

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PARTICLE SIZE OF LIMESTONE ADDED TO LIGNITE ON EMISSION BEHAVIOUR IN A FLUIDIZED BED COMBUSTION SYSTEM

İbrahim ATILGAN

Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fak., Makina Mühendisliği Bölümü,
06570 Maltepe-Ankara, TÜRKİYE, e-mail: atilgan@gazi.edu.tr

ABSTRACT

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 SO₂ adsorption are kept high.

Key Words: Emissions, fluidized bed, limestone

AKIŞKAN YATAKLI YAKMA SİSTEMİNDE LİNYİTE KATILAN KİREÇTAŞI TANE BOYUTUNUN EMİSYONLARA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

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 dolaşımli 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 SO₂ tutulmasındaki verimlerin yüksek tutulduğu bölge olarak tarif edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Emisyonlar, akışkan yatak, kireçtaşı

1.GİRİŞ

Hızlı gelişen teknoloji, artan dünya nüfusu ve bunlara paralel olarak artan enerji ihtiyacı, birçok problemleri de birlikte getirmiştir. Bunların başında atmosferik kirleticiler, kaliteli enerji kaynaklarının sürekli azalması, düşük kaliteli yüksek kirletici özelliği gösteren kömürlerin kullanılması gelmektedir. Kaliteli kömür rezervlerinin sürekli azalması ve artan fiyatları dolayısıyla, geniş rezervlere sahip düşük kaliteli kömürlerin (linyit, turba, şist vb.) kullanımı, zorunlu hale gelmiştir. Yerli birincil enerji kaynaklarımızdan linyit yaklaşık 8,4 milyar ton rezerv ile, enerji alt yapımızın temel girdisini oluşturmaktadır (1, 2).

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;

1.INTRODUCTION

Rapidly advancing technological improvements, increasing population on the world and the increasing energy requirements in parallel to such facts had simultaneously introduced numerous problems along with. Among such problems, the major ones could be determined as atmospheric pollutants, continuous diminish in high quality energy resources and utilization of low quality coals with highly pollutant characteristics. Continuous diminishing of high quality coal reserves and corresponding increase in price levels had made it obligatory to use low quality coal reserves having abundant reserves (lignite, turf, schist, etc.). Lignite, one of the local primary energy sources of our State constitutes the basic input of our energy infrastructure with approximately 8.4 billion tons of available reserves (1, 2).

As a consequence of the facts that the lignite used in our

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. 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 SO₂, NO_x ve toz emisyonlarını önleyici bir ortamın sağlanması gerekmektedir (1). Buna göre bu özellikleri sağlayan yakma sistemi ise, akışkan yataklı yakma sistemleri içerisinde dolaşımli olanıdır (3, 4). Ayrıca bu tür sistemlerde kireçtaşı katılması kolay ve kontrollüdür.

Bu çalışmada, dolaşımli akışkan yatak yakma sisteminde sabit operasyon şartları tespit edilerek Kütahya Tunçbilek Linyiti, değişik tane boyutlu kireçtaşlarıyla ayrı ayrı karışımı sağlanarak yakılmıştır. Kireçtaşının ısı performans ve emisyon özelliklerine göre belirlenen en uygun tane boyut değişimleri, Ca/S oranı ve kömür tane boyutu sabit tutularak kömürle yakılmasıyla, baca gazıyla atmosfere atılan hava kirletici emisyonlar ve SO₂ tutma verimleri incelenerek uygun değerler belirlenmiştir.

2.DENEY SİSTEMİ VE DENEYLERİN YAPILIŞI

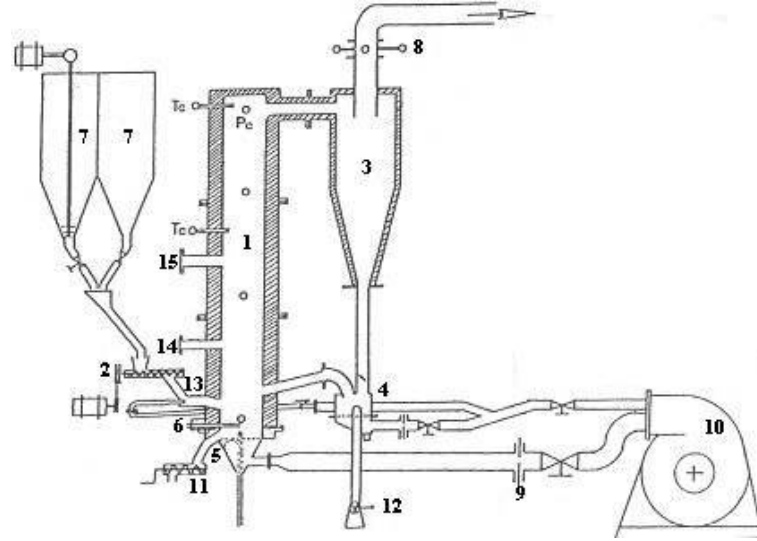
Türkiye'nin mevcut enerji kaynakları, teknik ve ekonomik imkanları dahilinde, ekonomik ve çevresel etki yönünden kendisine uygun olan yakma sistemlerini geliştirmesi, mevcut sistemleri de günün koşullarına göre modifiye etmesi gerekmektedir. Böyle bir çalışmanın gerçekleştirilmesi, ilgili ulusal ve uluslararası standartlara uygun bir araştırma alt yapısının kurulması ile oluşmaktadır. Dolayısıyla yüksek kirletici özelliklere sahip linyit kömürlerinin daha verimli ve temiz yakılmasına yönelik olarak, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fakültesi Makine Müh. Bölümü Isıl Güç Laboratuvarında bulunan ve modifiye edilen dolaşımli akışkan yataklı yakma sisteminde bu çalışma yapılmıştır (Şekil 1).

State has extremely low calorific values and contain materials such as moisture, ash, sulfur and volatile materials causing air pollutant emissions; the lignite shall not be burned in a clean and effective manner as required in the ordinary combustion systems. Therefore, development of combustion systems to provide combustion of this type of fuels in more appropriate methods to improve energy, administration and environmental economical aspects had been applied. The most suitable combustion methods for surpassing the combustion difficulties of low quality coals and decreasing the emission rates shall be the fluidized bed combustion systems. This type of combustion shall provide an alternate solution for effectiveness of energy usage and problem of environmental pollution. Thus, in order to provide effective and clean combustion of lignite it is required to provide a medium with heat storage, having turbulence and including structural means for prohibiting particularly SO₂, NO_x and dust emissions (1). Accordingly, the combustion system to provide all of the above-mentioned features shall be the method with circulation within the fluidized bed combustion system (3, 4). Also the addition of limestone shall be easier and controllable within this type of systems.

In this study, the constant operational conditions within the fluidized bed combustion system with circulation had been fixed and combusted with provision of Kütahya Tunçbilek Lignite product with variable mixture of various particle sizes of limestone. The most appropriate particle size variations, Ca/S ratio determined in accordance with the thermal performance and emission characteristics of limestone and upon combustion with coal as fixing the coal particle size the air pollutant emissions with flue gas and SO₂ retaining efficiencies had been examined and appropriate values had been determined.

2.THE SYSTEM OF EXPERIMENT AND PERFORMANCE OF THE EXPERIMENTS

The existing energy sources of Turkey require the development of appropriate combustion systems with regard to economical and environmental effect and modification of the existing systems to the contemporary conditions under the scope of technical and economical means. Realization of such a study shall be performed by establishment of research infrastructure in compliance with the relevant national and international standards. Therefore, in accordance with the combustion of lignite coal having highly pollutant characteristics in a more effective and clean manner, this study had been performed with fluidized bed combustion system with circulation existing and modified in Gazi University Faculty of Engineering and Architecture, Mechanical Engineering Department (Figure 1).

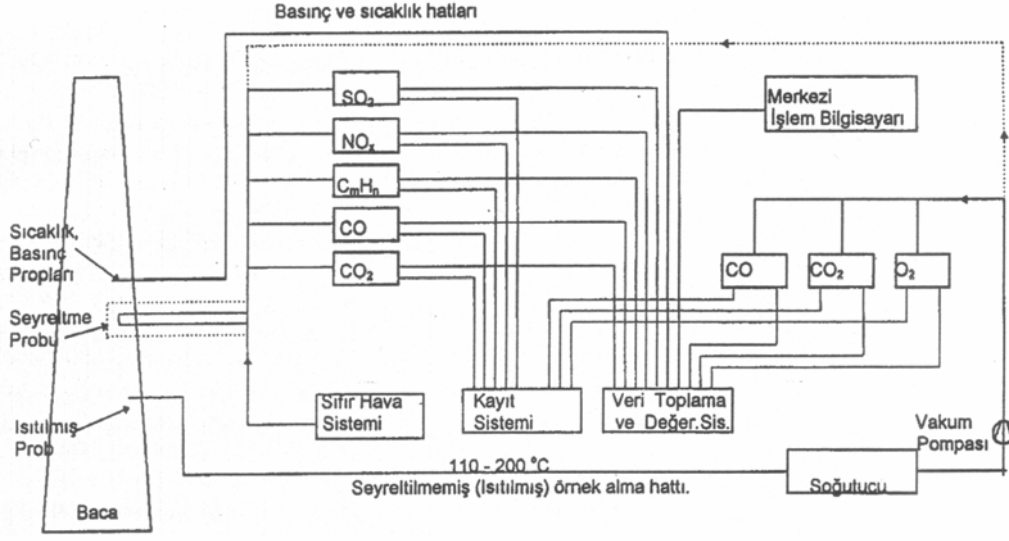


- 1) Fluidized body/Akışkanlaştırıcı gövde
- 2) Feeding system/Besleme sistemi
- 3) Cyclone/ Siklon
- 4) Back circulation system/ Geri sirkülasyon sistemi
- 5) Refining and distributing system/ Dağıtıcı elek sistemi
- 6) Electrical starting system/ Ateşleme elektrodları
- 7) Coal and limestone silos/ Kömür ve kireçtaşı siloları
- 8) Probes for sample gas taking/ Gaz örnek alma sondaları
- 9) Orificemeters/ Orifisetreler
- 10) Fan / Fan
- 11) Ash exhausting system/ Kül alma sistemi
- 12) Ash for star-valve/ Kül alıcı yıldız valf
- 13) The first feeding point/ Birinci besleme noktası
- 14) The second feeding point/ İkinci besleme noktası
- 15) Watching hole/ Gözetleme deliği

Figure 1. The circulating fluidized bed combustion system for laboratory
Şekil 1. Laboratuvar şartlarında dolaşimli akışkan yataklı yakma sistemi

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 sanayi tipi LPG tüpü kullanılmıştır. Yakıt ve kireçtaşının belli bir tane boyutuna getirilmesi için, çekiçli kaba kırıcı ile diskli öğütücünden faydalanılmıştır. Deney test merkezinde bulunan Mobil Emisyon Test Laboratuvarı'ndaki ölçüm sistem grubu şematik olarak Şekil 2'de verilmiştir.

The system constitutes of a fluidizing body and combustion chamber, feeding system, cyclone, back-circulation system, distribution sieve system, electrical ignition system, silos for fuel (lignite) and adsorbent (lime), fan, ash removal mechanism, observation holes (heat rated glass) and forced circulation system. In addition, industrial type LPG tube had been used for pre-heating and initial ignition process for fuel. Rough hammer crusher and grinders with discs had been used for crushing the fuel and limestone into a particle size. The measurement system group existing in the Mobile Emission Test Laboratory in the experiment test center had been schematically given in Figure 2.



- Temperature pressure probes / Sıcaklık basınç propları
- Infrequency probe / Seyreltme probu
- Heated probe / Isıtılmış prop
- Chimney / Baca
- Pressure and temperature lines / Basınç ve sıcaklık hatları
- Central processing computer / Merkezi işlem bilgisayarı
- Zero air-systems / Sıfır hava sistemi
- Recording system / Kayıt sistemi
- Data collection system / Veri toplama sistemi
- Cooler / Soğutucu
- Vacuum pump / Vakum pompası
- Heated sample obtaining line / Isıtılmış örnek alma hattı

Figure 2. Schematic view of system group of measurement and evaluation
Şekil 2. Ölçme ve veri değerlendirme sistem grubunun şematik görünümü

Bu ölçüm grubu; örnek gaz alma ve hazırlama sistemi, ölçüm aygıtları, sıfır hava sistemi, kayıt sistemi, basınç ve sıcaklık hatları, veri toplama ve değerlendirme sistemi, merkezi işlem bilgisayarı ve diğer yardımcı teçhizatın oluşmaktadır (5). Şekil 2'de görüldüğü gibi gaz emisyon ölçümlerinde seyreltilmiş ve seyreltilmemiş olarak iki örnekleme hattı kullanılmıştır. Gaz analizi yapılacak olan numune sürekli olarak aynı anda iki hat ile beraber alınabilmektedir. Örnekleme yapılan gaz konsantrasyonları gaz analiz sistemlerinin ölçme sınırlarının üzerinde olması durumunda seyreltilmiş hat ile gaz örneği aynı anda Mobil Emisyon Test Laboratuvarı'nda hazırlanan temiz hava ile seyreltilerek alınır. Seyreltme uygulanmayan örnek gaz alma işlemlerinde, örnekleme hattında yoğunlaşmanın önlenmesi için ısıtılmış hat kullanılmıştır. Elektrik ile ısıtılan örnek gaz alma hortumlarında, ısıtma sıcaklığı 170-200°C aralığında ayarlanabilmektedir. Gaz örneğinin içerisindeki nem bir yoğunlaştırıcıdan alındıktan sonra, kuru olarak gaz analiz cihazlarına beslenmektedir. Ayrıca yakıt ve kireçtaşı analizleri için bomba kalorimetresi, elemental analiz cihazı (Leco 610), sıcaklık ölçümleri için ısı çiftler, basınç ölçümlerinde manometreler, emisyon ölçerler, akış ölçümleri için gazometreler, digital anemometre, hassas terazi ve kurutma fırını gibi cihazlar da kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada, laboratuvar şartlarında bir dolaşım akışkan yatak yakma sisteminin hidrodinamik tasarım

This measurement group composes of sample gas collection and preparation system, measurement devices, zero air system, recording system, pressure and temperature lines, data collection and evaluation system, central processing computer and other auxiliary equipments (5).

As seen in Figure 2, two sampling lines as diluted and undiluted had been used for gas emission measurements. The sample on which the gas analysis process shall be performed is available for simultaneous collection from two lines in a continuous manner. In case the gas concentrations on which sampling had been performed are determined to be in excess values than the measurement limits of the gas analysis systems, the gas sample shall be simultaneously collected by diluted line upon dilution by clean air prepared in Mobile Emission Test Laboratory. For the undiluted sample gas collection processes, the heated line had been used in order to prevent condensation within the sampling line. The sample gas collection hoses heated electrically shall be adjustable for heating temperature values falling between 170-200°C. After the moisture content of the gas sample is removed within a condenser, the sample is fed to a gas analysis device in dry form. Additional devices such as bomb calorimeter, elemental analysis device (Leco 610) had been used for fuel and limestone analysis processes; thermal couples for temperature measurements; manometers, absorption

hesaplarına göre belirlenen ilgili temel parametreler (Çizelge 1) tespit edilerek, değişik kireçtaşı tane boyutlarına göre hazırlanan karışımın (kömür+kireçtaşı) emisyon etkileri incelenmiştir.

gauges for pressure measurements; gas meters, digital anemometer, precision balance and drying oven for flow meter.

In the performed study, relevant fundamental parameters (Table 1) determined according to the hydrodynamic design calculations of the fluidized bed combustion system with circulation under laboratory conditions had been designated and the emission effects of the mixture (coal+limestone) prepared according to various limestone particle sizes had been examined.

Table 1. Basic parameters and values (8)
Çizelge 1. Temel parametreler ve değerleri (8)

BASIC PARAMETERS/ TEMEL PARAMETRELER /	
Fuel type / Yakıt türü	Kütahya Tunçbilek Lignite/Kütahya Tunçbilek Linyiti
Bed material / Yatak malzemesi	Cilis sand + coal ash/Silis kumu + kömür küllü, $\bar{d}_p = 0.65$
Adsorbent material / Adsorbent madde	Göynük Limestone / Göynük kireçtaşı
Shape factor / Şekil faktörü	$\phi_s = 0.86$ (for sand) / (kum için)
Volume fraction of mininum bed cavity/Minumum yatak boşluğu hacim kesri	$\varepsilon_{mf} = 0.40$ (Teorik) / (Theoretical)
Average solid pile density/ Ortalama katı yığın yoğunluğu	$\rho_p = 1360$ (kg/m ³)
Bed prewarming/ Yatak ön ısıtma	LPG (45 kg)
Interior area of fluidized bed/ Akışkan yatak iç alanı	$A = 0.0123$ m ²
Runnig speed (normal conditions)/ İşletme hızı (normal şartlar)	$U_0 = 1.30$ m/s
Minumum fluidization speed/ Minumum akışkanlaşma hızı	$U_{mf} = 0.30$ m/s (Teorik) / (Theoretical)
Air density/ Hava yoğunluğu (25°C, 1 atm)	1.187 kg/m ³
Air density/ Hava yoğunluğu (850°C, 1 atm)	0.315 kg/m ³
Air viscosity/ Hava vizkositesi (25°C, 1 atm)	1.83×10^{-5} kg/m.s
Air viscosity/ Hava vizkositesi (850°C, 1 atm)	4.39×10^{-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 belirlendi. Aynı yöntemle belirlenen ortalama kömür tane boyutu 0,75 mm ve Ca/S = 1,5 oranı sabit tutularak deneyler yapıldı. Bu sabit değerler daha önce yapılan çalışmalarda en uygun değerler olarak belirlenmiş olup, bu çalışmada sabit olarak kullanılmıştır (6, 7). Bu deneylerde Ca/S = 1,5 oranına göre, her bir kireçtaşı tane boyutu ile kömür, homojen bir şekilde karışımı sağlanarak yakma sistemine beslendi.

Yatak malzemesi ortalama tane boyutu, elek analizi uygulanarak kümülatif yöntemle 0,65 mm olarak belirlendi.

Deneylerde kullanılan kömüre ait yaş temelde yapılan elementel analiz ve ısı değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

The limestone particle sizes had been determined to be 0.15; 0.30; 0.60; 0.90; 1.20 mm with cumulative method as a result of the sieve analysis by ASTM norm 8 inch sieves. The experiments had been performed with constant values of average coal particle size 0.75 mm determined upon application of the mentioned method and Ca/S = 1.5 ratio. These constant values had been determined to be the most appropriate values in previous studies and thus had been taken as constant for this study (6, 7). In the experiments, each limestone particle size and the coal had been homogenously mixed and fed into the combustion system according to the Ca/S = 1.5 ratio.

The bed material average particle size had been determined to be 0.65 mm with cumulative method upon application of sieve analysis.

The elemental analysis and thermal values performed on the wet foundation for the coal used in the experiments had been given in Table 2.

Table 2. Results of elementary analysis and thermal values related to used coal
Çizelge 2. Kullanılan kömüre ait elementel analiz sonuçları ve ısıl değerler

COAL/ KÖMÜR	TUNÇBİLEK LIGNITE/ TUNÇBİLEK LİNYİTİ
Fuel Components/ Yakıt Bileşenleri %	Moist State/ Yaş Temel
C (Carbon)/ (Karbon)	58.28
H (Hydrogen)/ (Hidrojen)	5.25
O (Oxygen)/ (Oksijen)	9.85
N (Nitrogen)/ (Azot)	2.50
S (Sulfur)/ (Kükürt)	1.92
A (Ash)/ (Kül)	14.45
W (Moisture)/ (Nem)	7.75
H _o (kcal/kg.Y)	5775
H _u (kcal/kg.Y)	5445
Ca (Calcium)/ (Kalsiyum)	1.18

Sisteme katılan kireçtaşı miktarı ve Ca/S oranı belirlenirken, kireçtaşının gözenekliliği, dönüşüm oranları ve kireçtaşı içindeki CaO'in ağırlıkça yüzdelere göre hesaplamalar yapıldı. Buna göre Göynük Yöresi kireçtaşının dönüşüm oranı maksimum olarak yaklaşık 0,15 mm tane boyutu için % 55 civarındadır (Çizelge 3). Fakat CaSO₄'ün CaO'in gözeneklerini tıkaması sonucu bu kireçtaşının en iyi şartlarda dönüşüm oranı ortalama % 40 gibi bir değere düşmektedir. Çizelge 3 incelendiğinde, kireçtaşı tane boyutunun artması ile ulaşılan maksimum dönüşüm oranları azalmaktadır. 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 Çizelge 4'de, ortalama gözenek yarıçapı ($\bar{\rho}$), bükümlülük faktörü (τ), gözenekliliği (ϵ) ve etkin difüzyon hızı (D_e) Çizelge 5'de verilmiştir (9). 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 alınarak; Kütahya Tunçbilek Linyitinin elementel analiz sonuçlarına göre, ilgili yanma hesapları (10) ve stokiyometrik bağıntılarla (11) elde edilen yanma verileri Çizelge 6'de verilmiştir.

In determination of the quantity of the limestone and the ratio of Ca/S added to the system, required calculations had been performed according to the porosity of the limestone, conversion rates and percentage by weight of CaO within the limestone. Accordingly, the conversion rate of the limestone from Göynük Region shall be approximately 55 % for maximum of average 0.15 mm particle size (Table 3). However, the conversion rate of this limestone falls down to an average value of 40 % under best applied conditions as a result of clogging of the pores of CaO by CaSO₄. When we examine Table 3, it is obvious to observe that the increase in the particle size of limestone shall decrease maximum conversion rates achieved. The average temperature at the conversion rates shall be T = 900°C. Also, the percentage by weight for CaO in the limestone obtained from this region shall be 53.1 %. The chemical analysis of the limestone from Göynük Region used in the experiments is given in Table 4, average pore radius ($\bar{\rho}$), tortuosity factor (τ), porosity (ϵ) and effective diffusivity value (D_e) had been given in Table 5 (9). Taking the value for combustion chamber empty column velocity of 1.3 m/s as a basis in which the overall air constitutes under normal conditions and 20-40 % excessive air conditions for unit kg fuel and according to the elemental analysis results of Kütahya Tunçbilek Lignite product, relevant combustion calculations (10) and the combustion data obtained by stoichiometric relations (11) are given in Table 6.

Table 3. Transformation ratios of the limestone according to various particle size (9)
Çizelge 3. Muhtelif tane boyutlarına göre kireçtaşının dönüşüm oranları (9)

\bar{d}_p / limestone kireçtaşı / (mm)	Göynük Limestone Transformation Ratio/ Göynük Kireçtaşı Dönüşüm Oranı (X _s) _{maks / max} (%)
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 / Calcination temperature T = 900°C, gaz akış hızı / gas flow rate = 12 L/h, %SO₂ = 0.35)

Table 4. Elementary analysis of Göynük Limestone**Çizelge 4.** Göynük Kireçtaşı'nın kimyasal analizi

LIMESTONE/ KİREÇTAŞI %	CaO	MgO	Re ₂ O ₃	SiO ₂
	53.1	1.1	0.2	2.2

Table 5. $\hat{\rho}_p$, τ , ϵ and D_e values Göynük Limestone**Çizelge 5.** Göynük Kireçtaşı'nın $\hat{\rho}_p$, τ , ϵ ve D_e değerleri

LIMESTONE / KİREÇTAŞI /	Values /Değerler
Average pore radius / Ortalama gözenek yarıçapı ($\hat{\rho}_p$), nm /	61.91
Tortuosity factor /Bükümlülük faktörü (τ)	2.67
Porosity/ Gözeneklilik (ϵ)	0.37
Effective diffusivity /Etkin difüzyon hızı (D_e), cm ² /s x 10 ² /	2.95

Table 6. Values of related to combustion and stoichiometric values**Çizelge 6.** İlgili yanma ve stokiyometrik değerler

Theoretical air necessity/ Teorik hava gereksinimi	$V_{Ht} = 6.32$ (Nm ³ Hava _{teorik} /kg-y)
Theoretical combustion gas/ Teorik yanma gazı	$V_{Gt} = 6.66$ (Nm ³ Gaz _{teorik} /kg-y)
Combustion gas quantity / Yanma gazı miktarı	$V_G = 7.92$ (Nm ³ Gaz/kg-y)
Theoretical oxygen necessity/ Gerekli teorik oksijen ihtiyacı	0.0653 (kg mol O ₂ /kg-y)
O ₂ quantity with air feeding/ Hava ile beslenen O ₂ miktarı	0.0066 (kg mol/dk)
Coal feeding rate/ Kömür besleme hızı	5.4 (kg-y/h) (Theoretical)/ (Teorik)
Thermal power produced/ Üretilen ısı güç /	40 (kW _t) (Theoretical)/ (Teorik)

Teorik olarak orjinal (nemli) kömür (yakıt) besleme hızı, 5,4 kg-y/h belirlenmiştir. Bu besleme hızına göre yakma sisteminin ısı gücü, üst ısı değere (H_0)'a göre 40 kW_t 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.

4. DENEY SONUÇLARI

Deney süresince (kararlı rejim durumunda) yanma parametreleri ve emisyon miktarları (cihazlardan doğrudan ölçülen) Çizelge 7'de gösterilmiştir.

Table 7. Measured emission values and combustion parameters according to particle size of limestone**Çizelge 7.** Kireçtaşı tane boyutuna göre yanma parametreleri ve ölçülen emisyon değerleri

$\bar{d}p_{kireçtaşı}$ $\bar{d}p_{limestone}$ (mm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO (%)	C _m H _n (ppm)	NO _x (ppm)	M _{up} (mg/Nm ³)
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

$$(\bar{d}p_{kömür/coal} = 0.75 \text{ mm}, \quad Ca/S = 1.50)$$

Theoretically, the original (wet) coal (fuel) feed velocity had been determined to be 5.4 kg-y/h. According to this feeding velocity, the thermal energy of the combustions system had been calculated as 40 kW_t for upper thermal value (H_0). This value obtained is the value demonstrating the maximum heat energy according to the full consumption of the coal within the combustion system under experimental conditions. The quantity of the limestone to be added to the coal had been determined as 1283.4 gr/h according to the Ca/S = 1.5 constant ratio with coal feed rate and stoichiometric relations. This quantity of limestone had been combusted within the combustion system upon provision of a homogenous mixture with coal.

4. RESULTS OF THE EXPERIMENT

The combustion parameters and emission amounts (measured directly from the devices) during the experiment (under stable regimes) had been given in Table 7.

Kireçtaşı tane boyutuna göre SO₂ tutma verimi ve emisyon gaz konsantrasyonları ile uçucu partikül miktarlarının değişimi yönetmelik şartlarında (% 7 O₂ esas alınarak) Çizelge 8, grafik olarak da Şekil 3 ve Şekil 4'de belirtilmiştir.

The SO₂ retention effectiveness according to the limestone particle size and the emission gas concentrations and the variation of volatile particle quantities had been shown in Table 8 under regulation conditions (taking 7 % O₂ as basis) and shown graphically in Figure 3 and Figure 4.

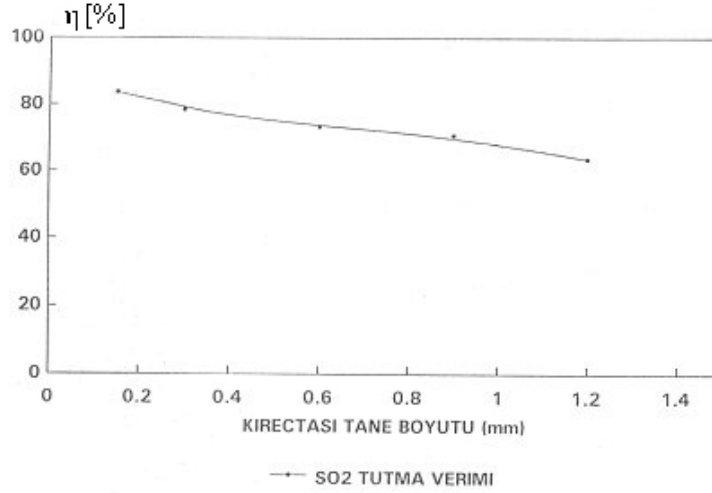
Table 8. Emission values for statutes conditions according to particle size of limestone
Çizelge 8. Kireçtaşı tane boyutuna göre yönetmelik şartları dahilinde emisyon değerleri

$\bar{d}p_{\text{limestone}}$ (mm)/ $\bar{d}p_{\text{kireçtaşı}}$	η_{SO_2} (%)	SO ₂ (mg/Nm ³) Statutes/Yönetmelik /	NO _x (mg/Nm ³) Statutes/Yönetmelik	CO (mg/Nm ³) Statutes/ Yönetmelik	C _m H _n (mg/Nm ³) Statutes/ Yönetmelik	M _{up} (mg/Nm ³) Statutes/ Yönetmelik
Original/ 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

$$(\bar{d}p_{\text{kömür/coal}} = 0.75 \text{ mm}, \quad \text{Ca/S} = 1.50)$$

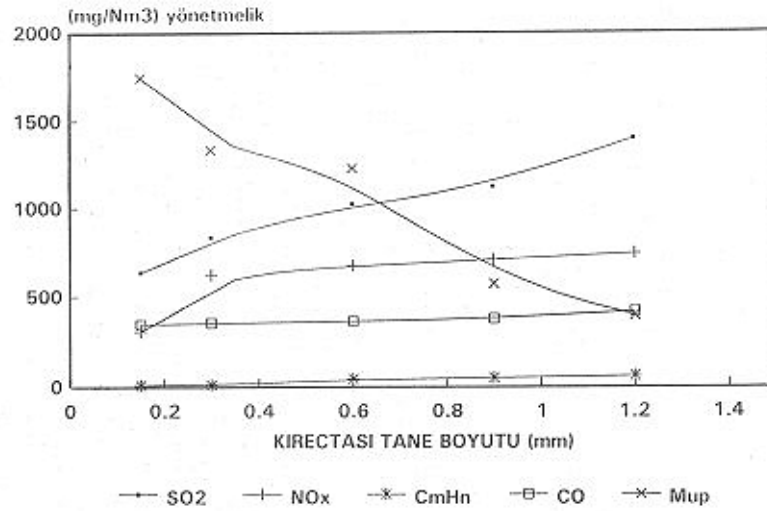
Çizelge 7'de görüldüğü gibi 0,15-1,20 mm kireçtaşı tane boyut aralığında yanma parametrelerinin (O₂, CO₂) değerleri ve bu değerlerin değişim grafiği ise Şekil 5'de belirtilmiştir.

As seen in Table 7, the values of the combustion parameters (O₂, CO₂) between 0.15-1.20 mm limestone particle sizes and the variation graphic of such values are given in Figure 5.



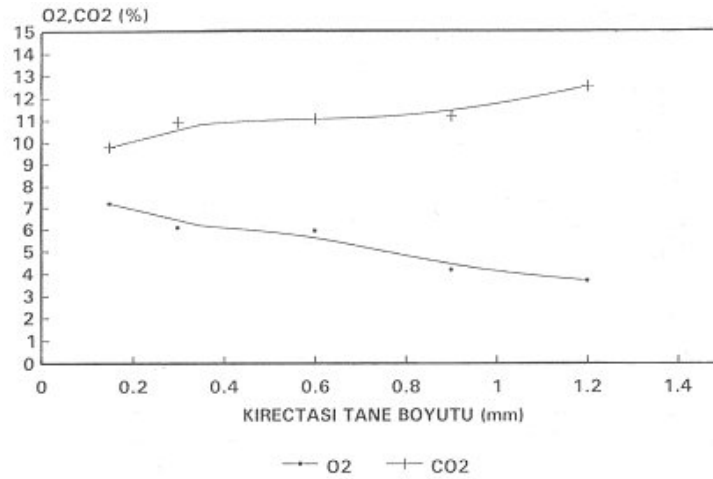
- Limestone particle size / Kireçtaşı tane boyutu
- SO₂ Retention efficiency / SO₂ tutma verimi

Figure 3. SO₂ retention change according to limestone particle size participating in system
Şekil 3. Sisteme katılan kireçtaşı tane boyutuna göre SO₂ tutulma değişimi



- Statutes / Yönetmelik
- Limestone particle size / Kireçtaşı tane boyutu

Figure 4. The system added limestone, the change of emission values for statutes conditions according to particle size of limestone
Şekil 4. Kireçtaşı ilaveli sistemde, kireçtaşı tane boyutuna göre yönetmelik şartları dahilinde emisyon değerlerinin değişimi



- Limestone particle size / Kireçtaşı tane boyutu

Figure 5. The change of combustion parameters according to limestone particle size participating in system
Şekil 5. Sisteme katılan kireçtaşı tane boyutuna göre yanma parametrelerinin değişimi

Kireçtaşının katıldığı yanma deneylerinde, sistem kararlı rejime geldiğinde akışkan yatak boyunca oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 6'da verilmiştir.

The distribution of temperature formed along the fluidized bed when the system reaches to a steady state in the combustion experiments where limestone is added had been given in Figure 6.

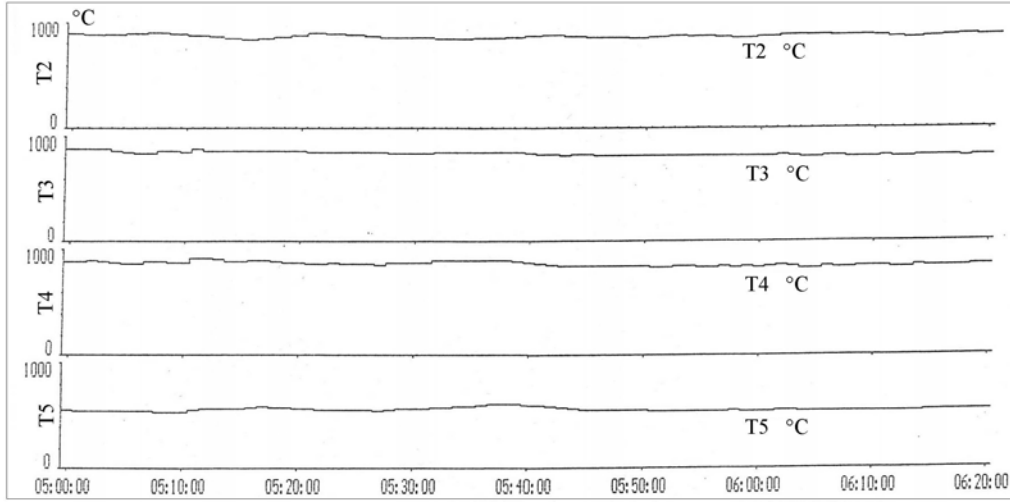


Figure 6. Temperature distribution of combustion system (T₂, T₃, T₄ bed body temperatures and T₅ cyclone temperature)
Şekil 6. Yakma sistemi sıcaklık dağılımları (T₂, T₃, T₄ yatak gövde sıcaklıkları ve T₅ siklon sıcaklığı)

Sıcaklık değerleri alınırken Ca/S = 1,5 oranı, ortalama kömür tane boyutu 0,75 mm ve kireçtaşı tane boyutu 0,15 mm sabit tutulmuştur. T₂ yatak alt gövde, T₃ yatak orta gövde, T₄ yatak üst gövde ve T₅ siklon sıcaklıklarını göstermektedir.

The Ca/S = 1.5 ratio, average coal particle size 0.75 mm and limestone particle size 0.15 mm had been taken as constant during taking the temperature values. T₂ indicates the temperature rating for lower body of the bed; T₃ indicates the temperature rating for intermediate body of the bed, T₄ indicates the temperature rating for upper body of the bed and T₅ indicates the temperature rating for cyclone.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Çizelge 8, Şekil 3 ve Şekil 4 incelendiğinde; SO₂ tutulması, kireçtaşı tane boyutu büyüdükçe azalmakta, emisyon gaz konsantrasyonları SO₂, NO_x, CO ve 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 artması). Bu durumdan dolayı SO₂ tutulmasının, Çizelge 8'de belirtilen orjinal (kireçtaşı katılmamış kömür) yakıt yakılması durumundaki değerine yaklaştığı belirlenmiştir. Kireçtaşının 0,15 mm ve daha küçük tane miktarlarında toz partiküllerinin belirgin artması, mevcut sistemdeki tek siklonun yanına ilave siklonların konulması veya sisteme elektro filtre takılmasını gerektirecektir.

Çizelge 7 ve Şekil 5 incelendiğinde; kireçtaşı tane boyutu büyüdükçe, yanma parametrelerini gösteren O₂ değerlerinde azalma CO₂'de ise artma belirlenmiştir. Bu durum, yanmanın sağlanabilmesi ve kalsinasyon için daha fazla O₂'e gereksinim olduğunu göstermektedir. CO₂'de artış ise yanmanın iyileştiğini göstermektedir. Daha iri tanelerde yapılan deneylerde ise kararlı rejimin bozulduğu görülmüştür. Rejimin bozulması durumunda, yanma performansı düşerek eksik yanma oluşmasıyla CO değerlerinde artma belirlenmiştir. Dolayısıyla kireçtaşının 0,60-1,20 mm tane aralığında uygun yanma parametreleri elde edilerek yanmanın daha düzenli ve sistemin ısı dengede kaldığı söylenebilir.

Şekil 6 incelendiğinde, yakma sisteminde sıcaklık

5. EVALUATION OF THE RESULTS AND DISCUSSION

When if examine Table 8, Figure 3 and Figure 4, as the limestone particle size increases, the SO₂ retention rate decreases, the emission gas concentrations SO₂, NO_x, CO and C_mH_n values increases and the volatile particle (M_{up}) quantities decreases. If the limestone particle size decreases excessively, it was observed that the cyclone was not able to perform the retention of the limestone particles (increasing of M_{up}). Therefore, it was observed that the SO₂ retention rate approaches to the value of combusting original (coal with no limestone addition) fuel as indicated in Table 8. The significant increase of the dust particles in 0.15 mm or lower sized limestone shall require introduction of additional cyclones to the system originally having single cyclone unit or installation of electro filters to the system.

When we examine Table 7 and Figure 5, as the limestone particle size increases, the combustion parameters indicating O₂ value decreases while CO₂ value increases. This fact represents that the system requires more amount of O₂ in order to provide combustion and calcinations. Increase in the amount of CO₂ represents that the combustion had been bettered. The experiments performed with larger sized particles shown that the steady state condition had been corrupted. In case of corruption within the regime, the combustion performance falls, thus leading to defective combustion of the fuel and increase in the CO value. Therefore, we could say that with the limestone particle sizes of 0.60-1.20 mm, it is

dağılımları (kararlı rejimin sağlandığı andan itibaren) incelendiğinde akışkan yatak içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımının olduğu ve yaklaşık 870-900 °C arasında bir değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum kül ergimesi ve NO_x değerlerinin fazla oluşmaması açısından önemlidir. Çünkü 1000 °C'den sonra NO_x'lerde ani artış görülür, 1200 °C'den sonra da kül ergimesinin meydana gelmesi dağıtıcı eleğin tıkanmasına yol açar. Siklonda ise yanıcı gazların ve dolaşımdaki partiküllerin meydana getirdiği sıcaklıklardan dolayı yaklaşık 550-600 °C sıcaklıklar oluşmuştur. Bu sıcaklıkların bacaya ulaşması, yanma veriminin düşmesine neden olur.

6. SONUÇ

Hava kirliliğinin ülkemizde oluşumunun başlıca nedenlerinden biri, düşük kalite linyitlerin mevcut yakma teknolojileri ve uygulamaları ile uygun biçimde yakılamamasıdır. Özellikle dolaşimli 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 SO₂ emisyonunun tutulabilmesi, bunun yanısıra yatak sıcaklığının düşük (750-850°C) ve kontrollü olabilmesi ile de NO_x emisyonlarının azaltılabilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca yakma sistemine ilave siklon takılmasıyla, bacadan dışarıya atılan toz emisyonları azaltılabilmektedir.

Kireçtaşı katkılı dolaşimli akışkan yataklı yakma sisteminin emisyon davranışını belirleyen başlıca emisyonlar SO₂, NO_x, 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 SO₂ tutulması belirlenmiştir.

Kireçtaşının 0,60-1,20 mm tane aralığındaki boyutlarında, uygun yanma parametreleri elde edilerek yanmanın daha düzenli ve sistemin ısıl dengede kaldığı gözlenmiştir. Kararlı rejim şartlarında ortalama yatak sıcaklığı, 885 °C olarak belirlenmiştir.

Laboratuvar şartlarında dolaşimli akışkan yataklı yakma sisteminde, kireçtaşı ilaveli ve bu kireçtaşının tane boyutlarına göre yapılan deneylerde elde edilen emisyon sonuçları, literatürde verilen sonuçlarla (9, 12) genelde paralellik göstermektedir. En önemli paralellik, kireçtaşı tane boyutunun artmasıyla, SO₂ tutulmasında azalmaya neden olmasıdır. Çünkü kireçtaşının tane boyutu, reaksiyon hızını ve dönüşüm oranını büyük ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla tane boyutunun artması kireçtaşının dönüşüm oranını önemli miktarlarda azaltmaktadır. Akışkan yatak sıcaklığının artması da

possible to obtain suitable combustion parameters more regular combustion process and that the system remains in thermal balance.

When we examine Figure 6, the distribution of temperature values within the combustion system (after the moment of achieving the steady state regime), we observe that a homogenous temperature distribution is obtained within the fluidized bed displaying a variation in between approximately 870-900°C. This fact is extremely important from the aspect of preventing ash fuse and formation of excessive NO_x value, as NO_x value increases instantaneously when the temperature value exceeds 1000°C and after 1200°C, the formation of ash fuse shall lead to clogging of distributive sieve. The cyclones had encountered approximately 550-600°C temperature rates as a result of the heat formed by circulating particles and combustible gasses. If such temperature ratings reach to the funnel, this shall lead to decrease in the efficiency of the system.

6. CONCLUSION

One of the major reasons of air pollution in our State is the combustion of low quality lignite coal inappropriately with existing combustion technologies and applications. Particularly the fluidized bed combustion system with circulation indicates itself as one of the most efficient systems for effective and clean combustion of this type of fuel. The system provides complete combustion of the fuel as a consequence of high level turbulence and prolonged retention period within the combustion chamber, retention of SO₂ emission by addition of adsorbent (limestone) to the coal as well as decreasing the NO_x emission by low (750-850°C) level of bed temperature and availability of control. Addition of extra cyclones to the combustion system shall also provide measures for decreasing the dust emissions exhausted from the funnel.

The principal emissions determining the emission attribute of the fluidized bed combustion system with circulation and limestone addition are the SO₂, NO_x, flue gas, combustible particles and dust emissions. In the experiments performed in order to determine the effect of the limestone particle size in between 0.15-1.20 mm, highest level of SO₂ retention had been determined in the experiments performed with the smallest particle dimensions (0.15-0.30 mm) of the limestone.

In between the 0.60-1.20 mm sizes of the limestone particles, suitable combustion parameters had been obtained and the combustion had been observed to be more regular and that the system is in thermal balance. The average bed temperature value under steady state regime conditions had been determined to be 885°C.

The emission results achieved from the experiments performed in the fluidized bed combustion system with circulation with limestone addition under laboratory conditions according to the particle sizes of limestone are generally in parallel with the results given in the literature (9, 12). The most important parallel fact is that as the size of the limestone particle increases, the rate of SO₂ retention decreases, because the particle size of the

reaksiyon hızını artırarak bu durumu oluşturmaktadır (9, 13).

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Rektörlüğü MMF 06/98-8 No'lu Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir.

limestone shall greatly affect the reaction speed and conversion rate. Therefore increasing the particle size shall significantly decrease the limestone conversion rate. Increasing of the fluidized bed temperature value shall also increase the reaction speed, thus leading the formation of this situation (9, 13).

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support of this study by the research fund of the Gazi University under Grant No. MMF 06/98-8 is gratefully acknowledged.

SEMBOLLER

CO	: Karbonmonoksit, (mg/Nm ³) _{yön}
CO ₂	: Karbondioksit, (%)
C _m H _n	: Hidrokarbonlar, (mg/Nm ³) _{yön} , (ppm)
Ca	: Kalsiyum, (%)
CaO	: Kalsiyumoksit, (%)
\bar{d}_p	: Ortalama partikül çapı, (mm)
H _o	: Yakıt üst ısıl değeri, (kcal/kg)
H _u	: Yakıt alt ısıl değeri, (kcal/kg)
LPG	: Likit petrol gazı
MgO	: Magnezyumoksit, (%)
M _{up}	: Uçucu partikül miktarı, (mg/Nm ³) _{yön}
NO _x	: Azotoksitler, (mg/Nm ³) _{yön} , (ppm)
O ₂	: Oksijen, (%)
Re ₂ O ₃	: Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ , (%)
SO ₂	: Kükürtdioksit, (mg/Nm ³) _{yön} , (ppm)
SiO ₂	: Silisyumdioksit, (%)
X _s	: Dönüşüm oranı, (%)
y	: Yakıt, (kg)
η	: Verim, (%)
η _{SO2}	

NOMENCLATURE

CO	: Carbon monoxide / Karbonmonoksit, (mg/Nm ³) _{yön}
CO ₂	: Carbon dioxide / Karbondioksit, (%)
C _m H _n	: Hydrocarbons / Hidrokarbonlar, (mg/Nm ³) _{yön} , (ppm)
Ca	: Calcium / Kalsiyum, (%)
CaO	: Calcium oxide / Kalsiyumoksit, (%)
\bar{d}_p	: Average particle diameter / Ortalama partikül çapı, (mm)
H _o	: Fuel high thermal value / Yakıt üst ısıl değeri, (kcal/kg)
H _u	: Fuel low thermal value / Yakıt alt ısıl değeri, (kcal/kg)
LPG	: Liquid petrol gas / Likit petrol gazı
MgO	: Magnesium oxide / Magnezyumoksit, (%)
M _{up}	: Volatile particle quantity / Uçucu partikül miktarı, (mg/Nm ³) _{yön}
NO _x	: Nitrogen oxides / Azotoksitler, (mg/Nm ³) _{yön} , (ppm)
O ₂	: Oxygen / Oksijen, (%)
Re ₂ O ₃	: Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ , (%)
SO ₂	: Sulfur dioxide / Kükürtdioksit, (mg/Nm ³) _{yön} , (ppm)
SiO ₂	: Silicium dioxide / Silisyumdioksit, (%)
X _s	: Transformation ratio / Dönüşüm oranı, (%)
y	: Fuel / Yakıt, (kg)
η	: Efficiency / Verim, (%)
η _{SO2}	: Sulfur dioxide retention efficiency / Kükürt dioksit tutulma verimi, (%)

KAYNAKLAR/ REFERENCES

1. Durmaz, A., "Yanmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü", Türkiye'nin enerji alt yapısı ve hava kirliliği, *Gazi Üniv., Müh. Mim. Fak., Makina Müh. Bölümü*, (Edit., Durmaz, A., Ercan, Y.) Ankara, 1-71 (1987).
2. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye Yerli Birincil Enerji Kaynakları Hedefleri", *ETKB, APKK Raporları*, Ankara, 3-9 (2000).
3. Plass, L. Bierbach, H. And Gummel, P., "Experience with Combustion in Circulating Fluidized Beds", *Lurgi GmbH Gervinusstrasse*, Frankfurt, 17-19 (1986).

4. Basu, P, Fraser, S.A., "Circulating fluidized bed boilers", Design and operations, **Butterworth-Heinemann**, USA, 4-16 (1991).
5. Başkaya, Ş., "Mobil Emisyon Test Laboratuvarı Kullanım Kılavuzu", **Gazi Üniv., Müh. Mim. Fak. Makina Müh. Bölümü**, (1989).
6. Atılğan, İ., "Yakıt Tane Boyutunun Yanma Verimi ve Emisyonlara Etkisinin Akışkan Yataklı İncelenmesi", **Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, Ankara, 11 (1):135-147 (1998).
7. Atılğan, İ., "Kireçtaşı İlaveli Dolaşimli Akışkan Yataklı Ca/S Oranının Yanma ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi", **Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, Ankara, 12(3): 593-605 (1999).
8. Howard, J.R., "Fluidized bed technology", Principles and applications, **Adam Hilger**, Bristol and New York, 8-32 (1989).
9. Ar, İ., "Kireçtaşı-SO₂ Reaksiyonunun Kinetiği Çalışmaları ve Baca Gazındaki SO₂'nin Tutulması Amacıyla Sobalara Uygulanması", Doktora Tezi, **Gazi Üniv., Fen Bil. Enst.**, Ankara, 154-158 (1992).
10. Türk Standartları Enstitüsü, "Kazanlar-Anma Isı Gücü ve Verim Deneyleri Esasları", **TS4041**, TSE, Ankara, (1983).
11. Smith, J. M., Van Ness, H. C., "Introduction to Chemical Eng. Thermodynamics", 3th. ed., **McGraw Hill**, Tokyo, 213-225 (1975).
12. Doğu, T. ve Togay, M., "Effect of Air to fuel Ratio on The Reaction of SO₂ and NO_x Emissions in a Fluidized Bed Combustor", **Technologie Des Lits Fluidises et disperse Applications Industrielles**, Compiègne, 1-5 (1979).
13. Doğu, T., "The importance of pore structure and diffusion in the kinetics of gas-solid non-catalytic reactions: Reaction of calcined limestone with SO₂", **Chem. Eng. J.**, 21:213-222 (1981).

Received/ Geliş Tarihi:07.07.2003 Accepted/Kabul Tarihi: 10.06.2004.