpları da en aza indirgenir.

Yakıttaki herhangi bir su içeriği, yakıtın yanma süreci başlamadan önce de enerji gerektirdiği için verimi düşüren ve yanma sıcaklığını optimum seviyelerin altına indiren bir durumdur. Örnek vermek gerekirse; kuru yakıtların yanma sıcaklıkları 1260-1370°C iken, yeşil bir odunun yanma sıcaklığı 982 °C civarındadır (FBT, 1994). Yanma sıcaklığının optimum seviyenin altına düşmesi, bacada, bilhassa uzun ve yön değiştiren bacalarda, yoğunlaşabilecek katran ve kreozot emisyonuna neden olarak yakıtın tamamen yanmaması ile sonuçlanabilir. Su ayrıca baca içinde yeniden yoğunlaşabilir ve bunların tümü baca korozyonuna ve nihai olarak tıkanma veya yangın potansiyeline yol açan materyallerin kademeli olarak birikmesine neden olabilir (Forest Research, 2019). Çevresel olarak da yakıt yanma işlemini ne kadar iyi tamamlarsa, yanma esnasında ortaya çıkan karbon monoksit (CO) salınımı da o kadar azalır.

Birleşik Krallık'ın Orman Araştırması Kurumu (Forest Research), ormancılık ve ağaçlarla ilgili araştırmalar için ana örgüt olup, söz konusu araştırma kuruluşunun yayınlarında yer alan veriler doğrultusunda hazırlanan grafik Şekil 6.1'de yer almaktadır. Grafikten de anlaşılacağı üzere, odunun nem oranı arttıkça, net ısıl değerinin düştüğü görülmüştür. Ayrıca; yine odunun nem oranı arttıkça hem yumuşak hem de sert odun yongası için enerji yoğunluğunun da azaldığı ortaya çıkmıştır. Odunun, enerji üretim tesislerinde yakıt olarak kullanılan herhangi bir biyokütlenin de benzer şekilde, kuruluk oranının enerji üretimine doğrudan etkisinin var olduğu bir kez daha ispat edilmiştir.



**Şekil 6.1** Odunun nem oranının ısı değeri ve enerji yoğunluğu ile karşılaştırılması (Birleşik Krallık Orman Araştırması Kurumu, 2019)

%45 nem oranında bir odun artığı karışımı yakıt olarak kullanıldığında, standart ünitelerle çalışan bir enerji üretim tesisinde kazan verimliliği yaklaşık olarak %74'tür. Aynı standartlarda üniteler kullanılarak %10-15 nem oranında bir odun artığı kullanıldığında verimlilik %80'lere ulaşabilir. Bu verimlilik artışı, buhar üretiminin %50-60 oranında artmasına tekabül eder (Ross, 2008).

## 6.2 Biyokütlelere Uygulanan Ön İşlem Yöntemleri

Günümüz teknolojisinde yapılan ön işlem yöntemleri; fiziksel, kimyasal, biyolojik ve çoklu/kombinatoryal ön arıtma olarak dörde ayrılmıştır. Kombinatoryal ön işlem yöntemlerinde, sıcaklık, basınç veya abiyolojik adım gibi fiziksel parametreler; kimyasal işlemlerle, fizikokimyasal veya biyokimyasal ön işlem yöntemleriyle birleştirilir (Agbor vd., 2011).

*Fiziksel ön işleme;* biyokütlenin, parçalama ve küçültme gibi yöntemlerle mekanik olarak boyutu küçültülür. Böylelikle biyokütlenin, mevcut spesifik yüzey alanı artırılır ve polimerizasyon derecesi ile selülozun kristallenmesi azaltılır.

*Biyolojik ön işleme;* çoğunlukla degradelignin, hemiselüloz ve polifenollerini parçalayabilen enzimler üretebilen mantarlar ile gerçekleştirilmektedir (Sun ve

Cheng, 2012). Bununla birlikte, söz konusu ön işlemleri gerçekleştirmek için çok fazla zamana ihtiyaç duyulduğundan (10-14 gün), endüstriyel uygulamalar için uygun değildir.

*Kimyasal önışlem;* asitler, alkaliler ve organik çözücüler gibi bazı kimyasalların, selülozik biyokütlenin doğal yapısı üzerindeki etkisi ile gerçekleştirilir. Örneğin, alkali ile yapılan ön işlemlerde, biyokütlenin iç yüzey alanının artırıldığı ve selüloz kristal asidinin azaldığı görülmüştür (Chang ve Holtzaple, 2000; Chandra vd., 2007).

*Fizikokimyasal önışlemlerde ise;* biyokütlenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen koşulların ve bileşiklerin kullanılmasından yararlanır.

Enerji üretim tesislerinde; biyokütlenin yüzey alanının artırılıp, nemlilik oranının düşürülmesi için çoğunlukla fiziksel ön işlemler metodları uygulanabilir. Bununla birlikte, maliyet açısından uygun koşullar sağlanabilirse fizikokimyasal önışlemler metoduna da başvurulabilir.

Yapılan deneysel çalışmalarda; biyokütlenin partiküllere ayrılarak boyutlarının küçültülmesinin, biyokütleyi kurutma sıcaklığını düşürdüğü görülmüştür (Kapseu vd., 2007).

### **6.3 Biyokütle Kurutucuları Çalışma Prensipleri**

Kurutma işlemini tanımlamak için yaygın olarak Fick'in ikinci difüzyon yasası kullanılmaktadır ve difüzyon için yaklaşık bir matematiksel çözüm, uzun kurutma süreleri varsayımı altında gerçekleştirilmektedir (Gebgeegziabher vd., 2013).

Kurutma için gerekli olan ısının nasıl tedarik edildiğine göre, kurutucular; doğrudan ve dolaylı ısıtmalı kurutucular olarak iki ayrı kategoriye ayrılır.

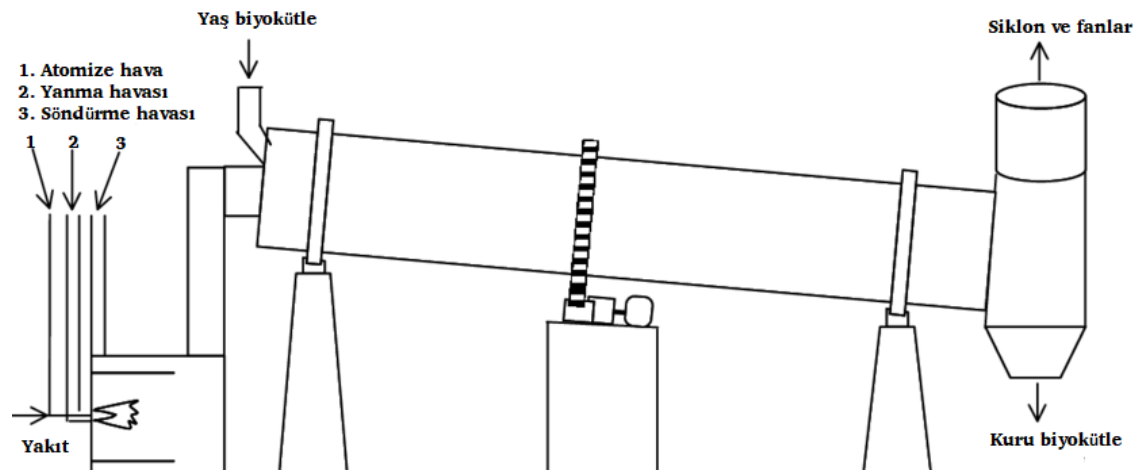
**Doğrudan ısıtmalı kurutucularda;** biyokütle, sıcak hava ya da buhar gibi bir akışkanla doğrudan temas geçer. Doğrudan ısıtmalı kurutucular da kendi arasında hava ve süper ısınmış buhar kurutucular (SSD) olarak, iki kategoriye daha ayrılır:

Hava kurutucularında, sıcak hava biyokütle ile biyokütle kuruyuncaya dek temas geçer. Hava hissedilen sıcaklığını kaybederek, biyokütleyi kurutmak için gerekli

olan buharlaşma gizli ısını tedarik eder. Hava aynı zamanda, buharlaşan su buharını da kaldırır.

SSD'lerde ise; havadan farklı olarak, ısıtma akışkanı buhardır. Süper ısınmış buhar, biyokütle ile temasa geçerek, kendi hissedilen sıcaklığını kaybeder ve kuru biyokütle elde etmek için gerekli buharlaşma gizli ısını tedarik eder. Buharın sıcaklığı, doyma sıcaklığının üzerinde olduğundan, yoğuşma söz konusu olmaz. Buhar kurutucuya girerken, biyokütleden ayrılan su buharı süper ısıtılmış buhar ile ısıtıldığından dolayı, daha düşük sıcaklıkta daha fazla miktarda su buharı elde edilmiş olur. Fazla olan buhar ayrıştırılarak, geri kalan buhar kurutucuya döndürülür (Amos, 1998).

Döner (rotary) kurutucular, biyokütlelerde yaygın olarak kullanılan kurutucu tipleridir. Döner kurutucularında birçok çeşidi olsa da en çok kullanılan çeşidi "doğrudan ısıtmalı tek geçişli döner kurutma"lardır. Tek geçişli döner kurutmalarda, biyokütle sıcak gazlarla dönen bir tamburun içerisinde temasa geçer. Tamburun dönmesi kurutucudaki biyokütleyi kaldırır ve ısı-kütle geçişinin artmasını sağlar. Doğrudan ısıtmalı tek geçişli döner kurutma sisteminin çalışma prensibi Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 6.2** Doğrudan ısıtmalı tek geçişli döner kurutma sisteminin çalışma prensibi (Magdalini vd., 2016)

Teknik özellikleri;

- Baca gazı devridaimi ile kontrol edilen 800- 1200 °F (bazı durumlarda 450 °F'a kadar düşebilir) besleme sıcaklığı
- 200-250 °F egzoz sıcaklığı
- 220 °F'nin üzerinde asit ve reçinelerin yoğunlaşmasını önleme kapasitesi (böylelikle, ısı transferi iyileştirilir ve nem artırılarak yangın riski azaltılır),
- Gelişmiş hava sınıflandırması ve ekstra kuruluk
- Bekleme süresi
  - Küçük partiküllerde <1 dakika
  - Büyük malzemelerde 10-30 dakika
- Isı kaynakları: atık gaz, sıcak hava
- Uygulanma biyokütlesi: odun artıkları, odun yongası, talaş vb.

olan bir “doğrudan ısıtım tek geçişli döner kurutma sistemi” Şekil 6.3'te yer almaktadır.

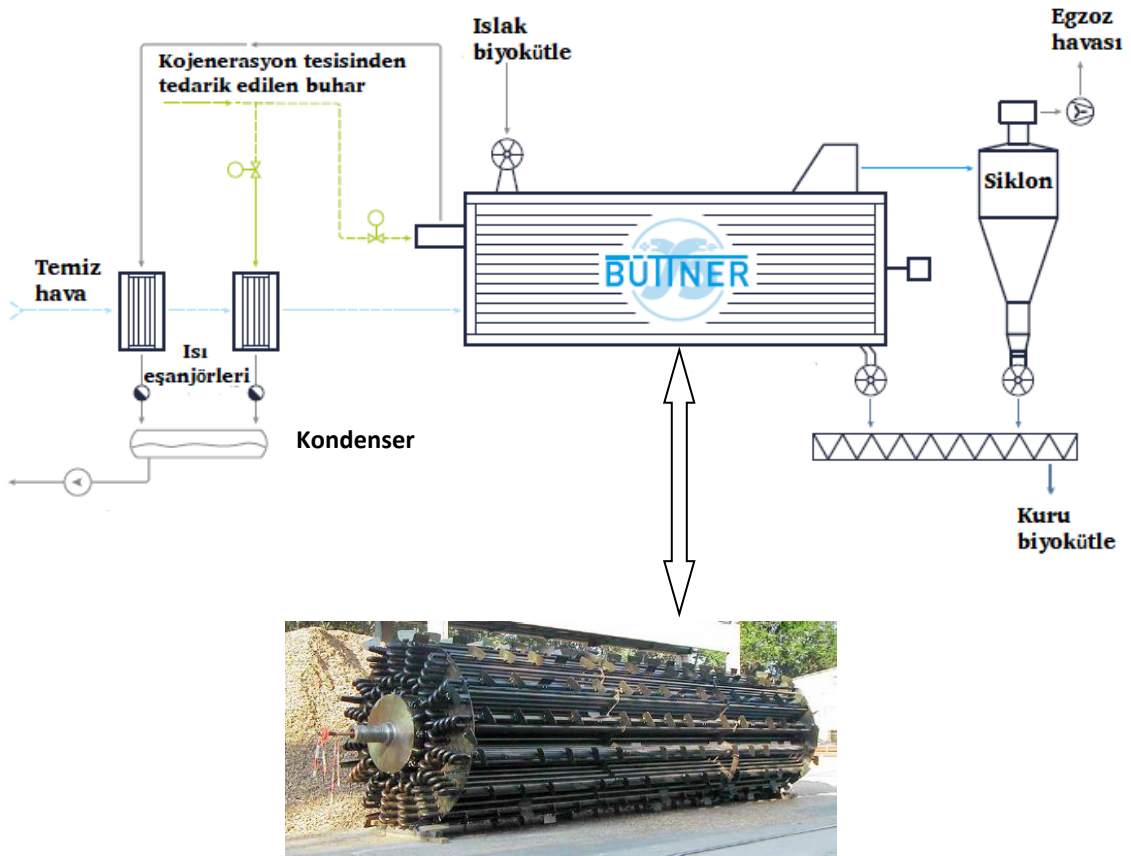


**Şekil 6.3** Doğrudan ısıtım tek geçişli döner kurutma sistemi (Harris Group Inc., 2019)

**Dolaylı ısıtım kurutucularında ise;** biyokütle ısı kaynağından bağımsız olarak ısı değişimli bir yüzeyde kurutulur. Ancak, dolaylı kurutucularında, su buharı hava ile seyreltilmediğinden dolayı, suyun buharlaşma gizli ısısının geri kazanımı söz konusu olabilir. Böylelikle, buharlaşmış su vakum pompasına gitmeden evvel

yoğunlaşabilir veya kurutucu çalışması için gerekli yüksek sıcaklıklara ulaşamayabilir (Amos, 1998).

Şekil 6.4 'de, spesifik olarak kojenerasyon tesislerinde kullanılmak üzere dizayn edilmiş dolaylı ısıtımalı döner kurutma sistemi görülmektedir. Boru demeti şeklinde kurutma mahfazasına sahip bu kurutma sistemi, yakıtın içerisinde bulunan suyun, ısı eşanjörleri tarafından önceden ısıtılmış olan kurutucu havanın içinde buharlaştırılması yöntemi ile çalışır. Kurutucu mahfazasının sonunda, kurutulmuş yakıt, hava geçirmez bir döner valf vasıtasıyla boşaltılır. Sıcak ve nemli kurutucu hava ise, siklonlar veya torba filtrelerden çıkartılır.



**Boru demeti şeklinde kurutma mahfazası**

**Şekil 6.4** Dolaylı ısıtımalı döner boru demetli kurutma sisteminin çalışma prensibi (Büttner, 2019)

Özellikleri;



- Talaşların, ahşap malzemelerin ve diğer serbest akışlı odun türevleri ile diğer biyokütle ürünlerinin kurutulabilmesi
- 10 t/h'a kadar su buharlaşma kapasitesi
- Buhar, sıcak su veya termal yağ ile dolaylı ısıtmayı sağlama
- Kojenerasyon tesisleri ile çalışabilme
- Yakıtın doğrudan kurutucudan çıkartılması
- Egzoz havası filtreleme

olan Büttner, Siempelkamp Group'un dizayn ettiği dolaylı ısıtmalı boru demetli kurutma sistemi Şekil 6.5' te yer almaktadır.

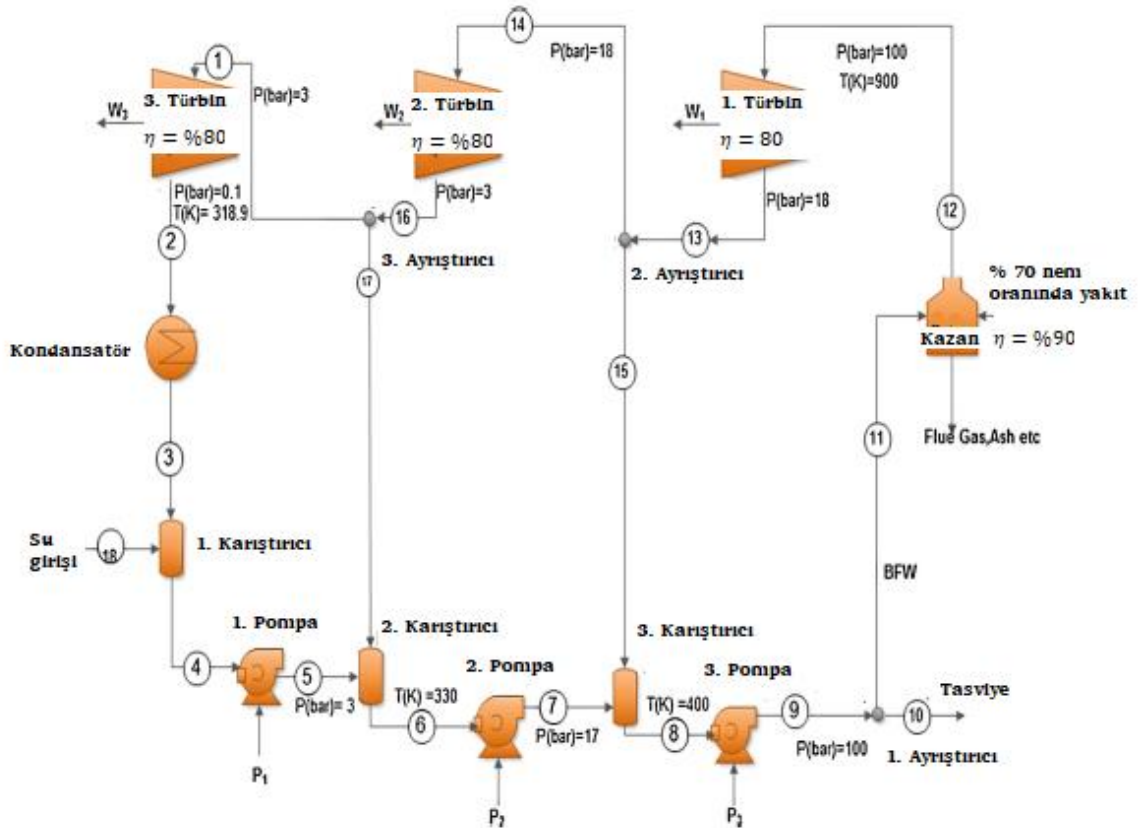


**Şekil 6.5** Dolaylı ısıtmalı döner boru demetli kurutma sistemi (Büttner, 2019)

#### **6.4 Biyokütle Yakıtlı Enerji Üretim Tesislerinde Kurutma İşlemi**

Kurutma için bir tesisin kendi bünyesinden çıkan buharın ya da atık ısının doğru kullanılması, elektrik enerjisi üretim maliyetini önemli ölçüde azaltabilir. Buharlı elektrik santralinde buhar türbini ortamından 10–40 bar orta basınç altında ve 2–5 bar düşük basınç altında çıkarılan buhar, kazan besleme suyu ön ısıtmasında sıklıkla kullanılır. Ön ısıtma kazan geri besleme suyunun kondenser kaybını azaltır, böylece santralin genel enerji verimliliği artmış olur. Biyokütlenin kurutulması için de benzer bir etki uygulanmalıdır. Biyokütlenin buharla kurutulması hem kondenserdeki hem de kazandaki enerji kaybını azaltır.

Gebreegziabhera vd.'nin yaptığı bir çalışmada kurutma sistemlerinin enerji üretim tesislerinin verimliliğine doğrudan katkısı incelenmiştir. Hava kurutucular ve/veya süper kurutucuların sisteme dâhil edilmesi ile birlikte sistem verimliliğindeki artışlar gözlemlenmiştir. 12,5 MW kapasitede ve %70 nem oranındaki odun atıklarının (meyve ağacı) yakıt olarak kullanıldığı enerji üretim tesisinin tasarımı şekil 6.6'da ve kurutucu ilavesinden önce buhar akışına ilişkin değerler tablo 6.1'de verilmiştir. Tesis kazan, kazan besleme suyu pompaları, türbinler, karıştırıcılar ve kondenserdan oluşmuştur. 100 bar basınçta ve 401 K sıcaklıktaki kazan besleme suyu, kazanda 900 K sıcaklığa kadar ısınmaktadır. Buharda meydana gelen entalpi değişimi 3149 kJ/kg olup, yüksek basınçlı buharın buhar akış oranı 40.138 kg/h'tir. Üç türbinden elde edilen toplam enerji 12.616 MW olup, bunun 115.55 kW'ı kazan besleme suyu pompaları tarafından tüketilmektedir. Sistemin toplam enerji verimliliği %20,08'dir.



**Şekil 6.6** Buhar akışını gösteren 12,5 MW kurulu güçteki enerji üretim tesisi tasarımı (Gebreegziabhera vd., 2014)

**Tablo 6.1** Kurutucu ilavesinden önce buhar akışına ilişkin değerler  
(Gebreegziabhera vd., 2014)

Buhar	Sıcaklık (K)	Basınç (bar)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg)	Buhar fraksiyonu	m (kg/h)	E (kJ/h)
1	481	3	2883	7,349	1,00	35.287	101.730.687
2	319	0,1	2476	7,812	0,96	35.287	87.382.578
3	314	0,1	171	0,583	0,00	35.287	6.031.115
4	314	0,1	171	0,583	0,00	35.387	6.043.689
5	314	3	171	0,583	0,00	35.387	6.054.035
6	330	3	238	0,791	0,00	36.285	8.643.683
7	330	18	240	0,791	0,00	36.285	8.698.327
8	400	18	534	1,600	0,00	40.238	21.487.401
9	401	100	543	1,600	0,00	40.238	21.838.390
10	401	100	543	1,600	0,00	100	54.273
11	401	100	543	1,600	0,00	40.138	21.784.117
12	900	100	3692	6,979	1,00	40.138	148.177.277
13	666	18	3235	7,157	1,00	40.138	129.862.755
14	666	18	3235	7,157	1,00	36.185	117.073.671
15	666	18	3235	7,157	1,00	3.953	12.789.084
16	481	3	2883	7,349	1,00	36.185	104.320.335
17	481	3	2883	7,349	1,00	898	2.589.648
18	303	1	126	0,437	0,00	100	12.583

Nem oranı %70 kadar yüksek olan odun atığı, sistem verimliliğinin %20,08 kadar düşük bir orana sahip olmasına sebebiyet vermiş, ancak ilave kurutucu sistemleri ile verimlilik %29,92'lere kadar çıkmıştır. Tablo 6.2'de de görüleceği üzere; ön ısıtma yöntemi, verimin %2 artmasını sağlamış, sıcak hava kurutucusu verimi %27,36'lara ulaştırmıştır. Sıcak hava kurutucusunun süper ısıtılmış hava kurutucusu ile birlikte kullanıldığı yöntem hem alçak hem de yüksek basınçlı buhar basıncı ile denenmiş olup; en yüksek verim alçak basınçlı buhar basıncı ile elde edilmiştir.

**Tablo 6.2** Kurutucunun tesis verimliliğine etkisi (Gebreegziabhera vd., 2014)

Sistem	Yakıt ihtiyacı (kg/h)	Kurutma için gerekli hava miktarı (kg/h)	Verim (%)
Kurutucusuz	45.589	-	20,08
Önısıtma yöntemi ile	42.934	-	22,08
Sıcak hava kurutucu ile	34.322	958.544	27,36

Yüksek basınçlı buhar basıncı ile sıcak hava kurutucu ve süper ısıtılmış buhar kurutucusu	33.886	395.997	27,87
Alçak basınçlı buhar basıncı ile sıcak hava kurutucu ve süper ısıtılmış buhar kurutucusu	31.576	355.110	29,92

İlerleyen yıllarda, kurutma teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte, kazan tasarımlarının da değişeceği düşünülmektedir. Ayrıca, kuru yakıtla çalışan enerji üretim tesislerinde, daha az ısı iletim alanına ihtiyaç duyulduğundan, kazan daha küçük dizayn edilebilir. Kurutucu ve kazanın uyuşacak şekilde boyutlandırılması gerekmektedir. Nem oranı az biyokütlelerde, yakıtın alev alması için gerekli olan aynı miktardaki ısı transferi miktarı için daha az kazan ısı transfer yüzeyi gerekmektedir. Kurutucularla birlikte, hali hazırda kurulu kazanlar için buhar miktarı artarken, yeni kurulacak tesislerde daha küçük kazanlar tedarik edilebilir. Daha küçük ısı transfer yüzeylerine ek olarak, kazan yanma bölgesi, tam yanmanın sağlanması nedeniyle daha küçük tasarlanabilir. Daha az yakıt kullanıldığından daha az kül açığa çıkar; hatta kül atık ve taşıma sistemlerinin de benzer şekilde değişikliğe uğraması ile birlikte boyutlarının da küçülmesi muhtemeldir. Böylelikle kurutucu ilavesi, kazandan kül sistemine kadar tesisin birçok ekipmanına pozitif yönde etki etmiş olur.

## 6.5 Yanma Analizi

Yanma, yakıtların oksijen ile hızlı reaksiyonu sonucu ısı ve sıcak yanma ürünlerinin açığa çıktığı kimyasal reaksiyondur. Yanma için gerekli oksijen genellikle havadan sağlanır. Normal şartlarda ve yeterli yakıcı oksijen ortamında yakıtlar çoğunlukla CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O'ya dönüşür. Ayrıca az miktarda kükürt, azot ve diğer elementlerin oksitleri de oluşur.

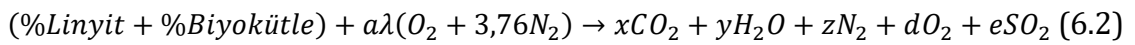
Kuru hava; %20,9 oksijen, %78,1 azot, %0,9 argon ve az miktarda karbondioksit, helyum, neon ve hidrojen den oluşur. Yanma işlemlerinde, kuru havayı oluşturan karışanların mol oranları %21 oksijen ve %79 azot olarak kabul edilir. Bu durumda yanmaya giren her mol oksijen için  $0,79/0,21 = 3,76$  mol azot alınır.

Yanma işlemlerinde yanmanın tam yanma olmasını sağlamak için genellikle teorik miktardan daha fazla hava kullanılır. Yanmanın gerçekleşmesi için kullanılan gerçek

hava miktarının, yakıtın yanması için gerekli minimum hava miktarına (teorik hava miktarı) oranı 'hava fazlalık katsayısı' olarak tanımlanır ve  $\lambda$  ile gösterilir. Hava fazlalık katsayısı denklem 6.1'de gösterilmektedir.

$$\lambda = \frac{\text{Gerçek hava miktarı}}{\text{Teorik hava miktarı}} \quad (6.1)$$

Yakıtın hava ile teorik tam yanması reaksiyonu sonucunda meydana gelen yanma ürünleri denklem 6.2'de gösterilmektedir. Çalışmamızda kullanılan linyit-biyokütle karışımının hava ile tam yanması sonucunda bileşenlerin mol oranları denklem 6.2'den hesaplanabilir.



Burada karbon denkliğinden x, hidrojen denkliğinden y, oksijen denkliğinden d, azot denkliğinden z, kükürt denkliğinden e hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler ile kazanın enerji ve ekserji hesapları yapılmıştır. Enerji ve ekserji hesaplarını yapabilmek için yanma sonu ürünlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu da yanma denklemi çözülerek bulunur. Öncelikle linyit ve çam talaşının kapalı formüllerine ve ısıl değerlerine ihtiyaç vardır.

Yanma işlemlerinde kullanılan diğer tanımlardan biri de ısıl değerdir. İki şekilde ifade edilir. Yanma ısısı; tam yanma sonucunda birim miktar yakıttan elde edilen ısıdır ve birimi kJ/kg veya kJ/m<sup>3</sup>tür.

Yakıt, içerisinde nem veya bünyesinde hidrojen ve oksijen taşıyorsa, tepkime ürünleri arasında doğal olarak su bulunacaktır. Bu suyun buhar veya sıvı şeklinde oluşuna göre ısıl değeri;

- ✓ Alt ısıl değer (AID)
- ✓ Üst ısıl değer (ÜID)

olmak üzere iki şekilde tanımlanır. Isıl değer; yanma sonu ürünleri içindeki H<sub>2</sub>O'nun bulunduğu faza bağlıdır. Eğer yanma ürünlerinde su, buhar halindeyse alt ısıl değer, sıvı halindeyse üst ısıl değer elde edilir. Katı yakıtlar için ısıl değer hesaplamalarında genellikle Dulong formülü kullanılır (Walter R. Niessen, 2010, s.121). Dulong formülü denklem 6.3'te görülebilir.

$$\dot{U}ID = 33700x\%C + 141900x(\%H - 0,125x\%O) + 2300x\%N + 9300x\%S \quad (6.3)$$

Üst ısıl değerin birimi kJ/kg 'dır. Buharlaştırma ısısı ise 6.4 no'lu denklemden hesaplanır.

$$\text{Buharlaştırma ısısı} = 9 \times H \times 2466 \text{ (kJ/kg)} \quad (6.4)$$

Alt ısıl değeri ise, üst ısıl değeri ile buharlaştırma ısısının farkıdır. Denklem 6.5'ten hesaplanır.

$$\text{Alt ısıl değeri} = \text{Üst ısıl değeri} - \text{Buharlaştırma ısısı} \quad (6.5)$$

Bu çalışmada yakıt olarak linyit ve biyokütle olarak çam talaşı seçilmiştir. Biyokütlenin yüzdesel olarak 5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında linyit ile kullanılması durumu için kazan enerji ve ekserji verimleri hesaplanmış ve grafik halinde verilmiştir. Tablo 6.3 ve 6.4'te linyit ve biyokütle için yapılan hesaplamaların sonuçları verilmiştir. Kapalı formülleri bulmak için yakıtların elementel analiz sonuçlarından yararlanılmıştır. Tablo 6.3'teki ilk sütun linyit yakıtının elementel analiz sonuçlarıdır (Vassilev vd., 2009). Tablo 6.4'teki ilk sütun da çam talaşı yakıtının elementel analiz sonuçlarıdır (Vassilev vd., 2010). Bu tablolardaki hesaplamalar sonucunda hem ısıl değerler hem de yakıtların kapalı formülleri elde edilmiştir.

**Tablo 6.3** Linyit için hesap sonuçları

Element	Analiz (kg)	%	KM %	OKM %	Mol K. kg/kmol	Mol sayısı	kJ/element	kJ/bileşen	kcal/bileşen
Nem	0,124	12,4							
C	0,51	51	58,22	64,15	12	5,3459	33700	21618,87	5163,331
H	0,041	4,1	4,68	5,16	1	5,1572	141900	7318,113	1747,818
O	0,238	23,8	27,17	29,94	16	1,8711	-17738	-5310,244	-1268,27
N	0,0044	0,44	0,50	0,55	14	0,0395	2300	12,72956	3,040258
S	0,0016	0,16	0,18	0,20	32	0,0063	9300	18,71698	4,470261
Kül	0,081	8,1	9,25						
TOPLAM	1	100	100	100				23.658,18	5650,39
Nem (%)	12,4								
Kül (%)	8,10								
KM (%)	87,6								
OKM (%)	79,5								
$C_{5,35}H_{5,15}O_{1,87}N_{0,039}S_{0,0063}$									

Hesaplamalar sonucunda linyit için kapalı formül  $C_{5.35}H_{5.15}O_{1.87}N_{0.039}S_{0.0063}$  olarak bulunmuştur.

**Tablo 6.4** Biyokütle (çam talaşı) için hesap sonuçları

Element	Analiz (kg)	%	KM %	OKM %	Mol K. kg/kmol	Mol sayısı	kJ/element	kJ/bileşen	kcal/bileşen
Nem	0,153	15,3							
C	0,432	43,2	51,00	51,06	12	4,25532	33700	17208,51	4109,986
H	0,05	5	5,90	5,91	1	5,91017	141900	8386,525	2002,991
O	0,363	36,3	42,86	42,91	16	2,68174	-17738	-7610,99	-1817,77
N	0,0008	0,08	0,09	0,09	14	0,00675	2300	2,174941	0,519451
S	0,0002	0,02	0,02	0,02	32	0,00074	9300	2,198582	0,525097
Kül	0,001	0,1	0,12						
TOPLAM	1	100	100	100				17.988,42	4296,256
Nem (%)	15,3								
Kül (%)	0,12								
KM (%)	84,7								
OKM (%)	84,6								

Benzer şekilde biyokütle (çam talaşı) için ise kapalı formül  $C_{4,255}H_{5,91}O_{2,68}N_{0,0067}S_{0,00074}$  olarak bulunmuştur. Tablolarda; *KM* kuru maddeyi (kül ve organik kuru maddeler toplamı), *OKM* ise organik kuru maddeyi (C, H, O, N, S toplamı) yani yakıt içerisindeki yanabilen organik maddeleri ifade etmektedir. Hesaplardaki yakıtların üst ısıl değeri ve alt ısıl değeri sonuçları ise tablo 6.5'te gösterilmektedir.

**Tablo 6.5** Hesaplamalarda kullanılan yakıtların ısıl değer sonuçları

Yakıt Türü	Üst Isıl Değer (kJ/kg)	Alt Isıl Değer (kJ/kg)
Çam Talaşı	17.988	16.678
Linyit	23.658	22.512

Hesaplarda elde edilen yakıtların ısıl değer sonuçları, literatür çalışmalarında kullanılan yakıtların ısıl değerlerine yakın olduğu söylenebilir.

Zuwala ve Sciazko'nun odun talaşı ile kömürün teğetsel olarak ateşlenen pülverize bir kazanda birlikte yakılarak kazan verimlerini inceledikleri çalışmasında kullandıkları yakıtların ısıl değerleri tablo 6.6'da görülebilir (Zuwala ve Sciazko, 2010).

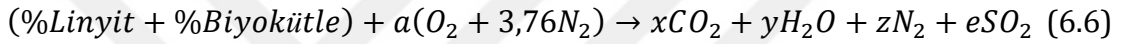
Gilbert vd.'nin Kanada'daki linyit kömürü ile beyaz çam talaşının kabarcıklı akışkan yataklı kazanda birlikte yakıldığı çalışmasında emisyon değerlerinde azalma ve kazan verimlerinde çok az bir düşüş olduğunu saptamışlardır. Çalışmalarında

kullandıkları yakıtların ısı değer sonuçları tablo 6.6'da görülebilir (Gilbert vd., 2011).

**Tablo 6.6** Biyokütle ile kömürün birlikte yakıldığı çalışmalardaki yakıtların ısı değer sonuçları

Yakıt Türü	Üst Isıl Değer (kj/kg)	Alt Isıl Değer (kj/kg)	Referans Çalışma
Odun Talaşı	16.356	15.189	Zuwala ve Sciazko, 2010
Linyit 1	21.487	20.587	
Linyit 2	23.341	22.371	
Beyaz Çam Talaşı	20.600	19.197	Gilbert vd., 2011
Linyit	21.800	20.875	

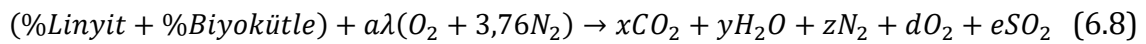
Hesaplarda bulunan bu kapalı formüllerle yanma denklemlerini çözerek çıkan ürünleri hesaplayabiliriz. Yakıtın hava ile *teorik* tam yanma denklemi aşağıdaki gibidir (Denklem 6.6). Çıkan ürünlerde O<sub>2</sub> yoktur.



Teorik hava miktarı a, oksijen denkliğinden hesaplanır (Denklem 6.7).

$$a = x + e + \frac{y}{2} - \frac{b}{2} \quad (6.7)$$

Giren ve çıkanların kütle denkliğinden de diğer katsayılar hesaplanarak denklem yeniden düzenlenir. Yakıtın hava ile gerçek tam yanma denklemi ise denklem 6.8'deki gibidir. Tam yanma denkleminde hava fazlalık katsayısı 'λ' eklenecektir. Hesaplamalarda λ = 1,7 kabul edilmiştir. Ayrıca çıkan ürünlerde O<sub>2</sub> olacaktır.



Bu denklemde yanma ürünlerini kmol cinsinden elde etmek için karbon denkliğinden x, hidrojen denkliğinden y, oksijen denkliğinden d, azot denkliğinden z, kükürt denkliğinden e hesaplanır ve denklem yeniden düzenlenir.

Karbon denkliği;

$$C \Rightarrow m = x \quad (6.9)$$

Hidrojen denkliği;



$$H \Rightarrow y = n/2 \quad (6.10)$$

Azot denkliği;

$$N \Rightarrow z = c/2 + 3,76 \cdot a \cdot \lambda \quad (6.11)$$

Kükürt denkliği;

$$S \Rightarrow e = f \quad (6.12)$$

Oksijen denkliği;

$$O \Rightarrow d = b/2 + a \cdot \lambda - x - y/2 - e \quad (6.13)$$

Toplam yanma ürünleri (baca gazı) miktarı kmol cinsinden denklem 6.14'ten hesaplanır.

$$n_{bg} = x + y + z + d + e \quad (6.14)$$

Baca gazını oluşturan bileşenlerin her birinin mol oranları (hacimsel oranları) aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır.

Karbondioksit oranı:  $x_{CO_2} = \frac{x}{n_{bg}} \quad (6.15)$

Su buharı oranı:  $x_{H_2O} = \frac{y}{n_{bg}} \quad (6.16)$

Azot oranı:  $x_{N_2} = \frac{z}{n_{bg}} \quad (6.17)$

Oksijen oranı:  $x_{O_2} = \frac{d}{n_{bg}} \quad (6.18)$

Kükürtdioksit oranı:  $x_{SO_2} = \frac{e}{n_{bg}} \quad (6.19)$

Baca gazını oluşturan bileşenlerin her birinin molar özgül ısıları aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır.  $T_{baca}$  baca gazlarının sıcaklığını göstermektedir ve birimi K'dir.

$$\overline{C}_{pCO_2} = 22,26 + 5,981 \cdot 10^{-2} x T_{baca} - 3,501 \cdot 10^{-5} x T_{baca}^2 + 7,469 \cdot 10^{-9} x T_{baca}^3 \quad (6.20)$$

$$\overline{C}_{pH_2O} = 32,24 + 0,1923 \cdot 10^{-2} x T_{baca} + 1,055 \cdot 10^{-5} x T_{baca}^2 - 3,595 \cdot 10^{-9} x T_{baca}^3 \quad (6.21)$$

$$\overline{C}_{pO_2} = 25,48 + 1,520 \cdot 10^{-2} x T_{baca} - 0,7155 \cdot 10^{-5} x T_{baca}^2 + 1,312 \cdot 10^{-9} x T_{baca}^3 \quad (6.22)$$

$$\overline{C}_{pN_2} = 28,90 - 0,1571 \cdot 10^{-2} x T_{baca} + 0,8081 \cdot 10^{-5} x T_{baca}^2 - 2,873 \cdot 10^{-9} x T_{baca}^3 \quad (6.23)$$

$$\overline{C}_{p_{SO_2}} = 25,78 + 5,795 \cdot 10^{-2} \times T_{baca} - 3,812 \cdot 10^{-5} \times T_{baca}^2 + 8,612 \cdot 10^{-9} \times T_{baca}^3 \quad (6.24)$$

Baca gazlarının ortalama özgül ısı ise denklem 6.25'ten hesaplanır (Çengel ve Boles, 2006).

$$\overline{C}_{port} = x_{CO_2} \times \overline{C}_{p_{CO_2}} + x_{O_2} \times \overline{C}_{p_{O_2}} + x_{H_2O} \times \overline{C}_{p_{H_2O}} + x_{N_2} \times \overline{C}_{p_{N_2}} + x_{SO_2} \times \overline{C}_{p_{SO_2}} \quad (6.25)$$

Yakıtın yanmasıyla elde edilen yakıt enerjisi aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$E_{yakıt} = m_{yakıt} \cdot H_u \quad (6.26)$$

Burada  $E_{yakıt}$  yakıtın yanmasıyla elde edilen enerjiyi (kJ),  $m_{yakıt}$  tüketilen yakıt miktarını (kg),  $H_u$  ise yakıtın alt ısıl değerini ifade etmektedir.

Yakıt, hava ve baca gazlarının mol kütleleri aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır.

Yakıtın mol kütlesi;

$$M_{a_{yakıt}} = m \cdot M_{a_C} + n \cdot M_{a_H} + b \cdot M_{a_O} + c \cdot M_{a_N} + f \cdot M_{a_S} \quad (6.27)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada  $M_{a_{yakıt}}$  yakıtın mol kütlesi,  $M_{a_C}$  karbonun mol kütlesi,  $M_{a_H}$  hidrojen atomunun mol kütlesi,  $M_{a_O}$  oksijen atomunun mol kütlesi,  $M_{a_N}$  azot atomunun mol kütlesi,  $M_{a_S}$  kükürtün mol kütlesidir ve birimi kg/kmol'dur.

Havanın mol kütlesi;

$$M_{a_{hava}} = x_{O_2} \cdot M_{a_{O_2}} + x_{N_2} \cdot M_{a_{N_2}} \quad (6.28)$$

eşitliğinden hesaplanır.  $x_{O_2}$  ve  $x_{N_2}$  havadaki oksijen ve azotun mol oranlarıdır ve değerleri sırasıyla 0,21 ve 0,79'dur.

Baca gazlarının mol kütlesi;

$$M_{a_{baca\ gazı}} = x_{CO_2} \cdot M_{a_{CO_2}} + x_{H_2O} \cdot M_{a_{H_2O}} + x_{O_2} \cdot M_{a_{O_2}} + x_{N_2} \cdot M_{a_{N_2}} + x_{SO_2} \cdot M_{a_{SO_2}} \quad (6.29)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada  $M_{a_{baca\ gazı}}$  baca gazlarının mol kütlesi,  $M_{a_{CO_2}}$  karbondioksitin mol kütlesi,  $M_{a_{H_2O}}$  suyun mol kütlesi,  $M_{a_{O_2}}$  oksijenin mol kütlesi,  $M_{a_{N_2}}$  azotun mol kütlesi,  $M_{a_{SO_2}}$  kükürtün mol kütlesidir ve birimi kg/kmol'dur.

Baca gazlarının kütlesi (kg), kütlelerin korunumu kanunundan hareketle yakıtın ve havanın kütleleri toplamına eşittir ve birimleri kg'dır (Denklem 6.30).

$$m_{\text{bac}a \text{ gaz}ı} = m_{\text{yak}ıt} + m_{\text{hava}} \quad (6.30)$$

Havanın kütlesi;

$$m_{\text{hava}} = \frac{m_{\text{yak}ıt} \cdot 4,76 \cdot \lambda \cdot M_{\text{a}hava}}{M_{\text{a}yak}ıt} \quad (6.31)$$

Baca gazlarının kütlesi;

$$m_{\text{bac}a \text{ gaz}ı} = m_{\text{yak}ıt} + \frac{m_{\text{yak}ıt} \cdot 4,76 \cdot \lambda \cdot M_{\text{a}hava}}{M_{\text{a}yak}ıt} \quad (6.32)$$

eşitliklerinden hesaplanır. Baca gazlarının mol miktarı ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanır (Denklem 6.33). Birimi kmol'dür.

$$n_{\text{bac}a \text{ gaz}ı} = \frac{m_{\text{bac}a \text{ gaz}ı}}{M_{\text{a}bac}a \text{ gaz}ı} \quad (6.33)$$

Yakıt yandıktan sonra elde edilen enerjinin bir bölümü baca gazlarıyla dışarı atılmaktadır. Baca gazlarının enerjisi; duyulur enerji ve gizli enerji olmak üzere iki türdür. Duyulur enerji baca gazlarının sıcaklığından kaynaklanmaktadır. Gizli enerji ise baca gazlarındaki su buharının taşıdığı enerjidir.

Baca gazlarında duyulur enerji;

$$E_{\text{bc}g \text{ duyulur}} = n_{\text{bac}a \text{ gaz}ı} \cdot \overline{C_{p\text{ort}}} \cdot (T_{\text{bac}a} - T_0) \quad (6.34)$$

Baca gazlarındaki su buharının taşıdığı gizli enerji;

$$E_{\text{bc}g \text{ gizli}} = (n_{\text{bac}a \text{ gaz}ı} \cdot x_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot h_{fg} \cdot M_{\text{a}H_2O} \quad (6.35)$$

eşitliklerinden hesaplanır. Burada  $h_{fg}$  suyun buharlaşma ısısıdır ve birimi kJ/kg'dır.

Bu değerlerle birlikte toplam baca kayıpları (enerji) ve % baca kaybı;

$$E_{\text{top} \text{ bac}a \text{ kayb}ı} = E_{\text{bc}g \text{ duyulur}} + E_{\text{bc}g \text{ gizli}} \quad (6.36)$$

$$\nabla = \frac{E_{\text{top} \text{ bac}a \text{ kayb}ı}}{E_{\text{yak}ıt}} \times 100 \quad (6.37)$$

Kazan verimi ise aşağıdaki gibi hesaplanır (Denklem 6.38);

$$\eta_{\text{kazan}} = 1 - \frac{\text{Kayıp enerji}}{\text{Giren enerji}} = 1 - \frac{E_{\text{kazan} \text{ kay}ıpları}}{E_{\text{yak}ıt}} \quad (6.38)$$

Kazan kayıpları ise;

$$E_{kazan kayıpları} = E_{top baca kaybı} + E_{diğer kayıplar} \quad (6.39)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Hesaplamalarda  $E_{diğer kayıplar}$  (yüzey kaybı, kül kaybı) kazan ve baca kayıplarına göre %1 oranında kabul edilmiştir.

Yanma sıcaklığı  $T_{yn}$  hesabı;

Kazana giren enerji ile yanma sonu enerji eşitliğinden hesaplanır (Denklem 6.40).

$$m_{yakıt} \cdot Hu = (T_{yn} - T_0) \sum_k n_k \overline{C_{p_k}} \quad (6.40)$$

$T_{yn}$  linyit – çam talaşının her karışım oranı için hesaplanıp grafik çizilir.

## 6.6 Enerji Analizi ve Ekserji Analizi

Özellikleri zamanla değişmeyen yani kararlı olan kontrol hacimleri için kütle, enerji ve entropi bağıntıları sırasıyla aşağıdaki şekilde yazılmaktadır.

$$\sum_g \dot{m}_g = \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} \quad (6.41)$$

$$\dot{Q}_{kh} - \dot{W}_{kh} = \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} \left( h_{\zeta} + \frac{V_{\zeta}^2}{2} + gz_{\zeta} \right) - \sum_g \dot{m}_g \left( h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) \quad (6.42)$$

$$\dot{S}_{\dot{u}} = \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} s_{\zeta} - \sum_g \dot{m}_g s_g - \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} \quad (6.43)$$

Ekserji, verilen şartlar altındaki bir sistemin çevresi ile aynı şartlara getirilmesi ile elde edilebilecek en büyük işe denir. Bir sistemin ölü halde olması, çevresiyle termodinamik dengede bulunmasıdır. Sistem ölü haldeyken çevresi ile eşit sıcaklık ve basınçta olup çevreyle ısıl ve mekanik dengededir (Terhan, 2015).

Ekserji, enerjinin faydalı kısmını oluşturmaktadır. Enerjinin kullanılmayan kısmına ise anerji adı verilmektedir. Buna göre ekserji ve anerji arasında;

$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji}$$

bağıntısı geçerlidir. Ekserji dengesi;

$$\dot{E}_{X,G} = \dot{E}_{X,\zeta} + \dot{E}_{X,K} + \sum_i I_i \quad (6.44)$$

eşitliğiyle hesaplanır.

Tersinmezlik, ekserji kaybı olarak da isimlendirilir. Tersinmezlik, ekserji dengesinden;

$$I = \sum_{giren} \dot{E}_{X,g} - \sum_{çıkan} \dot{E}_{X,c} \quad (6.45)$$

veya entropi artışı (Gouy-Stodola) ilkesinden hareketle,

$$I = T_0(\sum_c \dot{S}_c - \sum_g \dot{S}_g) = T_0 \Delta \dot{S} \quad (6.46)$$

bağıntıları kullanılarak hesaplanır.

Kimyasal ekserji; çevre ile aynı sıcaklık ve basınca sahip olan bir sistemin kimyasal bileşiminin, çevre ile dengeye gelirken elde edilebilecek maksimum yararlı işe denir (Terhan, 2015).

Yakıtların kimyasal ekserjileri, katı, sıvı ve gaz olma durumlarına göre farklı şekillerde hesaplanır. Yanabilen kimyasal maddelerin ekserjisi:

$$\varepsilon_0 = -\Delta h_0 + T_0 \Delta s_0 + \tilde{R} T_0 \left( v_{O_2} \ln \frac{P_{O_2}^{00}}{P_0} - \sum_k v_k \ln \frac{P_k^{00}}{P_0} \right) \quad (6.47)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada  $k$  indisi yanma ürünlerini ifade eder. Bu ifade kimyasal bileşimleri ve termokimyasal verileri hesaplanabilen gaz yakıtlar için uygulanabilir.  $\Delta s_0$  reaksiyon entropisinin zorluğundan dolayı, katı ve sıvı yakıtların ekserjisinin yukarıdaki bağıntıdan hesaplanması oldukça zordur. Bundan dolayı Szargut ve Strylska; yakıt ekserjisinin yakıtın ısı değerine oranını ifade eden  $\varphi$  değerini geliştirmişlerdir (Kotas, 1995). Bu oran;

$$\varphi = \frac{\varepsilon_0}{(Hu)} \quad (6.48)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

C, H, O, N içeren ve O/C oranı 0,667'den küçük olan katı yakıtlar için yakıtın bileşenlerinin kütle oranlarını içeren aşağıdaki ifade kullanılır (Kotas, 1995).

$$\frac{o}{c} \leq 0,667 \quad \Rightarrow \quad \varphi = 1.0437 + 0.1882 \frac{h}{c} + 0.0610 \frac{o}{c} + 0.0404 \frac{n}{c} \quad (6.49)$$

Burada  $h$ ; hidrojenin kütleli fraksiyonu,  $c$ ; karbonun kütleli fraksiyonu,  $o$ ; oksijenin kütleli fraksiyonu,  $n$ ; azotun kütleli fraksiyonudur. Bu ifade O/C oranından dolayı odun türü yakıtlar için uygun değildir.  $0,667 < \frac{o}{c} < 2,67$  olması durumunda odun türü yakıtları da içeren aşağıdaki ifade kullanılır (Denklemler 6.50).

$$\varphi = \frac{1,0438 + 0.1882 \frac{h}{c} - 0,2509 \left( 1 + 0,7256 \frac{h}{c} \right) + 0,0383 \frac{n}{c}}{1 - 0,3035 \frac{o}{c}} \quad (6.50)$$

Bu ifadede kükürt ve su buharının ekserjileri dikkate alınmamıştır. Her iki ürün dikkate alındığında nemli katı yakıtlar için kimyasal ekserji aşağıdaki gibi hesaplanır (Denklem 6.51).

$$\varepsilon_{0,katı} = \varphi((Hu)_{katı} + wh_{fg}) + (\varepsilon_{0,s} - (Hu)_s)s \quad (6.51)$$

Burada  $w$ ; yakıt içerisindeki suyun kütleli fraksiyonu,  $s$ ; yakıtın içerisindeki kükürtün kütleli fraksiyonu,  $h_{fg}$ ; yakıt içerisindeki suyun çevre sıcaklığındaki buharlaşma entalpisidir.

Elde edilen bu bağıntı katı yakıtlar için %1 hassasiyetle uygulanabilir.

Ekserji maksimum iş potansiyeli olarak tanımlandığından, bütün süreçlerde iş, ekserjiye eşittir.

$$\dot{E}_{X,W} = \dot{W} \quad (6.52)$$

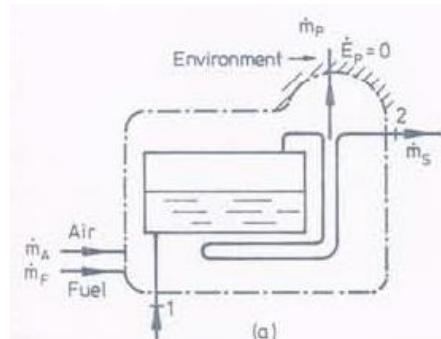
Isı transferinden dolayı meydana gelen ekserji,

$$\dot{E}_{X,Q} = \dot{Q}_A \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (6.53)$$

şeklinde hesaplanır.

## 6.7 Verim Hesapları

*Verim*; bir sistemden alınan veya arzu edilen enerji/ekserjinin, sisteme verilen enerji/ekserjiye oranı olarak tanımlanır. Başka bir tanımla; ürünlerin enerji/ekserjisinin, yakıtların enerji/ekserjisine oranı sırasıyla *enerji ve ekserji verimi* olarak adlandırılır. Bir santraldeki buhar kazanının verim hesabı için şekil 6.7'deki basit bir kazanı ele alalım. (Kotas, 1995).



Şekil 6.7 Basit bir buhar kazanı (Kotas, 1995)

Özellikleri zamanla değişmeyen yani kararlı bir durumdaki buhar kazanı için ekserji dengesi denklem 6.54'teki gibi yazılabilir (Kotas, 1995).

$$\dot{m}_{yakıt} \varepsilon_{yakıt} + \dot{m}_{hava} \varepsilon_{hava} - \dot{m}_{ürün} \varepsilon_{ürün} - \dot{m}_{buhar} (\varepsilon_{bh,\zeta} - \varepsilon_{bh,g}) = \dot{I} \quad (6.54)$$

Eğer hava atmosferik şartlarda (ön ısıtma olmadan) kazanı terk ediyorsa kontrol bölgesi yanma ürünlerinin karışım bölgesini de kapsayacak şekilde genişletilebilir. Dolayısıyla;

$$\dot{m}_{hava} \varepsilon_{hava} - \dot{m}_{ürün} \varepsilon_{ürün} = 0 \quad (6.55)$$

Denklem 6.54 yeniden düzenlenirse;

$$\dot{m}_{yakıt} \varepsilon_{yakıt} - \dot{m}_{buhar} (\varepsilon_{bh,\zeta} - \varepsilon_{bh,g}) = I \quad (6.56)$$

eşitliği elde edilir.

Bir sistemden alınan veya elde edilen ekserjinin, sisteme verilen ekserjiye oranı *rasyonel verim* veya *ekserji verimi* olarak tanımlanır. Bir santraldeki kazan için ekserji verimi;

$$\psi = \frac{\dot{m}_{buhar} (\varepsilon_{bh,\zeta} - \varepsilon_{bh,g})}{\dot{m}_{yakıt} \varepsilon_{yakıt}} \quad (6.57)$$

eşitliğiyle hesaplanır.

Kazanın konvansiyonel yanma verimi ise;

$$\eta_{yanma} = \frac{\dot{m}_{buhar} (h_{bh,\zeta} - h_{bh,g})}{\dot{m}_{yakıt} H_u} \quad (6.58)$$

olarak tanımlanır. Yukarıdaki denklem, Szargut ve Strlyska'nın geliştirdiği denklem 6.48'deki  $\varphi$  değeriyle yeniden düzenlenirse;

$$\dot{m}_{yakıt} \varepsilon_{yakıt} = \frac{\dot{m}_{buhar} (h_{bh,\zeta} - h_{bh,g}) \varphi}{\eta_{yanma}} \quad (6.59)$$

eşitliği elde edilir. Ayrıca;

$$\varepsilon_{bh,\zeta} - \varepsilon_{bh,g} = (h_{bh,\zeta} - h_{bh,g}) - T_0 (s_{bh,\zeta} - s_{bh,g}) \quad (6.60)$$

Kazanın birim buhar için özgül tersinmezliği ise;

$$\frac{I}{\dot{m}_{buhar}} = (h_{bh,\zeta} - h_{bh,g}) \left( \frac{\varphi}{\eta_{yanma}} - 1 \right) + T_0 (s_{bh,\zeta} - s_{bh,g}) \quad (6.61)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Tüm bu denklemlerle birlikte, kazanın konvansiyonel yanma verimi ile rasyonel verim arasında denklem 6.62'deki ilişki elde edilir.

$$\psi = \frac{\eta_{yanma}}{\varphi} \left[ 1 - \frac{T_0(s_{bh,\zeta} - s_{bh,g})}{(h_{bh,\zeta} - h_{bh,g})} \right] \quad (6.62)$$

Düşük kapasitede çalışan, odun atığı yakıtlı bir enerji üretim tesisinin aşağıda yer alan tablo 6.7'de kazan, türbin, kondenser ve besleme pompalarına ilişkin olarak ekserji giriş çıkış değerleri verilmiştir (Naik vd., 2012).

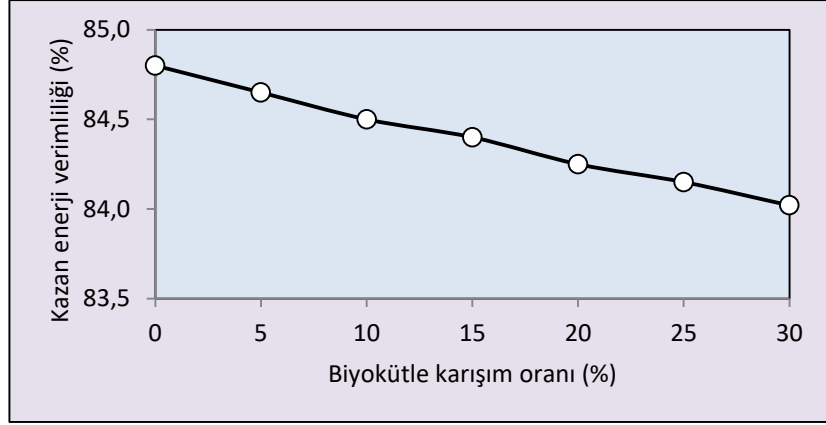
**Tablo 6.7** Tesis bileşenlerine ilişkin ekserji-enerji değerleri (Naik vd., 2012)

Tesis bileşenleri	Ekserji (Giriş)	Ekserji (Çıkış)	Ekserji kaybı (%)	Anerji (kJ/kg)
Kazan	6200,95	3151,51	49,17	3049,44
Türbin	3151,51	2125,93	32,54	1025,58
Kondenser	2125,93	1312,07	38,28	813,86
Besleme pompası	1312,07	1037,83	20,90	274,24

Tesisteki en büyük ekserji kaybının kazanda olduğu görülmüştür. Kurutucusu olmayan bu tasarımdaki bir tesiste, daha önceki bölümlerde de ifade edildiği üzere, yakıt olarak kullanılan odunun nem içeriği fazla olduğundan tesisteki ekserji kaybı fazla olup; sistemin toplam verimliliğini düşürmektedir. Biyokütlenin içerisindeki nem oranının enerji üretim tesislerine negatif etkisi böylelikle bir kez daha ispat edilmiştir. Eğer tesis, yakıtın kazana gönderilmesinden önce bir kurutucu ilave edilerek çalıştırılırdı, kazanın verimliliği artacak, ekserji kaybı azalacaktı.

Bu tez çalışmasında dikkate alınan linyit-biyokütle karışım oranlarının kazan enerji verimine etkisi şekil 6.8 ve tablo 6.8'de görülmektedir. Kazan ekserji verimine etkisi ise şekil 6.9 ve tablo 6.9'da görülmektedir. Biyokütle karışım miktarı arttıkça kazan enerji ve ekserji verimi de azalmaktadır. Bunun en önemli nedeni, biyokütle içerisindeki yüksek nem miktarı ve ısıl değerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu iki faktör, yanma sıcaklığını düşürdüğünden dolayı şekil 6.10 ve tablo 6.10'da görüldüğü gibi hem enerji hem de ekserji verimleri azalmaktadır.

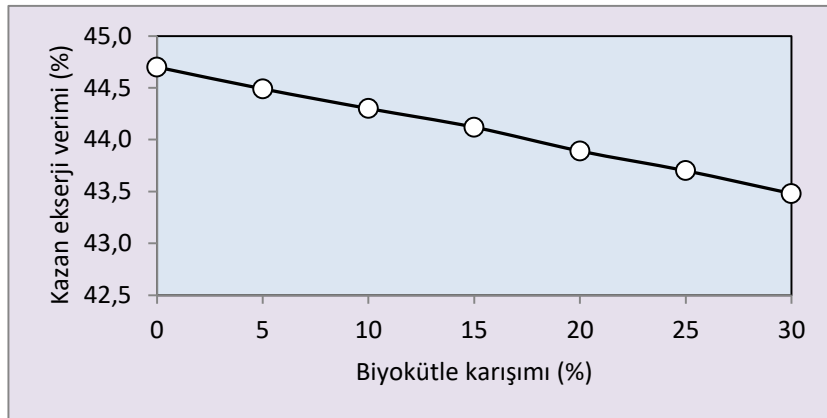




**Şekil 6.8** Biyokütle karışım oranının kazan enerji verimine etkisi

**Tablo 6.8** Biyokütle karışım oranına göre kazan enerji veriminin değişimi

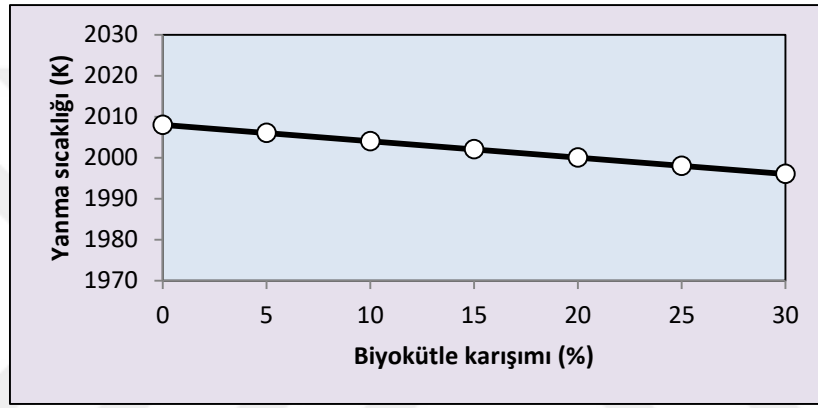
Biyokütle Karışım Oranı (%)	Kazan Enerji Verimi (%)
0	84,8
5	84,65
10	84,5
15	84,4
20	84,25
25	84,15
30	84,02



**Şekil 6.9** Biyokütle karışım oranının kazan ekserji verimine etkisi

**Tablo 6.9** Biyokütle karışım oranına göre kazan ekserji veriminin değişimi

<b>Biyokütle Karışım Oranı (%)</b>	<b>Kazan Ekserji Verimi (%)</b>
0	44,7
5	44,49
10	44,3
15	44,12
20	43,89
25	43,7
30	43,48



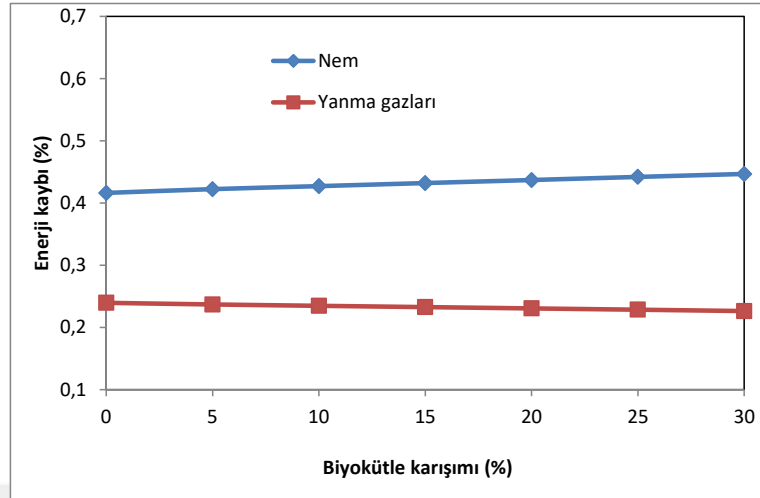
**Şekil 6.10** Biyokütle karışım oranının yanma sıcaklığı üzerine etkisi

**Tablo 6.10** Biyokütle karışım oranına göre yanma sıcaklığının değişimi

<b>Biyokütle Karışım Oranı (%)</b>	<b>Yanma Sıcaklığı (K)</b>
0	2008
5	2006
10	2004
15	2002
20	2000
25	1998
30	1996

Şekil 6.11 ve 6.12'deki grafikte nem ve yanma gazlarının enerji ve ekserji kaybına etkisi daha net görülmektedir. Ayrıca; tablo 6.11 ve tablo 6.12'de sayısal değerler görülebilir. Biyokütle karışım miktarı arttıkça nem miktarı artmakta ve bundan

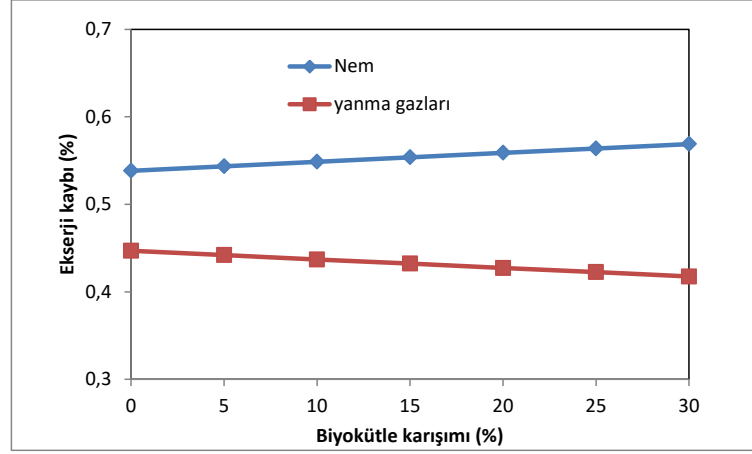
dolayı enerji ve ekserji kayıpları da artmaktadır. Bununla birlikte yanma gazlarının sıcaklığı azalmaktadır.



**Şekil 6.11** Biyokütle karışım oranının enerji kaybına etkisi

**Tablo 6.11** Biyokütle karışım oranına göre enerji kaybındaki değişim

Biyokütle Karışım Oranı (%)	Nem Miktarındaki Artış	Yanma Sıcaklığındaki Azalış
0	0,416117	0,239422
5	0,422236	0,236792
10	0,427026	0,23462
15	0,431997	0,232548
20	0,436877	0,230426
25	0,441851	0,228353
30	0,446637	0,226183

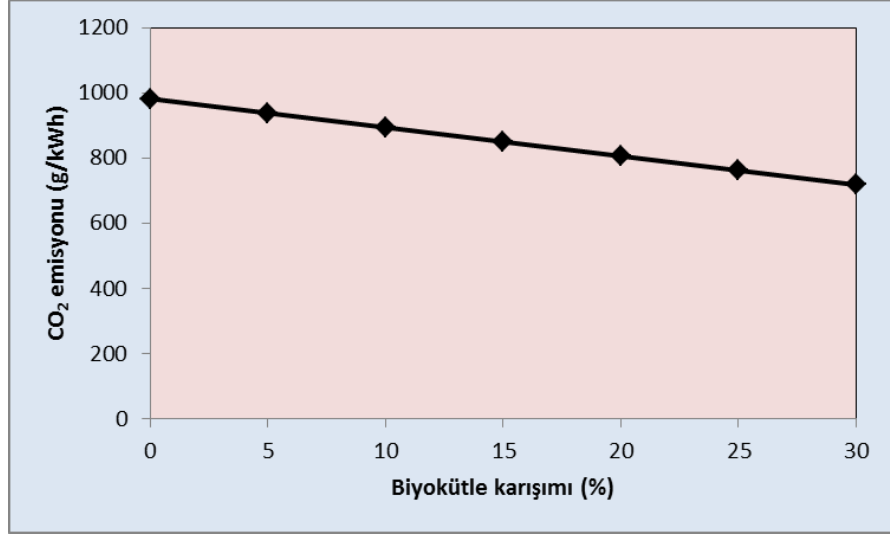


**Şekil 6.12** Biyokütle karışım oranının ekserji kaybına etkisi

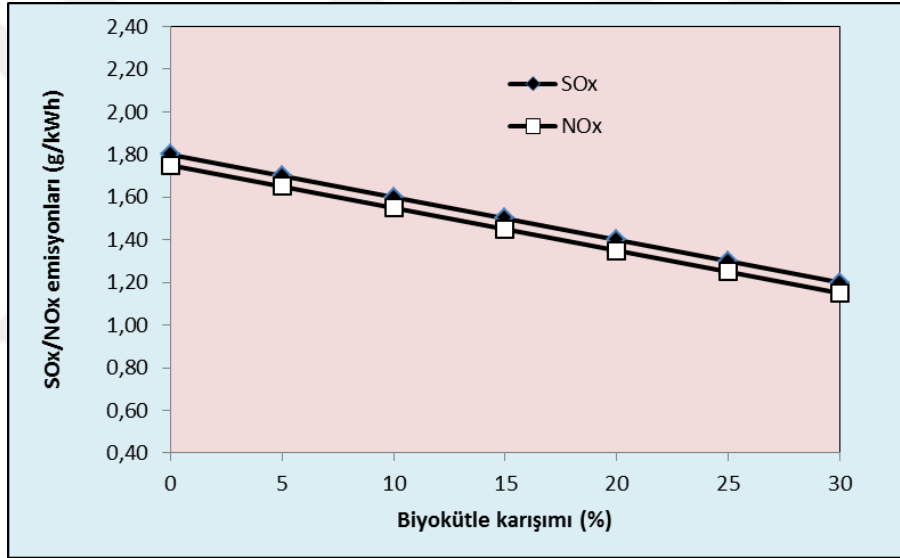
**Tablo 6.12** Biyokütle karışım oranına göre ekserji kaybındaki değişim

Biyokütle Karışım Oranı (%)	Nem Miktarındaki Artış	Yanma Sıcaklığındaki Azalış
0	0,538225	0,446896
5	0,543406	0,441997
10	0,548544	0,436893
15	0,553685	0,432288
20	0,558779	0,427226
25	0,563738	0,42255
30	0,568786	0,417532

Biyokütle kullanımı emisyon değerlerini olumlu yönde etkilemektedir. Yanma denklemlerini her bir oran için çözdüğümüzde çıkan ürünleri ayrı ayrı bulmuş oluyoruz. Örneğin; %95 linyit, %5 biyokütle yakılması durumunda %CO<sub>2</sub>, %SO<sub>x</sub>, %NO<sub>x</sub> bulunur. Şekil 6.13 ve 6.14'te biyokütle karışımı ile emisyon değerlerinin değişimleri görülmektedir. Grafiklerde görüldüğü gibi biyokütle karışım oranı arttıkça CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> değerleri azalmaktadır. Çevresel açıdan olumlu sonuçları olduğu için biyokütlenin kullanımı rahatlıkla tercih edilebilir.



**Şekil 6.13** Biyokütle karışım oranının CO<sub>2</sub> emisyonuna etkisi



**Şekil 6.14** Biyokütle karışım oranının SO<sub>x</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonuna etkisi

Zuwala ve Sciazko, teğetsel olarak ateşlenen pulverize bir kazanın enerji analizini yapmışlardır. Deneysel sonuçlar, %6,6'lık kütle payındaki biyoatıktan veya %9,5 kütle payındaki odun talaşından oluşan kömür ve biyokütle karışımının birlikte yakılmasının kazan verimi üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Verim değerleri tablo 6.13 ve tablo 6.14'te, emisyon değerleri ise tablo 6.15 ve 6.16'da görülebilir. Ayrıca, hesaplanan emisyon verileri şekil 6.15 ve 6.16'da görüldüğü gibi biyokütle ile birlikte yakmanın CO ve SO<sub>2</sub> emisyonlarını azalttığını göstermiştir (Zuwala ve Sciazko, 2010).

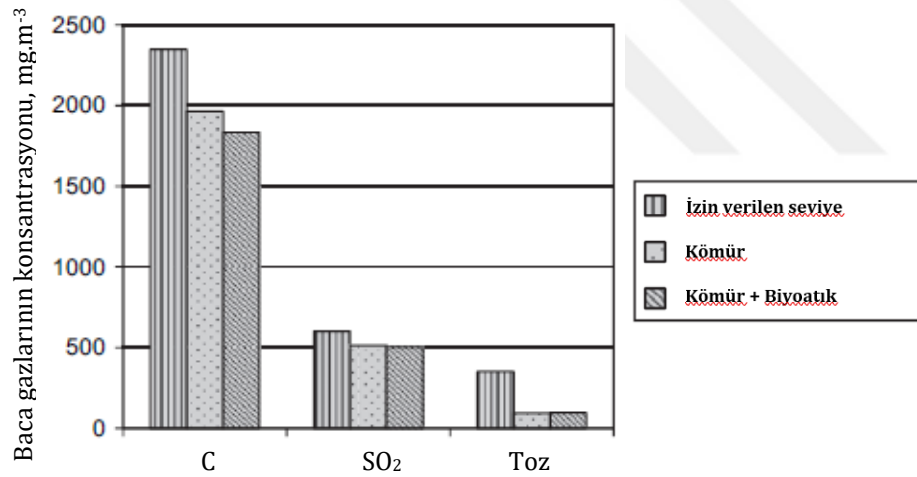
Hesaplarımızdaki gibi biyokütlenin kullanılması ile zararlı gazların emisyonlarında azalma olmaktadır ve kazan verimlerinde çok az bir düşüş meydana gelmektedir.

**Tablo 6.13** Biyoatık ile kömürün birlikte yakılmasının kazan verimine etkisi (Zuwala ve Sciazko, 2010)

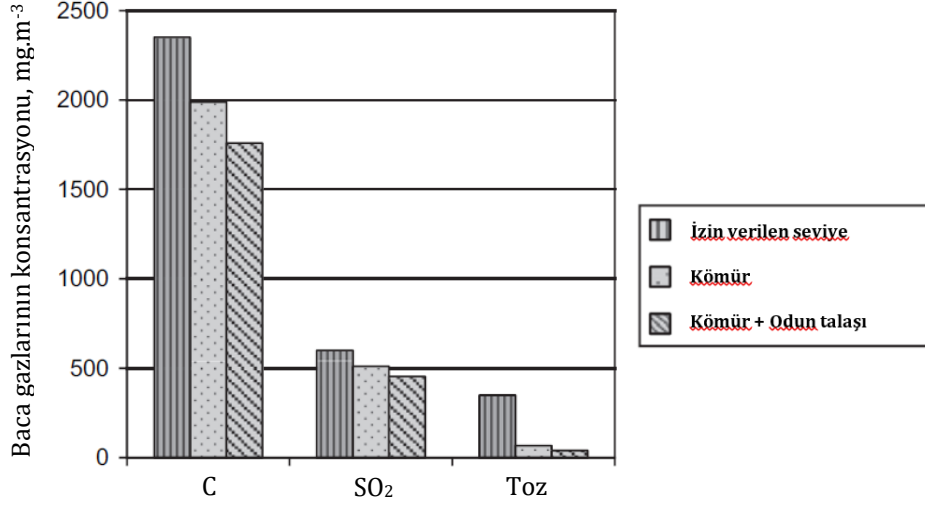
	<b>Biyokütle Olmadan (Yalnızca Kömür ile)</b>	<b>%6,6 Biyoatık ile Kömürün Birlikte Yakılması Durumunda</b>
Kazan Termal Verimi (%)	91,23	90,61

**Tablo 6.14** Odun talaşı ile kömürün birlikte yakılmasının kazan verimine etkisi (Zuwala ve Sciazko, 2010)

	<b>Biyokütle Olmadan (Yalnızca Kömür ile)</b>	<b>%9,5 Odun Talaşı ile Kömürün Birlikte Yakılması Durumunda</b>
Kazan Termal Verimi (%)	92,14	91,83



**Şekil 6.15** Biyoatık ile kömürün birlikte yakılmasının CO ve SO<sub>2</sub> emisyonuna etkisi (Zuwala ve Sciazko, 2010)



**Şekil 6.16** Odun talaşı ile kömürün birlikte yakılmasının CO ve SO<sub>2</sub> emisyonuna etkisi (Zuwala ve Sciazko, 2010)

**Tablo 6.15** Biyoatık ile kömürün birlikte yakılmasının CO ve SO<sub>2</sub> emisyonuna etkisi (Zuwala ve Sciazko, 2010)

Emisyon Türü (mg/GJ)	Biyokütle Olmadan (Yalnızca Kömür ile)	%6,6 Biyoatık ile Kömürün Birlikte Yakılması Durumunda
SO <sub>2</sub>	361,8	238,4
NO <sub>2</sub>	94,3	65,5
CO	5,7	4,3
Toz	16,9	12,6

**Tablo 6.16** Odun talaşı ile kömürün birlikte yakılmasının CO ve SO<sub>2</sub> emisyonuna etkisi (Zuwala ve Sciazko, 2010)

Emisyon Türü (mg/GJ)	Biyokütle Olmadan (Yalnızca Kömür ile)	%6,6 Biyoatık ile Kömürün Birlikte Yakılması Durumunda
SO <sub>2</sub>	316,1	314,4
NO <sub>2</sub>	81,2	81,2
CO	3,8	3,4
Toz	10,7	7,1

Enerji yatırımcıları için en önemli unsur olan yatırım maliyeti, kurutucunun ilavesi ile bir miktar artsa dahi, sistem verimliliği artıp birim yakıttan elde edilen enerji

miktarı da daha fazla olacağından, tesisin amortisman süreci hızlanır. Uzun vadede ise, tesisin karlılık oranı artar. Diğer taraftan, yakıt tüketiminin azalması ile zehirli gaz salınımı da azalacağından, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimde en önemli etken olan çevreyi koruma unsuru da daha fazla gerçekleşmiş olacaktır.





Enerji tüketimindeki küresel artış, öngörülen düşük maliyetli fosil yakıt rezervlerinin tükenmesi ve iklim değişikliği, yenilenebilir lignoselülozik biyokütlelere (odun atıkları) dayanan daha sürdürülebilir enerji tesislerini geliştirmeye yönelik acil ihtiyaçlara dönüşmüştür.

Biyokütle yakıtı kullanılacak tesisler için kojenerasyon teknolojisinin, tesisin hem elektrik hem de ısı enerjisini tedarik edebilmek ve hatta fazla elektrik enerjisinin şebekeye verilerek serbest piyasa koşullarında satılabilmesini sağlamak adına uygun olduğu düşünülmektedir.

Biyokütle yakıtlı kojenerasyon tesisi tasarlanırken, termodinamik çevrim teknolojilerinde Rankine çevrimi tercih edilmiştir. Farklı sıcaklık, basınç ve kuruluk oranlarında çalışabilmesi; ürettiği ısı ve iş miktarının fazlalılığı söz konusu çevrimin tercih edilmesinde ana sebeplerdir. Kazan ünitesi için ise, tüm yıl boyunca ve her türlü yakıt ile çalışabilmesinden dolayı, hareketli ızgaralı kazan düşünülmüştür. 2,3 MW kurulu güce göre dizayn edilen örnek bir tesisin verimliliğinin %22,9 olacağı hesaplanmıştır.

Bununla birlikte, düşük kapasiteli biyokütle yakıtlı tesisler için yapılan ekserji analizinde, tesis üniteleri arasında en çok ekserji kaybının kazanda olduğu görülmüş ve bunun sebebinin, termik tesislerde genellikle yakıt olarak kullanılan kömürün aksine, biyokütle yakıtlarında nem oranının çok fazla olmasından kaynaklandığı görülmüştür. Biyokütlelerin bileşimi son derece heterojen olmasına rağmen, tüm malzemelerin ortak bir özelliğinin olduğu çoğu durumda, enerji üretimi için kullanılmadan önce su/nem içeriğinin önemli ölçüde azaltılması gerektiği anlaşılmıştır.

Biyokütlenin en kolay uygulanabilir şekli kömür ile birlikte karıştırılarak yakılması (co-firing) yönteminin olduğu gözlemlenmiştir. Kömür içerisine %30'lara kadar biyokütle karıştırılması durumunda yanma veriminde çok az değişim olmaktadır.

Biyokütlenin yüzdesel olarak 5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında linyit ile kullanılması durumu için kazan enerji ve ekserji verimleri hesaplanmış ve grafik halinde verilmiştir. Biyokütle karışım oranı arttıkça; kazan enerji veriminin %85'ten %84'e düştüğü, kazan ekserji veriminin ise %45'ten %43'e düştüğü görülmüştür. Kazan verimlerindeki bu düşüşün sebebi biyokütle içerisindeki nem miktarıdır. Yakıtın, kazana gönderilmeden önce mutlaka bir kurutucu ünitesi kullanılarak, yakıttaki su/nem oranının düşürülmesi ve yakıttaki suyun buharlaştırılması gerekmektedir.

Ayrıca bu yöntemle, kömür yakmadan dolayı açığa çıkan SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> vb. zehirli gazların atmosfere salınımını azaltma imkânı doğmaktadır. Biyokütle karışım oranı arttıkça; CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> emisyonlarının yaklaşık %30 azaldığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı kömür tesislerine biyokütle tesisi ilavesi ile sistem az maliyetle kurulabilir.

Bir enerji üretim tesisinde esas olan, enerji tüketimini azaltarak, enerji verimliliğini artırmaktır. Biyokütle yakıtlı enerji üretim tesislerinde, özellikle düşük kapasiteli tesislerin değerlendirilmesi ile birlikte, bu durumun kurutucu ünitesi ilavesi ile sağlanabileceği ve %10'lara varan oranlarda verim artışı sağlanabileceği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, odun atıkları yakıtlı enerji üretim tesisinin, verimliliğini artırıp; dolayısıyla daha ekonomik ve enerji yatırımcısının dikkatini çeker hale getirebilmek adına kurutucu ünitesi ilave edilmesi düşünülmüştür.

Biyokütle yakıtın kurutulmasının; yanma verimini ve buhar üretimini artırdığı, zehirli gaz emisyonlarını azalttığı ve kazanın çalışmasını iyileştirdiği görülmüştür. Yakıtın, kazana gönderilmeden önce mutlaka bir kurutucu ünitesi kullanılarak, yakıttaki su/nem oranının düşürülmesi ve yakıttaki suyun buharlaştırılması gerekmektedir. Biyokütle yakıtlı elektrik enerjisi üretim tesislerine kurutucu ilavesinin birçok faydası vardır.

Daha kuru yakıtlar ile, kazanlarda gerçekleşen tam yanma daha az miktarda uçucu kül ile sonuçlanacağından kazan hava emisyonları da azaltılmış olur. Böylelikle, baca gazındaki parçacıkların da azaltılması sağlanır.

Tesis için daha az yakıt gereksiniminin olması, kazan, kül atık sistemleri vb. ekipmanların boyutlarının küçültülebilmesine imkân sağlar.

Biyokütle yakıtların kurutulması nakliye maliyetlerini düşürür. İlave olarak, kuru biyoküteller depoda mikrobiyolojik bozulmaya daha az maruz kalırlar.

Son olarak; kurutucu ünitesinin çalışması için gerek duyulan ısı, kazan baca gazından veya diğer atık ısı kaynaklarından geri kazanılırsa, verimlilik daha da artar ve tesis daha da ekonomik hale gelir.



## KAYNAKÇA

---

- ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA). (2017). Catalog of CHP Technologies. ABD: EPA.
- ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA). (Eylül, 2007). Biomass Combined Heat and Power Catalog of Technologies U. S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership. ABD: EPA.
- ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA). Combined Heat and Power (CHP) Partnership. *Methods for Calculating CHP Efficiency*. (2018). <https://www.epa.gov/chp/methods-calculating-chp-efficiency> adresinden erişildi.
- ABD Enerji Bakanlığı. (Mart, 2013). Guide to the Successful Implementation of State Combined Heat and Power Policies.
- ABD Enerji Bakanlığı Departmanı. (2017). *Overview of CHP Technologies*. [https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/attachments/CHP%20Overview-120817\\_compliant\\_0.pdf](https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/attachments/CHP%20Overview-120817_compliant_0.pdf) adresinden erişildi.
- Agbor, V.B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A. ve Levin, D.B. (2011). Biomass Pretreatment: Fundamentals Toward Application. *Biotechnology Advances*, 29, 675-685.
- Akgün, N. (2006). Rüzgâr Enerjisi. Dört Mevsim Meteoroloji Bülteni, 36.
- Alanne, K. ve Saari, A. (2004). Sustainable Small-Scale CHP Technologies for Buildings: The Basis for Multi-Perspective Decision-Making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 422.
- Al-Mansour, F. ve Zuwala J. (2010). An Evaluation of Biomass Co-firing in Europe. *Biomass and Bioenergy*, 34(5), 620-629.
- Amos, W.A. (1998). Report on Biomass Drying Technology. National Renewable Energy Labotary: NREL/TP-570-25885, 3-4.
- Askarov, D. (Kasım, 2010). Cogeneration. Submitted as Coursework for Physics 240, Stanford University.
- AutoMOD Teknoloji. (2019). *Rüzgar Türbini Nasıl Çalışır?* <https://www.automodteknoloji.com/ruzgar-turbini-nasil-calisir/> adresinden erişildi.
- Backreedy R.I, Fletcher L.M, Jones J.M, Ma L, Pourkashanian M., and Williams A. (2005). Co-firing Pulverized Coal and Biomass: A Modelling Approach. *Proceedings of Combustion Institute*, 30(2), 2955-2964.
- Badour, C., Gilbert, A., Xu, C., Li, H., Shao, Y., Tourigny, G., ve Preto, F. (2011). Combustion and Air Emissions from Co-Firing a Wood Biomass, a Canadian Peat and a Canadian Lignite Coal in a Bubbling Fluidised Bed Combustor.

- Bakker, R.R. ve Elberse, H.W. (2005). Managing Ash Content and Quality in Herbaceous Biomass an Analysis from Plant to Product. 14th European Biomass Conference, 4.
- Ballegooyen, H. (t.y.). Cogeneration Principles. Ontario: Gryphon International Engineering Services Inc. 2.
- Basu P., Butler J. ve Leon M.A. (2011). Biomass Co-firing Options on the Emissions Reduction and Electricity Generation Costs in Coal-Fired Power Plants. *Renewable Energy*, 36(1), 282-288.
- Başkaya, Z. (Kasım, 2017). Exergy Analysis of Biomass CHP Power Plant. Las Vegas, ABD: 5th International Conference and Exhibition on Mechanical & Aerospace Engineering.
- Beith, R. (2011). Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems: Advanced Design, Performance, Materials and Applications. Cambrigde, UK: Woodhead Publishing Series in Energy: Number 18.
- Bektaş, Y. ve Gülmez, M. (Aralık 2015). Biyogaz Destekli Yenilenebilir Hibrid Sistemler ile Enerji Üretimi. EJOIR, IWCEA Özel Sayısı, 129.
- Bevcon Wayors. (2019). *Pneumatic Ash Handling System*. <http://bevconwayors.com/product/dense-phase-pneumatic-conveying-system/> adresinden erişildi.
- Birleşik Krallık, Orman Araştırması Kurumu, Forest Research. (2019). *Effect of Moisture Content*. United Kingdom Yayınları. <https://www.forestresearch.gov.uk/> adresinden erişildi.
- Birleşik Krallık Yenilenebilir Enerji Websitesi. *Larderello World's First Geothermal Power Station*. (2015). <http://www.reuk.co.uk/wordpress/geothermal/larderello-worlds-first-geothermal-power-station/> adresinden erişildi.
- Bjärebörn, E. ve Åkerman, F. (2010). *Thermodynamic Modelling of Biomass-Based Power Production*. Lund University: Thesis for the Degree of Master of Science.
- Brodianskiy, V.M., Verkhivker, G.P. ve diğerleri (1991). Exergy Accounts of Engineering Systems. Kiev: Naukova Dumka, 360.
- Brown, R.C. ve Stevens, C. (2001). Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power, Robert C. Brown and Christian Stevens. Wiltshire: John Wiley & Sons Yayınevi.
- Büttner, Siempelkamp Group, *Drying Technology and Energy Systems* (2019). [https://www.buettner-energy-dryer.com/fileadmin/files/download-bereich/PDF\\_Download\\_Bereich\\_/broschueren/BUE\\_17\\_107\\_Broschuere\\_EN-web.pdf](https://www.buettner-energy-dryer.com/fileadmin/files/download-bereich/PDF_Download_Bereich_/broschueren/BUE_17_107_Broschuere_EN-web.pdf) adresinden erişildi.
- Casaca, C. ve Costa, M. (2003). Co-combustion of Biomass in a Natural Gas-Fired Furnace. *Combustion Science and Technology*, 175(11), 1953-1977.
- Chandra, R.P., Bura,R., Mabee, W.E., Berlin, A.,Pan, X. ve Saddler, J.N. (2007). Substrate Pretreatment: The Key to Effective Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosics. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 108, 67-93.

- Chang,V.S. ve Holtzaple M.T. (2000). Fundamental Factors Affecting Biomass Enzymatic Reactivity. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 84–86, 5-37.
- Chao CYH, Kwong PCW, Wang JH, Cheung CW, Kendall G. (2008). Co-firing Coal with Rice Husk and Bamboo and the Impact on Particulate Matters and Associated Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions. *Bioresource Technology*, 99, 83–93.
- Çengel, Y.A. ve Boles M.A. (2006). Thermodynamics an Engineering Approach. McGraw- Hill, ABD.
- Da Rosa, A.V. (2005). Fundamentals of Renewable Energy Processes, Elsevier Science & Technology. Boston: Elsevier Academic Press.
- De, S. ve Assadi, M. (2009). Impact of Biomass Co-firing with Coal in Power Plants – A Techno-economic Assessment. *Biomass and Bioenergy*, 33(2), 283-293.
- Demirbaş A. (2003). Sustainable Co-firing of Biomass with Coal. *Energy Conversion and Management*, 44(9), 1465-1479.
- Demirbas, A. (2008). Co-firing Coal and Municipal Solid Waste. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 30(4), 361-369.
- Dong, C., Yang, Y., Yang, R. ve Zhang, J. (2010). Numerical Modeling of the Gasification Based Co-firing in a 600 MW Pulverized Coal Boiler. *Applied Energy*, 87(9), 2838-2834.
- Dong, L., Liu, H. ve Riffat, S. (2009). Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems – A literature review. *Applied Thermal Engineering*, 29(11–12), 2119-2126.
- Dornburg, V. ve Faaij, A. (Ağustos, 2001). Efficiency and Economy of Wood-Fired Biomass Energy Systems in Relation to Scale Regarding Heat and Power Generation Using Combustion and Gasification Technologies. *Biomass and Bioenergy*, 21(2), 96.
- Earnest, J. (2014). Wind Power Technology. New Delhi: PHI Learning Private Limited.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H. ve Blaabjerg, F. (2014). Renewable Energy Resources: Current Status, Future Prospects and their Enabling Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764.
- Energyen Corporation. (2015). Italy Air Cooled Condenser Tube Bundle. <http://energyen.co.kr/en/business/sub01.html?num1=2&num2=1&cate=3> adresinden erişildi.
- ETKB, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. (2016). Fotovoltaik Piller. <http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/gunespv.html> adresinden erişildi.
- ETKB, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. (2017). Yenilenebilir Enerji. <http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir.aspx> adresinden erişildi.
- ETKB, Yenilenebilir Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kullanan Tesislerin Toplam Kurulu Gücü. (2019a). <http://www.yegm.gov.tr/anasayfa.aspx> adresinden erişildi.

- ETKB, Yenilenebilir Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. *Türkiye Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası*. (2019b). <http://bepa.yegm.gov.tr/> adresinden erişildi.
- European Technology and Innovation Platform. (2017). Bioenergy Fact Sheet: Biomass CHP Facilities. European Commission: ETIP.
- FBT, Inc. (Temmuz 1994). Fluid Bed Combustion and Gasification: A Guide for Biomass Waste Generators. Southeastern Regional Biomass Energy Program. Chattanooga, TN: FBT.
- Fernando, R. (2012). Co-firing High Ratios of Biomass with Coal; IEA Clean Coal Centre: London, UK, 194.
- Gebgeegziabher, T., Oyedun, A.O., Zhang, Y. ve Hui, C.W. (2013). Effective Optimization Model for Biomass Drying. *Computer Aided Chemical Engineering*, 32, 97-102.
- Gebregeziabhera, T., Oyedun, A.O., Lukb, H.T., Lamb, T.Y.G., Zhangb, Y. ve Hui, C.W. (2014). Design and Optimization of Biomass Power. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(8), 1412-1427.
- Gimelli, A. ve Luongo, A. (Nisan, 2012). 2,3 MW Biomass Steam Power Plant: Experimental and Thermodynamic Analysis. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12): RE&PQJ, No.1, No.10*.
- Gökçol, C., Dursun, B., Alboyacı, B. ve Sunan, E. (2009). Importance of Biomass Energy as Alternative to Other Sources in Turkey. *Energy Policy*, 37(2), 424-431.
- Göksu, Ç. (2008). Küresel Isınma ve Türkiye'nin Güneş Projeleri, Güncel Yayıncılık, 49.
- Goldstein, L., Hedman, B., Freedman S.I. ve Schweizer T. (Kasım, 2013). Gas-Fired Distributed Energy Resource Technology Characterizations. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Gupta, M.K. (2012). Power Plant Engineering. Yeni Delhi: Prentice Hall India Learning Private Limited.
- Gustavsson, L. ve Johansson, B. (1994). Cogeneration: One Way to Use Biomass Efficiently. *Heat Recovery Systems and CHP*, 14(2), 117-127.
- Harris Group Inc. (2019). *Biomass Drying Technology Update*. <https://www.tappi.org/content/events/11biopro/19.2worley.pdf> adresinden erişildi.
- Hindistan Yenilenebilir Enerji Bakanlığı. (2016). *Biomass Cogeneration*. <https://biomasspower.gov.in/document/downloadleftside/Biomass%20Cogeneration.pdf> adresinden erişildi.
- Hydroelectric Power Water Use. (2017). *Hydroelectric Power: How It Works*. <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school> adresinden erişildi.
- IEA. (2008). Combined Heat and Power: Evaluating the Benefits of Greater Global Investment. Paris: OECD/IEA Yayınları.
- IEA. (2009). Co-generation and District Energy: Sustainable Energy Technologies for Today and Tomorrow. Paris: OECD/IEA Yayınları.

- IEA. (2014). Co-generation and Renewables: Solutions for a Low-Carbon Energy Future. Paris: OECD/IEA Yayınları.
- IRENA (International Renewable Energy Agency). (2019). *Wind Energy*. <https://www.irena.org/wind> adresinden erişildi.
- ISGEC: Biyokütle İçin Kazan Broşürü. (2019). *Bagasse and Biomass Fired Boilers*. <http://www.isgrec.com/pdf/BFB-Brochure.pdf> adresinden erişildi.
- Jönsson, O., Polman, E., Jensen, K., Eklund, R., Schyl, H. ve Ivarsson, S. (2003). Sustainable Gas Enters the European Gas Distribution System.
- Kakaç, S. (2006). Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Bugünü ve Yarını. TÜBA Türkiye Bilimler Akademisi, 1.
- Kaltschmitt, M. (1999). Utilization of Biomass in the German Energy Sector. Strategies and Technologies for Greenhouse Gas Mitigation.
- Kaltschmitt, M. ve Neubarth, J. (2000). Biomass for Energy—An Option for Covering the Energy Demand and Contributing to the Reduction of GHG Emissions. London, UK: Workshop Proceedings, Workshop on Integrating Biomass Energy with Agriculture, Forestry and Climate Change Policies in Europe.
- Kapseu, C., Bup, D.N., Tchiegang, C., Abi, C.F., Broto, F. ve Parmentier, M. (2007). Effect of Particle Size and Drying Temperature on Drying Rate and Oil Extracted Yields of *Bucchozia Coriacea* (MVAN) and *Butyrospermum Parkii* ENGL. *International Journal of Food Science and Technology*, 42, 573-578.
- Kari, V.E. (2016). Steam Generation from Biomass- Construction and Design of Large Boilers. Elsevier, e-kitap.
- Kıvanç, A.H. ve Serpen, Ü. (Nisan 2011). Jeotermal Enerji Santrallerinin Karşılaştırılması. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 114.
- Kotas, T. J. (1995). *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Reprint ed. Florida.
- Kruczek, H., Raczka, P. ve Tatarek, A. (2006). The Effect of Biomass on Pollutant Emission and Burnout in Co-combustion with Coal. *Combustion Science and Technology*, 178(8), 1511-1539.
- Ling, W.C., Ansiappan, V. ve Wan, Y.K. (2018). Design of Biomass Combined Heat and Power (CHP) Systems Based on Economic Risk Using Minimax Regret Criterion. *MATEC Web of Conferences*, 152, s.2.
- Madencilik Özel İhtisas Komisyonu. (Mayıs 1996). Jeotermal Enerji Çalışma Grubu Raporu. Ankara: DPT.
- Magdalini, K., Dimitris, M.K., Mujumdar, A.S. (2006). Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition. Washington: CRC Press.
- Martin, C., Villamanan, M.A., Chamorro, C.R., Otero, J., Cabanillas, A. ve Segovia, J.J. (2006). Low-grade Coal and Biomass Co-firing on Fluidized Bed: Exergy Analysis. *Energy*, 31(2-3), 330-344.
- Martin, A. (2017). Encyclopedia of Sustainable Technologies. Cambridge, MA: Elsevier Inc.



- McIlveen-Wright, D.R., McMullana, J.T. ve Guine, D.J. (2003). Wood-Fired Fuel Cells in Selected Buildings. *Journal of Power Sources* 118, 393-394.
- McKendry, P. (2002). Energy Production from Biomass (part 1): Overview of Biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46.
- Mekhilef, A., Saidur, R. Ve Safari, A. (2012). Comparative Study of Different Fuel Cell Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 981-989.
- Mitsubishi Heavy Industries, Turboden. (2016). *Organic Rankine Cycle Technology*. <https://www.turboden.com/solutions/1051/biomass> adresinden erişildi.
- Nag, P.K. (2014). Power Plant Engineering (4. bs.). Yeni Delhi: McGraw Hill Education (India) Private Limited.
- Naik, R.J., Gupta, B.L.V.S. ve Sharma, G.S. (2012). Exergy Analysis of 4,5 MW Biomass Based Steam Power Plant. *IOSR Journal of Humanities and Social Sciences*, 1(1), 1-4.
- Noussan, M. (2015). *Wood biomass CHP in District Heating Systems: Simulation and Operation Analysis*. Politecnico Di Torino: Doctoral Thesis.
- Obernberger, I., Thonhofer, P. ve Reisenhofer, E. (2002). Description and Evaluation of the New 1000 kWel Organic Rankine Cycle Process Integrated in the Biomass CHP Plant in Lienz, Austria. *Euroheat & Power*, 10, 3.
- Otis, P. (Ağustos, 2015). CHP Industrial Bottoming and Topping Cycle with Energy Information Administration Survey Data. 2015 s.2,3 ABD Enerji Bilgi Yönetimi İdaresi (Energy Information Administration, EPA) Yayınları, 3-5.
- Padinger, R., Aigenbauer, S. ve Scmidl, C. (Şubat, 2019). Best Practise Report on Decentralized Biomass Fired CHP Plants and Status of Biomass Fired Small-Micro Scale CHP Technologies. IEA Bioenergy: Task 32, 26.
- Pang, S. ve Mujumdar, A.S. (2010). Drying of Woody Biomass for Bioenergy: Drying Technologies and Optimization for an Integrated Bioenergy Plant. *Drying Technology*, 28(5), Selected Papers Presented at the 16th International Drying Symposium (IDS 2008).
- Parker, S. (2004). Solar Power Second Edition. ABD: Gareth Stevens Publishing LLLP.
- Patumaswad, S. ve Cliffe, K.R. (2002). Experimental Study on Fluidized Bed Combustion of High Moisture Municipal Solid Waste. *Energy Conversion and Management*, 43(17), 2329-2340.
- Ross, C.J. (2008). Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat &Power. North West CHP Application Center, Olympia WA.
- Salomón, M., Savola, T., Martin, A., Fogelhom, C.J. ve Fransson, T. (2011). Small-Scale Biomass CHP Plants in Sweden and Finland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4451-4465.
- Sami, M. Annamalai, K. ve Woolbridge, M. (2001). Co-firing of Coal and Biomass Fuel Blends. *Progress in Energy and Combustion Science* 27(2), 171-214.

- Shukuya, M. ve Hammache, A. (2002). Introduction to the Concept of Exergy - for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems. *Research Notes*, 2158, 13.
- Smil, V. (2017). Energy Transitions: Global and National Perspectives & BP Statistical Review of World Energy.
- Subramanian, A.K. & Awasthi. (2010). High Pressure Multi Fuel Fired Boilers for Cogeneration. *S. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technology*, 27, 4.
- Sun, Y. ve Cheng, J. (2012). Hydrolysis of Lignocellulosic Materials for Ethanol Production: A Review. *Bioresource Technology*, 83, 1-11.
- Szargut, J. (1998). Thermodynamics and the Optimization of Complex Energy Systems. Exergy in Thermal Systems Analysis. Neptun, Romania: NATO ASI.
- Terhan, M. (2015). *Doğalgaz Yakıtlı Bir Kazanda Baca Gazından Enerji Geri Kazanımı ve Yoğuşma Olayının Enerji, Ekserji ve Ekonomik Yönden İncelenmesi* (Doktora Tezi). Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Thrän, D. ve Kaltschmitt, M. (2002). Biomass for a Sustainable Energy Provision Systems—State of Technology, Potentials and Environmental Aspects. Cologne, Germany: Workshop Proceedings, World Renewable Energy Congress.
- Tillman, D. A. (2000). Biomass Co-firing: The Technology, The Experience, The Combustion Consequences. *Biomass and Bioenergy*, 19(6), 365-384.
- Triple Green Products. (2020). *ORC Generators*. <http://www.triplegreenenergy.com/products/orc-generators/> adresinden erişildi.
- U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership, Catalog of CHP technologies, (2017), 3-5.
- Uluslararası Yenilenebilir Enerji Kurumu (International Renewable Energy Agency, IRENA). (2019a). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Raporu*. Abu Dabi: IRENA Yayınları.
- Uluslararası Yenilenebilir Enerji Kurumu (International Renewable Energy Agency, IRENA). (2019b). *Renewable Power Generation Costs in 2018, International Renewable Energy Agency*. Abu Dabi: IRENA Yayınları.
- Van Loo, S. ve Koppejan, J. (2008). The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. Earthscan.
- Verkhivker, G. P. ve Kosoy, B. V. (2001). On the Exergy Analysis of Power Plants. *Energy Conversion and Management*, 42, 2053-2059.
- Walter, R. Niessen. (2010). Combustion and Incineration Process: Applications Environmental Engineering, Marcel Dekker, Inc., 270 Madison Avenue, New York, NY 10016, 121.
- Williams, R.H. ve Larson, E.D. (1996). Biomass Gasifier Gas Turbine Power Generating Technology. *Biomass and Bioenergy*, 10, 151-152.
- World Energy Council (WEC). (2013). Energy Efficiency Technologies: Overview Report. Londra: Global CCS Institute.

- Vassilev, S. V. ve Vassileva, C. G. (2009). A New Approach for the Combined Chemical and Mineral Classification of the Inorganic Matter in Coal. 1. Chemical and Mineral Classification Systems. *Fuel*, 88(3), 235-245.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen L. K. ve Vassileva, C. G. (2010). An Overview of the Chemical Composition of Biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933.
- Zuwala, J. ve Sciazko, M. (2010). Full Scale Co-firing Tests of Sawdust and Bio-waste in Pulverized Coal-fired 230t/h Steam Boiler. *Biomass and Bioenergy*, 34(8), 1165-1174.



## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

**İletişim Bilgisi:** s.berber20@gmail.com

### **Konferans Bildirisi**

Berber, Ş., Taner, T. ve Dalkılıç, A. S. (2019). Investigation of the Coal and Biomass Fuels Effects on Boiler Efficiency in Cogeneration Power Plants. *5<sup>th</sup> International Conference on Advances in Mechanical Engineering*, İstanbul, 17-19 Aralık 2019, 2160-2169.

