



Kömür-su karışımları teknolojisinde farklı yapıdaki Türk kömürlerinin yanma özellikleri

The combustion properties of different structural Turkish coals in coal-water slurries technology

Feridun BOYLU, Gündüz ATEŞOK, Mustafa ÖZER

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İSTANBUL

ÖZ

Bu çalışmada, kömürleşme derecesi birbirinden farklı olan üç farklı Türk kömüründen hazırlanmış karışımlar üzerinde yakma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kömür tane boyutu ve yanma oranı sabit tutularak gerçekleştirilen yakma deneyleri sonucunda, karışım hazırlama aşamasında etkili olan kömürleşme derecesinin, karışımların yakılması işleminde çok etkin olmadığı, kömürleşme derecesine bağlı olmaksızın, karışımların yüksek yanma verimleri ile yakılabileceği saptanmıştır. Gerçekleştirilen yakma deneyleri sonucunda, farklı kömürleşme derecesine sahip kömür-su karışımlarının yakılmasıyla % 96.5-99.0 gibi yüksek yanma verimlerine ulaşılmıştır. Isı kayıpları ise, kömürleşme derecesine bağlı olarak, % 5-22 arasında değişim göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Kömür, kömür-su karışımları, yakma.

ABSTRACT

In this study, combustion experiments were carried out by using different rank coals from Turkey. The experiments, performed at a constant coal particle size and combustion ratio suggested that the coalification degree, which is very important parameter in preparation of coal-water mixtures, is not effectual on the combustion of coal-water slurries. It is observed that the slurries can be combusted with high combustion efficiency independent on the degree of coalification. As a result of combustion tests, a combustion efficiency of 96.5 - 99.0% was achieved in the combustion of coal-water slurries prepared from different rank coals. On the other hand, heat losses during the combustion determined between 5 - 22% depending on the degree of coalification.

Key Words: Coal, coal-water slurries, combustion.

GİRİŞ

Kömür-su karışımları (KSK) ile ilgili ilk çalışmalar, yaklaşık yüz yıl önce, kömür-fuel oil karışımlarının endüstriyel bir yakıt olarak kullanılmasıyla başlamıştır. İlk temel araştırmalar, I. ve II. Dünya savaşları sırasında yapılmıştır. Akışkanlaştırıcı ortam olarak, başlangıçta, fuel-oil kullanılmıştır. Petrol tüketimine olan gereksinimi tamamen ortadan kaldırmak için yapılan çalışmalarda, KSK yakıtında akışkanlaştırıcı olarak su kullanımı gündeme gelmiş ve kömür-su karışımı, 1980 yılından sonra bu konu ile ilgili araştırmaların odak noktasını oluşturmuştur.

KSK'ların yakıt olarak değerlendirilmek istenmesinin iki temel nedeni vardır. Bunlar; (1) mevcut fuel oil yakma sistemlerinde yapılacak ufak değişikliklerle karışımların, ağır fuel oile benzer şekilde yakılabilmesi ve depolanabilmesi ve (2) KSK'ların boru ile taşınabilir olmasıdır.

Tipik bir KSK, %60-75 kömür, %24-30 su ve %1 katkılı maddelerinden oluşan bir karışımdır. Uygun bir karışım hazırlanması, çeşitli değişkenlerin birlikte dikkate alınmasını gerektiren karmaşık bir işlemdir. Uygun bir karışım tanımından,

en fazla kömür yüklenmesi yapılmış, en fazla ağır fuel-oilinkine eş değer bir viskoziteye sahip, belirli depolama ve işletme koşullarında sorun yaratmayan (kömür taneciklerinin çökmesi, viskozitedeki ani değişimler gibi) bir karışım anlaşılmaktadır (NEDO, 1997). Bir KSK için endüstride beklenen, ancak kesin olmayan hedefler; Brookfield viskozitesinin, 100 rpm'de 1000 cp ve çalkalanma olmaksızın, bir hafta sonunda alt kısımda oluşan sert birikimin KSK hacminin %5'inden daha az olmasıdır (Natoli vd., 1985; Ateşok vd., 2002a ve 2002b; Dinçer vd., 2002a ve 2002b; Boylu ve Ateşok, 1999 ve 2003; Boylu vd., 2001). KSK yakıtının yanma özelliklerinin belirlenmesi, yakma sistemlerinin tasarımı gerçekleştirilen üretici firmalara, yakıtın endüstriyel ölçekte yakılmasında daha başarılı sonuçların alınması için gerekli bilgileri sağlar.

Kömürün yanması, genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; kömür taneciğinin ısınması, uçucu madde çıkışı sonucu görünür alev ile yanması ve yarıkok yanmasıdır. KSK yakıtının yanmasında, bazı farklılıklar içermekle birlikte, genel olarak kömürün yanmasına benzer bir durum sergilemektedir. En önemli fark, KSK'ların sıvı yakıtlar gibi atomize edilerek yakılmasıdır. Konu ile ilgili olarak başta ABD, Kanada, İsveç, Japonya, İtalya ve Çin olmak üzere bir çok ülkede araştırmalar yapılmıştır ve halen de yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda kömür-su oranının, stokiometrik yakma oranının ve ikincil hava miktarının KSK'nın yakma özelliklerini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir (NEDO, 1997; McHale, 1985).

Özellikle, toplam yanma süresinin büyük bir bölümünü oluşturan yarıkok yanmasının kömürün türüne bağlı olduğu birçok araştırma tarafından saptanmıştır. Az sayıda linyit kömürü üzerinde gerçekleştirilen tek damla yanma deneylerinde, linyit-su karışımlarının toplam yanma süresinin, bitümlü kömür ile hazırlanan KSK'larının yanma süresinden daha uzun olduğu sonucuna varılmıştır. (Yavuz, 1996). Metthews ve Jones (1986), hem deneysel, hem de kuramsal olarak, orta kömürleşme derecesine sahip kömürle hazırlanan KSK'nın, düşük veya yüksek kömürleşme dereceli kömürlere göre daha hızlı yandığını göstermişlerdir. Sato vd. (1988), yanma veriminin kömür tanecik boyutunun küçülmesiyle yükseldiğini, ancak baca gazındaki NO_x yayınının arttığını saptamışlardır. %70-80'li 75 mik-

ronun altında ve ortalama tane boyutu 20-30 mikron civarında olan karışımların yanmada en yüksek verimi sağladığı diğer bir araştırmada saptanmıştır (McHale, 1985). Olen (1984), gerçekleştirdiği çalışmada, etkin bir yakma için KSK'nın bir ön ısıtma işlemine tabi tutulmasını önermektedir.

Yapılan bazı araştırmaların sonuçlarına göre; akışkan yatakta KSK'nın yakılmasında herhangi bir viskozite sınırlaması getirilmemekte ve KSK için en ideal yakma sistemi olarak akışkan yatak önerilmektedir (NEDO, 1997; Kefa vd., 1985). Karışımın tanecik boyutu, diğer sistemlere göre daha büyük olabilmektedir. Özellikle basınçlı akışkan yatakta, yakma esasına dayanan güç üretimi için en cazip yakıt KSK'dır. Ancak akışkan yatakta yakma ile ilgili en büyük sorunun besleme sistemi olduğu belirtilmektedir (Shang, 1984; Arena vd., 1985).

Akışkan yatak, yatağa sorbent ilave edilmesiyle SO₂ yayınının kontrolünde önemli bir üstünlüğe sahip olduğu diğer bir çalışmada belirlenmiştir. Gaz yayınımları konusunda gerçekleştirilen diğer çalışmalarda ise; akışkan yatakta KSK yakılması halinde, kömürün yakılmasındaki oranla NO_x yayınının azaldığı saptanmıştır (Mackay vd., 1985).

Şimdiye kadar KSK ile ilgili gerçekleştirilen yakma deneylerinde ve pilot ölçekli çalışmalarda genellikle düşük küllü (%5-10) kömürler kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında ise; yüksek kül içerikli Zonguldak bitümlü kömürü, Soma yaribitümlü kömürü ve İstanbul-Yeniköy linyit kömürü ile hazırlanan kömür-su karışımlarının (KSK), pilot ölçekli düşey yakmalı kömür yakıcısında yakma deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar mevcut veriler çerçevesinde yorumlanmıştır.

MALZEME VE YÖNTEM

Malzeme

Farklı yapıya sahip Türk kömürleri ile hazırlanan kömür-su karışımlarının yakma özelliklerinin incelendiği bu araştırma kapsamında; bitümlü, yarı bitümlü ve linyit kömürlerini temsil eden, sırasıyla; ZB (Zonguldak-Armutçuk), SYB (Soma) ve İstanbul-Yeniköy (İSL) kömürleri kullanılmıştır. Bu kömürler üzerinde yapılan standart ve elementel kömür analiz deneylerinden elde edi-

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan kömürlerin standart ve elementel analiz sonuçları.
Table 1. Proximate and ultimate analyses of the samples used in the study.

	Özellikler	ZB	SYB	İSL
Standart	Nem, (%)	1.20	18.42	35.50
	Kül, (%)	12.61	15.31	40.36
	Uçucu madde, (%)	30.33	42.37	43.60
	Sabit karbon, (%)	57.06	42.32	16.04
	Toplam kükürt, (%)	0.61	0.69	1.20
	Üst kalorifik değer, (Kcal/kg)	7086	4608	3677
	Yanar kükürt, (%)	0.40	0.42	0.73
Elementel	C, (%)	74.86	60.78	58.10
	N, (%)	1.08	1.09	0.87
	O, (%)	6.21	17.83	16.91
	H, (%)	4.63	4.30	4.80
	Porozite, (%)	9.70	11.8	18.30

ZB: Zonguldak-Armutçuk bitümlü kömürü

SYB: Soma yarı bitümlü kömürü

İSL: İstanbul linyit kömürü

len sonuçlar kuru baza göre Çizelge 1'de verilmiştir. Hazırlanan kömür-su karışımlarında dağıtıcı olarak ağırlık bazında %0.3 oranında sodyum polistiren sulfonat (PSS) ve stabilizör olarak da %0.01 miktarında karboksil metil selüloz (CMC) kullanılmıştır. Hazırlanan karışımların pH'ı 8.8 (doğal pH) olarak sabit tutulmuştur. Yakma deneylerinde kullanılan karışımların özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2'den görüleceği üzere; yakma deneylerinde kullanılan karışımların hazırlanmasında, karışımların içindeki kömür boyutu 24 mikron (d_{50}) olarak sabit tutulmuştur. Yakma deneylerinde, Şekil 1'de gösterilen ve yakma oranı 193000 kcal/saat olan düşey yakmalı kömür yakıcısı kullanılmıştır.

Yakıcı; 305 cm uzunluğunda ve 114 cm iç çapında olup, 7.62 cm kalınlığında Hydrocon 3000 tip, 1650 °C'ye kadar ısıya dayanıklı refrakter malzeme ile kaplanmıştır. Yakıcı aynı zamanda; 20 cm kalınlığında, hafif ve yüksek alümina içerebilir malzeme ile yalıtılarak, yakıcı içi sıcaklıkla-

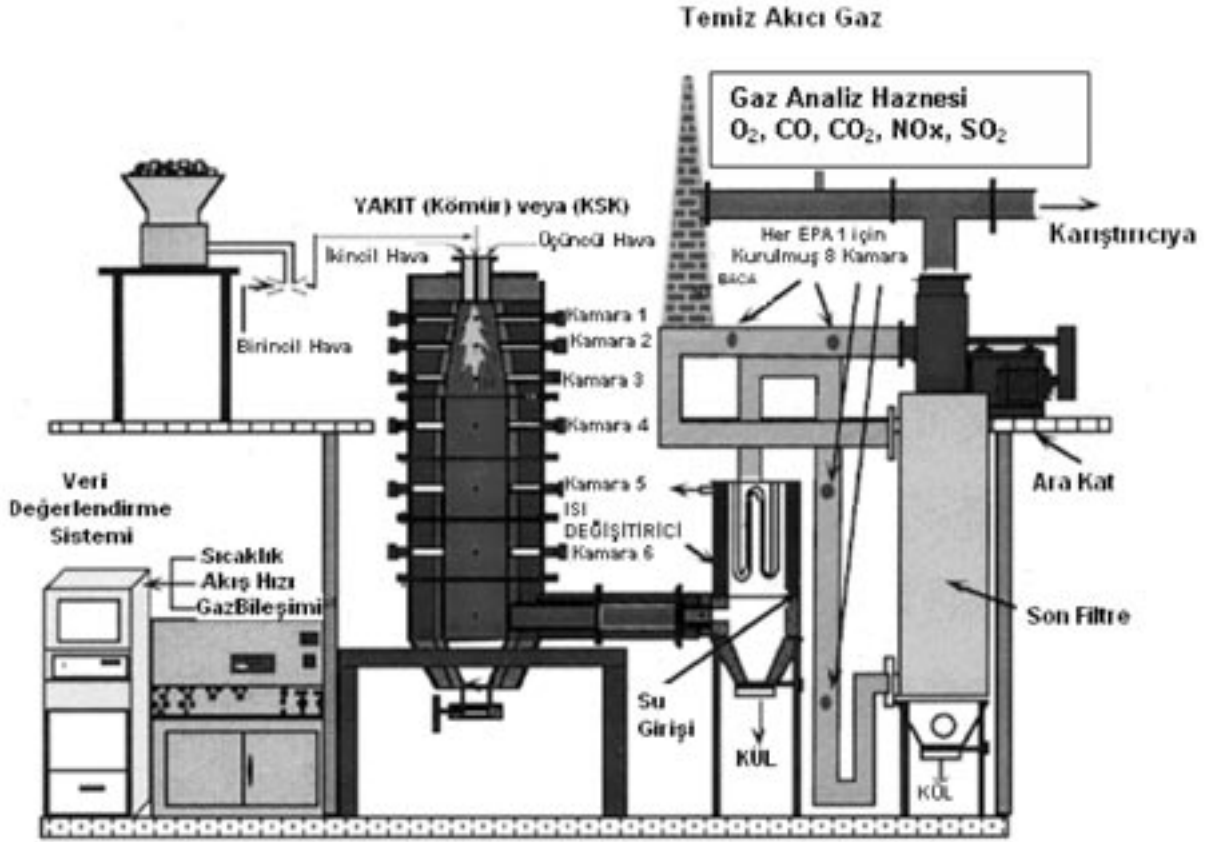
rın 1450-1500 °C'de tutulması sağlanmıştır. 1.56-2.27 m³/dakika arasında akıcı gaz üreten yakıcıda akıcı gaz, kullanılan ısı eşanjörleri ile 104 °C'ye kadar soğutulmuş son filtreye gönderilmektedir. Yakıcıyı terk eden akıcı gaz ve yanma sonrası elde edilen yanma ürünleri, MODEL BB-9-III marka pulse-jet tipi, 6 m²'lik filtre alanına sahip son filtre kullanılarak tutulmaktadır. Son filtrenin toz tutma kapasitesi % 99'dur. Yakıcı içerisindeki farklı kamaralardaki sıcaklıklar, yakıcının değişik bölgelerine yerleştirilmiş olan sıcaklık sensörleri ile belirlenmekte, yanma sonucu elde edilen akıcı gaz konsantrasyonları ise gaz kromatografileri ve bilgisayar vasıtasıyla online olarak gözlenmekte ve kaydedilmektedir.

Uygulanan Yöntemler

Yakma deneyleri, Şekil 1'de gösterilen düşey yakmalı kömür yakıcısı kullanılarak, üç farklı kömür için üç farklı atomize edici hava basıncında (2.11, 4.22 ve 6.33 kg/cm²) gerçekleştirilmiştir. Yakma deneylerinde karışımların yakıcıya besleme hızları, 193000 kcal/saat yakma miktarına

Çizelge 2. Yakma deneylerinde kullanılan karışımların özellikleri.
Table 2. Properties of each slurry used in the combustion experiments.

Örnek	Boyut (d_{50}) (mikron)	PKO (%)	Viskozite (mPa.s)	Besleme oranı (kg/dak)	Toplam kalorifik değer (kcal/saat)
ZB	23.95	64.2	560	0.3178	193000
SYB	24.12	56.4	250	0.5448	193000
İSL	24.29	40.2	110	1.1350	193000



Şekil 1. Düşey yakmalı kömür yakıcısı ve yardımcı ekipmanlar.
Figure 1. Down-fired coal combustor and other equipment.

karşılık gelecek şekilde ayarlanmıştır. Yakma işlemi öncesinde yakıcı 63000 kcal/saat yakma oranında, doğal gaz kullanılarak ısıtılmış ve yakıcı içi sıcaklık 1150 °C'ye ayarlanmıştır. Bu sıcaklıktan sonra doğalgaz beslemesi kesilerek KSK beslemesi yapılmıştır. Yakma işlemi boyunca, yanma işlemi kontrol altında tutulmuş, birincil ve ikincil yakma havası, yakıcı içerisindeki O₂ gaz konsantrasyonu % 4.5 (sabit) olacak şekilde ayarlanmıştır. Yakma deneyi sonuçları; akıcı gaz (O₂, CO, CO₂, SO₂ ve NO_x) emisyonları, yakıcı içi sıcaklıkları ve yanma etkinliği derecesi baz alınarak değerlendirilmiştir. Yanma süresi boyunca her 30 saniyede bir yukarıda belirtilen akıcı gaz emisyonları ve yakıcı içi sıcaklıkları ölçülerek kaydedilmiştir. Yakıcı içi sıcaklıklar, yanmanın etkin olduğu ve karışımların yakıcı içerisine ilk girdikleri bölge olan 2. kamara sıcaklıkları baz alınarak değerlendirilmiştir. Deneylerde atomizer 2. kamaraya yerleştirilmiştir. Yanma sonunda, son filtreden katı örnekleri alınarak kül analizi yapılmış ve yanma etkinliği aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$FB = \left[1 - \frac{A_C(100 - A_R)}{A_R(100 - A_C)} \right] \times 100 \quad (1)$$

Burada; FB yakıt yanma oranı (%), A_C kömürün orijinal kül içeriği (%) ve A_R yanma sonunda geride kalan katının kül içeriği yüzdesidir.

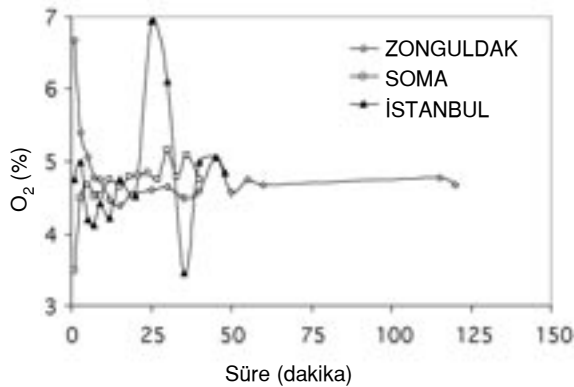
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yanma deneyleri ile ilgili deney koşulları, her üç kömür için toplu halde Çizelge 3'de verilmiştir. Farklı atomize edici hava basınçlarında (AEHB) gerçekleştirilen yanma deneyleri sonucunda, 6.33 kg/cm² değeri optimum AEHB değeri olarak belirlenmiştir. Şekil 2-6'da, deneysel çalışmalarda kullanılan kömürlerle hazırlanmış karışımların optimum AEHB'inde yakılması sonucunda elde edilen akıcı gaz emisyonları sırasıyla verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi, her üç kömür-su karışımının yanması sırasında ortamdaki oksijen içeriği % 4.5 civarında sabit tutul-

Çizelge 3. ZB, SYB ve İSL kömür-su karışımları ile gerçekleştirilen yanma deneyi koşulları.

Table 3. The conditions of combustion experiments carried out by using ZB, SYB and ISL coal-water slurries.

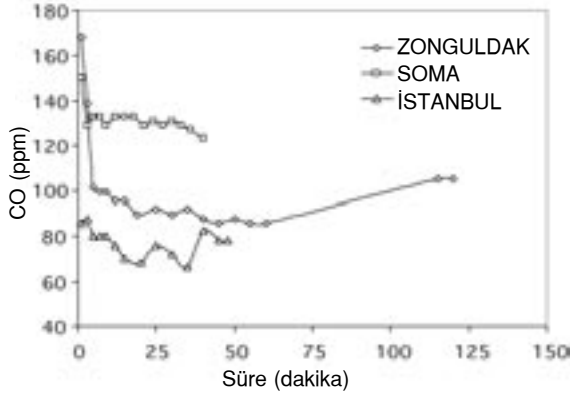
Özellikler (ZB)	2.11 kg/cm ²	4.22 kg/cm ²	6.33 kg/cm ²
Birincil hava miktarı	171 kg/saat	182 kg/saat	171 kg/saat
	0.47 kg/cm ²	0.57 kg/cm ²	0.57 kg/cm ²
İkincil hava miktarı	152 kg/saat	152 kg/saat	152 kg/saat
	0.35 kg/cm ²	3.5 kg/cm ²	0.34 kg/cm ²
AEHB (atomize edici hava basıncı)	304 kg/saat	400 kg/saat	437 kg/saat
	2.11 kg/cm ²	4.22 kg/cm ²	6.33 kg/cm ²
Karışım besleme hızı	0.3178 kg/dakika	0.3178 kg/dakika	0.3178 kg/dakika
Özellikler (SYB)	2.11 kg/cm ²	4.22 kg/cm ²	6.33 kg/cm ²
Birincil hava miktarı	137 kg/saat	145 kg/saat	152 kg/saat
	0.47 kg/cm ²	0.28 kg/cm ²	0.35 kg/cm ²
İkincil hava miktarı	152 kg/saat	152 kg/saat	152 kg/saat
	0.35 kg/cm ²	0.35 kg/cm ²	0.35 kg/cm ²
AEHB(atomize edici hava basıncı)	361 kg/saat	437kg/saat	494 kg/saat
	2.11 kg/cm ²	4.22 kg/cm ²	6.33 kg/cm ²
Karışım besleme hızı	0.5448 kg/dakika	0.5448 kg/dakika	0.5448 kg/dakika
Özellikler (İSL)	2.11 kg/cm ²	4.22 kg/cm ²	6.33 kg/cm ²
Birincil hava miktarı	266 kg/saat	266 kg/saat	285 kg/saat
	1.1 kg/cm ²	1.1 kg/cm ²	1.3 kg/cm ²
İkincil hava miktarı	137 kg/saat	137 kg/saat	137 kg/saat
	0.18 kg/cm ²	0.17 kg/cm ²	0.18 kg/cm ²
AEHB (atomize edici hava basıncı)	361 kg/saat	399 kg/saat	418 kg/saat
	2.11 kg/cm ²	4.22 kg/cm ²	6.33 kg/cm ²
Karışım besleme hızı	1.135 kg/dakika	1.135 kg/dakika	1.135 kg/dakika

Şekil 2. Üç farklı kömür-su karışımı için, yanma sırasında süreye bağlı olarak O₂ konsantrasyonunun değişimi (6.33 kg/cm² hava basıncında).Figure 2. O₂ concentrations in combustor during the combustion for each coal-water slurries (under air pressure of 6.33 kg/cm²).

muştur. Bu şekilde, üç kömürle hazırlanmış karışımların yakılması sonucu elde edilen gaz emisyonlarının karşılaştırmasının daha doğru olacağı düşünülmüştür.

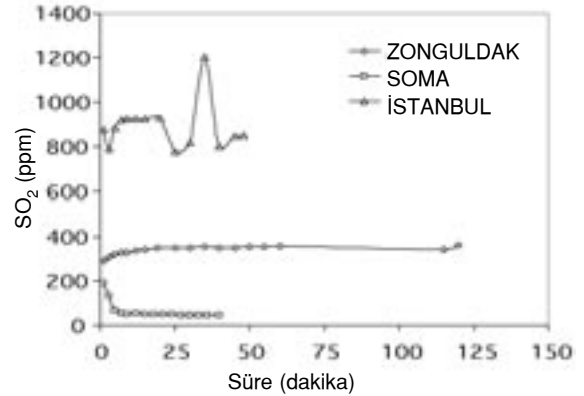
Şekil 3'te ise, yakma işlemleri sonucunda ulaşılan CO emisyonları verilmiş olup, aynı yakma oranı olan 88200 kcal/saat için elde edilen CO emisyonları kömürleşme derecesine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, üç farklı kömür-su karışımının yakılması sırasında elde edilen CO emisyonları 80-140 ppm arasında seyretmiş olup, bu değerler oldukça küçüktür ve her üç kömürün de yüksek yanma verimi ile yakıldıklarını göstermektedir. Sabit O₂ (% 4.5) ve CO₂ içeriğini (% 13.5) esas alarak değerlendirme yapılacak olursa, İstanbul ve Zonguldak kömürlerinin Soma kömürüne oranla daha etkin bir şekilde yakıldığı söylenebilir. Bununla birlikte, 80-140 ppm arasında bir karşılaştırma yapılması CO emisyonları çok küçük olduğundan çok doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Ancak, genel olarak, her kömür-su karışımının yakılmasında düşük CO emisyonlarının elde edildiği daha doğru bir ifade olacaktır.

Üç farklı kömür örneğinden hazırlanmış karışımların yakılmasından elde edilen SO₂ emisyonları Şekil 4'te verilmiş olup, bu kömür-su ka-



Şekil 3. Üç farklı kömür-su karışımı için, yanma sırasında süreye bağlı olarak CO konsantrasyonunun değişimi (6.33 kg/cm² hava basıncında).

Figure 3. CO concentrations in combustor during the combustion for each coal-water slurries (under air pressure of 6.33 kg/cm²).



Şekil 4. Üç farklı kömür-su karışımı için, yanma sırasında süreye bağlı olarak SO₂ konsantrasyonunun değişimi (6.33 kg/cm² hava basıncında).

Figure 4. SO₂ concentrations in combustor during the combustion for each coal-water slurries (under air pressure of 6.33 kg/cm²).

rışımlarının yakılmasıyla farklı SO₂ emisyonları elde edilmiştir. Ancak bu durum, karışımların hazırlanmasında kullanılan kömür örneklerinin

yapısından, ya da inorganik madde içeriğinden kaynaklanmaktadır. Çizelge 4'de verilen, örneklerle ait küllerde yapılan plazma emisyon spekt-

Çizelge 4. ZB, SYB ve İSL kömürlerine ait küllerde yapılan ICP analiz sonuçları.
Table 4. Results of the ICP analyses of ZB, SYB and ISL coal ashes.

ELEMENT	ZB	SYB	İSL
SiO ₂ (%)	41.75	19.64	27.86
Al ₂ O ₃ (%)	21.89	9.44	13.92
Fe ₂ O ₃ (%)	11.85	6.58	9.79
MgO (%)	3.17	2.73	2.62
CaO (%)	5.50	45.25	27.16
Na ₂ O (%)	1.75	0.83	1.87
K ₂ O (%)	2.33	0.56	1.00
TiO ₂ (%)	1.15	0.36	0.53
P ₂ O ₅ (%)	0.14	0.28	0.26
MnO (%)	0.12	0.07	0.10
Cr ₂ O ₃ (%)	0.043	0.032	0.043
Ba (ppm)	1005	1312	1156
Ni (ppm)	235	72	232
Sr (ppm)	643	664	981
Zr (ppm)	257	105	171
Y (ppm)	80	24	47
Nb (ppm)	<10	<10	<10
Sc (ppm)	32	11	20
Kızdırma kaybı (%)	9.9	2.6	5.9
Toplam karbon (%)	7.41	1.07	2.87
Toplam sulfur (%)	1.12	4.32	1.0
Baz/Asit oranı (B/A)	0.38	1.9	3.32
Curuf oluşturma faktörü	0.232	1.31	1.20
Tıkanma faktörü	0.665	1.577	1.87

$$B/A = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$$

$$\text{Curuf oluşturma faktörü } (R_c) = B/A * \text{Kömür kükürt içeriği, \% (kuru baza göre)}$$

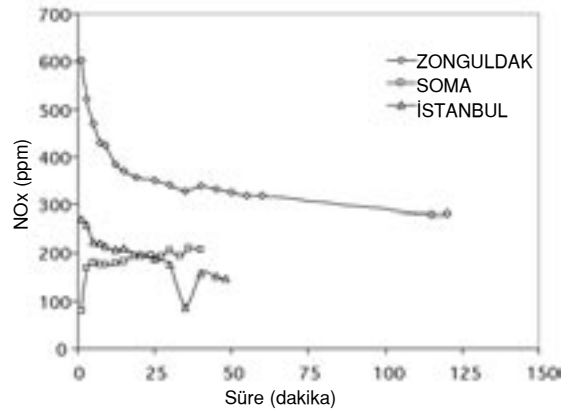
$$\text{Tıkanma faktörü } (R_t) = B/A * \text{Na}_2\text{O, \% (Kül içerisindeki)}$$

rometresi (ICP) analizleri sonucunda, kömürlerin yapısındaki inorganik madde içeriğinin, özellikle Ca içeriğinin farklılık gösterdiği görülmektedir.

Soma ve Zonguldak kömürlerinin toplam ve yazar kükürt içeriği birbirine yakın olmasına rağmen, Soma kömürü ile hazırlanmış karışımlarda daha düşük SO_2 emisyonlarına (40-80 ppm) ulaşılmıştır. Oysa, Zonguldak kömürü ile 300-350 ppm civarında SO_2 emisyonları elde edilmiştir. Bilindiği üzere, kömürlerin yapısında bulunan Ca yanma sırasında açığa çıkan SO_2 ile tepkimeye girerek gibsit dönüşümüne ve bu sayede açığa çıkan SO_2 emisyonlarının bir kısmını tutmaktadır.

Ancak, sağlıklı karşılaştırma yapabilmesi için Ca/S oranına göre değerlendirme yapılması gerekmektedir. Ca/S oranları; Zonguldak, Soma ve İstanbul kömürleri için sırasıyla 0.82, 3.42 ve 6.53 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, Soma kömürünün Zonguldak kömürüne oranla daha düşük SO_2 emisyonları vermesi, daha yüksek Ca/S oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, İstanbul kömürünün diğer kömürlere göre daha yüksek Ca/S oranına sahip olmasına karşın, daha yüksek SO_2 emisyonları vermesinin nedeni, kömürlerin yapısındaki kükürt oluşturan maddenin farklılığından kaynaklanabilmektedir. Örneğin; kömür yapısındaki kükürt oluşturan maddenin, inorganik veya organik kökenli, ya da pirit ya da markasit olması da SO_2 gazı emisyonlarını doğrudan etkileyebilmektedir. Ancak, genel olarak, Soma kömürünün inorganik madde yapısından dolayı, SO_2 emisyonlarının yaklaşık olarak % 85-90'ını tuttuğu söylenebilir.

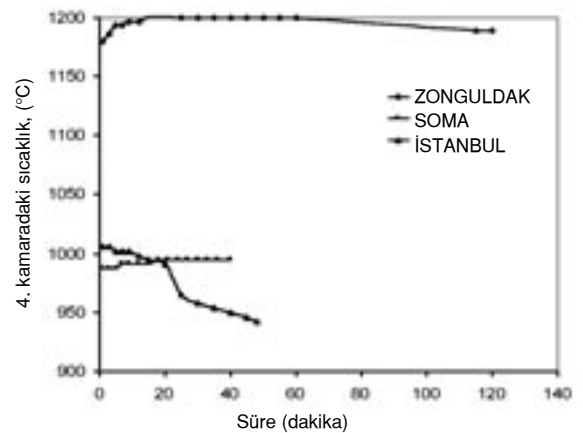
Üç farklı kömür-su karışımının yanması sonucunda ulaşılan NO_x emisyonları Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5'ten görüleceği üzere, bu karışımların yakılmasında, NO_x emisyonlarının EPA standardı (EPA, 1998) olan 500 ppm'in altında olduğu anlaşılmaktadır. Kömürleşme derecesine bağlı olarak, NO_x emisyonlarında gözlemlenen değişiklik tamamıyla kömürün yapısındaki N içeriğinden ve yanma ortamının sıcaklığından kaynaklanmaktadır. Zonguldak kömürü ile hazırlanan karışımların yakılmasında diğer karışımlara nazaran daha yüksek NO_x emisyonları elde edilmiştir (bkz. Şekil 5). Standart ve elementel kömür analizleri sonuçlarının verildiği Çi-



Şekil 5. Üç farklı kömür-su karışımı için, yanma sırasında süreye bağlı olarak NO_x konsantrasyonunun değişimi (6.33 kg/cm² hava basıncında).

Figure 5. NO_x concentrations in combustor during the combustion for each coal-water slurries (under air pressure of 6.33 kg/cm²).

zelge 1'den Zonguldak kömürünün yapısındaki N içeriğinin diğer iki kömürüne göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 6'da verilen ortam sıcaklıklarındaki değişimle Zonguldak kömürünün daha yüksek NO_x emisyonları vermesinin nedeni anlaşılmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, NO_x iki kaynaktan dolayı oluşmaktadır. Bunlar, kömürün yapısındaki N ve yanma ortamındaki havadan gelen N'dir (havadaki N oranı % 78). Ancak yanma ortamındaki oksijen içeriği % 4.5 olarak sa-



Şekil 6. Üç farklı kömür-su karışımı için, yanma sırasında süreye bağlı olarak ortam sıcaklık değişimi (6.33 kg/cm² hava basıncında).

Figure 6. Temperature variation during the combustion for each coal-water slurries (under air pressure of 6.33 kg/cm²).

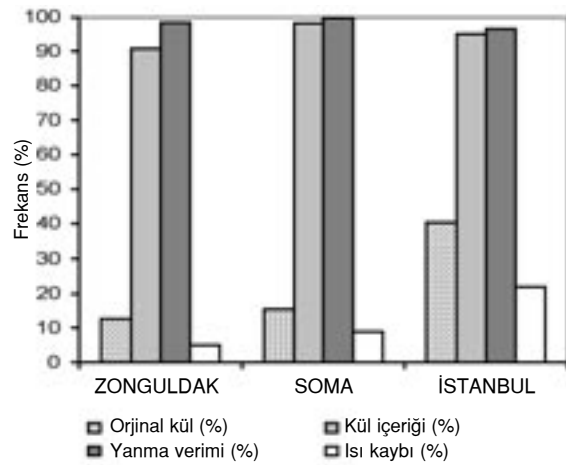
bitlendiğinden, NO_x farklılığı tamamen kömürlerin yapısındaki N içeriği farklılığından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, NO_x oluşumları genellikle 1000 °C'nin üzerindeki ortam sıcaklıklarında meydana gelmektedir. Zonguldak kömürü ile hazırlanmış karışımların yakılmasında ortam sıcaklığı, bu kömürün yüksek ısı değerinden dolayı 1200 °C civarında seyretmiştir (Şekil 6). Bu da, daha yüksek NO_x emisyonlarına neden olmuştur.

Kömür örneklerinin yanması sonucu elde edilen yanma etkinlikleri Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre; kömür- su karışımlarının yakılmasında % 96.5-% 99.0 aralığında değişen yüksek yanma verimlerine ulaşılmıştır. Ancak, İstanbul kömürüyle hazırlanmış karışımlardaki su oranının yüksek olmasından dolayı, ısı kayıpları diğer karışımlara nazaran çok daha yüksek olmaktadır. Su içeriğine bağlı olarak gerçekleşen ısı kayıpları Zonguldak, Soma ve İstanbul kömürleri ile hazırlanmış karışımlar için sırasıyla % 5, % 9 ve % 22 olarak saptanmıştır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir;

1. Zonguldak-Armutçuk, Soma ve İstanbul-Yeniköy kömürleri ile hazırlanmış karışımlar üzerinde gerçekleştirilen yakma deneyleri sonucunda, atomize edici hava basıncının



Şekil 7. Her üç kömür-su karışımı için, yanma sonucunda elde edilen yanma verimliliği histogramları.

Figure 7. Histograms for evaluation of combustion of each slurry.

(AEHB) gerek yanma verimleri, gerekse yanma sonucu açığa çıkan akıcı gaz içerisindeki CO, SO₂ ve NO_x emisyonları açısından önemli etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.

2. Yanma sırasında, karışımların su içeriklerine ve ısı değerlerine bağlı olarak ortam sıcaklığının değiştiği saptanmıştır. Sıcaklık değişimleri değerlendirildiğinde, Zonguldak-Armutçuk ve Soma kömürleri ile hazırlanmış karışımların su içerikleri ve ısı değerleri nedeniyle yanma sırasında, ortam sıcaklığını arttırdığı belirlenmiştir. İstanbul-Yeniköy kömürü ile hazırlanmış karışımların ise, % 60 su içeriğine ve 3677 Kcal/kg (kömür için) ısı değerine sahip olmaları nedeniyle, yanma sırasında, yanma ortamı sıcaklığını zamana bağlı olarak azalttığı anlaşılmıştır.
3. Zonguldak-Armutçuk, Soma ve İstanbul-Yeniköy kömür-su karışımlarının yakılması sonucunda, yanma verimleri her bir kömür-su karışımı için sırasıyla, %98-99, %99-99.8 ve %96.5-97.5 olarak saptanmıştır. Ancak, karışımların kömürleşme derecesine bağlı olmadan yüksek verimlerle yakılabilesine rağmen, yanma sırasında karışımların içerdikleri su oranına ve ısı değerlerine bağlı olarak elde edilen sıcaklığın bir kısmı suyun buharlaşması işlemi için kaybolmaktadır. Kömür-su karışımlarında su oranının % 30-60 arasında değiştiği dikkate alınır; su oranları değişimi için ısı kayıpları Zonguldak-Armutçuk, Soma ve İstanbul-Yeniköy kömürlerinden hazırlanmış karışımlar için sırasıyla, % 3-13, % 4-18 ve % 7-23 olarak saptanmıştır.
4. Kömür-su karışımlarının gerek hazırlanması, gerekse yakılması sırasındaki özellikler ve davranışlar, tamamen kömürleşme derecesine bağlı olarak değişmektedir. Ancak, kömürleşme derecesine bağlı olarak değişen ısı değer, boyut dağılımı, nem çekme özelliği, porozite, tane şekli gibi özelliklere rağmen, kömür-su karışımları, kömürleşme derecesine bağlı kalmadan yüksek yanma verimleri ile yakılabilmektedir. Bununla birlikte kömürleşme derecesi düşük olan kömürlerin yakılmasında oluşan ısı kayıpları nedeniyle düşen ortam sıcaklığını arttırmak için, yakıcıya doğalgaz, ya da fuel oil (düşük kükürt içeriği) ilavesiyle yardımcı yakma işlemi gerekmektedir.

Bu çalışmada, farklı kömürleşme derecesine sahip Türk kömürleri ile gerçekleştirilen karışım hazırlama ve yakma işlemleri sonucunda, bu

kömürlerin KSK teknolojisine uygun olduğu ve kullanılabilirliği saptanmıştır.

KAYNAKLAR

- Arena, U., De Michele, G., Maresca, A., Massimilla, L., and Miccio, M., 1985. Fluidized combustion of coal and coal-water slurry: A comprasion. Proceeding of International Conference on Fluidized Bed Combustion, VIII (2), 853-864.
- Ateşok, G., Boylu, F., Sirkeci, A. A., and Dinçer, H., 2002a. The effect of coal properties of coal water slurries. Fuel, 81, 1855-1858.
- Ateşok, G., Boylu, F., and Sirkeci, A. A., 2002b. Rheological behaviour of low rank turkish coal-water slurries. Proceedings of 9th International Mineral Processing Symposium, Kapodakya, 208-210.
- Boylu, F. ve Ateşok, G., 1999. Çevre dostu yeni bir enerji hammaddesi: Kömür-su karışımları. Türkiye'de Kömür Politikaları ve Temiz Kömür Teknolojileri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara, 154-161.
- Boylu, F., and Ateşok, G., 2003. The effect of pss (sodium polystyrene sulphonate) dispersing agent on grindability of coal-water slurries. Proceedings of 10th Balkan Mineral Processing Congress, Varna, 308-314.
- Boylu, F., Ateşok, G., Acarkan, N., and Koçak, E., 2001. Determining properties of some turkish lignites for the coal water slurry technology. Proceedings of the 9th Balkan Mineral Processing Congress, İstanbul, 395-400.
- Dinçer, H., Boylu, F., and Ateşok, G., 2002a. Stabilization of coal water slurries and its standartization. Proceedings of 19th International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, USA. ISBN 1-890977-19-5.
- Dinçer, H., Boylu, F., Sirkeci, A. A., and Ateşok, G., 2002b. The effect of chemicals on the viscosity and stability of coal-water slurries. International Journal of Mineral Processing, 70, 41-51.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1998. NO_x - How nitrogen oxides affect the way we live and breathe. US EPA Office of Air Quality Planning and Standards.
- Kefa, C., Guoquang, H., and Mingjiang, N., 1985. Pipeline conveyance and fluidized bed combustion of coal-water mixtures with high viscosity. Proceedings of 2nd European Conference on Coal liquid Mixtures, International Chemical Engineering Symposium., Series No 95, 87-99.
- Matthews, K.J., and Jones, A.R., 1986. The effect of coal composition on coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics. Proceedings of 8th International Symposium on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, Orlando, 1-20.
- McHale, E.T., 1985. Review of CWF combustion technology. Energy Progress, 5(1), 15-24.
- Mackay, G.D.M., Trivett, G.S., Field, R.S., Zayed, R.S., and Al Taweel, A.M., 1985. Combustion of coal-water mixtures in fluidised beds. Proceedings of 1985 International Conference on Coal Science, Sydney, 427-430.
- Natoli, J., Mahar, R. C., and Bobsein, B. R., 1985. Polyacrylate thickeners for coal-water slurries: slurry formation, stability and rheology. Proceedings of 2nd Europian Conference on Coal liquid Mixtures, International Chemical Engineering Symposium, Series No 95, 17-36.
- NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), 1997. CWM in Japan, International Cooperation Project for Coal Utilization Technology, 416 pp.
- Olen, K.R., 1984. Atomization and combustion of coal/water mixture fuels. The American Society of Mechanical Engineers, 1, 1-7.
- Shang, Y.J., 1984. An overview of Fluidized bed combustion boilers. Fluidized Bed Boilers: Design and Applications, Pergamon Press, New York, 350 pp.
- Sato, K., Shoji, K., Okiura, K., Akiyama, I., and Baba, A., 1988. Effect of coal particle and spray droplet sizes on combustion characteristics of coal-water mixtures. Powder Technology, 54, 127-135.
- Yavuz, R., 1996. Linyit-su karışımlarının incelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya ve Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul (yayımlanmamış).