



## DOLAŞIMLI BİR AKIŞKAN YATAKDA KİREÇTAŞININ YANMA PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

İbrahim ATILGAN

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü  
06570 Maltepe, Ankara, [atilgan@gazi.edu.tr](mailto:atilgan@gazi.edu.tr)

(Geliş Tarihi: 14.04.2014, Kabul Tarihi: 10.07.2014)

**Özet:** Günümüzde standart dışı düşük kaliteli yakıtların verimli ve temiz yakılması için uygun teknoloji, akışkan yatakta yakma teknolojisidir. Akışkanlaştırılmış ortamda yakma prensibine dayanan bu uygulamada temel yanma, SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> tutma kuralları kolayca oluşturulabilmektedir. Yapılan çalışmada, yakıt olarak Kütahya Tunçbilek Linyiti, yatak malzemesi olarak silis kumu ve kül karışımı, adsorbent madde olarak da Göynük Yöresi Kireçtaşı kullanılarak emisyon davranışları incelenmiştir. Kömür, silis kumu ve kireçtaşının tane boyutları kümülatif yöntemle hesaplanarak en uygun tane boyutları, sistem için belirlenmiştir. Kireçtaşı ilaveli dolaşimli akışkan yatakta, tane boyutlarının emisyonlara etkisi incelenmiştir. Kullanılan kömürün ve adsorbent maddelerin özelliklerine de bağlı olarak çalışılan aralıklarda, kirletici emisyonların değişimi incelenerek en uygun çalışma bölgesi belirlenmiştir. Bu bölge yanma performansının bozulmadığı, yanmadaki ve SO<sub>2</sub> tutulmasındaki verimlerin yüksek tutulduğu bölge olarak tarif edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Akışkan yatak, Yanma, Emisyon

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LIMESTONE ON COMBUSTION PERFORMANCE IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED

**Abstract:** At present time, the best combustion technology for burning the low grade coals in the fluidized bed combustion technology. In the fluidized bed combustion systems, which based on the combustion of coal particles in a fluidized space, the fundamental combustion and adsorption of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> can easily be realized. In the experimental studies, Kütahya Tunçbilek Lignite was used as fuel, silica sand and ash mixture was used as bed material, limestone from Göynük was used as adsorbent. For the combustion system particle size of coal and limestone were calculated employing the cumulative method and optimum particle sizes for the system were determined. Adding limestone to the coal, effect of particle size on the emission behaviour was investigated. Separately optimum operating conditions were determined on the basis of pollutant emissions for different coal and adsorbent properties. These conditions are described as regions there the combustion performance is not hindered and there the efficiencies in combustion and SO<sub>2</sub> adsorption are kept high.

**Keywords:** Fluidized bed, Combustion, Emission

### SEMBOOLLER

A	Kül, (%)	NO <sub>x</sub>	Azotoksitler, (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sub>yön</sub> , (ppm)
C	Karbon, (%)	O	Oksijen (%)
CO	Karbonmonoksit, (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sub>yön</sub>	O <sub>2</sub>	Oksijen gazı, (%)
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit, (%)	Re <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (%)
C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	Hidrokarbonlar, (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sub>yön</sub> , (ppm)	S	Kükürt, (%)
Ca	Kalsiyum, (%)	SO <sub>2</sub>	Kükürtdioksit, (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sub>yön</sub> , (ppm)
CaO	Kalsiyumoksit, (%)	SiO <sub>2</sub>	Silisyumdioksit, (%)
D <sub>e</sub>	Etkin difüzyon hızı, (cm <sup>2</sup> /s x 10 <sup>2</sup> )	U <sub>mf</sub>	Minimum akışkanlaşma hızı, (m/s)
$\bar{d}_p$	Ortalama partikül çapı, (mm)	U <sub>o</sub>	Normal şartlarda işletme hızı, (m/s)
H	Hidrojen, (%)	W	Nem, (%)
H <sub>o</sub>	Yakıt üst ısı değeri, (kCal/kg)	X <sub>s</sub>	Dönüşüm oranı, (%)
H <sub>u</sub>	Yakıt alt ısı değeri, (kCal/kg)	Y	Yakıt
MgO	Magnezyumoksit, (%)	$\hat{c}_p$	Ortalama gözenek yarıçapı, (nm)
M <sub>up</sub>	Uçucu partikül miktarı, (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sub>yön</sub>	$\eta$	Verim, (%)
N	Azot, (%)	$\eta_{SO_2}$	Kükürtdioksit tutulma verimi, (%)
N <sub>2</sub>	Azot gazı (%)	$\epsilon$	Gözeneklilik,
		$\tau$	Bükümlülük faktörü.

## GİRİŞ

Fosil yakıtlardan kömür, dünya enerji üretiminde hala önemli bir paya sahiptir. Kaliteli kömür rezervlerinin sürekli azalması ve artan fiyatları, henüz oldukça çok rezervlere sahip olan düşük kaliteli kömürlerin (linyit, turba, şişt vb. gibi) kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Düşük kaliteli linyitlerin kazan endüstrisinde enerji kaynağı olarak kullanılmaya çalışılması, değişik kazan sistemlerinin geliştirilmesi üzerine yeni araştırmaların yapılmasını gerektirmiştir (Durmaz A., 1991).

Ülkemizde kullanılan linyitlerin oldukça düşük kalorili oluşları ve içersinde yanmayı olumsuz yönde etkileyen ve hava kirletici emisyonlara neden olan nem, kül, kükürt ve uçucu maddelerin yüksek oranlarda bulunması nedeniyle; alışılmış yakma sistemlerinde gerekli biçimde temiz ve verimli yakılamamaktadır. Bu nedenle bu tür yakıtların enerji, işletme ve çevre ekonomisi yönünden daha uygun biçimde yakılmasını sağlayacak yakma sistemleri geliştirilmesi yönüne gidilmiştir (Topal H., 2001). Düşük kaliteli kömürlerin yakılması güçlüğüne karşı ve de emisyonların azaltılması bakımından en uygun yakma sistemleri, akışkan yataklı yakma sistemleridir. Bu tür yakma sistemleri, enerji kullanım verimi ve çevre kirlenmesi problemlerine bir alternatif çözüm olmaktadır. Dolayısıyla linyitlerin verimli ve temiz yakılabilmesi için, yanmanın yüksek ısı depolu, türbülanslı, yapısal olarak özellikle SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve toz emisyonlarını önleyici bir ortamın sağlanması gerekmektedir (Doğu T. and Togay M., 1979). Buna göre bu özellikleri sağlayan yakma sistemi ise, akışkan yataklı yakma sistemleri içerisinde dolaşımli olanıdır (Plass L., vd., 1986; Basu P. and Fraser S. A., 1991). Ayrıca bu tür sistemlerde kireçtaşı katılması kolay ve kontrollüdür. Akışkan yataklarda kömür ile beslenen kireçtaşı, SO<sub>2</sub> tutulmasında büyük rol oynar. Bu konuda ilk deneysel çalışma Borgwadh tarafından yapılmıştır (Borgwadh R. H., 1970).

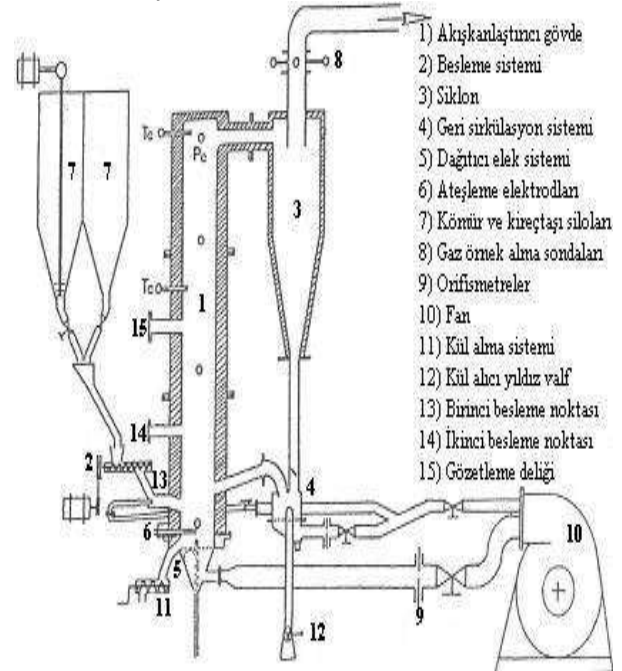
Akışkan yatak yakma teknolojisi genelde, kabarcıklı (sabit) ve dolaşımli olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Dolaşımli akışkan yatak uygulamalarında, siklon hattı (düşme borusu) ve yanma odası (reaktör, yükselme borusu) arasında akışkanlaştırılmış ortamda yoğunluk farkı oluşturularak yatak dolaşımına zorlanır (Monazam E. R. vd., 2005). Bu sistemde, yüksek yakma hava hızı ve yatak malzemesi ile yanan malzemenin gazlardan siklon yardımıyla ayrıştırılıp yanma odasına geri gönderilmesiyle katı dolaşımı sağlanmaktadır (Grace vd., 1986). Dolayısıyla bu sistemin diğer akışkan yatak ve klasik yakma sistemlerine göre birçok üstünlüklere sahip olduğu, gerçekleştirilen deneyler sonucunda görülmüştür (Atılğan İ., 1997). Bu çalışmada, laboratuvar şartlarında dolaşımli akışkan yatak yakma sisteminde sabit operasyon şartları tesbit edilerek Kütahya Tunçbilek Linyiti, değişik tane boyutlu kireçtaşıyla (emisyonları azaltma ve yanma verimlerine en uygun tane boyut değişimleri uygulanarak) ayrı ayrı karışımları sağlanarak yakılmıştır. Ayrıca kireçtaşının,

en uygun ısıl performans ve emisyon özelliklerine göre belirlenen Ca/S oranı ve kömür tane boyutu sabit tutularak linyitle yakılmasıyla, baca gazıyla atmosfere atılan hava kirletici emisyonlar, SO<sub>2</sub> tutma verimleri, yanma performansı ve özellikleri incelenerek uygun değerler belirlenmiştir (Atılğan İ., 1998).

## DENEYSEL ÇALIŞMA

Böyle bir çalışmanın gerçekleştirilmesi, ilgili ulusal ve uluslararası standartlara uygun bir araştırma alt yapısının kurulması ile oluşmaktadır. Dolayısıyla yüksek kirletici özelliklere sahip linyit kömürlerinin daha verimli ve temiz yakılmasına yönelik olarak, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Isıl Güç Laboratuvarında bulunan ve modifiye edilen dolaşımli akışkan yataklı yakma sisteminde bu çalışma yapılmıştır (Şekil 1).

Sistem, akışkanlaştırıcı gövde ve yanma odası, besleme sistemi, siklon, geri sirkülasyon sistemi, dağıtıcı elek sistemi, elektrikli ateşleme sistemi, yakıt (linyit) ve adsorbent (kireçtaşı) için silolar, fan, kül alma mekanizması, gözetleme delikleri (ısıya dayanıklı cam) ve zorlanmış sirkülasyon sisteminden oluşmaktadır. Ayrıca sistemin ön ısıtılması ve yakıtı ilk tutuşturma işlemi için sanayii tipi LPG tüpü kullanılmıştır. Yakıt ve kireçtaşının belli bir tane boyutuna getirilmesi için, çekiçli kaba kırıcı ile diskli öğütücüden faydalanılmıştır. Yakıt ve kireçtaşı analizleri için bomba kalorimetresi, elementel analiz cihazı (Leco 610), sıcaklık ölçümleri için ısıl çiftler, basınç ölçümlerinde manometreler, emiş ölçerler, akış ölçümleri için gazometreler, dijital anemometre, hassas terazi ve kurutma fırını gibi cihazlar da kullanılmıştır.



Şekil 1. Laboratuvar şartlarında dolaşımli akışkan yataklı yakma sistemi

Yapılan çalışmada, laboratuvar şartlarında bir dolaşımli akışkan yatak yakma sisteminin hidrodinamik tasarım hesaplarına göre belirlenen ilgili temel parametreler (Tablo 1) tespit edilerek, değişik kireçtaşı tane boyutlarına göre hazırlanan karışımın (kömür+kireçtaşı) emisyon etkileri incelenmiştir.

**Tablo 1.** Temel parametre ve değerleri (Howard J. R., 1989)

TEMEL PARAMETRELER	
Yakıt türü	Kütahya Tunçbilek Linyiti
Yatak malzemesi	Silis kumu + kömür külü,
Adsorbent madde	Göynük kireçtaşı
Şekil faktörü	$\phi_s = 0,86$ (kum için)
Min. yatak boşluğu hacim kesri	$\epsilon_{mf} = 0,40$ (Teorik)
Ortalama katı yığın yoğunluğu	$\rho_p = 1360$ (kg/m <sup>3</sup> )
Yatak ön ısıtma	LPG 5 kg'lık sanayii tüpü
Akışkan yatak iç alanı	$A = 0,0123$ m <sup>2</sup>
İşletme hızı (normal şartlar)	$U_0 = 1,30$ m/s
Minumum akışkanlaşma hızı	$U_{mf} = 0,30$ m/s (Teorik)
Hava yoğunluğu (25°C, 1 atm)	1,187 kg/m <sup>3</sup>
Hava yoğunluğu (850°C, 1 atm)	0,315 kg/m <sup>3</sup>
Hava vizkositesi (25°C, 1 atm)	$1,83 \times 10^{-5}$ kg/m.s
Hava vizkositesi (850°C, 1 atm)	$4,39 \times 10^{-5}$ kg/m.s

Kireçtaşı tane boyutu, ASTM normu 8 inçlik eleklerle elek analizi neticesi kümülatif yöntemle 0,15; 0,30; 0,60; 0,90; 1,20 mm olarak belirlenmiştir. Aynı yöntemle belirlenen ortalama kömür tane boyutu 0,75 mm ve Ca/S = 1,5 oranı sabit tutularak deneyler yapılmıştır. Bu sabit değerler daha önce yapılan çalışmalarda en uygun değerler olarak belirlenmiş olup, bu çalışmada sabit olarak kullanılmıştır (Atılğan İ., 1999). Bu deneylerde Ca/S = 1,5 oranına göre, her bir kireçtaşı tane boyutu ile kömür, homojen bir şekilde karışımı sağlanarak yakma sistemine beslenmiştir.

Yatak malzemesi ortalama tane boyutu, elek analizi uygulanarak kümülatif yöntemle 0,65 mm belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan kömüre ait yaş temelde yapılan elementel analiz ve ısı değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Sisteme katılan kireçtaşı miktarı ve Ca/S oranı belirlenirken, kireçtaşının gözenekliliği, dönüşüm oranları ve kireçtaşı içindeki CaO'in ağırlıkça yüzdelerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre Göynük Yöresi kireçtaşının dönüşüm oranı maksimum olarak yaklaşık 0,15 mm tane boyutu için % 55 civarındadır (Tablo 3). Fakat CaSO<sub>4</sub>'ün CaO'in

gözeneklerini tıkaması sonucu, bu kireçtaşının en iyi şartlarda dönüşüm oranı ortalama % 40 gibi bir değere düşmektedir. Tablo 3 incelendiğinde, kireçtaşı tane boyutunun artması ile ulaşılan maksimum dönüşüm oranları azalmaktadır. Literatürdeki diğer çalışmalara bakıldığında, benzer sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür (García-Labiano F. vd., 2011; Saastamoinena J. and Shimizub T., 2007).

**Tablo 2.** Kullanılan kömüre ait elementel analiz sonuçları ve ısı değerleri

YAKIT CİNSİ	TUNÇBİLEK LİNYİTİ
Yakıt Bileşenleri %	Yaş Temel
C (Karbon)	58,28
H (Hidrojen)	5,25
O (Oksijen)	9,85
N (Azot)	2,50
S (Kükürt)	1,92
A (Kül)	14,45
W (Nem)	7,75
H <sub>o</sub> (kCal/kg.Y)	5775
H <sub>u</sub> (kCal/kg.Y)	5445
Ca (Kalsiyum)	1,18

**Tablo 3.** Muhtelif tane boyutlarına göre kireçtaşının dönüşüm oranları (Ar İ., 1992)

$\bar{d}_p$ kireçtaşı (mm)	Göynük Kireçtaşı Dönüşüm Oranı (X <sub>s</sub> ) <sub>maks</sub> (%)
0,10	54,08
0,25	55,81
0,62	50,32
1,02	52,58
1,70	19,06
2,25	12,13

(Kalsinasyon sıcaklığı T = 900°C, gaz akış hızı = 12 L/h, %SO<sub>2</sub> = 0,35)

Dönüşüm oranlarında ortalama sıcaklık T = 900°C'dir. Ayrıca bu yöre kireçtaşı içindeki CaO'in ağırlıkça yüzdesi % 53,1 değerindedir. Deneylerde kullanılan Göynük Yöresi kireçtaşının; kimyasal analizi Tablo 4'de, ortalama gözenek yarıçapı ( $\bar{r}_p$ ), bükümlülük faktörü ( $\tau$ ), gözenekliliği ( $\epsilon$ ) ve etkin difüzyon hızı ( $D_e$ ) Tablo 5'de verilmiştir (Howard J.R., 1989; Ar İ., 1992). Birim kg yakıt için % 20-40 fazla hava şartlarında ve normal şartlarda toplam havanın oluşturduğu yanma odası boş kolon hızı 1,3 m/s baz alınmıştır.

**Tablo 4.** Göynük kireçtaşı kimyasal analizi

KİREÇTAŞI (Göynük Yöresi)	CaO	MgO	Re <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
%	53,1	1,1	0,2	2,2

**Tablo 5.** Göynük kireçtaşı  $\hat{c}_p$ ,  $\tau$ ,  $\varepsilon$  ve  $D_e$  değerleri

KİREÇTAŞI (Göynük Yöresi)	Değerler
Ortalama Gözenek Yarıçapı ( $\hat{c}_p$ ), nm	61,91
Bükümlülük Faktörü ( $\tau$ )	2,67
Gözeneklilik ( $\varepsilon$ )	0,37
Etkin Difüzyon (D <sub>e</sub> ), cm <sup>2</sup> /s x 10 <sup>2</sup>	2,95

Kütahya Tunçbilek Linyiti'nin elementel analiz sonuçlarına göre, ilgili yanma hesapları (TSE 1983) ve stokiyometrik bağıntılarla (Smith J. M. and Van Ness H. C., 1975) elde edilen yanma verileri Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6.** İlgili yanma ve stokiyometrik değerler

Teorik hava gereksinimi	$V_{Ht} = 6,32$ (Nm <sup>3</sup> Hav <sub>atm</sub> /kg-y)
Teorik yanma gazı	$V_{Gt} = 6,66$ (Nm <sup>3</sup> Gaz <sub>atm</sub> /kg-y)
Yanma gazı miktarı	$V_G = 7,92$ (Nm <sup>3</sup> Gaz/kg-y)
Gerekli teorik oksijen ihtiyacı	0,0653 (kg mol O <sub>2</sub> /kg-y)
Hava ile beslenen O <sub>2</sub> miktarı	0,0066 (kg mol/dk)
Kömür besleme hızı	5,4 (kg-y/h) (Teorik)
Üretilen ısı güç	40 (kW <sub>t</sub> ) (Teorik)

Teorik olarak orijinal (nemli) kömür (yakıt) besleme hızı, 5,4 kg-y/h belirlenmiştir. Bu besleme hızına göre yakma sisteminin ısı gücü, üst ısı değere (H<sub>0</sub>)'a göre 40 kW<sub>t</sub> olarak hesaplanmıştır. Bulunan bu değer yakma sisteminde kömürün tam yanması sonucuna göre deney şartlarında maksimum ısı gücünü veren değerdir.

Kömüre katılacak kireçtaşı miktarı, kömür besleme hızı ve stokiyometrik bağıntılarla Ca/S = 1,5 sabit oranına göre 1283,4 gr/h belirlenmiştir. Bu kireçtaşı miktarı, kömürle homojen bir karışım sağlanarak yakma sisteminde yakılmıştır. Deney süresince (kararlı rejim durumunda) yanma parametreleri ve emisyon miktarları (cihazlardan doğrudan ölçülen) Tablo 7'de gösterilmiştir.

**Tablo 7.** Kireçtaşı tane boyutuna göre yanma parametreleri ve ölçülen emisyon değerleri

dp Kır.taşı (mm)	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>2</sub> (ppm)	CO (%)	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	M <sub>up</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )
0,15	7,20	9,80	218	0,027	13	223	1718
0,30	6,10	10,93	309	0,030	17	492	1420
0,60	5,96	11,07	384	0,031	64	537	1317
0,90	4,20	11,19	470	0,036	83	630	683
1,20	3,70	12,50	604	0,041	106	681	485

$$(\bar{d}p_{\text{kömür}} = 0,75 \text{ mm, Ca/S} = 1,50)$$

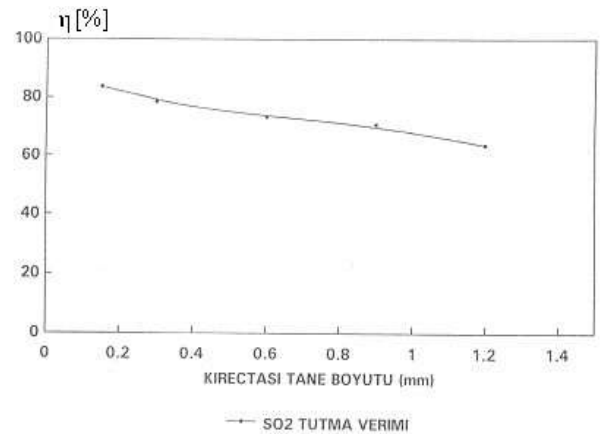
Kireçtaşı tane boyutuna göre SO<sub>2</sub> tutma verimi ve emisyon gaz konsantrasyonları ile uçucu partikül miktarlarının değişimi yönetmelik şartlarında (%7 O<sub>2</sub> esas alınarak) Tablo 8, grafik olarak da Şekil 2 ve Şekil 3'de belirtilmiştir.

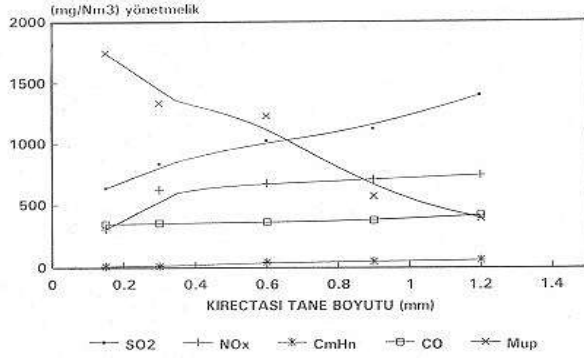
**Tablo 8.** Kireçtaşı tane boyutuna göre yönetmelik şartları dahilinde emisyon değerleri

dp Kır.taşı (mm)	$\eta_{\text{SO}_2}$ (%)	SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) Yön.	NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) Yön.	CO (mg/Nm <sup>3</sup> ) Yön.	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) Yön.	M <sub>up</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) Yön.
Orjinal	49,43	1943	1009	24	446	330
0,15	83,55	632	303	9	343	1743
0,30	78,40	830	619	11	352	1334
0,60	73,40	1022	670	43	361	1226
0,90	70,85	1120	703	49	375	569
1,20	63,64	1397	738	61	415	393

$$(\bar{d}p_{\text{kömür}} = 0,75 \text{ mm, Ca/S} = 1,50)$$

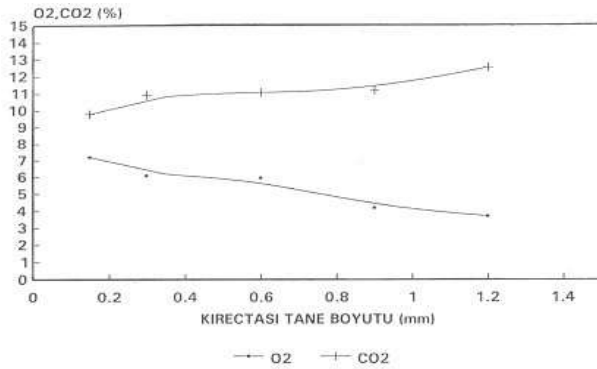
**Orjinal:** Kömüre kireçtaşı katılmamış durumdur.

**Şekil 2.** Sisteme katılan kireçtaşı tane boyutuna göre SO<sub>2</sub> tutulma değişimi



**Şekil 3.** Kireçtaşı ilaveli sistemde, kireçtaşı tane boyutuna göre yönetmelik şartları dahilinde emisyon değerlerinin değişimi

Tablo 7’de görüldüğü gibi 0,15-1,20 mm kireçtaşı tane boyut aralığında yanma parametrelerinin ( $O_2$ ,  $CO_2$ ) değerleri ve bu değerlerin değişim grafiği ise Şekil 4’de belirtilmiştir.



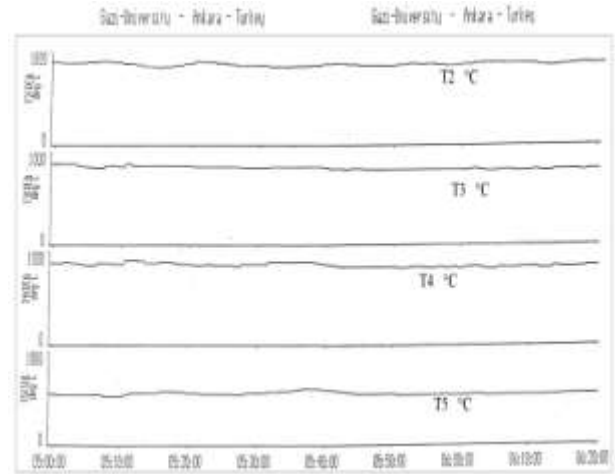
**Şekil 4.** Sisteme katılan kireçtaşı tane boyutuna göre yanma parametrelerinin değişimi

Tablo 8, Şekil 2 ve 3 incelendiğinde;  $SO_2$  tutulması, kireçtaşı tane boyutu büyüdükçe azalmakta, emisyon gaz konsantrasyonları  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO$  (çok az olarak),  $C_mH_n$  değerleri artmakta, uçucu partikül ( $M_{up}$ ) miktarlarında ise azalma görülmektedir. Kireçtaşı tane boyutunun çok küçülmesinde, kireçtaşı partiküllerinin siklon tarafından tutulmasının yetersiz kaldığı görülmüştür ( $M_{up}$ 'nin artma nedeni). Bu durumdan dolayı  $SO_2$  tutulmasının, orjinal kömür (kireçtaşı katılmamış) değerine yaklaştığı belirlenmiştir.

Tablo 7 ve Şekil 4 incelendiğinde; kireçtaşı tane boyutu büyüdükçe, yanma parametrelerini gösteren  $O_2$  değerlerinde azalma  $CO_2$ 'de ise artma belirlenmiştir. Bu durum, yanmanın sağlanabilmesi ve kalsilyasyon için daha fazla  $O_2$ 'e gereksinim olduğunu göstermektedir.  $CO_2$ 'de artış ise yanmanın iyileştiğini göstermektedir. Daha iri tanelerde yapılan deneylerde ise kararlı rejimin bozulduğu görülmüştür.

Kireçtaşının katıldığı yanma deneylerinde, sistem kararlı rejime geldiğinde akışkan yatak boyunca oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 5’de verilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü üzere bu sıcaklık dağılımlarının, dengeli

yanma rejimi sürdürüldüğü sürece, üniform bir dağılım gösterdiği anlaşılmıştır.



**Şekil 5.** Yakma sistemi sıcaklık dağılımları ( $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  yatak gövde sıcaklıkları ve  $T_5$  siklon sıcaklığı)

Sıcaklık değerleri alınırken  $Ca/S = 1,5$  oranı, ortalama kömür tane boyutu 0,75 mm ve kireçtaşı tane boyutu 0,15 mm sabit tutulmuştur.  $T_2$  yatak alt gövde,  $T_3$  yatak orta gövde,  $T_4$  yatak üst gövde ve  $T_5$  siklon sıcaklıklarını göstermektedir. Buna göre yatak içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımının oluştuğu ve yaklaşık  $870-900^\circ C$  bir değişim gösterdiği tesbit edilmiştir. Siklonda ise yanıcı gazların ve dolaşımdaki partiküllerin meydana getirdiği sıcaklıklardan dolayı yaklaşık  $550-600^\circ C$  sıcaklıklar oluşmuştur.  $1000^\circ C$  altında olan bu çalışma ortamındaki yanma odası sıcaklığına bağlı olarak aşırı  $NO_x$  oluşumları meydana gelmemiştir (Tarelho vd., 2006). Çünkü  $1000-1100^\circ C$  yukarısındaki yanma odası sıcaklıklarında (diğer yakma sistemlerinde olduğu gibi), ortam havasındaki  $N_2$  gazı da devreye girerek  $NO_x$  oluşumları ani artış göstermektedir (Zhao vd.,1994).

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Hava kirliliğinin ülkemizde oluşumunun başlıca nedenlerinden biri, düşük kalite linyitlerin mevcut yakma teknolojileri ve uygulamaları ile uygun biçimde yakılamamasıdır. Özellikle dolaşımli akışkan yatak yakma sistemleri bu tür yakıtların verimli ve temiz yakılması yönünde en etkin sistemlerden birisi olarak kendini göstermektedir. Yoğun türbülans ve yanma odasında uzun kalma süresi nedeniyle tam yanmanın sağlanabilmesi, kömüre adsorbent (kireçtaşı) ilavesiyle  $SO_2$  emisyonunun tutulabilmesi, bunun yanı sıra yatak sıcaklığının düşük ( $750-850^\circ C$ ) ve kontrollü olabilmesi ile de,  $NO_x$  emisyonlarının azaltılabilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca yakma sistemine ilave siklon takılmasıyla, bacadan dışarıya atılan toz emisyonları da azaltılabilmektedir.

Kireçtaşı katılı dolaşımli akışkan yataklı yakma sisteminin, emisyon davranışını belirleyen başlıca

emisyonlar; SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, baca gazı yanıcı partikül ve toz emisyonlardır. 0,15-1,20 mm tane aralığındaki kireçtaşı tane boyutu etkisinin belirlenmesi amacıyla, yapılan deneylerdeki en küçük tane boyutlarındaki (0,15-0,30 mm) kireçtaşı ile yapılan deneylerde en yüksek SO<sub>2</sub> tutulması belirlenmiştir. Bu durum Şekil 2'de görülmektedir. Kireçtaşı tane boyutu artışıyla; CO emisyonunda ve C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>'larda çok az bir artma olduğu, NO<sub>x</sub> emisyonlarında 0,15-0,30 mm arasında ani ve 0,30 mm den sonra lineer bir artma olduğu, uçucu partikül miktarında ise belirgin bir azalma olduğu görülmüştür (Şekil 3, Tablo 8). Kireçtaşıyla yapılan bu deneylerde yanma parametreleri incelendiğinde; kireçtaşı tane boyutu arttıkça CO<sub>2</sub>'de belli bir artış, O<sub>2</sub>'de ise bir azalma olduğu görülmüştür (Şekil 4). Yakma sistemindeki sıcaklık dağılımları değerlendirildiğinde, sistemin kararlı yanma şartlarına geçtikten sonra homojen sıcaklık durumları izlenmiştir (Şekil 5).

Laboratuvar şartlarında dolaşimli akışkan yataklı yakma sisteminde, kireçtaşı ilaveli ve bu kireçtaşının tane boyutlarına göre yapılan deneylerde elde edilen emisyon sonuçları, literatürde verilen sonuçlarla (Doğu T. and Togay M., 1979; Ar İ., 1992) genelde paralellik göstermektedir. En önemli paralellik, kireçtaşı tane boyutunun artmasıyla, SO<sub>2</sub> tutulmasında azalmaya neden olmasındır. Çünkü kireçtaşının tane boyutu, reaksiyon hızını ve dönüşüm oranını büyük ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla tane boyutunun artması kireçtaşının dönüşüm oranını önemli miktarlarda azaltmaktadır. Literatürdeki benzer çalışmalardan (Topal H. and Amirabedin E., 2011) elde edilen sonuçlara göre; 0,25-1,25 mm kireçtaşı tane boyutu ve 1-2,5 Ca/S oranı aralıklarında yapılan çalışmada, 0,7 mm kireç tane boyutunda en uygun yanma veriminin, %1,5 Ca/S oranında en iyi kükürt tutulma verimliliği elde edilmiştir. Ayrıca SO<sub>2</sub> azaltılmasında da parçacık boyutunun küçük tutulması gerektiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, yapmış olduğum deneysel sonuçlarla örtüşmektedir. Ayrıca akışkan yatak sıcaklığının artması da reaksiyon hızını artırarak kireçtaşının dönüşüm oranını önemli miktarlarda azaltmaktadır (Ar İ.,1992; Doğu, T., 1981).

Dolaşimli akışkan yatakta temel amaç, yakıt taneciklerinin oluşturulan yoğun türbülans etkisiyle olabildiğince reaktörde (yanma odası) yanmasının sağlanmasıdır. Bu çalışmada külde görülen oldukça büyük boyutlardaki yanmamış kok (C) oranları, reaktör boyutunun daha artırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Ayrıca akışkan yataklarda, yanma ve emisyon davranışları, yatak hidrodinamiği tarafından da belirlenmektedir. Akışkan yatakların hidrodinamiği, gaz-katı iki fazlı akış modelini ve etkileşimlerini açıklayan bir mekanizmadır. Partikül yoğunluk değişimi, yüzeysel gaz hızı değişimi ve partikül çapı değişimi ile akışkan yatak içerisindeki katı dolayım oranının oldukça fazla etkilendiği görülmüştür (Baysal Ö., 2007).

İleride yapılacak sistematik ve geniş kapsamlı çalışmalar hususunda; akışkan yatakların hidrodinamiği ile öne çıkan parametrelerin incelenmesinin yanı sıra, çeşitli yakıt türleri, akışkanlaşma, yanma davranışı ile tasarıma ve işletmeye yönelik ampirik korelasyonlar oluşturmaya yönelik uygulamalar önerilir.

## KAYNAKLAR

Durmaz A., 1991, Alışılmış Yakma Sistemleri ve Uygulamaları, *Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü I. Ulusal Sempozyumu Bildiri Kitabı*, Gazi Üniv. Müh.Mim.Fak., Ankara, 79-100.

Topal H., 2001, Dolaşimli Akışkan Yatakta Kömür Tane Boyutunun Yanma ve Emisyon Davranışı Üzerine Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14:1215-1228.

Doğu T. and Togay M., 1979, Effect of Air to Fuel Ratio on The Reaction of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> Emissions in a Fluidized Bed Combustor, *Technologie Des Lits Fluidises et disperses Applications Industrielles*, Compiegne, 1-5.

Plass L., Bierbach H. and Gummel P., 1986, Experience with Combustion in Circulating Fluidized Beds, *Lurgi GmbH Gervinusstrasse*, Frankfurt, 17-19.

Basu P. and Fraser S. A., 1991, Circulating Fluidized Bed Boilers, Design and Operations, *Butterworth-Heinemann*, USA, 4-16.

Borgwardth R. H., 1970, Kinetics of the Reaction of SO<sub>2</sub> with Calsined Limestone, *Environ. Sci. Tech.*, 4, 59.

Monazam E. R., Shadle L. J., Mei J. S. and Spenik J., 2005, Identification and Characteristics of Different Flow Regimes in a Circulating Fluidized Bed, *Powder Technology*, 155: 17-25.

Grace J. R., Limn C. J., Brereton C. M. H. and Chaouki J., 1986, Circulating Fluidized Bed Reactor Design and Operation, *University of British Columbia Vancouver*, Canada,

Atılğan İ., 1997, Linyit Yakılan Dolaşimli Akışkan Yatak Yakma Sisteminde, Kireçtaşı İlavesinin Yanma Rejimi ve Emisyon Davranışına Etkilerinin İncelenmesi, *MMF 06/96-8 No'lu Gazi Üniv. Araştırma Fonu Projesi*, Ankara.

Atılğan İ., 1998, Yakıt Tane Boyutunun Yanma Verimi ve Emisyonlara Etkisinin Akışkan Yatakta İncelenmesi, *Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Ankara, 11 (1):135-147.

Howard J. R., 1989, Fluidized Bed Technology, Principles and Applications, *Adam Hilger*, Bristol and New York, 8-32.

Atılğan İ., 1999, Kireçtaşı İlaveli Dolaşımli Akışkan Yatakta Ca/S Oranının Yanma ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi, *Gazi Üniv. Fen Bil. Enstitüsü Dergisi*, Ankara, 12(3): 593-605.

García-Labiano F., Rufas A., Diego L. F., Obras-Loscertales M., Pilar Gayán P., Alberto Abad A. and Adánez J., 2011, Calcium-Based Sorbents Behaviour During Sulphation at Oxy-Fuel Fluidised Bed Combustion Conditions, *Fuel*, 90: 3100–3108

Saastamoinena J. and Shimizu T., 2007, A model of Limestone Attrition and SO<sub>2</sub> Capture in a Large-Scale Pressurised Fluidised Bed Combustor, *Chemical Engineering Science*, 62: 574 – 583

Ar İ., 1992, *Kireçtaşı-SO<sub>2</sub> Reaksiyonunun Kinetiği Çalışmaları ve Baca Gazındaki SO<sub>2</sub>'nin Tutulması Amacıyla Sobalara Uygulanması*, Doktora Tezi, Gazi Üniv., Fen Bil. Enst., Ankara, 154-158.

Türk Standartları Enstitüsü, 1983, Kazanlar-Anma Isı Gücü ve Verim Deneyleri Esasları, *TS4041, TSE*, Ankara.

Smith J. M. and Van Ness H. C., 1975, Introduction to Chemical Eng. Thermodynamics, 3<sup>th</sup>. ed., *McGraw Hill*, Tokyo, 213-225.

Tarelho L. A. C., Matos M. A. A., and Pereira F. J. H. A., 2006, Influence of Limestone Addition on the Behaviour of NO and N<sub>2</sub>O During Fluidised Bed Coal Combustion, *Fuel*, 85: 967–977

Zhao J., Lim J., Brereton C. and Legros R., 1994, Influence of Operating Parameters on NO<sub>x</sub> Emissions from a Circulating Fluidized Bed Combustor, *Fuel*, Dep. of Chem. Eng. Univ. of British Columbia, Vancouver, vol. 73, no.10.

Doğu, T., 1981, The Importance of Pore Structure and Diffusion in the Kinetics of Gas-Solid Non-Catalytic Reactions: Reaction of Calcined Limestone with SO<sub>2</sub>, *Chem. Eng. J.*, 21:213-222.

Topal H., Amirabedin E., 2012, The Effect of Sulphur Retention on Combustion Performance of a Circulating Fluidized Bed: A Case Study of Zonguldak Gelik Coal, *6<sup>th</sup> International Ege Energy Symposium & Exhibition*, İzmir, 41-49

Baysal Ö., 2007, *Akışkan Yatak İçerisindeki Gaz-Katı İki Fazlı Akışın Hidrodinamiğinin Sayısal Olarak İncelenmesi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Y. Lisans Tezi.