

# Biyokömür-Soma Kömür Karışımlarının Oksijenli Koşullarında Birlikte Yakılmasının Deneysel İncelenmesi ve Emisyonlar Üzerindeki Etkileri

Babak Keivani<sup>1\*</sup>, Hayati Olgun<sup>2</sup>, Aysel T. Atımtay<sup>3</sup>

## ÖZ

Bu deneysel çalışma, kızılçam talaşından elde edilen biyokömürün Soma linyit ile birlikte yakılmasını kapsamaktadır. Deneyler 30 kW termal kapasiteli dolaşimli akışkan yataklı yakma (DAY) sisteminde, havada ve oksijen zengin hava ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde akışkan yatağın içindeki yanma sıcaklığı 850 + 50 °C'de tutulmuştur. Farklı oranlarda linyit ve biyokömür karışımları oksijen zengin ortamda yanma testleri yapılmıştır. Kızılçam talaşı için 300 °C ve 30 dakika işlem koşullarının soma linyit ile biyokömürün akışkan yatağa birlikte yakılması açısından en uygun üretim koşulları olacağı görüşüne varılmıştır. Linyitteki biyokömür karışımının payı %50'ye kadar artırılmıştır. Yakıt karışımlarının ağırlıkça %50'ye kadar çıktığı ve sistemde biyokömürün etkin bir şekilde yakıldı bulunmuştur. Sonuçlar kömür ve biyokömürün birlikte yanması için biyokömürün iyi bir katkı yakıtı olabileceğini göstermektedir. Ayrıca oksijen zengin ortamında birlikte yakmanın SO<sub>2</sub>, CO ve N<sub>2</sub>O'nun baca gazı emisyonlarını azaltmak için bir seçenek olduğunu göstermiştir. Havaya oksijen eklenmesi yanma verimini artırmış ve CO emisyonlarını azaltmıştır. Biyokömürün içinde kükürt bulunmadığından SO<sub>2</sub> emisyonlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Bununla birlikte, NO<sub>x</sub> emisyonları, yüksek oksijen konsantrasyonları ve yüksek seviyelerde biyokömür ilavesi ile artmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Oksijen zengin ortamda yanma, biyokömürleştirme, emisyonlar, biyokömür

## Experimental Investigation of Co-combustion of Biocoal with Soma Lignite in Air and The Oxygen-enriched Air Atmospheres and Its Effects on Emissions

### ABSTRACT

This experimental work includes the co-combustion of Soma lignite with biochar obtained from red pine sawdust. The experiments were carried out in a circulating fluidized bed combustion (DAY) system with a thermal capacity of 30 kW, in air and in an oxygen-rich air atmosphere. In this study, the combustion temperature in the fluidized bed was kept at 850 + 50 °C. Combustion tests of Soma lignite and biochar mixtures at different rates were carried out in an oxygen-rich medium. It was concluded that 300 °C and 30 minutes processing conditions for red pine sawdust would be the most suitable production conditions for the co-combustion of soma lignite and biochar in a fluidized. The share of biochar mixture in lignite has been increased up to 50% by weight. It was found that the biochar was burned effectively when the mixture of biochar was up to 50%. The obtained results emphasized that biochar can be a good additive fuel for co-combustion of coal and biochar. It has also shown that co-combustion in an oxygen-rich atmosphere is a choice to decrease stack emissions of SO<sub>2</sub>, CO and N<sub>2</sub>O. Addition of oxygen to air increased the combustion efficiency and reduced CO emissions. Since biocoal does not have sulfur in it significantly reduced SO<sub>2</sub> emissions. However, emissions of NO<sub>x</sub> increased with high oxygen concentrations and high levels of biocoal addition.

**Keywords:** Oxygen enriched combustion, torrefaction, emissions, biocoal

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 28.06.2021

Kabul/Accepted : 13.08.2021

<sup>1</sup> Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, bab20822000@yahoo.com, ORCID: 0000-0003-2390-4726

<sup>2</sup> Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Bornova, İzmir, hayatiolgun1958@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-1777-2010

<sup>3</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Fakültesi, 06800 Cankaya, Ankara, ayselatimtay@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-7012-308X



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

The General Directorate of Forestry (GDF) estimates that Turkey has an annual sustainable forest residue potential of five to seven million tons [1]. It is crucial that these forest residues be converted to combustible solid fuels. However, conventional combustion technologies cannot be effectively used to fulfill the energy demands of the country. We are challenged to use wood biomass in general as a fuel for combustion / co-combustion systems because of its fuel properties compared to lignite [2]. To this end, the use of biomass with coal in power plants has its own limitations. For this reason, biomass and coal are not often used together in power plants. Torrefaction is a method that can be used to eliminate / reduce all these negative effects. Biomass co-firing also has the potential to reduce emissions [3]. Previous studies have widely proposed and reported on the use of biomass blends as feedstock in the oxy-combustion process [1]. However, there are very limited pilot studies on the use of biocoal mixtures as a raw material in oxygen combustion processes [4,5]. None of these studies has performed an oxy-combustion study of biocoal mixtures to further evaluate its properties as a potential solid fuel.

In this research torrefied pinewood chips were used for co-combustion with lignite. Detailed information about the torrefaction system is given elsewhere [6,7]. The purpose of this study is two-fold: Firstly, to use torrefied biomass (biocoal) with a lignitic coal for co-combustion, so that the emissions can be lowered as compared to the combustion of lignite coal alone in a power plant for energy generation. Secondly, to use oxy-fuel combustion system to produce a flue gas consisting of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O vapor, so that CO<sub>2</sub> in the flue gas can be captured with a CCS technology.

### Materials and Methods

Biocoal and Soma lignite were used as fuels for this study. Biocoal was prepared by torrefaction of red pine wood chips in a laboratory scale torrefaction system under nitrogen atmosphere at 300°C for 30 min. The details of the system are given in [6,7].

### Experimental System and Procedure

The experimental system used in this study is a pilot scale CFBC system consisting of feeder, combustor reactor, cyclones, down comer, return leg, primary and secondary air feeding systems, combustor heaters, ash hoppers, and a flue gas cooling system, a bag filter and chimney.

### Results and Discussion

First of all, soma lignite was combusted alone in air and in the oxygen enriched atmosphere to see its combustion behavior. The average bed temperature increased as the oxygen concentration levels increased in the experiments. CO emission is an indication of non-complete combustion. Therefore, as the oxygen concentration in the combustion air increases, CO concentration in the flue gas decreases due to better combustion with plenty of oxygen (Figure 2a). In contrary to CO emissions, as the oxygen concentration in the combustion air and biocoal amount in the fuel mixture increases, CO<sub>2</sub> emissions increase as explained in CO emissions due to better combustion (Figure 2b). The results show it is the increase in the proportion of biocoal in the fuel composition that results in higher NO<sub>x</sub> emissions (Figure 2c). When the oxygen concentration in the combustion air increases, the combustion efficiency also increases to 98.5% for oxygen concentration of 28% with better combustion.

The highest CO emission was obtained with Soma lignite alone, while the CO emission decreased as the biocoal additive increased. In addition to decreased CO emission, the combustion efficiency increased with biocoal addition. As the oxygen content increased along with the addition of biocoal, Soma showed a faster increase in CO<sub>2</sub> concentration as well as the combustion efficiency.

When Orhaneli and Soma lignites are compared, more NO<sub>x</sub> formation takes place in Orhaneli case than Soma case with increase of oxygen in combustion air. With the addition of biocoal to these lignites, NO<sub>x</sub> formation increased in both cases. However, this is for sure that co-combustion of Soma lignite with biocoal is a very good option to give support to a low-quality coal.



## 1. GİRİŞ

Türkiye'nin toplam geri kazanılabilir ve kullanılabilir biyokütle enerji potansiyeli 17 milyon ton petrol eşdeğeri (mtoe) olarak tahmin edilmiştir [1]. Orman Genel Müdürlüğü (OGM) tarafından yıllık sürdürülebilir orman kalıntısı potansiyelin yaklaşık 5 ila 7 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Yakılabilecek odun, orman artıkları ve çalı bitki örtüsünün maksimum üretim potansiyeli Türkiye'nin Akdeniz Bölgesindedir [1]. Bu nedenle, bu orman artıkları yanıcı katı yakıtlara dönüştürülmesi Türkiye'nin sürdürülebilir enerji üretimi açısından çok önemlidir. Ancak bu potansiyel, geleneksel yakma teknolojileri ile ülkenin enerji ihtiyacı için etkin bir şekilde kullanılamamaktadır. Özellikle bu orman artıklarının enerji dönüşüm merkezlerine taşınması sorun teşkil etmektedir.

Türkiye linyit kaynakları bakımından zengin bir ülkedir. Türkiye'nin 2015 yılında kanıtlanmış geri kazanılabilir linyit rezervi 14,76 milyar ton'dur. Bu linyitlerin ısı değerleri genellikle orta ila düşüktür ve 1000 ila 5000 kcal / kg arasında değişmektedir. Isıtma değerlerinin dağılımı %1'i 4001 kcal / kg üzerinde, %4'ü 3001-4000 kcal / kg arasında, %22'i 2001-3000 kcal / kg arasında, %70'i 1001-2000 kcal / kg arasında ve %3'ü 1000 kcal / kg altındadır [2]. Ayrıca, bu linyitler genellikle yüksek kükürt ve kül içeriğine sahiptir.

Türkiye toplam birincil enerji talebinin %72'sini ithal etmektedir. Bu talep her yıl artıyor çünkü Türkiye'nin kalkınma hızı yılda %4-5 civarında ve bu da büyük miktarda enerji gerektiriyor. Bu nedenle temiz enerji üretiminde uygun bir yakma teknolojisi ile linyit ve biyokütle kaynaklarının birlikte kullanılması akıllıca olacaktır. Akışkan yataкта veya pülverize yanmada düşük kalorili, yüksek küllü ve yüksek kükürlü yakıtları biyokütle ile yakmak için, birlikte yanma uygun bir teknoloji olabilir [3,4].

Dünyada fosil yakıt tüketiminin artması, CO<sub>2</sub> emisyonlarının artmasına neden oluyor. Atmosferdeki son CO<sub>2</sub> konsantrasyonu 414 ppm'ye ulaşmıştır [9]. Mevcut kömür santrallerinde linyit kömürlerinin biyokütle ile birlikte yakılması daha ekonomik ve daha çevre dostu olabilir çünkü biyokütle genellikle çok düşük kükürt ve kül içeriğine sahiptir. Bu nedenle, biyokütlenin birlikte yanması, kömür yakıtlı elektrik santrallerinden kaynaklanan emisyonları azaltma potansiyeline sahiptir.

Acar ve Dinçer [5], yenilenebilir enerji kaynaklarını ve fosil yakıtları elektrik üretiminin çevresel etkileri açısından incelemiş ve çevreye etkisi açısından en zararlı kömürün olduğuna karar vermişlerdir. Kourkoumpas vd. [6] linyit ve biyokütle tabanlı güç sistemlerini çevresel ve ekonomik açıdan yaşam döngüsü analizi metodolojisi ile incelemişler. Linyit kullanımıyla ilişkili önemli çevresel etkileri vurgulamışlar.

Biyokütlenin kömürle birlikte yakmada emisyon azaltımına katkısı, farklı yapısı ve nakliye zorlukları nedeniyle sınırlıdır. Ancak bu katkıyı, biyokütlenin biyokömürleştirilmesi ve linyit kömürüne benzer biyokömürün elde edilmesi ile artırmak müm-



kündür. Genel olarak, biyokütle düşük hacimsel enerji yoğunluğuna, yüksek nem içeriğine ve hidrofilik yapıya sahiptir ve bu da nakliye, depolama ve işlemede daha yüksek maliyetlere yol açıyor. Odunsu biyokütleyi doğrudan yakma / birlikte yakma sistemleri için bir yakıt olarak kullanmak, linyitlere kıyasla yakıt özelliklerinden dolayı zordur. Bu nedenle, biyokütlenin kömürle birlikte karışımı güç santrallerinde kullanımı sınırlıdır. Güç sistemlerinde odunsu biyokütlenin kullanımını artırmanın bir yolu, biyokütleyi biyokömürleştirme yoluyla biyokömüre dönüştürmektir.

Termal bir ön-işlem olarak biyokömürleştirme, biyokütlenin fiziksel ve kimyasal bileşimini önemli ölçüde değiştiren uygulanabilir bir teknolojidir [7]. Biyokömürleştirme, inert bir ortamda 200–300 °C sıcaklık aralığında biyokütlenin yavaşça ısıtılmasını sağlayan bir işlemdir. Bu işlem, biyokütlenin fiziksel, kimyasal ve biyokimyasal bileşimini iyileştirerek, birlikte yanma ve gazlaştırma amaçları için daha iyi performans göstermesini sağlıyor [8].

Bu çalışmada, 5 kg / saat kapasitesine sahip pilot ölçekli sürekli beslemeli biyokömürleştirme sisteminde biyokütleden üretilen biyokömür yakıt olarak birlikte yanma için kullanılmıştır. Biyokömürleştirme sisteminin çalışma koşulları Türk linyitlerinin özelliklerine göre optimize edilmiştir. Bu sistem hakkında ayrıntılı bilgi başka bir yerde verilmiştir [10,11].

Oksi yanma, yakıtın hava yerine oksijen ve geri dönüştürülmüş baca gazı (RFG) karışımında yakıldığı, yeni ve mevcut enerji santralleri için ortaya çıkan bir karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojisidir. Bu teknoloji, esas olarak karbondioksit ve su buharından oluşan bir baca gazı üretiyor. Oksi yanma uygulamalarından biri, artmış oksijen konsantrasyonunda yanmanın gerçekleştiği Oksijence Zengin ortamda Yanmasıdır (OEC). Yanma havasına saf oksijen eklenir ve böylece oksitleyici akışında oksijen konsantrasyonu artıyor.

Biyokömürün kömür ile birlikte akışkan yatak yakma sisteminde ve hava ve oksijence zengin ortamda birlikte yakılması konusunda literatürde çok fazla çalışma mevcut değildir. Çalışmalar kömür ve biyokütlenin birlikte hava ve oksijence zengin ortamda yakılması üzerinedir. Literatürde bu konuya benzer çalışmalar aşağıda verilmiştir:

Engin ve arkadaşları [12], İki düşük kaliteli linyit kömürünün hava ve oksijence zengin ortamında yakılmasını termogravimetrik analiz (TGA) yöntemi ile incelemiştir. Oksi yanma deneyleri 950°C'de, 10 °C / dakika, 20 °C / dak ve 40 °C / dakika ısıtma oranları ile % 21 O<sub>2</sub>-% 79 CO<sub>2</sub>, % 40 O<sub>2</sub>-% 60 CO<sub>2</sub> ve % 50 O<sub>2</sub>-% 50 CO<sub>2</sub> içeren üç farklı gaz karışımıyla gerçekleştirilmiştir. Kömürlerinin oksijence zengin ortamında yanma kinetiği, Coats-Redfern (model uydurma yöntemi), Friedman (FR), Flynn-Wall-Ozawa'nın (FWO) ve Kissinger-Akahira-Sunose'un (KAS) dört farklı yöntemle incelenmiştir. Her iki kömürün de oksijence yanma ortamındaki yanma davranışları kül ve uçucu madde içeriği gibi özelliklerinden dolayı önemli ölçüde değişmiştir.



Rui ve arkadaşları [13]. 75-150  $\mu\text{m}$  boyut aralığında toz haline getirilmiş, odunsu, otsu ve bitki kökenli atıklar dahil olmak üzere çeşitli biyokütle türlerinin yakılmasından kaynaklanan karbon, kükürt ve azot oksitlerin gaz emisyonlarını karşılaştırmışlardır. Deneyler hem ham biyokütle hem de biyokömür üzerinde, 1400 K'de çalıştırılan, laboratuvar ölçekli, elektrikle ısıtılan bir düşürme tüpü fırında (drop tüp) ve yüksek ısıtma oranlarında (104-105 K/s) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, (a) Biyokömürün karbon içeriğinin daha yüksek olması nedeniyle biyokömür yakılmasından kaynaklanan  $\text{CO}_2$  emisyonunun biyokütleden daha yüksek olduğunu göstermiştir. (b) Biyokömür, biyokütleden daha yüksek kükürt içerse bile biyokömür yakılması ile daha düşük  $\text{SO}_2$  emisyon oluşmuştur. (c) biyokömür, ham biyokütleden daha yüksek yakıt-azot kütle fraksiyonlarına sahiptir; düşük-bitümlü kömürle karşılaştırıldığında, bazı ham ve kömürleşmiş biyokütle türleri daha düşük ve bazıları daha yüksek  $\text{NO}_x$  emisyon faktörleri üretmiştir.

Gil ve arkadaşları [14] kömür ve kömürleşmiş biyokütle karışımlarının öğütülebilirlik ve yanma özelliklerini incelemişlerdir. Kömür ile birlikte yanma deneylerinde kullanılmak üzere; çam, siyah kavak ve kestane ağacın kırıntılarında elde edilen kömürleşmiş biyokütle numuneleri, farklı biyokömürleştirme sıcaklıklarında (240, 260, 280 ve 300  $^{\circ}\text{C}$ ) ve bekleme sürelerinde (11, 22 ve 43 dakika), boru şeklinde bir döner fırında en iyi biyokömürü oluşturmak için dönüştürülmüştür. Daha sonra kömür/kömürleşmiş biyokütle karışımlarının hem öğütme özellikleri hem de birlikte yanma davranışları incelenmiştir. Karışımların yanma performansı sürüklenmeli akışlı bir reaktörü (EFR) içinde değerlendirilmiştir. Kömürle karşılaştırıldığında, kömür / biyokömür karışımlarının birlikte yanması esnasında,  $\text{NO}$  ve  $\text{SO}_2$ 'nin daha düşük emisyonları üretilmiştir.

Kayahan ve arkadaşları [15] 30 kWth dolaşımli akışkan yatakta linyit ve biyokütlenin oksijen zengin ortamında birlikte yanmasını incelemişlerdir. Deneyler iki farklı Türk linyiti, bir biyokütle ve bunların karışımları ile yapılmıştır. Biyokütle payı %20'ye kadar artırılmıştır. Oksijen konsantrasyonu %21 ile %30 arasında tutulmuştur. Linyitlere biyokütle ilave edildiğinde ve karışımdaki oksijen zenginleştirilmesi ve biyokütle oranı arttıkça, yanma üzerinde artan bir sinerjik etkiye sahip olduğu görülmüştür. Oksijen zenginleştirmenin tüm durumlarda  $\text{NO}$  ve  $\text{SO}_2$  oluşumunun arttırdığını göstermiştir. Biyokütle payı arttıkça, tüm oksijen durumlarında  $\text{NO}_x$  emisyonları artarken,  $\text{SO}_2$  emisyonları için bunun tersi gerçekleşmiştir.

Bu çalışmanın amacı iki yönlüdür: İlk olarak, birlikte yakma için linyit kömürü ile işlenmiş biyokütlenin (biyokömür) kullanılması, böylece enerji üretimi için bir elektrik santralinde tek başına linyit kömürünün yakılmasına kıyasla emisyonlar azaltılabilir. İkinci olarak,  $\text{CO}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  buharından oluşan bir baca gazı üretmek için oksijen-yanma sistemini kullanmak, böylece baca gazındaki  $\text{CO}_2$  bir CCS teknolojisi ile yakalanabilir.



## 2. MATERYALLER VE YÖNTEMLER

### 2.1 Yakıt ve Yatak Malzemesi

Bu çalışmada yakıt olarak Soma linyiti ve biyokömür kullanılmıştır. Biyokömür, Ege Üniversitesinde kurulan 5 kg / saat kapasiteye sahip laboratuvar ölçekli vidalı “sürekli beslemeli biyokömürleştirme sistemi” ile kızılçam yongalarından üretilmiştir. Yakıt analizleri Tablo 1’de verilen ASTM prosedürlerine göre yapılmıştır. Yaklaşık analiz bir LECO TGA 701 Termogravimetrik Analizör ile gerçekleştirilmiştir. Yakıtların üst ısıl değerini ölçmek için LECO AC350 bomba kalorimetresi kullanılmıştır. Nihai

**Tablo 1.** Ham Biyokütlenin ve Bu Çalışmada Hazırlanan Farklı Biyokömürlerin Analizi İçin Kullanılan Standartlar

Nihai Analiz	Kükürt	Azot	Hidrojen	Karbon	Oksijen	Kül	Nem
Kullanılan standart	ASTM D4239-14	ASTM D5373-14	ASTM D5373-14	ASTM D5373-14	ASTM D3176-09	ASTM E1755-01	ASTM D 7582-12
Yaklaşık Analiz	Uçucu Madde	Nem	Sabit Karbon	Kül	HHV	HGI	
Kullanılan standart	ASTM D7582-12	ASTM D7582-12	ASTM D3172-13	ASTM E1755-01	ASTM D5865-13	ASTM D5003	

**Tablo 2.** Yakıt Analizi

	Kızılçam biyokütle (B)	Soma linyit (S)	Kızılçam biyokömürü (BK)
Karbon (% ağı)	44.92	5.14	68.91
Kül (% ağı)	0.88	32.78	1.50
Uçucu Madde, UM (% ağı)	73.76	40.49	39.22
Sabit Karbon, SK (%ağı)	15.53	21.60	58.48
Oksijen (% ağı)	47.95	42.40	23.03
Nem (ağı)	9.81	1.84	0.79
Azot (% ağı)	0.31	0.84	0.62
Hidrojen (% ağı)	5.89	0.73	5.77
Kükürt (% ağı)	0.029	11.51	0.082
Üst Isıl Değer (kJ/kg)	17506	10513	17506
	19964	13464	19964
Alt Isıl Değer (kJ/kg)	15950	11466	15950
	18588	14108	18588
Hardgrove Grindability Index (HGI)	23	64	104



analiz LECO Truspec CHN-S cihazı ile yapılmıştır [4,12]. Yakıtların nihai, yaklaşık analizi ve ısı değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablolardan biyokömürün ısı değerinin Soma linyitinden daha yüksek olduğu görülebilmektedir. Yatak malzemesi olan silika kumun (%99,5 SiO<sub>2</sub>), ortalama partikül boyutu 0.34 mm, partikül yoğunluğu 2.4 g / cm<sup>3</sup> ve yığın yoğunluğu 1.7 g / cm<sup>3</sup>’dir. Deneylerde yatak malzemesi olarak 4,5 ile 4,75 kg arasında silika kumu kullanılmıştır. OEC için test matrisi Tablo 3’te verilmiştir.

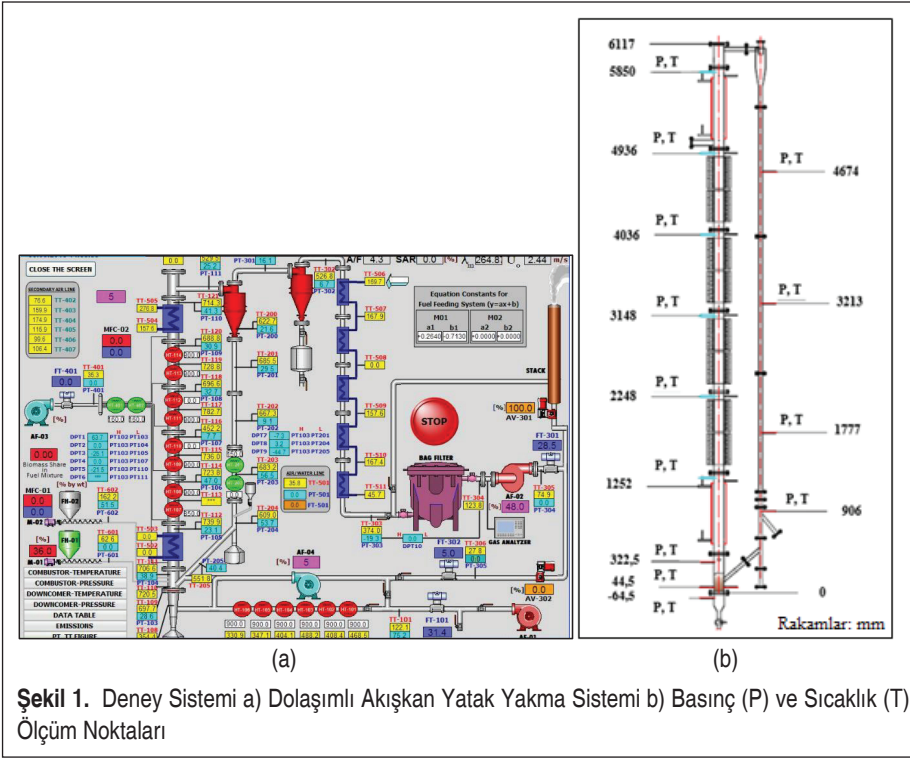
**Tablo 3.** Oksijen Zengin Ortamda Yanma (Oksijenleme) için Deney Matrisi

Yakıtlar (Soma linyit; Biyokömür: BK), (% ağı.)	Havadaki O <sub>2</sub> oranı (% hacimce.)
S	21, 23, 26, 28
%90 S + %10 BK	21, 23, 26, 28
%80 S + %20 BK	21, 23, 26, 28
%70 S + %30 BK	21, 23, 26, 28

## 2.2 Deneysel Sistemi ve Yöntem

Pilot ölçekli DAY sistemi, yakıt besleme sistemi, yakma reaktörü, siklonlar, geri dönüş ayağı, kül toplama ve boşaltma sistemi, FD ve ID fanları, hava ve yanma ısıtıcıları, baca gazı hattı sistemlerinden oluşmaktadır [3,15] (Şekil 1). Yanma reaktörü 108 mm iç çaplı ve 6 m yüksekliğinde 300 AISI 310 paslanmaz çelik borudan yapılmıştır. Birincil hava hattı üzerinde 6 adet elektrikli hava ısıtıcısı ve yanma kolonu üzerinde 8 adet elektrikli hava ısıtıcısı bulunmaktadır. Hava, 200 mbar hidrolik yük basıncına sahip bir hava fanı (FD fan) ile sisteme verilmiştir. Yakıt, vidalı besleyicilerle beslenmiştir. Yakıt besleme hızı bir frekans kontrolörü tarafından kontrol edilmektedir. Ayrıca, oksijen akış hızı, kütle akış kontrolörü (MFC) tarafından kontrol edilmiştir. Sistemden geçen sıcaklık, basınç ve akış oranları SIEMENS Win CC SCADA sistemi ile ölçülerek kontrol edilmiştir. Giriş akışındaki oksijen konsantrasyonu ABB Magnos 206 paramanyetik çevrimiçi oksijen analizörü cihazı ile ve çıkıştaki baca gazı GAS-MET DX 4000 FTIR cihazı ile analiz edilmiştir. Baca gazı bileşenleri CO<sub>2</sub> (% 0-100, ± % 1), O<sub>2</sub> (% 0-25, ± % 1), H<sub>2</sub>O (% 0-25, ± % 1), NO<sub>x</sub> (0-1000 ppm), N<sub>2</sub>O (0-500 ppm), HCN (0-1000 ppm), SO<sub>2</sub> (0-2000 ppm), CO (0-10000 ppm) ölçülmüştür.

Deneysel yöntem aşağıda açıklanmıştır. Başlangıçta, tüm elektrikli ısıtıcılar (yanma odası ısıtıcıları ve hava kanalı ısıtıcıları) açılmıştır. Boş yanma reaktörü, alt bölgedeki sıcaklık 250 °C’ye ulaşana kadar sıcak hava ile ısıtılmıştır (Şekil 2). Yatak malzemesi (silika kumu) yüklendikten sonra sıcaklık 120-150 °C’ye kadar düşmektedir (Şekil 2). Yatak sıcaklığı tekrar 280-300 °C’ye ulaştığında ki bu olay genellikle 5-6 saat sürüyor,

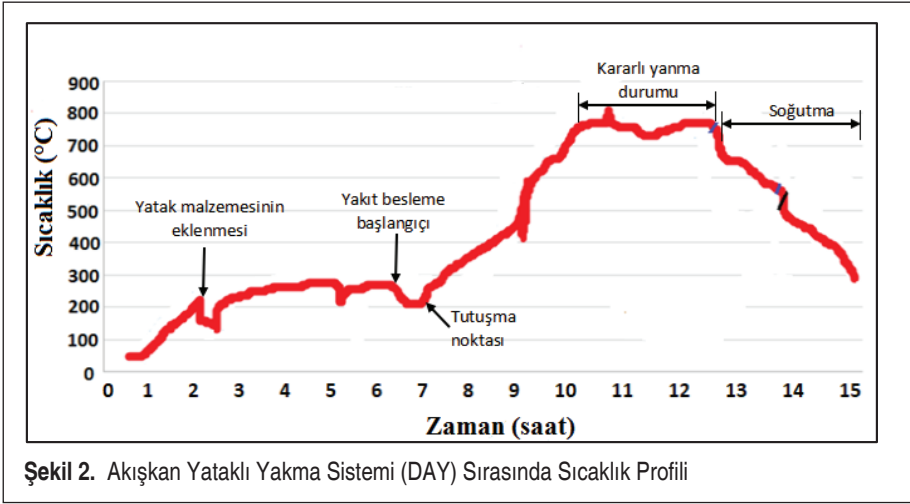


Şekil 1. Deney Sistemi a) Dolaşımli Akışkan Yatak Yakma Sistemi b) Basınç (P) ve Sıcaklık (T) Ölçüm Noktaları

yakıt beslemesine geçilmiştir. Yakıt soğuk olduğu için yakıt beslemesinin ilk dakikalarında yataktaki sıcaklık düşmektedir (Şekil 2). 10 ile 20 dakika içinde tutuşma meydana gelmiş ve sıcaklık yükselmeye başlamıştır (Şekil 2). Yaklaşık 780oC’de, hava kanalı ısıtıcıları devrede kalırken yakıcı ısıtıcıları kapatılmıştır. Hava kullanıldığında stabil bir durumda çalışmaya ulaşmak için yakıt beslemesinin başlangıcından itibaren 8-10 saat gerekmektedir.

Tüm yakıtlar önce hava ortamında yakılmış ve ardından yanma modu Oksijence zengin hava ortamına geçirilmiştir. Hızlı sıcaklık artışını ve sıcak bölge oluşumunu önlemek için mod değişikliği, O<sub>2</sub> konsantrasyonunu hedef değere küçük adımlarla çok yavaş artırarak gerçekleştirilmiştir. Yanma deneyleri sırasında tipik bir sıcaklık profili Şekil 2’de gösterilmektedir. Her deney yaklaşık 14 ile 18 saat arasında sürmüştür. Deney sırasında yataktaki basınç düşüşü sürekli olarak izlenmiştir. Testler sırasında sıcaklıklar, DAY yanması için tipik olan 800 ile 900 °C arasında tutulmuştur. Yanma havasının O<sub>2</sub> konsantrasyonu hacimce % 21’den (atmosferik koşul) % 28’e çıkarılmıştır. Oksijen zenginleştirme, bir kütle akış kontrolörü ile birincil hava hattına saf oksijenin eklenmesi ile sağlanmıştır. Yanma testleri sırasında, yakıt karışımlarındaki biyokömürün katkıları ağırlıkça %0, %20, %30, %50’ye ayarlanmıştır. Şekil 2’de bes-





Şekil 2. Akışkan Yataklı Yakma Sistemi (DAY) Sırasında Sıcaklık Profili

leme sisteminin tıkanması veya kapanması nedeniyle hızlı sıcaklık düşüşleri görülmektedir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

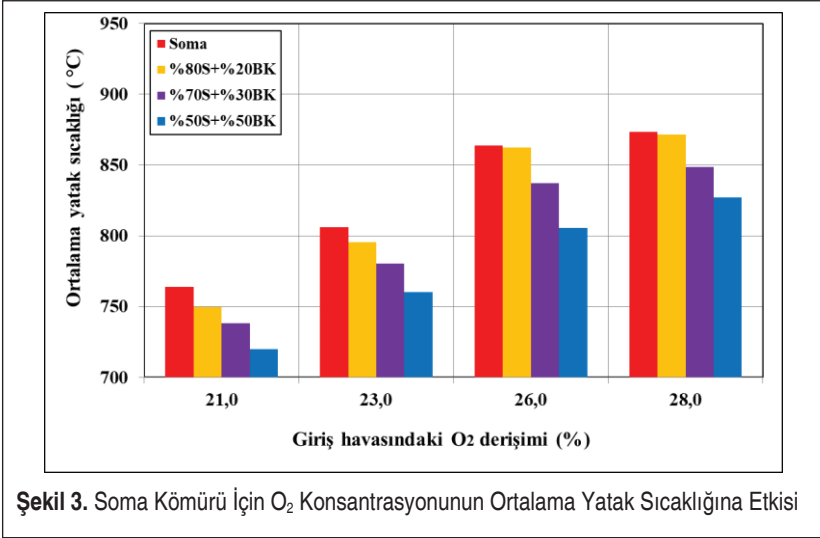
#### 3.1 Sıcaklık Profilleri

Oksijence zengin hava ortamında yanma deneyleri ilk önce tek başına Soma linyit ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra biyokömür ve linyit karışımları, Tablo 3'te gösterilen gerekli yakıt bileşimlerine göre hazırlanmıştır. Tablo 3'te gösterilen test matrisi, Soma linyitine çeşitli biyokömür yüzdelerin ilavesi ile elde edilmiştir. Ortalama yatak sıcaklığı, birincil havadaki oksijen konsantrasyonundan etkilenmiştir.

O<sub>2</sub> konsantrasyonunun ortalama yatak sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 3'te gösterilmektedir. Deneylerde oksijen konsantrasyonu arttıkça ortalama yatak sıcaklığı yükselmiştir. Soma kömüründe %21 oksijen konsantrasyonu ile ortalama yatak sıcaklığı 710-750 °C arasında değişirken, %28 oksijen konsantrasyonunda ortalama yatak sıcaklığı 875 °C'ye yükselmiştir (Şekil 3).

Soma kömürüne sınırlı miktarda biyokömürün ilave edilmesi ile karışımın ÜİD'i artmıştır çünkü biyokömürün ÜİD'i Soma kömürün ÜİD'inden daha yüksektir, bunun nedeni de biyokömürün karbon içeriğinin Soma'dan daha yüksek olmasıdır (C: ağırlıkça %42,4'e ve %68,9). Karbonun yanması diğer bileşenlere göre daha zordur. Bu nedenle, daha düşük bir yatak sıcaklığı gözlemlenmiştir.

%21 oksijen konsantrasyonunda yanma için yakıt karışımındaki biyokömür yüzdesi ağırlıkça %20'den %50'ye arttığında, ortalama yatak sıcaklığı kademeli olarak

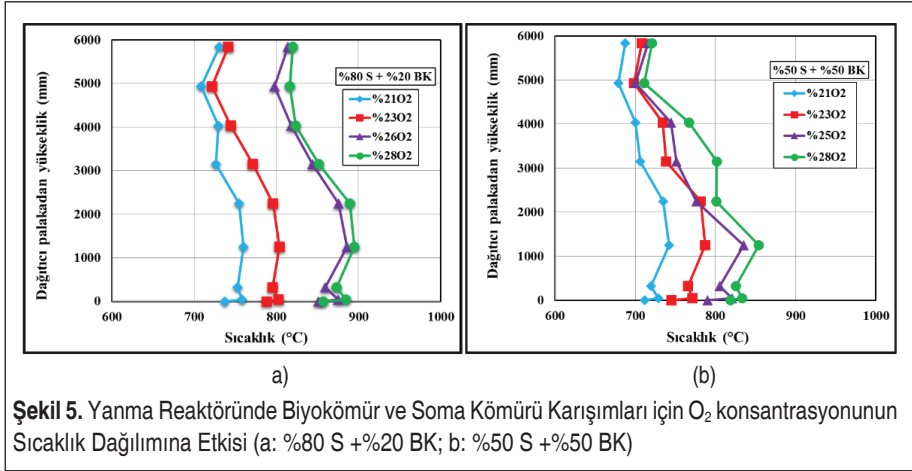
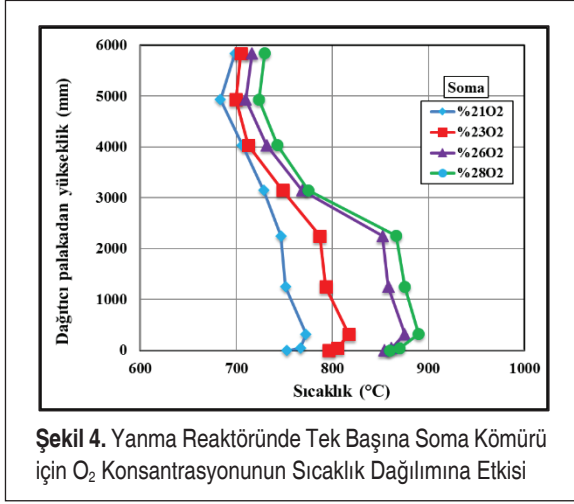


Şekil 3. Soma Kömürü İçin O<sub>2</sub> Konsantrasyonunun Ortalama Yatak Sıcaklığına Etkisi

760'dan 720 °C'ye düşmüştür. Oksijen konsantrasyonu %28'e çıkınca bu eğilimin devam etmiş ve %50 / %50 Soma ve biyokömür karışımı için yatak sıcaklığının 830 °C olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, %21 ve %23 oksijen konsantrasyonunda Soma kömürü karışımına %20 biyokömür ilave ettiğimizde yatak sıcaklığı biraz düşmüştür. Bununla birlikte, yakıt karışımındaki biyokömür içeriği ağırlıkça %20'den fazla arttıkça, yatağın ortalama sıcaklığı giderek azalmaktadır çünkü biyokömür, Soma kömüründen biraz daha yüksek bir uçucu içeriğe sahiptir (Şekil 3).

Öte yandan, kömüre %50 biyokütle eklendiğinde (Şekil 3), yatak sıcaklığı tek başına kömür yanmasına kıyasla tüm O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında daha düşüktür. Bu, daha iyi yanma için biyokömür katkısının bir sınırı olduğunu göstermektedir. Ticari birlikte yakma uygulamasında maksimum biyokütle katkısının %10 ile %15 arasında olduğu dikkate alındığında, bu sonuç bize biyokütleden daha fazla biyokömür ekleyebileceğimizi göstermektedir.

Tek başına Soma kömürü için oksijenle zenginleştirilmiş deneylerinde yakma reaktörün yüksekliği boyunca sıcaklık değişiklikleri, Şekil 4'te verilmiştir. Yanma havasında oksijen konsantrasyonu %21 ile %28 arasında değişmektedir. Yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu arttığında, yataktaki (300-320 mm) ve serbest bölgedeki (1252-2248 mm) sıcaklıklar tüm durumlarda artmıştır. Sıcaklık profili üzerinde etkili olan diğer faktör, kömürün uçucu madde (UM) içeriğidir. Kömür partikülleri yanma reaktörüne girdiklerinde uçucu maddeleri buharlaşma eğilimine sahiptirler. UM, serbest bölgede yanmakta ve bu da yatak sıcaklığından daha yüksek bir serbest bölge sıcaklığına neden olmaktadır. Uçucu maddenin yanması nedeniyle serbest bölgede bir maksimum sıcaklık gözlemlenmiştir. Yanma reaktöründe yakılan yakıtın uçucu



madde içeriği ne kadar yüksekse, serbest bölgede ulaşılan maksimum sıcaklık o kadar yüksek olur. Böylece, yanma havasında %28 oksijen konsantrasyonu için serbest bölgede maksimum 860-88 °C sıcaklıkları görülebilir. Şekil 4'te açıkça görülmektedir. Diğer oksijen konsantrasyonları için de benzer sonuçlar görülebilmektedir.

### 3.2 Emisyonlar

Oksijenle zenginleştirilmiş birincil havada yanma sırasında başlıca kirletici ( $CO$ ,  $NO$  ve  $SO_2$ ) emisyonlarının değişimleri bu bölümde sunulmuştur. Baca gazındaki her kirleticinin konsantrasyonu, baca gazındaki hacimce %6  $O_2$ 'ye dayanır ve normal sıcaklık (273 °K) ve basınçta (1 atm.)  $mg / Nm^3$  (kuru bazda) olarak ifade edilmektedir. Ölçü-

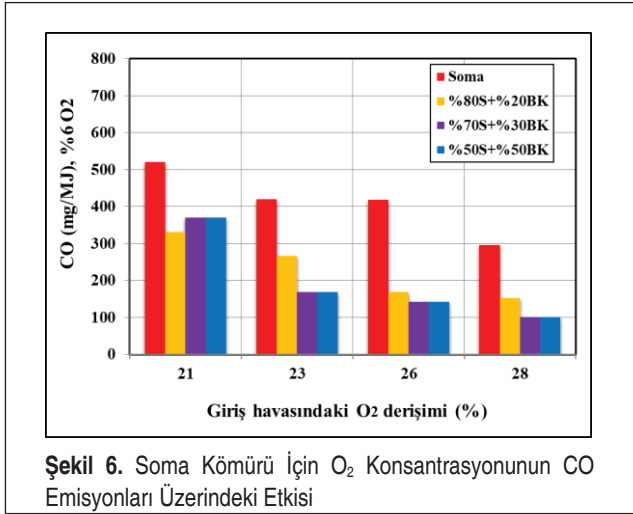


len ppm verileri, oksijenle zenginleştirilmiş durumlar için düzeltilmiş ve mg / MJ'e dönüştürülmüştür.

CO Emisyonları: CO emisyonu, tam olmayan yanmanın bir göstergesidir. Bu nedenle yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu arttıkça, bol oksijen sebebiyle daha iyi yanma olur ve baca gazındaki CO konsantrasyonu azalır. Havadaki O<sub>2</sub> oranına göre incelenen tüm durumlar için CO konsantrasyonları Şekil 6'da verilmiştir. Soma kömürün tek başına normal havada yakılması için (hacimce %21 O<sub>2</sub>), CO konsantrasyonu 520 mg / MJ olarak bulunmuştur. Yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu arttıkça, daha iyi yanma meydana gelmiştir ve hacimce %27 O<sub>2</sub> içeren havada tek başına Soma kömürü için CO emisyonu 295 mg / MJ'e düşmüştür. Bu eğilim, Soma linyitine biyokömürün eklenmesiyle devam etmektedir. Biyokömür ilave yüzdesi arttıkça CO emisyonunda azalma görülmektedir. En yüksek CO konsantrasyonları, ağırlıkça %50 / %50 yanmada bulunmuştur. Bunun iki olası nedeni vardır: (i) biyokömürün eklenmesiyle elde edilen yakıt karışımının daha yüksek uçucu içeriği, serbest bölgedeki uçucu madde içeriğini (hidrokarbon konsantrasyonu) artırır, bu da hidrokarbonlarla CO'dan daha kolay reaksiyona girebilme imkanı olduğu için, CO, OH ve HO<sub>2</sub> radikallerinin oksidasyonunu sınırlar, (ii) CO reaktörden yanmadan kaçar.

Yanma reaktöründe CO emisyonunu azaltmak için olası bir çare, ikincil havanın serbest bölge içine enjekte edilmesi, böylece CO oksidasyonunun artırılması ve ayrıca yanma reaktörün serbest bölge türbülansının artırılması ile olabilir.

Yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu arttıkça daha iyi yanma meydana gelmiş ve havada hacimce %28 O<sub>2</sub> ile CO emisyonu 295 mg / MJ'e düşmüştür (Şekil 6). Soma kömürüne ağırlıkça %50 biyokömür ilave edildiğinde bile, yanma sisteminde



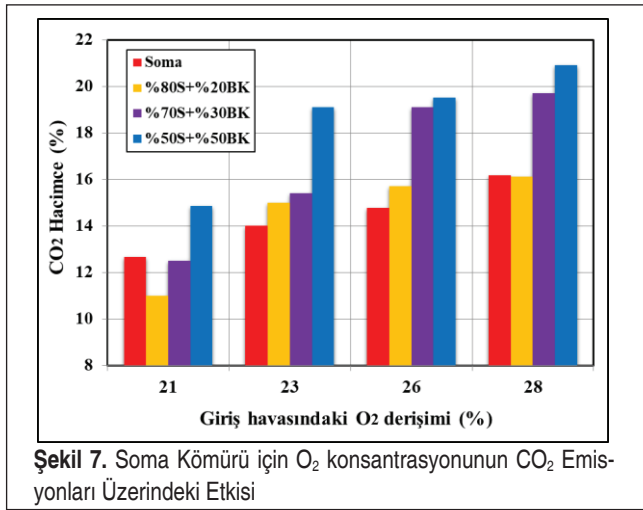


ve emisyonlarda herhangi bir olumsuz durum ile karşılaşmamıştır. Ağırlıkça %50 biyokömür ilavesi, havada %28 O<sub>2</sub> ile CO emisyon değerini 100 mg / MJ'e düşürmüştür. Bu, Soma kömür külünün metal oksit içeriklerine bağlanabilir. Tablo 4'teki Soma kömürünün kül analizinden görülebileceği gibi, Soma kömür külü silika, alümina ve CaO bakımından zengindir. Bu oksitler, yanma reaktöründe CO oksidasyonu için katalizör görevi görebilir.

CO<sub>2</sub> Emisyonları: CO emisyonlarının aksine, yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu ve yakıt karışımındaki biyokömür miktarı arttıkça, CO emisyonlarında anlatıldığı gibi daha iyi yanma nedeniyle CO<sub>2</sub> emisyonları da artmaktadır. Şekil 7, tüm yanma deneyleri için O<sub>2</sub> konsantrasyonundaki artışla birlikte CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun değişimini göstermektedir. Oksijen zenginleştirme daha iyi yanmayı destekler; bu nedenle, oksijen zenginleştirme tüm durumlarda CO<sub>2</sub> konsantrasyonunu artırır. Linyitlere biyokömürün ilavesi, yakıt karışımındaki oksijenin zenginleştirilmesi ve biyokütle payı artışı, yanma üzerinde artan bir sinerjik etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yakıt karışımlarında biyokömürün payı arttıkça, Soma linyiti için CO<sub>2</sub> konsantrasyonları artmıştır. Yakıt karışımındaki biyokömürün payı ve oksijen zenginleşmesi arttırıldığı zaman Soma linyitine biyokömürün ilavesi, yanma üzerindeki sinerjik etkiyi artırır. Sinerjistik etki, biyokütlenin yüksek alkali ve toprak alkali metal oksit içeriğine bağlanabilir. Soma linyitinin kül bileşimi yüksek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO ve SiO<sub>2</sub> içerikleri gösteren Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Soma Linyitinin Kül Bileşimi, Ağırlıkça %. (Kuru bazda)

Kömür	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SrO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Soma	22.24	0.12	19.37	5.85	1.95	2.08	0.07	0.24	0.25	6.79	39.51	0.05	1.14	0.14



**Şekil 7.** Soma Kömürü için O<sub>2</sub> konsantrasyonunun CO<sub>2</sub> Emisyonları Üzerindeki Etkisi

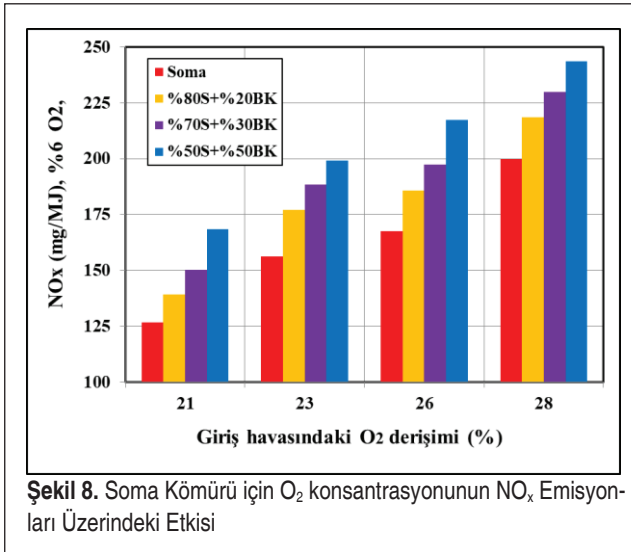


NO<sub>x</sub> Emisyonları: Yanma sırasında NO<sub>x</sub> (NO ve NO<sub>2</sub>) oluşum mekanizması çok karmaşıktır. Yanma bölgesinde bulunan azotlu türlerin tipine, sıcaklığına ve stokiometrik oranına bağlı olarak nitrojen oksit oluşum mekanizması değişir. Genellikle alev türü, NO<sub>x</sub> oluşumunun baskın mekanizmasının koşullarını belirlemektedir. NO, yanma sırasında NO<sub>x</sub> emisyonlarının çoğunu oluşturur (> %90).

Oksijence zengin ortamdaki sıcaklıklar termal NO<sub>x</sub> oluşum sıcaklığının 1000 °C'ın çok altındadır. Romeo vd. [16], termal NO<sub>x</sub>'in DAY Oksiyenma deneylerinde ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir [16]. Termal-NO<sub>x</sub> oluşumu, dolaşımli akışkan yatak yanmasında daha düşük çalışma sıcaklıkları (800-900 °C) nedeniyle NO emisyonlarının nedeni gibi görünmemektedir [16]. İncelenen koşullarda olası NO<sub>x</sub> oluşum yolu, yakıt-N'nin NO'ya dönüştürülmesidir. Yakıt-NO<sub>x</sub> oluşumu üzerindeki sıcaklığın etkisi literatürde net değildir. Khan vd. [17], akışkan yatağın çalışma sıcaklıklarının en yüksek yakıt NO<sub>x</sub> dönüşüm oranları için uygun olduğunu bildirmektedir [17]. Öte yandan Miller ve Bowman. [18], yakıt-N'den NO<sub>x</sub>'e dönüşümün sıcaklığa çok az bağlı olduğunu iddia etmektedirler.

O<sub>2</sub> konsantrasyonuna göre NO<sub>x</sub> emisyonlarındaki değişim Şekil 8'de gösterilmektedir. Yanma reaktöründe maksimum sıcaklık 750 °C ve 871 °C olarak gözlemlenmiştir. Küçük sıcaklık aralıklarında NO<sub>x</sub> emisyonlarındaki artışa bakıldığında, 760 °C ile 890 °C arasında sıcaklığın yakıt-N'den NO'ya dönüşümünde önemli bir etkisi olmadığını düşünmek mantıklıdır.

O<sub>2</sub> konsantrasyonunun artması ile birlikte tek başına Soma linyitin yanmasından kaynaklanan NO<sub>x</sub> emisyonları, 127 mg / MJ'den 200 mg / MJ'e yükselmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Soma Kömürü için O<sub>2</sub> konsantrasyonunun NO<sub>x</sub> Emisyonları Üzerindeki Etkisi



Yanma havasında O<sub>2</sub> konsantrasyonunun hacimce %21'den %27'ye yükseltilmesi, Soma linyit için NO<sub>x</sub> emisyonlarında hafif artışa neden olduğu göstermektedir. Bunun nedeni, yanma reaktöründe daha yüksek O<sub>2</sub> konsantrasyonunun bir sonucu olarak OH radikallerindeki artıştan kaynaklanıyor olabilmesi ve buda, NO<sub>x</sub> oluşumunu artışına sebep olmasıdır [19].

Soma linyitine biyokömür ilavesinin NO<sub>x</sub> oluşumu üzerindeki etkisi, Şekil 8'de gösterilmektedir. NO<sub>x</sub> emisyonları tüm yakıt karışımları için tek başına linyitten daha yüksektir. Sonuçlar, yakıt karışımındaki artan biyokömür payının daha yüksek NO<sub>x</sub> emisyonu ile sonuçlandığını göstermektedir. Biyokömürün azot içeriği (ağırlıkça %0,63) linyitin azot içeriğinden (uçucu içerik olarak ağırlıkça %0,84) daha düşük olmasına rağmen, biyokömür, linyite göre (Soma için 2.19) daha yüksek H/N oranına (9.17) sahiptir. Daha yüksek H/N oranına sahip yakıtların, daha yüksek NH<sub>3</sub> üretmesi bekleniyor ki buda NO oluşumunu arttırmaktadır. Bu nedenle, %50 /%50 kömür ve biyokömür yakıt karışımı için, O<sub>2</sub> konsantrasyonunun hacimce %21'den %28'e çıkmasıyla NO<sub>x</sub> emisyonu 170 mg / MJ'den 240 mg / MJ'e yükselmiştir.

SO<sub>2</sub> Emisyonları: Soma linyitinin tek başına yanması, çok düşük S içeriği nedeniyle (ağırlıkça %0,73) ölçülebilir SO<sub>2</sub> emisyonları üretmemektedir. Biyokömürün S içeriği de çok düşüktür (ağırlıkça %0,08). Bu nedenle Soma için SO<sub>2</sub> emisyonları, burada verilmemiştir.

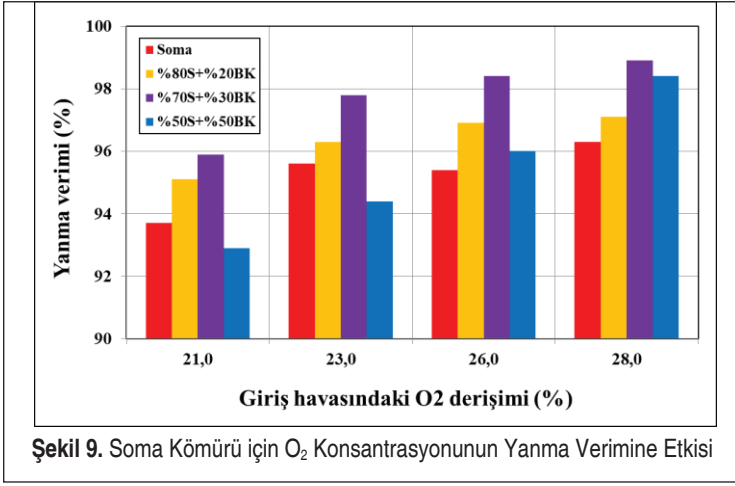
### 3.3 Yanma Verimi

Yanma verimi aşağıdaki ilişkiden hesaplanmıştır [20]:

Bu verimlilik hesaplama yöntemi, baca gazı bileşimi bilgisine dayanmakta ve karbon kaybının olmadığını ve beslemede sunulan karbon bileşiminin tamamen karbon monoksit ve karbondioksite dönüştüğünü varsaymaktadır. Şekil 8, Soma linyiti ve biyokömür ile karışımları için yanma verimliliği varyasyonunu O<sub>2</sub> konsantrasyonu ile göstermektedir. Sistemde karbon dengesi yapılırsa yakıttaki tüm karbonun CO veya CO<sub>2</sub>'ye dönüştüğünü göstermektedir.

$$\eta_{CE} = 100 \times \frac{\text{Baca gazındaki } \%CO_2}{\text{Baca gazındaki } (\%CO_2 + CO)} \quad (1)$$

Bu, yanma veriminin hesaplanmasında "külde yanmamış karbon kalmaması" varsayımının doğru olduğunu göstermektedir. Tek başına Soma linyiti için hava ile yakıldığında yanma verimi, yaklaşık %94 olmuştur. Yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu %21'den %28'e çıktığında yanma verimi %96,5'e yükselmiştir. Biyokömür Soma linyitine ilave edildiği zaman, hacimce %28 oksijen konsantrasyonu için yakıt karışımına %20 biyokömür ilavesi için yanma verimi %96,5'e, %30 biyokömür ilavesi için %99'a yükselmiştir. Bununla birlikte, Soma linyitine %50 biyokömür ilavesi için yanma verimi %99'a yükselmiştir.



vesi için, özellikle düşük O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında yanma verimi %93-96 arasında daha düşük seviyelere düşmektedir. Bu, yakıt karışımına %50 biyokömür ilavesiyle daha düşük ortalama yatak sıcaklığı ile açıklanabilir. Biyokömür yüksek miktarda sabit karbon içeriyor (%58,49) ve karbonun yanmasının uçucu maddeden daha zor olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, yatağa beslenen yüksek miktarda biyokömür yatak sıcaklığını düşürebilir, buda düşük oksijen konsantrasyonlarında daha düşük yanma veriminin nedeni olabilir. Ancak yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu arttığında, daha iyi yanma ile %28 oksijen konsantrasyonu için yanma verimi de %98,5'e yükselmiştir.

### 3.4 İki Linyit Kömürün Karşılaştırılması- Soma Linyit ve Orhaneli Linyit

Soma linyiti, çam ağacından elde edilen biyokömür ile birlikte yakma için kullanılmadan önce, Orhaneli linyiti de biyokömür ile birlikte yakma için kullanılmıştır. Bu çalışmanın detaylı sonuçları Keivani, B. vd., 2019'da yayınlanmıştır. Bu linyit kömürleri birbirinden çok farklıdır. Orhaneli linyiti, Soma'ya kıyasla düşük kül (%8,8) ve yüksek UM içeriğine (%44,4) sahiptir. Soma, yüksek kül (%42,7) ve düşük UM içeriğine (%32,8) sahiptir. Sabit Karbon (SK) içeriği söz konusu olduğunda, Soma %21,6 ve Orhaneli %41,1 SK'a sahiptir. Bu nedenle bu kömürlerin yanma ve birlikte yanma özellikleri oldukça farklıdır. Bu kömürlerin alt ısıl değerleri (AID) de farklıdır. Orhaneli, yüksek UM, yüksek SK ve düşük kül içeriği nedeniyle çok daha iyi bir kömürdür. AID'i kuru bazda 25034 kJ/kg'dır ve kalorifik değeri biyokömürden (23487 kJ / kg) daha yüksektir. Öte yandan Soma, düşük UM, düşük SK ve yüksek kül içeriği (kuru bazda yaklaşık %42,7) nedeniyle düşük kaliteli bir kömürdür. AID'i kuru bazda 13464 kJ/kg'dır ve kalorifik değeri biyokömürden (23487 kJ/kg) daha düşüktür. Kalorifik değer açısından bakıldığında, Soma linyitin biyokömür ile birlikte





yakılması, düşük kaliteli bir kömüre destek vermek için çok daha iyi bir seçenektir. Emisyonlar dikkate alınır, CO emisyonları eğilimi her iki kömür için de aynıdır. Bol oksijen beslemesi nedeniyle yanma havasındaki oksijen içeriği arttıkça CO emisyonu azalmıştır. Ancak biyokömür ilavesi ile CO emisyonu Soma linyitinde azalmakta, Orhaneli linyitinde artmaktadır. Soma için yanma verimliliği tek başına yakıldığında %93,5-96,5 civarındadır. Yakıt karışımına biyokömür ilavesi ile yanma verimliliği %98-99'a yükselmiş ve bu yakıt karışımında, %50 /%50 kömür ve biyokömür karışımı için CO emisyonlarının 100 mg / MJ'e düşmesini açıklamaktadır.

Orhaneli tek başına yakıldığında yanma verimi %98,7-99,2 civarındadır. Ancak Orhaneli linyitinde yakıt karışımına biyokömür ilavesi ile linyite %20 ve %30 biyokömürün ilavesi için yanma verimi %99,5-99,7'ye kadar yükselmektedir. Bununla birlikte, %50 biyokömür ilavesi ile yanma verimi %93,5-97,5'e düşmektedir. Bu, yakıt karışımındaki %50 /%50 kömür ve biyokömür karışımı için CO emisyonlarının 280 mg / MJ'e kadar artışı açıklamaktadır. Bunun nedeni, yanma reaktöründeki çok yüksek SK içeriğinden ve sabit karbonun daha yavaş yanma hızından kaynaklanıyor olabilir. Bu oldukça ilginç bir noktadır ve yardımcı yanma reaktörlerin tasarımında dikkate alınmalıdır.

Baca gazında CO azaldığında CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun artacağı oldukça açıktır. Bu, her iki kömür karışımının baca gazı bileşiminde gözlemlenen durumdur. NO<sub>x</sub> emisyonu söz konusu olduğunda: Soma ve Orhaneli için yanma havasındaki oksijen konsantrasyonunun artmasıyla NO<sub>x</sub> emisyonları artmaktadır. Bu oldukça beklenen bir durumdur çünkü yanma reaktöründeki fazla oksijen miktarı ile daha yüksek sıcaklıklara ve daha iyi yanma koşullarına ulaşılır. Yanma sırasında yakıt-NO<sub>x</sub> oluşmanın beklenmesi ile birlikte, ortamdaki bol oksijen ve kömür külünde bulunan bazı alkali metallerin olası etkisi nedeniyle Termal NO<sub>x</sub> oluşumu da gerçekleşebilir. Nitekim Soma durumunda NO<sub>x</sub> emisyonları Orhaneli'ye göre daha yüksektir ve daha önce Tablo 2'de verildiği gibi Soma'da kül içeriği oldukça yüksektir (kuru bazda ağırlıkça %42,7). Bu, NO<sub>x</sub> oluşumundaki kömür külünün sinerjik etkilerini ve muhtemelen yakıt NO<sub>x</sub>'e ilave olarak Termal NO<sub>x</sub> oluşumu ile açıklanabilir.

#### 4. SONUÇLAR

Oksijen zenginleştirme, daha iyi yanma nedeniyle tüm durumlarda CO oluşumunu azaltmış ve CO<sub>2</sub> konsantrasyonunu arttırmıştır. Biyokömürün yakıt karışımındaki payı arttıkça, Soma linyiti için CO emisyonu azalmıştır. En yüksek CO emisyonu tek başına Soma linyiti ile elde edilirken, biyokömürün katkı payı arttıkça CO emisyonu azalmıştır. Azaltılmış CO emisyonuna ek olarak, yanma verimliliği biyokömürün ilavesi ile artmıştır. Biyokömür ilavesi ile birlikte oksijen içeriği arttıkça, Soma kömürünün CO<sub>2</sub> konsantrasyonunda ve yanma veriminde daha hızlı bir artış göstermiştir.

Soma linyitine biyokömür ilavesi yanma üzerindeki sinerjik etkiyi arttırmıştır. Siner-



jistik etki, biyokömürün yüksek alkali ve toprak alkali metal oksit içeriğine bağlanabilir. Soma linyiti üzerindeki etki daha belirgindir.

Havadaki oksijen konsantrasyonunu %28'e kadar O<sub>2</sub> ile zenginleştirmek, bu çalışmanın sıcaklık aralığında Yakıt-N dönüşümünü teşvik ederek ve kısmen Termal-NO<sub>x</sub> oluşumunu teşvik ederek NO<sub>x</sub> emisyonlarını arttırmıştır. Yakıt karışımındaki daha yüksek biyokömür payı, temel olarak biyokömürün düşük S içeriği nedeniyle daha düşük SO<sub>2</sub> emisyonlarına neden olmuştur.

Orhaneli ve Soma linyitleri karşılaştırıldığında yanma havasında oksijenin artışı ile Orhaneli linyitinde Soma'ya göre daha fazla NO<sub>x</sub> oluşumu meydana gelmiştir. Bu linyitlere biyokömür ilavesi ile her iki durumda da NO<sub>x</sub> oluşumu artmıştır. Bu nedenle, sinerjistik etkinin biyokömürün yüksek alkali ve toprak alkali metal oksit içeriğinin yanı sıra Yakıt-NO<sub>x</sub>'e ilave olarak bir miktar Termal-NO<sub>x</sub> oluşumuna atfedilebileceğini bekleyebiliriz. Bununla birlikte, Soma linyitinin biyokömür ile birlikte yakılması düşük kaliteli bir kömüre destek vermek için çok iyi bir seçenek olduğu kesindir.

Ticari uygulamalar için daha fazla çalışma yapılmalıdır. Biyokömürleştirme ve DAY sistemlerinde enerji ve ekserji analizleri yapılmalıdır. Ölçek büyütmek için bir model geliştirilmelidir. Oksijenleme teknolojisinin mevcut enerji santrallerine güçlendirme seçeneğini değerlendirmek için oksijen zengin bir yanma ortamında ısı transferi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

## TEŞEKKÜRLER

213M527 numaralı Tübitak 1003 "Dolaşım Akışkan Yatak Yakma Sisteminde Linyit ve Biyokömürün Oksijen Zengin Ortamda Yakılması (OKSİYANMA)" projesi kapsamında TÜBİTAK ARDEB'e desteklerinden dolayı çok teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

1. **Saracoglu, N.** 2015. Energy production from forest residues in Turkey, 3rd International Symposium and Innovative Technologies in Engineering and Science, Valencia, Spain. ISITES.
2. **Ersoy, M.** 2015. Role of coal in Turkey, Workshop on best practices in production of electricity from coal, 29 October 2015, Genova, [https://www.unece.org/.../se/.../8\\_M\\_Ersoy\\_TURKEY.pdf](https://www.unece.org/.../se/.../8_M_Ersoy_TURKEY.pdf) (Accessed 08 February 2019).
3. **Varol, M., Atımtay, A.T., Olgun, H. and Atakül, H.** 2014. Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high sulfur-lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor: Part 1, Effect of excess air ratio, Fuel, 117, 792–800.
4. **Atımtay, A.T., Kayahan, U., Unlu, A., Engin, B., Varol, M., Olgun, H., Atakul, H.** 2017. Co-firing of pine chips with Turkish lignites in 750 kWth circulating fluidized bed combustion system, Bioresource Technology, 224, 601–610.
5. **Acar, C. and Dincer, I.** 2017. Environmental impact assessment of renewables and Conventional fuels for different end use purpose, Int. J. Global Warming, 13 (3/4), 260-277.



6. **Kourkoupas, D.S., Stamatiou, G., Karellas, S., Grammelis, P. and Kakaras, E.** 2017. An environmental and economic evaluation of the lignite power generation system by using the life cycle analysis principles, *Int. J. Global Warming*, 13(3/4), 297-329.
7. **Tumuluru, J.S., Sosanj, S., Hess, J.R., Wright C.T. and Boardman, R.D.** 2011. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications, *Industrial Biotechnology*, 384-401.
8. **Recari, J., Berruoco, C., Puy, N., Alier, S., Bartroli, J. and Farriol, X.** 2017. Torrefaction of a solid recovered fuel (SRF) to improve the fuel properties for gasification processes, *Applied Energy*, 203, 177-188.
9. NASA, Global Climate Change. 2019. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>. Erişim tarihi Şubat 25, 2019.
10. **Olgun, H., Keivani, B., Gultekin, S. and Kabadayi A.** 2016. Experimental study on torrefaction of pine wood in a continuous screw conveyor, 6th International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice -Italy, November 14-17.
11. **Keivani, B., Gultekin, S., Olgun, H., and Atımtay, A.T.** 2018. Torrefaction of pine wood in a continuous system and optimization of torrefaction conditions, *International Journal of Energy Research*, 4597-4609.
12. **Engin, B., Atakül, H.** 2016. Air and oxy-fuel combustion kinetics of low rank lignite, *Journal of the Energy Institute*, 1-12.
13. **Rui, S., Xiaohan, R., Xiaoxiao, M., Nikita, V., Martin, S., Yiannis, A.L.** 2017 Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass, *Fuel*, 188: 310-323.
14. **Gil, M.V., García, R., Pevida, C. and Rubiera, F.** 2015. Grindability and combustion behavior of coal and torrefied biomass blends, *Bioresource Technology*, 191:205-212.
15. **Kayahan, U. and Ozdogan, S.** 2016. Oxygen enriched combustion and co-combustion of lignites and biomass in a 30 kWth circulating fluidized bed, *Energy*, 116, 317-328.
16. **Romeo, L.M., Díez, L.I., Guedea, I., Bolea, I., Lupiáñez, C., González, A., Pallarés, J., and Teruel, E.** 2011. Design and operation assessment of an oxyfuel fluidized bed combustor, *Exp. Therm. Fluid Sci*, 35(3), 477-484.
17. **Khan, A.A., De Jong, W., Jansens, P.J. and Spliethoff, H.** 2008. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies, *Fuel Processing Technology*, 90, 21-50.
18. **Miller, J.A., Bowman, G.T.** 1989. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion, *Prog Energy Combust Sci*, 15, 287-338.
19. **Duan, L., Duan, Y., Zhao, C., and Anthony, E.J.** 2015. NO emission during co-firing coal and biomass in an oxy-fuel circulating fluidized bed combustor, *Fuel*. 150, 8-13.
20. **Patumsawad, S. and Cliffe, K.R.** 2002. Experimental study on fluidized bed combustion of high moisture municipal solid waste, *Energy Conversion and Management*, 43, 2329-2340.