

# KÖMÜR YAKMA SİSTEMLERİNDE SO<sub>2</sub> EMİSYON ETKİSİNİN YAKMA ŞARTLARINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Dr. Müh. M. Handan ÇUBUK - Prof. Dr. Hasan A. HEPERKAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fak. Makina Müh.Böl. Termodinamik ve  
Isı Tekniği A.B.D. 80750 Yıldız - İstanbul

## ÖZET

Bu çalışmada, SO<sub>2</sub> emisyonunun teorik olarak hesaplanması ele alınmıştır. Teorik hesaplamalarda kullanılan analiz değerleri ASTM standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Ancak, kullandığımız Orhaneli linyitinin akışkan yataklı yakma sisteminde yakılması ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar sırasında, yatak içindeki yanma sıcaklığının ortalama olarak 835°C olduğu ve ölçülen SO<sub>2</sub> emisyonunun teorik olarak hesaplanan değerler ile uyum sağlamadığı kaydedilmiştir. Buradan hareketle, kükürt oranlarının yanma şartları için değişebileceği düşünülerek, bu şartlarda kül ve külde kükürt tayinleri yinelenildiğinde, kül yüzdesi artarken, külde kükürt oranının azaldığı görülmüştür. Yeni analiz değerleri ile yapılan teorik hesaplamalar, deneysel sonuçlar ile uyum sağlamıştır. Aşağıda, yapılan teorik hesaplamalar ve deneysel bulgular ile ilgili ayrıntılı bilgiler ve grafikler verilmiştir.

## 1.GİRİŞ

Enerji kaynaklarını çevre üzerindeki etkilerinden bağımsız olarak ele almak mümkün değildir. Özellikle kömür ve linyit gibi fosil yakıtların yanması sonucu oluşan CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> emisyonları, atmosferik kirliliğin artmasında birinci derecede etkilidirler. Endüstriyel faaliyetler sonucunda, her yıl atmosfere yaklaşık 20 milyar ton CO<sub>2</sub>, 100 milyon ton kükürt bileşikleri, 2 milyon ton kurşun ve diğer zehirli kimyasal bileşikler salınmaktadır (Kadioğlu ve Telloğlu, 1996). CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub>

emisyonları doğru - dan doğruya tüketilen enerjinin miktarı ile orantılıyken, NO<sub>x</sub>, CO ve diğer uçucuların yarattığı emisyon seviyeleri ise kullanılan teknolojiye bağlıdır.

Bilindiği gibi, fosil yakıtların yanması sonucu oluşan emisyonların en zararlılarından biri de, SO<sub>2</sub> yayınıdır. Genel olarak yakıtın yapısındaki kükürt miktarı ile SO<sub>2</sub> yayını orantılıdır. Yakıtın bünyesindeki piritik ve organik kükürtlerin toplamı olarak adlandırılan kükürt miktarı, yakıtın yanması sonucu oluşan SO<sub>2</sub> yayınına doğrudan olarak etki eder. Fosil yakıtların yanması sonucu oluşan kükürt oksitlerinin miktarı, yakıtın yanma kükürt içeriği ile doğru orantılıdır. Fosil yakıtların yanması sonucu oluşan kükürt oksitlerinin miktarı, yakıtın yanma kükürt içeriği ile doğru orantılıdır. Fosil yakıtların yanması sonucu oluşan kükürt oksitlerinin miktarı, yakıtın yanma kükürt içeriği ile doğru orantılıdır.

### M. Handan ÇUBUK

14.12.1961 tarihinde İstanbul'da doğdu. Fransızca ve İngilizce biliyor. 1987 - 1998 YTÜ Fen Bilimleri Enst. Mak. Müh. Isı Proses, Doktora; 1985 - 1987 YÜ Fen Bilimleri Enst. Mak. Müh. Isı Proses, Y. Lisans; 1981 - 1985 YÜ Müh. Fak. Makina Mühendisliği Bölümünü; 1973 - 1981 Özel Notre Dame De Sion Fransız Kız Lisesini; 1968 - 1973 Ataköy İlkokulu'nu bitirdi. Halen Yıldız Teknik Üniversitesi Mak. Fak. Makine Müh. Böl. Termodinamik ve Isı Tekniği A.B.D.'de Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.

### Prof. Dr. Hasan HEPERKAN

1974'te İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi'nden mezun olan Hasan Heperkan 1976'da Syracuse University'den M.Sc., 1980'de University of California, Berkeley'den Ph. D. derecelerini aldı. 1980-1981 yılları arasında ABD'de Union Carbide Araştırma Laboratuvarlarında çalıştıktan sonra 1981-1984 yılları arasında Alexanide von Humboldt bursiyeri olarak Üniversite Karlsruher, Engier Bunte Institut'ta yanma üzerine araştırmalar yaptı. 1984'te Türkiye'ye dönerek TÜBİTAK-Marmara Araştırma Enstitüsünde, Bosch ve Demirdöküm firmalarında çalıştı. 1995 yılı başından beri Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Termodinamik Anabilim Dalı'nda öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.

kürt, SO<sub>2</sub>'yi oluşturur. Fosil yakıtların yakılması sonucu oluşan kükürt oksitlerinin miktarı, yakıtın yanma kükürt içeriği ile doğru oran-

yönde önlem alınması konusunda zorunlu - lukların getirilmesi AYY sistemlerine karşı ilginin artmasına neden olmuştur (Atakül vd,

tıdır.

Kükürt içeriği diğer fosil yakıtlara oranla genelde daha yüksek olan kömürün yakılması sonucu önemli ölçüde kükürt oksit yayınımlı olmaktadır. Yakıtlar yanarken, içerdikleri kükürlü bileşikler de yanar. Kükürdün yüksek sıcaklıklarda kararlı olan bileşiği SO<sub>2</sub>'dir; ancak az miktarda (~ %5 - 1) SO<sub>3</sub> de oluşur. Dolayısı ile çok az olan SO<sub>3</sub> ihmal edilebilir. Kükürt oksitler su ile birleşerek sülfürik asit oluştururlar. Sudaki çözünürlükleri yüksek olduğu için yağmur damlacıkları ile birleşerek asit yağmurları olarak yeryüzüne ulaşırlar. Kükürt oksitler kuru olarak da bitkiler, toprak ve diğer maddeler tarafından adsorplanmaktadır. İnsan sağlığı ve doğal denge açısından SO<sub>2</sub> yayınımlarının bir üst sınırı vardır. Bunun üzerindeki değerlere çıkıldığında toplu ölümlere varan durumlarla karşılaşılabilir. Bu sınırı ülkeler standartları getirilerek ortaya koymuşlardır. Ülkemizde de 2 Kasım 1986 tarihinde yayımlanan "Hava Kalitesi Kontrolü Yönetmeliği" ile yakma sistemlerine emisyon sınırlamaları getirilmiştir.

Türk linyitleri düşük kaliteli kömürlerdir ve özellikle, kükürt oranları oldukça yüksektir. Bu tip kömürlerden optimum şekilde yararlanmanın yolu akışkan yataklı yakma (AYY) sistemlerinin kullanılmasıdır (Vural, H., 1989). Bu sistemler, kimya ve metalurji endüstrisinde sağladıkları yüksek ısı ve kütle transferi nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yüksek kaliteli fosil yakıtların azlığı ve pa-halılığı ayrı- ayrı yanma gazlarının atmosfere bırakılma- dan önce hava kirliliğini azaltıcı

1993). AYY sistemlerinde, 850 °C civarında meydana gelen yanma sırasında NO<sub>x</sub> oluşumu çok az olmakta, yatağa kireçtaşı beslenerek, oluşan SO<sub>2</sub> tutulabilmektedir. Ancak, hidrokarbonlu fosil yakıtlarda yanmanın kaçınılmaz ürünü olan CO<sub>2</sub> oluşumu ve sera etkisi önlenememektedir.

Çalışmamızda da, AYY sisteminde Orhaneli linyitin yakılması sonucu oluşan SO<sub>2</sub> emisyonu ile ilgili teorik hesaplamalar ile deneysel bulguların karşılaştırılması yapılmıştır.

## 2. DENEY NUMUNESİNİN HAZIRLANMASI ve ANALİZLERİ

Deneylede kullanılan linyit, TEAŞ'a ait Bursa-Orhaneli Termik Santrali'nden alınmıştır. Söz konusu kömür çeneli kırıcıda kırıldıktan sonra <0.5; 0.5-1; 1-2; >2 mm elekalıklarında elenmiş ve naylon torbalarda saklanmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda, 1-2.36 mm aralığında elenen kömürde kararlı bir yanma sağlandığı saptanmıştır (Ağabay, 1987). Bu bilgi göz önünde tutularak, deneylerimizde 1-2 mm aralığında elenmiş olan kömürler kullanılmıştır.

Kurutularak 250 mm'nin altına düşürülen kömürün özelliklerini belirlemek amacıyla analizler, ASTM standartlarına uyularak, TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi, Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü (ESÇAE) Kömür Analiz Laboratuvarında yapılmıştır. Bu analiz değerleri Tablo 2.1'de

Tablo 2.1 Orhaneli Linyiti (1.00-2.00 mm arası) elementel analiz değerleri

	Elementel Analiz (%)						
	C	H	N	S	O	Kül	W
Kuru Baz	50,68	4,17	0,50	1,65	27,89	15,11	--
Orijinal Baz	39,37	3,24	0,39	1,28	21,67	11,73	22,32

% S<sub>kül</sub> = 4,72 (kuru baz) ; 3,67 (orijinal baz)      %S<sub>yanar</sub> = 0,7277  
Isıl değer = 3701,4 kcal/kg

verilmiştir.

Deneysel çalışmalar, TÜBİTAK-MAM ESÇAE Akışkan Yatak Laboratuvarında bulunan, sürekli kömür besleyerek yanmayı sağlayabilecek bir AYY düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Sistemde, yatak malzemesi olarak kullanılan kuartz kumu, 0.5-1 mm aralığında elenerek kullanılmıştır.

kullanılmıştır. Birim kg linyit için hesaplanan teorik değerler aşağıda Tablo 3.1.2'de verilmiştir (Çubuk, H., 1998).

### Tablo 3.1.2 Birim kg linyit için hesaplanan yanma ürünleri ve teorik özgül hava ihtiyacı

YANMA ÜRÜNÜ (Nm <sup>3</sup> /kg linyit)
--

### 3. TEORİK YANMA HESAPLARI

#### 3.1 YANMA HESAPLARI

Çalışmamızın temelini oluşturan SO<sub>2</sub> emisyonunun teorik olarak hesaplanması için kullanılan yanma reaksiyon denklemleri, Tablo 3.1.1'de verilmiştir. Bu bölümdeki bütün yanma hesapları bu denklemlere dayandırılmıştır. Söz konusu denklemler sadece reaksiyona hangi elemanların katıldığını göstermekle kalmaz aynı zamanda hangi moleküller oranlarda katıldıklarını da gösterir (Onat vd., 1988).

**Tablo 3.1.1 Yanma denklemleri**

YAKIT	Mol.Ağırlığı	REAKSİYON
Karbon	12	C+O <sub>2</sub> u CO <sub>2</sub> 1
Hidrojen	2	H <sub>2</sub> + — O <sub>2</sub> u H <sub>2</sub> O 2
Kükür	32	S+O <sub>2</sub> u SO <sub>2</sub>

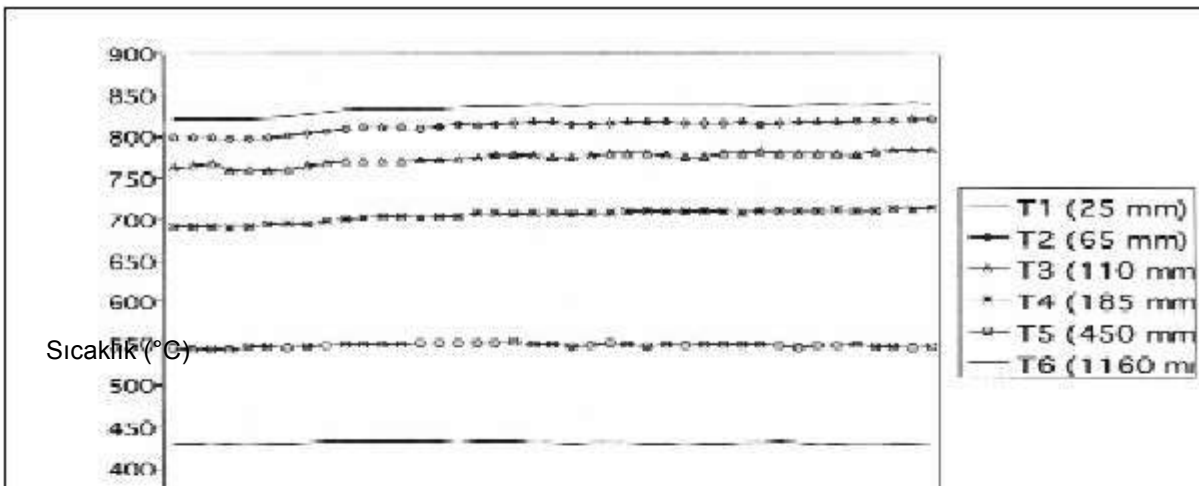
Yakıtlarda yanabilen elemanlar sadece karbon, hidrojen ve kükürt olduğundan, bu yakıtların yakılabilmeleri için gereken oksijen ve hava miktarları Tablo 3.1.1'de verilen yanma denklemleri yardımı ile bulunabilir. Burada hatırlanması gereken kabuller, yanma reaksiyonuna giren bütün gaz reaktant ve ürünlerin ideal gaz olduğu, 1 kmol gazın 22,4 Nm<sup>3</sup> hacim işgal ettiği ve havanın hacimsel olarak % 79 azot ve % 21 oksijenden oluştuğudur. Buna göre elementel analizi bilinen 1 kg yakıtın yanabilmesi için gerekli teorik hava miktarı ve yanma ürünleri miktarları hesaplanabilir. Yapılan yanma ürünü hesaplamalarında toplam kükürt yerine toplam kükürt içindeki yanar kükürt (%Syanar) miktarı

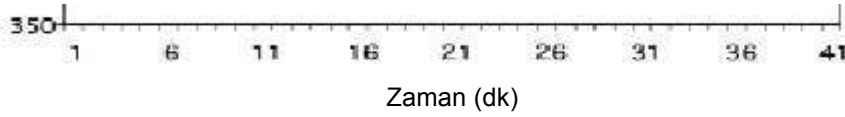
CO <sub>2</sub>	0,7349
SO <sub>2</sub>	0,0051
H <sub>2</sub> O	0,6406
N <sub>2</sub>	2,8994
Özgül baca gazı hacmi	4,2800
Teorik özgül hava ihtiyacı	3,666

Deneyler sırasında, AYY sisteminden alınacak güç 10.000 kcal/h olacak şekilde, Q= 2,7 kg/h debide linyit beslenerek yanma sağlanmıştır. Hava fazlalık katsayısı n=1,20 olmak üzere, sisteme 12 m<sup>3</sup>/h hava beslenmiştir. Bu havanın 11 m<sup>3</sup>/h'i akışkanlaştırma için, 1 m<sup>3</sup>/h'i kömür besleme hattında kullanılmıştır. Bu şartlar için SO<sub>2</sub> konsantrasyonu teorik olarak hesaplanmış ve 1019 ppm. bulunmuştur.

#### 3.2 DENEY ŞARTLARINDA TEORİK YANMA HESAPLARI

Yukarıda anlatılan hesaplamalarda kullanılan analiz değerleri, daha önce de bahsedildiği gibi ASTM standartlarına uyularak yapılmıştır. Bu standartlara göre kül analizi, kısa analiz cihazında 750 °C'da yapılmış olup, yanar kükürdün belirlenmesinde kullanılan küldeki kükürt miktarı da, 750 °C'da elde edilen külde belirlenmiştir. Ancak, kullandığımız Orhaneli linyitinin AYY sisteminde yakılması ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar sırasında, yatak içindeki yanma sıcaklığının ortalama olarak 835 °C olduğu ve ölçülen SO<sub>2</sub> emisyonunun teorik olarak hesaplanan değerler ile uyum sağlamadığı kaydedilmiştir. Yanma deneyi ile ilgili sıcaklık dağılımları aşağıda Şekil 3.2.1'de verilmiştir. Buradan hareketle, kükürt oranlarının yanma şartları





**Şekil 3.2.1 Yanma deneyinde elde edilen sıcaklık dağılımı**

**Tablo 3.2.1 Orhaneli Linyitinin (1.00-2.00 mm arası) ASTM yerine 835°C'daki elementel analiz değerleri**

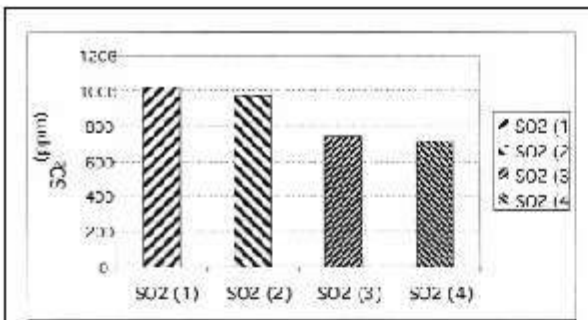
	Elementel Analiz (%)						
	C	H	N	S	O	Kül	W
Kuru Baz	50,68	4,17	0,50	1,65	20,43	22,57	--
Orijinal Baz	39,37	3,24	0,39	1,28	15,87	17,53	22,32

$\% S_{k\ddot{u}l} = 4,30$  (kuru baz) ;  $3,34$  (orijinal baz)       $\% S_{yanar} = 0,528$

için değişebileceği düşünülerek, bu şartlar da kül ve külden kükürt tayinleri yinlendiğinde, kül yüzdesi artarken, külden kükürt oranının azaldığı görülmüştür. Yeni analiz değerleri aşağıda Tablo 3.2.1'de verilmiştir. Bu değerler ile yapılan teorik hesaplamalar sonucunda SO<sub>2</sub> konsantrasyonu 743 ppm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, deneysel sonuçlar ile uyum sağladığı kaydedilmiştir.

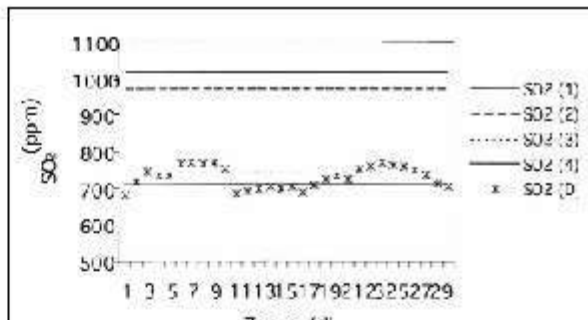
Bunun yanı sıra, yakma deneylerinden sonra yatak içi, alt siklon ve üst siklondan alınan kül numunelerinde kükürt tayini yapılmıştır. Daha sonra bu küllere, yine 835°C'da olmak şartıyla, kısa analiz cihazında kül analizi uygulanmış ve bu küllerde tekrar kü-

lürin kül yüzdesi %95 iken, yatak içinden alınan numunede %98 civarındadır. Buradan yola çıkarak, sisteme beslenen yakıtın yaklaşık %5'inin yanmadan sistemi terk ettiğini varsaymak mümkündür. Bu varsayma dayanarak, tüm teorik hesaplamalar, yakıtın %5'inin yanmadığı durum için bir kez daha tekrar edilmiş olup ASTM standartlarına göre 974 ppm, yanma şartlarına göre ise 710 ppm SO<sub>2</sub> konsantrasyonu elde edilmiştir. Yukarıda bahsedilen, linyit yanması sonucu oluşacak SO<sub>2</sub> konsantrasyonları ile ilgili hesaplanan teorik değerler Şekil 3.2.2'de verilmiştir. Bu grafik de belirtilen indisler:



**Şekil 3.2.2 SO<sub>2</sub> için hesaplanan teorik değerler**

- (1) : ASTM standartlarına göre ,
- (2) : ASTM standartlarına göre ve yakıtın %5'inin yanmadığı durum için,
- (3) : 835 °C'daki analiz değerlerine göre,
- (4) : 835 °C'daki analiz değerlerine göre ve yakıtın %5'inin yanmadığı durumda



**Şekil 4.1 Teorik ve deneysel SO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının (ppm) karşılaştırılması**

dukça önemlidirler. Ancak, bu çalışma sonucunda, yakma sistemlerinin tasarımına geçilmeden önce, yakıtların yanma şartlarında denenecek hesaplamaların tekrar edilmesinin gerekebileceği öngörülmektedir.

hesaplanan değerleri belirtmektedir.

**Tablo 3.2.2 Deney sonrasında yatak içi, alt siklon ve üstsiklondan alınan kül numunelerine uygulanan analiz sonuçları**

Numune	% kül	% S	% S <sub>kül</sub>
Alt siklon	95,26	1,74	1,42
Üst siklon	95,133	43	3,74
Yatak içi	98,320	26	0,121

#### 4. SONUÇ

Yukarıda anlatılan teorik hesaplamalar ile deneysel olarak ölçülen SO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının karşılaştırılması, aşağıda Şekil 4.1'de verilmiştir.

Bu şekilden de görüldüğü gibi, Orhaneli linyitinin AYY sisteminde yakılması sonucu ölçülen SO<sub>2</sub> emisyonları, ASTM standartlarına göre yapılan analiz değerleri ile hesaplanan konsantrasyonlardan oldukça düşüktür. Söz konusu deneysel emisyon değerleri, yanma sıcaklığı olan 835°C için tekrarlanan teorik hesaplamalar sonucu elde edilen SO<sub>2</sub> konsantrasyonları ile uyum içindedir.

Bilindiği gibi, standartlar yakıtların birbirleriyle karşılaştırılmaları ve yakma sistemleri ile ilgili bir ön bilgi edinebilme açısından ol -

#### KAYNAKLAR:

- Ağabay, M., (1987), "Tipik Türk Linyitlerinin Akışkan Yataklı Yakıcıda Yakılmasıyla Oluşan SO<sub>2</sub>'nin Tutulması", TÜBİTAK-MAM Proje raporu, Kasım 1997
- Atakül, H., Öner, G., Yardım, M.F.,(1993), "Fluidized Bed Combustion Research in Turkey", Energy Sources, pp:1-15
- Çubuk, M.H., (1998), "Orhaneli Linyiti - Biyokütle Karışımının Akışkan Yatakta Yakılmasında Çevre Kirliliğinin İncelenmesi", YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi
- Kadioğlu, S. ,Tellioğlu Z. , (1996), "Enerji kaynaklarının kullanımı ve çevreye etkileri", TMMOB Türkiye Enerji Sempozyumu, 12-14 Kasım 1996, Ankara
- Onat, K., Genceli O., Arısoy A., (1988), "Buhar Kazanlarının Isıl Hesaplamaları", Denklem Matbaası : 28-32
- Vural, H., (1989), "Akışkan Yatakta Yakma Teknolojisindeki Gelişmeler", II.Yanma Sempozyumu, İTÜ, İstanbul:33-42

**Not: Bu makale, 19-21 Temmuz 1999 tarihlerinde gerçekleştirilen "6.Uluslararası Yanma Sempozyumu"nda bildiri olarak sunulmuştur.**