

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖNER YANMA ODALI KÖMÜR YAKMA SİSTEMİ

77661

Cengiz ÖNER

77661

DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ
1998

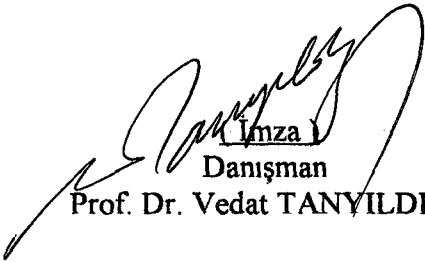
T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

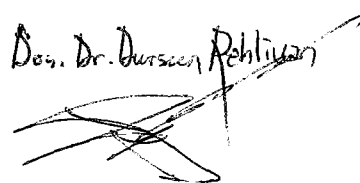
DÖNER YANMA ODALI KÖMÜR YAKMA SİSTEMİ

Cengiz ÖNER

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

Bu tez, Tarihinde, aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /
oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.


(İmza)
Danışman
Prof. Dr. Vedat TANYILDIZI

(İmza)
Doç. Dr. Dursun Rehtiyar


(İmza)

ÖZET

Doktora Tezi

DÖNER YANMA ODALI KÖMÜR YAKMA SİSTEMİ

Cengiz ÖNER

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

1997, Sayfa: 130

Türkiye’deki linyit yataklarının büyük bir bölümünün ısı değeri düşük, rutubet ve kül içeriği yüksek kömürlerden olmasının; özellikle ısınma amaçlı linyit tüketiminin düşmesine sebep olduğu belirtilmektedir. Bu rezervlerden en üst düzeyde yararlanmak için, yeni yakma tekniklerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada esas olarak, yüksek kabarma özellikli ve düşük kalorifik değerli kömürlerin daha verimli yakılabilmesi araştırılmıştır. Bu amaçla prototip olarak bir döner yanma odalı kömür yakma sistemi yapılmış ve bu sistemin performansı incelenmiştir.

Yüksek kabarma özellikli kömürler yakılırken kek oluşumu kömür yatağının çalkalanması veya karıştırılması ile önlenabilir. Bu yeni kömür yakma sisteminde kömür döner yanma odasında alt üst edilerek yanma esnasında kek oluşumu önlenmiştir.

Sunulan tezde Şırnak-Cizre ve Tunçbilek linyiti 4-9.5mm , 9.5-19 mm , ve 19-32 mm tane büyüklüklerine ayrılarak yakıldı. İşletme şartları olarak, döner yanma odasının devir sayısı, kömür debisi, hava fazlalık katsayısı ve hava dağıtım şekli değiştirildi. Ayrıca

sistemin kuyruk açısına bağılı olarak kömürün yakma başlığındaki kalma süresi, yatak hacmi ve derinliği değiştirilerek; yanma verimi, yakma başlığı içerisindeki sıcaklık dağılımı ve baca gazı emisyonları incelendi. Yapılan çalışmada yakılan kömürlerin tek tane yanma davranışı ile yeni yakma sisteminden elde edilen veriler birleştirilerek bir yanma modeli geliştirildi. Bu model için sistemin işletme şartlarını değerlendirerek yanma sonuçlarını hesaplayan bir bilgisayar programı yapıldı.

Tasarımı yapılan bu yeni kömür yakma sisteminde, düşük duman emisyonları şartları altında tutularak çalıştırmak kaydıyla, sistemin yukarıda açıklanan işletme şartlarının optimum olması durumunda yanma veriminin %82'nin üzerine çıkmasının başarılması mümkün olabilmektedir.

Kömürün içerdiği kül miktarının char yanması üzerinde etkili olduğu, daha aktif olması beklenen düşük karbonlu kömürlerin aktivitesi artan kül oranı ile azalarak char yanma süresinin arttığı, ancak; yanma odasının dönmemesinin külün yanma üzerindeki bu olumsuz etkisini azalttığı sonucuna varılmıştır.

NO_x , CO , CO_2 ve duman emisyonu seviyesinin işletme şartlarının optimizasyonu ile iyileştirilebileceği görülmüştür. Baca gazlarındaki ısılık derecesinin Ringelman ölçeğine göre sifıra kadar düşürülebileceği anlaşıldı. Son olarak hava dağıtımının gaz yanması üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu görüldü.

SUMMARY

PhD. Thesis

**COAL BURNING SYSTEM WITH
ROTATION COMBUSTION CHAMBER**

Cengiz ÖNER

Fırat University
Institute of Science and Technology
Mechanical Education Department

1997, Page: 130

It is reported lignite consumption for heating has decreased because of its low, calorific value high moisture and ash content in Turkey. It is necessary to develop new burning system to obtain a high efficiency from these reservoirs.

In this study an alternative way of burning the coals with a high swelling ratio and low calorific value were investigated. With this aim, the prototype of a coal burning system with a rotary combustion chamber was designed, manufactured and its performance was determined

The ash formation can be prevented by mixing or shaking the coal bed when burning the coals with a high swelling rate. In the study, the lignite from Şırnak-Cizre and Tunçbilek was sorted into the diameters of 4-9.5 mm, 9.5-19 mm and 19-32 mm and burnt in the combustor. The running conditions like rotation speed, coal rate, excess air coefficient and the form of air distribution of the rotary combustion chamber were changed. In addition the heat distribution inside the burning head, flue gas emissions

and burning efficiency were determined by changing. The passing time of the coal inside the burning head depending on the tail angle of the system and the volume and the depth of the bed. In the study a burning model was developed combining the burning behaviour of a single coal and the data prepared, which calculates the results of the burning considering the running conditions of the system.

In this coal burning system, the burning efficiency can rise up to 82 % provided running in the low fume emissions condition in case of optimum service condition.

From the results it was concluded that the ash content of the coal affected. Char burning, contrary to the expectations, the activity of the coals with lower C content decreased and the burning time increased. However, the rotation of the combustion chamber decreased this negative effect of the ash on burning.

It was understood that the emissions of NO_x , CO, CO_2 and fume amount could be improved by the optimization of the running conditions. It was concluded that the amount of soot in the emissions of chimney can be reduced to zero according to Ringleman scales. Finally it was seen that air distribution had a big effect on gas burning.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarında beni teşvik ederek gayretlendiren, çalışmalarında har zaman yardımlarını gördüğüm, bu çalışmayı yöneten mümtaz insan Sayın Hocam Prof. Dr. Vedat TANYILDIZI'na teşekkür etmeyi borç bilirim.

Doktora tez konusunun bulunmasından çalışma sonuçlanıncaya kadar her aşamada tecrübe ve değerli bilgilerinden yararlandığım, Sayın Doç. Dr. Dursun PEHLİVAN'a bu çalışmadaki büyük katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Ayrıca kömür analizlerinin yapılmasında özveri ile çalışan Neslihan DEVECİ'ye teşekkür ederim

Tez çalışmasının deneysel bölümüne maddi destek vererek araştırmaya önemli katkıda bulunan FÜNAF Müdürlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
Özet	III
Abstract	V
Teşekkür	VII
İçindekiler	VIII
Şekiller	XII
Resimler	XIII
Tablolar	XIV
Simgeler	XV
1. GİRİŞ	1
1.1. Kömür Potansiyeli ve Ekonomik değeri.....	1
1.2. Mevcut Çalışmaya Bakış	2
2. KÖMÜR YAKMA SİSTEMLERİ	5
2.1. Sabit Yatakta Yakma	5
2.1.1. Elle beslemeli ızgaralı ocaklar	5
2.1.2. Mekanik stokerler	6
2.1.2.1. Alttan beslemeli stokerler	6
2.1.2.2. Üstten beslemeli koklaştırma Stokerleri	8
2.1.2.3. Serpme (savurmalı) stokerler	9
2.1.2.4. Zincirli veya gezer ızgaralı ocaklar	10
2.2. Pülverize Kömür Yakma Sistemleri	11
2.3. Akışkan Yatakta Yakma	12

3. KÖMÜR YANMASI	13
3.1. Sunuş	13
3.2. Yanma Kinetiği	13
3.3. Kömür Parçacıklarının Yanma Modeli	15
3.3.1. Uçucu madde çıkışı	15
3.3.2. Uçucu madde yanması	17
3.3.3. Artık kömürün yanması	18
3.4. Yanma Çalışmaları	19
3.4.1. Karbon yanması	19
3.4.2. Char taneciğinin yanması	20
3.4.2.1. Difüzyon kontrol ($k_0 \ll k_1$)	23
3.4.2.2. Kimyasal kontrollü yanma ($k_1 \ll k_0$)	24
3.4.3. Çok parça yanması	25
3.4.3.1. Difüzyon kontrol	26
3.4.3.2. Kimyasal kontrol	27
3.5. Yataklarında Yanma	27
3.5.1. Teorik çalışmalar	27
3.5.2. Deneysel çalışmalar	29
3.6. Havanın Dağıtılması	30
3.6.1. Primer hava	30
3.6.2. Sekonder yada alev üstü havanın dağıtılması	30
3.6.3. Aşırı Hava	31
3.7. Kirlenme Seviyesi	31
3.7.1. Duman seviyesi	31
3.7.2. Azot oksitler	32
3.7.3. CO oluşumu	33
3.7.4. SO_x oluşumu	34

3.8. Kabaran Kömürler Yakılırken Çalkalamanın Etkileri	34
3.9. Kömürün Yanması Üzerine Kabarmasının Etkisi	35
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	36
4.1. Deney Sisteminin Tanıtılması	36
4.1.1. Döner yanma odası	37
4.1.2. Helezon taşıyıcı	39
4.1.3. Hava dağıtım başlığı	40
4.2. Ölçümler ve Kontrol Teknikleri	42
4.2.1. Hava miktarı ve dağıtımı	42
4.2.1.1. Hava debisi ölçme ve kontrolü	43
4.2.1.2. Hava dağıtımı ve kontrolü	44
4.2.2. Sıcaklık ölçümleri	45
4.2.3. Küldeki yanabilir madde miktarının bulunması	46
4.2.4. Baca gazı emisyonları ve yanma veriminin ölçülmesi	46
4.3. Deneyin Yapılışı	47
4.3.1. Soğuk deneyler	47
4.3.1.1. Kömür Akışı	48
4.3.1.1.1. Kömürün başlıkta kalma süresinin ölçümü	48
4.3.1.1.2. Kömür debisi ve yatak hacminin ölçümü	49
4.3.1.2. Kalma zamanı sonuçları	49
4.3.1.3. Yatak hacmi, yüzey alanı ve başlıktaki kömür miktarı	51
4.1.3.4. Yatak hacminin teorik olarak hesaplanması	53
4.3.2. Sıcak deneyler	54
4.3.2.1. Ön deneyler	54
4.2.2.2. Ön deneylerden sonra yakma sisteminde yapılan değişiklikler	55
4.3.2.3. Deney düzeneğinin sıcak deneylere hazırlanması	55

4.3.2.4. Deney sonuçları ve yorum	58
4.3.2.5. Fazla havanın etkisi	58
4.3.2.6. Kömür debisinin etkisi	62
4.3.2.7. Döner başlıklı yakma sistemi eğiminin etkisi	66
4.5.3.8. Başlık dönme hızının etkisi	68
4.5.3.9. Kömür tane büyüklüğünün etkisi	69
4.5.3.10. Ön flanş ilavesi ve hava dağıtım başlığı tipinin etkisi	71
4.5.3.11. Farklı kömür tiplerinin yakılması	75
5. YANMA MODELİ	79
5.1. Bölge Seçimi	79
5.1.1. Gaz çıkış bölgesi	80
5.1.2. Char tüketim (yanma) bölgesi	81
5.2. Model Sınırlılıkları	81
5.2.1. Hesap yöntemi	81
Yanma süresinin hesaplanması (akış şaması)	82
6. SONUÇLAR	86
KAYNAKLAR	89
EKLER	98
Ek 1. Hava Debisinin Ölçülmesi	98
Ek 2. Tablolar	100
Ek 3. Döner Başlık Kömür Yatağı Hacminin ve Kalma Süresinin Hesabı	103

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Dünya enerji üretiminde kullanılan kaynakların değişim oranları	1
Şekil 1.2. Türkiye'deki kömür tüketiminin alanlara göre dağılımı	3
Şekil 2.1. Alttan beslemeli stokerde bunkerden kömürün akışı	7
Şekil 2.2. Alttan beslemeli stokerin alından kesit görünüşü	7
Şekil 2.3. Üstten beslemeli fırlatıcı tip koklaştırma stokeri	8
Şekil 2.4. Serpme (savurmalı) sabit ızgaralı stoker	9
Şekil 2.5. Zincir veya gezer ızgaralı ocak	10
Şekil 2.6. Gezer ızgaralı ve fırlatmalı tip ocak	11
Şekil 4.1. Döner yanma odalı kömür yakma sisteminin şematik görünüşü	38
Şekil 4.2. Eğimli konumda kömür yatağının görünüşü	39
Şekil 4.3. Başlık çıkışında hava hızı dağılımı	45
Şekil 4.4. Yakma sistemi eğiminin kamarada kalma süresi üzerinde etkisi	50
Şekil 4.5. Kömürün debisinin, kamarada kalma süresine etkisi	50
Şekil 4.6. Başlıktaki kömür miktarının eğim ile değişimi	52
Şekil 4.7. Kömür debisi ile kamaradaki kömür hacmi arasındaki ilişki	52
Şekil 4.8. Yatak hacmi ve kalma süresinin hesaplanması	53
Şekil 4.9. Gaz konsantrasyonlarının HFK ile değişimi	60
Şekil 4.10. Sıcaklık dağılımı ve verimim HFK ile değişimi	60
Şekil 4.11. Gaz konsantrasyonlarının kömür debisi ile değişimi	64
Şekil 4.12. Verim ve sıcaklıkların kömür debisi ile değişimi	64
Şekil 4.13. Gaz konsantrasyonlarının kömür debisi ve HFK ile değişimi	66
Şekil 4.14. Verimin sistem eğimi ile değişimi	67
Şekil 4.15. Başlık devir sayısının verim üzerindeki etkisi	69
Şekil 4.16. Verimin kömür tane büyüklüğü ile değişimi	70
Şekil 4.17. Sıcaklığın tane büyüklüğü ile değişimi	70
Şekil 4.18. Flanş ilavesi ve hava başlığı tipinin yakma başlığı bölgelerindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi	74
Şekil 4.19. Yanma veriminin ve küldeki yanabilme C %'sinin flanş ilavesi ve hava dağıtım başlığı tipi ile değişimi	74

Şekil 4.18.	Flanş ilavesi ve hava başlığı tipinin yakma başlığı bölgelerindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi	74
Şekil 4.19.	Yanma veriminin ve küldeki yanabilme C %'sinin lanş ilavesi ve hava dağıtım başlığı tipi ile değişimi	74
Şekil 4.20.	Şırnak-Cizre ve Tunçbilek kömürlerinin yanma verimlerinin HFK ile değişimi	76
Şekil 4.21.A.	Şırnak -Cizre ve Tunçbilek kömürlerinin gaz konsantrasyonlarının HFK ile değişimi (A)	77
Şekil 4.21.B.	Şırnak -Cizre ve Tunçbilek kömürlerinin yanmasında gaz konsantrasyonlarının HFK ile değişimi (B)	77
Şekil 5.1.	Yanma modeli	79

RESİMLER LİSTESİ

Resim 4.1.	Deney seti ve ölçüm cihazlarının görünüşü	42
Resim 4 2.	Baca gazı emisyonları ve verim ölçüm cihazı	47
Resim 4.3.	Yakma başlığına kömür ve tahta parçalarının yerleştirilmesi	56
Resim 4.4	Tutuşma ve yanma	56
Resim 4.5.	Kararlı yanma durumunda yatağın görünüşü	57
Resim 4.6.	Yatakta akkor halindeki kömürün görünüşü	57
Resim 4.7.	Yanma sonunda kömür yatağının görünüşü	58
Resim 4.8.	Dönme sırasında başlık içerisinde kömür yatağının görünüşü	73

TABLOLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1. Hava dağıtım başlığı deliklerinden çıkan havanın, deliklerdeki hız dağılımı	44
Tablo 4.2. 4-9.5 mm kömür büyüklüğü ve 0.934 kg/dm ³ yığın yoğunluklu Şırnak-Cizre linyitlerinin döner yakma başlıklı sistemdeki soğuk deneme sonuçları için	48
Tablo 4.3. Yakma deneyinde kullanılan linyitlerin analizleri	54
Tablo 4.4. Şırnak-Cizre linyitlerinin yanmasında farklı HFK'nda elde edilen yanma verileri	59
Tablo 4.5. Şırnak-Cizre linyitlerinin yanmasında farklı kömür debilerinde elde edilen yanma verilerinin değerleri	63
Tablo 4.6. Şırnak-Cizre linyitlerinin yanmasında farklı HFK ve farklı kömür debileri için yanma verileri	65
Tablo 4.7. Şırnak-Cizre linyitlerinin yanmasında farklı eğimler için elde edilen yanma verilerinin değerleri	66
Tablo 4.8. Şırnak-Cizre linyitlerinin yanmasında başlık devir sayısında elde edilen yanma verilerinin değerleri	68
Tablo 4.9. Farklı ortalama tane büyüklüğündeki Şırnak-Cizre linyitlerinin yanmasında elde edilen yanma verilerinin değerleri	69
Tablo 4.10. Şırnak-Cizre linyitlerinin yanmasında flanş ilavesi ve farklı hava dağıtım başlığı ile elde edilen yanma verilerinin değerleri	73
Tablo 4.11. Şırnak-Cizre ve Tunçbilek linyitlerinin yanmasında elde edilen yanma verilerinin değerleri	76

SİMGELER LİSTESİ

F_d	: Difüzyon kontrollü yanma için çok parça faktörü katsayısı
F_c	: Kimyasal kontrolü yanma için çok parça faktörü katsayısı
C	: Karbon
G	: Aadsorblanan gaz kompenenti
x	: Oksijen
G'	: Olusan gazlı ürünler
$C(x)$	: Oksijen ile birlikte taşınan karbon
S_T	: Aktif adsorbsiyon bölgesi
S/S_T	: Oksijenle kaplı yüzey kesri
k_1	: Adsorbsiyon hız sabiti
r_A	: Adsorbsiyon hızı
r_D	: Desorbsiyon hızı ise;
R_s	: Termal reaksiyon hızı
P_3	: Yanma ürünlerinin kısmi basıncı
k_3	: Yanma ürünlerinin adsorbsiyon hız sabiti
r_{PA}	: Yanama ürünlerinin adsorbsiyon hızı
r_A+r_P	: Toplam adsorbsiyon hızı
W	: Kürenin son ağırlığı
W_o	: Kürenin ilk ağırlığı
d_o	: Kürenin ilk çapı
K_p	: Bir sabit bir sayı
t_v	: Buharlaşma yayılma veya uçucu madde yanma zamanı
K_v	: Erime hız sabiti
k	: Regrasyon analizi katsayısı
n	: Regrasyon analizi katsayısı
A,B,C	: Regrasyon analizine göre sabit sayılar
C	: Konsantrasyon (gmol/cm^3)
t	: Zaman (s)
R	: Gaz sabiti (1.986 cal/mol K)
T	: Sıcaklık (K)

k	: Reaksiyon hızı sabiti ($-3 \times 10^{10} \text{ (cm}^3/\text{gmol)}^{0.8}/\text{s}$)
E	: Aktivasyon enerjisi (16 000 cal/gmol)
R_{MT}	: Kütle transport limiti
D^1	: Oksijenin T_1 referans sıcaklığındaki moleküler difüzyon katsayısıdır
Sh	: Sherwood sayısı
P	: Oksijenin kısmi basıncı
G_o	: Yanma oranı
r_o	: Yakıt parçacıklarının başlangıç yarıçapları
T_{ox}	: Oksidant transport özellikleri
$m_{ox,o}$	: Parçacık yüzeylerinde oksidant madde miktarı
s	: Oksidant ve yakıtın stoikiyometrik oranı
K_p	: Bir sabit
T_o	: İlk parçacık sıcaklığı
t_b	: Char yanma süresi
ρ_{ap}	: Char parçacığının görünür yoğunluğunun hacmi
V_s	: Sitokiyometrik katsayı
M_p	: Yakıtın moleküler ağırlığı
C_{og}	: Gaz fazında oksitleyicinin molar konsantrasyonu
D_{om}	: Oksitleyicinin difüzyon katsayısı
T_b	: Karbon parçacığının kimyasal kontrollü olarak yanma süresi
K_c	: Kinetik teoriden bulunan bir katsayıdır
M_o	: Gaz karışımının ortalama molekül ağırlığı
ρ	: Partükül yoğunluğu,
K_d	: Difüzyon kontrollü yanma sabiti
ρ_p	: Partükül yoğunluğu,
ρ_o	: Hava yoğunluğu
D_o	: Difüzyon katsayısı
P_o	: Oksijenin kısmi basıncı
T_o	: Hava sıcaklığı
T	: Yatak sıcaklığı

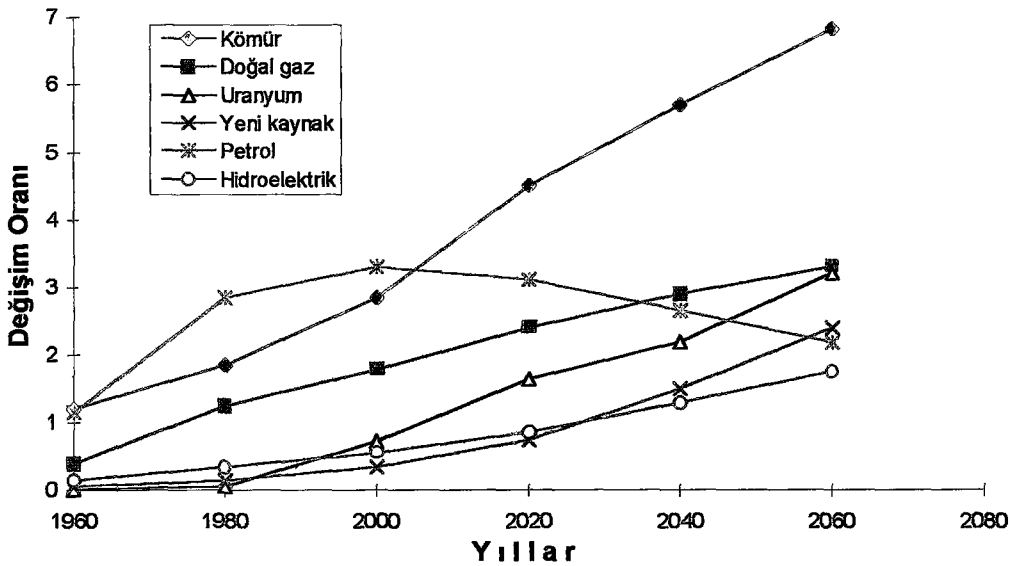
1. GİRİŞ

1.1. Kömür Potansiyeli ve Ekonomik Değeri

İstatistiksel veriler, dünya fosil kaynaklar jeolojik rezervinin 13 300 milyar ton (taşkömürü eşdeğeri) civarında olduğunu göstermektedir. Bunun içerisinde kömür % 82'lik oranla en büyük paya sahiptir. Rezerv büyüklüğü yanında kömür yatakları dünya yüzünde daha homojen bir dağılım göstermektedir (Kural,1991).

Dünya elektrik enerjisi üretiminde, kömüre dayalı üretimin 1960 yılı sonrasında hızla arttığı gözlenmektedir. Gelecek yüzyılın ortalarında elektrik enerjisi üretiminde kömür kullanımının, diğer kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi toplamına yaklaşacağı beklenmektedir. Şekil 1.1'de dünya enerji üretiminde kullanılan kaynakların değişim oranları görülmektedir (Yeger,1990).

Bu beklentiler kömürün daha iyi yakılmasıyla ilgili çalışmalara hız vermiştir. Kömür kalitesini artırma, emisyon kontrolü ve yakma sistemleri üzerinde birçok bilimsel araştırmalar yapılarak bunların sonuçları uluslararası sempozyumlarda tartışılmıştır. Bütün bunlar bir anlamda 2000'li yılların kömür çağı olacağını ortaya koymaktadır (Kural,1991).



Şekil 1.1. Dünya enerji üretiminde kullanılan kaynakların değişim oranları.

Türkiye'deki kömür rezervleri yaklaşık 1,3 milyar ton taşkömürü ve 8 milyar ton linyit olarak bilinmektedir. Taşkömürü rezervlerinin yanı sıra petrol ve doğal gaz rezervlerinin de çok sınırlı olması, ülkemizin enerji kaynakları arasında linyitin önemini açıkça belirtmektedir (Kural, 1991).

Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumunun 1990 yılı kömür satışı yaklaşık olarak 42 milyon ton olarak gerçekleşmiş olup bunun %71'i termik santrallarda, %19'u ısınma amaçlı, %10'i ise değişik sanayi sektörlerinde kullanılmıştır (T.K.İ.1991). Türkiye'nin 1989 yılı elektrik enerjisi üretiminin % 31'i kömür kaynaklı termik santrallardan sağlanmaktadır (D.P.T. Programı,1990).

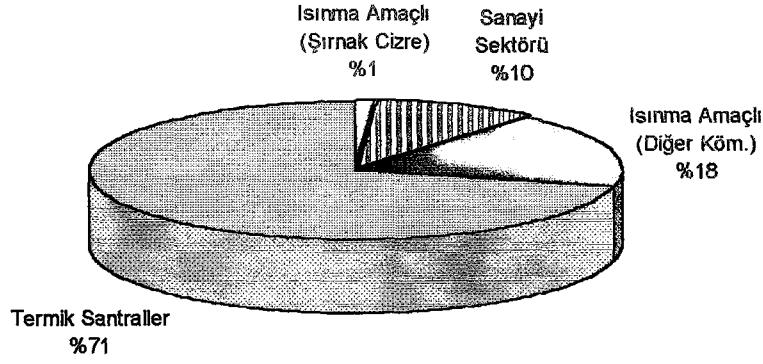
Özelikle ısınma amaçlı linyit tüketimindeki düşüklük, ülkemizdeki linyit yataklarının büyük bir bölümünün ısı değeri düşük, rutubet ve kül içeriği yüksek kömürlerden olmasına bağlanmaktadır. Bu yeterli bir mazeret değildir. Bu rezervlerden en üst düzeylerde yararlanabilmek için ; Yeni yakma tekniklerinin geliştirilmesi ve bu tip kömürlerin alternatif kullanım alanlarının araştırılması büyük bir kıymet ifade etmektedir.

Binaların ısıtılması için gerekli olan ısı enerjisinin kömürden karşılanması, dünyada çok büyük potansiyel oluşturmaktadır. Bu nedenle kömürün temiz, verimli ve çevreci bir şekilde yakılması kalorifer sistemlerinde kullanılması üzerinde oldukça etkilidir.

Türkiye'nin belirlenen petrol ve gaz rezervlerindeki değişim ile petrol ve gaz fiyatları, ticari müesseselerin ısıtılmasında da bir alternatif yakıt olarak kömürün kullanılabilirliğinin araştırılmasında etkili olacaktır. Kömürün tercih sebeplerinden birisi de ekonomik oluşudur. Ancak kömür yakılarak üretilen ısı enerjisinin maliyeti yinede yüksektir. Sabit yatakta yakma sisteminin çalışmasının tam anlaşılması daha ekonomik ve kabul edilebilir emisyon düzeylerini sağlayabilecek modellerin ortaya çıkmasını kuvvetlendirecektir.

1.2. Mevcut Çalışmaya Bakış

1990 yılı itibarıyla Isınma amaçlı kömür tüketimi 8 milyon ton olup bunun 4.2 milyon tonu konutlarda kullanılmaktadır. Konutlarda kullanılan enerji türleri içerisinde kömüre dayalı enerji tüketimi %28'dir. Isınma amaçlı kömür tüketiminin yıllık ortalama 400 bin tonu, Şirnak ve Silopi'de 52 milyon ton rezerve sahip olan yüksek kabarma özellikli, kül ve kükürdü çok olan kömürler (asfaltit) oluşturmaktadır (Başol ,1994).



Şekil 1. 2. Türkiye’deki kömür tüketiminin alanlara göre dağılımı

Bu kömür tipinin toplam kömür tüketimi içindeki payı ancak %1 kadardır (T.K.I. Kurumu, 1991). Şekil 1.2’de Türkiye’deki kömür tüketim alanlarının toplam tüketim içerisindeki payları görülmektedir.

Eğer kömürün ticari ve küçük boyutlu (75-150 kW) işletmelerde yaygın olarak başarılı bir şekilde yakılması sağlanır ve bu işletmeler kömür kaynaklarına yakın yerlere yerleştirilecek olursa taşımacılık ücreti de kar olarak kalabilecektir. Sonuçta kömür yakılmasına dayanılarak üretilen ısı enerjisi artabilecektir.

Son yıllarda otomatik kül boşaltan alttan beslemeli stokerlerdeki gelişmeler, hem evlerde hem de ticari pazarlarda, düşük maliyetli tam otomatik kömür yakma boylerlerinin arzında önemli bir ilerleme teşkil etmiştir. Yalnız böyle sistemler taşınabilecek kömür miktarı ile sınırlıdır (Given,1955;Stephan,1980). 200-700 ranklı tekil kömürler kekleşmeye meyilli olduklarından bu sınırlar içerisinde yüzeysel yataklarda tamamen pasif (reaktif olmayan) duruma geçtikleri için pratik değildirler (Dunningham and Gurummel,1938). Alev yatağının sürekli çalkalanmasıyla bu gibi problemlerin üstünden gelinebilir. Bu, alev yatağı el ile taranarak taze kömür yüzeylerinin hava ile temasını sağlamak gibi işlemleri de içeren daha basit farklı tekniklerle başarılabilir. Genelde bu pratik bir çözüm değildir. Bir alternatif olarak İngiliz British Coal Board tarafından döner başlıklı bir yakıcı geliştirmiştir (Malik,1991).

Bu çalışmada 40 kW lık bir döner yanma odalı kömür yakma sistemi planlanmış ve prototip üretimi yapılmıştır. Bu düzenekte kömür bir sonsuz vida taşıyıcı tarafından bunkerden döner rotorun arkasına sürekli olarak taşınmaktadır. Yanma odası sabit devirde kendi eksenini etrafında sürekli olarak döndürülür. Böylece kömür yatağı devamlı karıştırılarak temin edilen hava ile kömürün daha iyi teması sağlanır. Kül, yanma kafasının açık tarafından küllüğe doğru akar.

Bu çalışmada döner bir yanma odası üzerinde yanma verimi, ısı verim ve kirlilik seviyesini esas alan bir performans izleme çalışması yapılmıştır.



2. KÖMÜR YAKMA SİSTEMLERİ

Kömürün yakılmasında yüksek performans sağlanması temel amaçtır. Bunun yanında, ocak sıcaklığının gereken seviyede tutulabilmesi, düşük baca gazı emisyonu, ekonomiklik ve farklı özelliklerdeki kömürleri aynı iyilikte yakabilmesi gibi faktörleri de yerine getirebilmesi istenir. Bu nedenle uygulamada bu faktörleri sağlayabilmek düşüncesiyle, çok farklı yapıda yakma sistemleri ortaya çıkmıştır.

2.1. Sabit Yatakta Yakma

Bu yakma sistemi tarihsel olarak kömür yataklarının bilinen standart yakma tekniğiydi. Bu teknik 10 cm büyüklüğüne kadar kömürleri yakmaya elverişlidir. Fakat zamanımızda tozlaştırılmış yakıtlar ve akışkan yataklar yaygın olarak kullanılmaktadır. En eski mekanik yakıcılar ilk defa 1816 yılında çıkmıştı. 1960'a kadar otomatik yakma sistemlerinde anlamlı gelişmeler başarıldı, bununla beraber muteber diğer enerji kaynakları bu çalışmaları yavaşlattı. Özellikle 1950-1970 yılları arasında kullanımdan çekilmişlerdir. Ancak petrol krizi sonrası dönemlerde, kömür kullanımının öne çıkması ile birlikte özellikle küçük kapasiteli uygulamalarda tekrar geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Yine de sabit veya hareketli ızgaralarda daha fazla gelişme için küçükte olsa teşvikler bu alandaki çalışmaların devamını sağlamıştır.

Çok farklı kapasitede yapılabilen sabit yatakta yakma sistemleri, elle yüklemeli ve mekanik yüklemeli olarak iki grupta toplanabilir. Sabit yataklarda yanma süresi tane büyüklüğüne bağlı olarak çok uzun sürelerle çıkabilmektedir. Yanma reaksiyonları difüzyon kontrollüdür (Essenhigh,1981). Sabit yatakta yakma sistemlerinin üst bölümüne yerleştirilen hava jetleri giren kömürün üniform yanmasını sağlar. Bu yakma sistemlerinde kekleşen kömür yakılması esnasında kok oluşumu sonucu ortaya çıkan problemler, uygun ızgara dizaynı ile veya kömür üzerine su püskürtülmesi ile önenebilir (Berkowitz,1978).

2.1.1. Elle beslemeli ızgaralı ocaklar

Elle yüklemeli ızgaralı sabit yataklı ocaklar küçük kapasiteli olup, Türkiye için, özellikle ısınma amaçlı kullanım açısından önemli bir yere sahiptir. Evlerde ve ticari amaçlı kullanılan küçük fırınlı ocak örneklerinde olduğu gibi, küçük boyutlu boylerlerde

kullanılan bazı sabit yatakta yakma sistemlerinin yerine geçebilecek kabul edilmiş bir alternatif yoktur. Elle beslemede verim büyük ölçüde ateşçiye bağlıdır. Kül içerisinde yanmamış kömüre rastlamak her zaman mümkündür (Barkley, 1933).

2.1.2. Mekanik stokerler

Mekanik karıştırıcı yakma sistemleri, süreklilik esası üzerine kurulmuş bir kömür yakma mekanizmasıdır. Bu tip karıştırıcının performansı, kullanılan kömür özelliği ve işletme maharetine bağlıdır. Şimdiye kadar bu tip yakıcıların küçük boyutlu olanları yaygın olarak satışa sunulmamıştır. Büyük boyutlu boylerlerde stoker yakıcılar, yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar hala yüksek yanma verimliliğini sürdürmekte ve bütün kömür tipleri için kullanmaya uygun olabilmektedir. Fakat küçük tipler için ideal kömür tipi, yanarken kabarmayan kömürlerdir (Barkley, 1933; Helfinstine, ve caby, 1949).

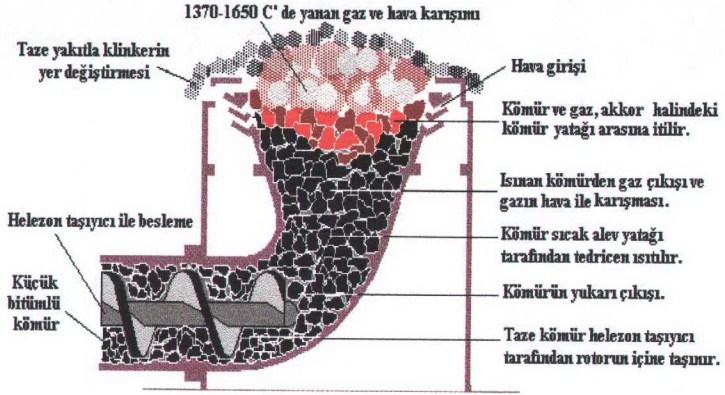
Stoker yakıcılı boylerler aşağıdaki avantajlara sahiptir :

- a) Düşük düzeyde tane ve toz emisyonunu başararak bütün kirlilik standartları sağlamaya elverişlidir.
- b) Duruma göre yanma yavaşlatılabilir veya durdurulabilir. Acil durumlarda elle yakılabilir.
- c) Direk olarak daha fazla kömür öğütmeye gerek duyulmadan serbest olarak kömürü yakarlar.
- d) Yakıcıların anlaşılması ve işletilmesi kolay, kontrolleri basittir.

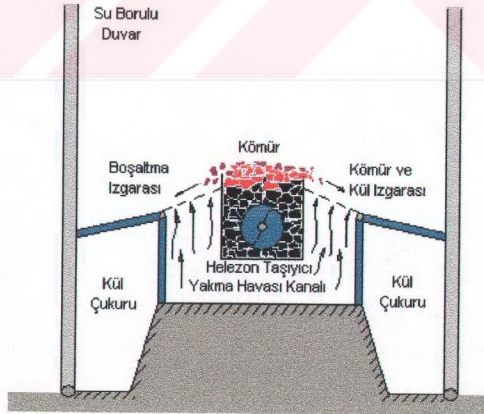
Esas olarak stokerler alttan beslemeli, koklaştırma ocakları, serpme tip ve zincir ızgaralı olmak üzere dört gruba ayrılabilir.

2.1.2.1. Altan beslemeli stokerler

Bunlar içerisine basınçlı hava gönderilen bir rotor veya başlık ile hava borularından meydana gelmiştir. Kömür rotorun alt tarafından içerisine bir sonsuz vida tarafından sürülmektedir. Şekil 2.1’de bir alttan beslemeli stoker bunkerinden kömür akışının genel görünüşü, şekil 2.2’ de ise alından kesiti görülmektedir. Yüksek kapasiteli endüstriyel yakıcılarda çok başlıklı olanlar kullanılabilmektedir (Barnes, 1940).



Şekil 2.1. Alttan beslemeli stokerde bunkerden kömürün akışı.



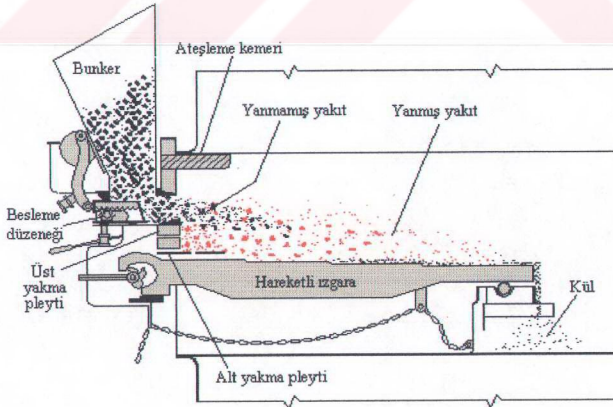
Şekil 2.2. Alttan beslemeli stokerin alından kesit görünüşü

Altan beslemeli stokerler, kömürlerin geniş bir alana yayılarak yakılmasına elverişli değildir. Bu tip mekanik stokerler bir tesisin bir kısmında kullanmak için üretilirler. Yanma oranları, besleme limiti, hava oranı ve yatak derinliği ile değişmektedir. Kömür ve char'ın yanması, küçük alttan beslemeli stokerlerde, sürekli işletme durumları altında bile stabil bir işlem değildir (Bornes, 1940; Barkley and Budrick, 1933).

Bu stokerlerin performansına etki eden faktörler birçok çalışmada belirtilmiştir (Allen,1953; Barnes,1941). Antrasitten linyite kadar bütün kömür cinsleri için uygun ise de, çok uçucu madde, az kül, az nem içeren ve külü yüksek yumuşama sıcaklığına sahip kömürlerde tercih edilir.

2.1.2.2. Üstten beslemeli koklaştırma stokerleri

Bu tip stokerlerde kömür ram feeding mekanizmasıyla, ızgaranın ön kısmından yukarıya doğru koklaştırma pleytinin üzerine itilir. Orada kömür, uçucularından ayrılarak kısmen damıtılır. Izgara genellikle bir kam tarafından sürekli hareket verilecek şekilde özel ızgara çubuklarından meydana gelmiştir. Kömür ızgaranın hareketiyle ileri doğru atılmadan önce uçuğu gazlarından ayrılarak kok haline dönüştürülür. Hava genellikle bir fan tarafından alev boruları arasına kuvvetle üflenir ve kül ızgaranın sonunda üstten dökülür.



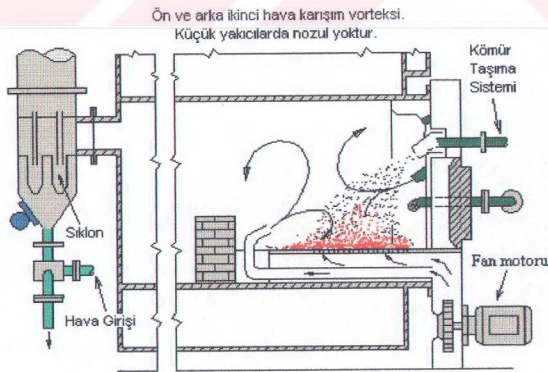
Şekil 2.3. Üstten beslemeli fırlatıcı tip koklaştırma stokeri

Kömürün kuvvetli kokaşması tavsiye edilmez, çünkü bu durumda kül içinde yüksek karbon kayıpları söz konusudur (Stephen,1980). Kullanılan kömür büyüklüğü 12.5-25 mm dir.

Şekil 2.3.'de bir kokaştırma stokerinin kısımları ve alev yatağının yapısı görülmektedir (Murrey,1957). Bu tip stokerler 4,4 mW'a kadar küçük buhar kazanları ve küçük su hazneli boylerlerde kullanılır.

2.1.2.3. Serpme (savurmalı) sabit ızgaralı stokerler

Bu yakma şekli yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar, bütün ızgara yüzeyi üzerinde oldukça ince bir tabaka sağlamak için mekanik kürek veya rotor kullanımı ile yakma şartlarını en iyi şekilde temsil etmektedir. Ocak (yakma) tipi tamamen üstten beslemelidir. İlk mekanik stokerler yakıtın ızgara üzerine yayılması için pervane kullanma sistemine dayanmaktadır. Yakıt dağıtma sistemlerindeki son değişimler ile kömürün pnomatik olarak düşme borularından veya lülelerden beslenmesi yapılmaktadır. Şekil 2.4. en son tiplerinden birini göstermektedir. Bu tip savurmalı yakma sistemi yüklemdeki değişikliklere kolay adapte olmakta, fakat üniform yakıt boyutu istenmekte özellikle bitümlü parçacıklar tavsiye edilmektedir.



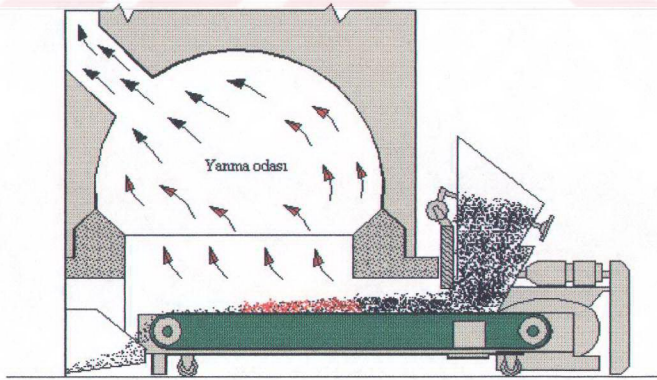
Şekil 2.4. Serpme (savurmalı) sabit ızgaralı stoker

Toz miktarı fazla olan parçacıklar grit emisyonunun (baca gazları içindeki toz miktarının) yükselmesine sebep olabilirler. Bu yakma sistemleri ile donatılan boylerler tipik olarak 600-8800 kW arasında olabilirler.

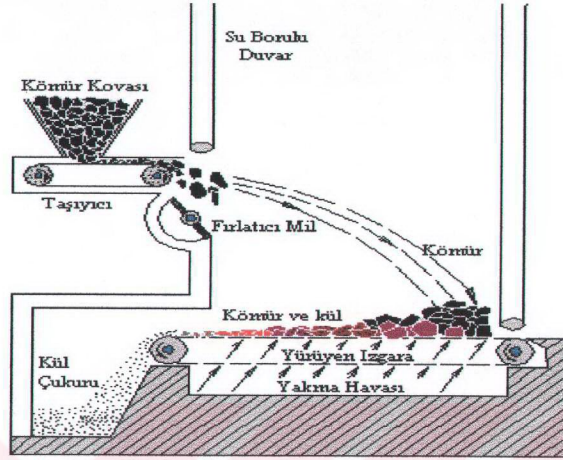
2.1.2.4. Zincirli veya gezer ızgaralı ocaklar

Bu tip stokerler bir sonsuz zincir veya gerilme altındaki hareketli bir banttıan oluşmaktadır. Besleme hızı, ızgaranın hızı ile kontrol edilmektedir ve kömür ızgara üzerine düşey olarak açılıp kapanan bir kapı ile düzenli olarak yayılmaktadır. Hava ızgara üzerine basınçlı çekme fanı ile üflenmektedir. Izgaranın sonunda tamamen yanmış kömür, kül olarak küllük kısmına dökülür. Izgara ilerledikçe kömür tabakası inceler ve kömür tabakasının hava geçişine karşı direnci azalır. Bu nedenle hava miktarı son bölüme doğru azaltılır (Rolfé, T.J.K. vd 1961). Şekil 2.5’de zincir ızgaralı stokerlerin kesit görünüşü ve ateş yatağının şekli Şekil 2.6 ‘da ise üstten fırlatmalı ve gezer ızgaralı ocağın birleştirilmiş şekli görülmektedir.

Özellikle stoker aşırı yükleme altında çalışırken, ızgarayı korumak için, kül, izalosyon tabakası olarak görev yapar. Bu tip stokerlerde çok değişik kömür tipleri kullanılabilir, ancak taş kömürü cinsi kömürlerin yakılmasına daha uygundur. Linyit yakmak için özel önlemler gerekir. Yaklaşık 80 mW ‘a kadar su borulu boylerler için de kullanılabilir (Marksel ve Miller, 1946).



Şekil 2.5. Zincir veya gezer ızgaralı ocak



Şekil 2.6. Gezer ızgaralı ve fırlatmalı tip ocak

2.2. Pülverize Kömür Yakma Sistemi

Bu sistemde kazan, ya daha önceden toz haline getirilerek depolanmış kömür ile beslenir, veya her kazanın kendi öğütme tesisi bulunur. Pülverize kömür yakma sistemlerinde alev istenilen şekilde ve kazan içinde istenilen bölgeye ayarlanabilmektedir. Özellikle çok jetli yakma sistemlerinde alev boyu uzatılmadan alev kalınlığı artırılabilir. Yanma havasına türbilanslı hareket verilerek kömür tozları ile daha iyi karışması sağlanabilmektedir.

Kül erimesi sonucu konveksiyon yüzeylerine külün yapışmasını ve tıkanmaları önlemek için duvar yakınlarında sıcaklığın düşük tutulması tavsiye edilmektedir (Pitt and Milvard,1981).

Pülverize yakma sistemlerinde uygun düzenlemeler yapmak şartıyla her türlü katı yakıt yakılabilir (Kural,1991). Toz haline getirilmiş kömür veya diğer katı yakıtlar hava ile taşınarak ocağa üflenirler veya fuel-oil gibi sıvı yakıtlarla karıştırılarak emülsiyon haline getirilip ocağa sıvı yakıt gibi püskürtülürler.

2.3. Akışkan Yatakta Yakma

Sıvı veya gaz halindeki bir akışkan bir yatak içerisinde katı tanecikler arasından geçirilerek, katı taneciklere akışkan özellik kazandırma esasına dayanmaktadır. Yatak genişlemesinde yatak yüksekliği ve yatak içerisindeki tanecik dağılımı, kullanılan akışkan cinsine ve bunların yatakta akış hızlarına göre değişir. Ayrıca akışkan yatağın dizaynı da akışkanlaştırma kalitesi üzerinde oldukça etkilidir (Güvenilir,1984). Akışkan yatakta sıcaklık dağılımı, sıvılarda olduğu gibi üniforma yakın olup yatak içerisindeki soğuk yüzeylere ısı transferi çok hızlıdır.

Gibson (1979), Akışkan yataklı yakma sistemlerinde düşük kalorifik değerli yakıtları, daha az kirlilik düzeyinde yakabilmiş, akışkan yataklı yakma sistemini eski ve yeni kazan tiplerinde başarı ile uygulayabilmiştir. Bu sistemle ekonomik olmadığı düşünülen düşük kalorifik değerli yakıt yakılabilmektedir.

Yüksek uçucu madde içeren kömürlerde aktif yatak, bir gazlaştırıcı olarak görev yapmaktadır. Açığa çıkan gazların yanması daha ziyade yatağın üst kısmı ve serbest bölgede olmaktadır. Ekonomik değerlendirmeler akışkan yatakta yakma sistemlerinin özellikle hava kirliliğine neden olan emisyonların denetlenmesi açısından daha yararlı olduklarını göstermiştir.

Basınçlı akışkan yatakların atmosferik şartlarda çalışanlara göre daha az NO_x yayını, buhar kazanları boyutlarının küçülmesi ve daha yüksek yanma verimleri gibi üstünlükleri vardır. Yüksek sıcaklıklarda NO_x oluşumunun artması ve kül yapışma sıcaklığına yaklaşılmaması nedeni ile yatak sıcaklığı sınırlandırılır. Yanma sıcaklığı ortalama $800-900^\circ\text{C}$ olup konveksiyonel sistemlere göre çok düşüktür. Bu nedenle buhar boruları üzerinde korozyon azalmıştır.

Birin vd (1979), akışkan yatakta bitümlü şist yakma esnasında havayı 450°C sıcaklığa kadar ısıtmalarına rağmen, yatak sıcaklığını $750-800^\circ\text{C}$ de tutmanın mümkün olmadığını göstermişlerdir.

3. KÖMÜR YANMASI

3.1. Sunuş

Genel yanma işlemi hakkında günümüzde oldukça geniş bir teorik bilgi bulunmaktadır. Ancak kömür yataklarındaki yanma davranışının ilmi olarak anlaşılması ile ilgili literatür azdır. Kömürün yakılması bugün hala pratik bir olay olup, bilimsel anlaşılmadan ziyade geçmiş deneyimlerden elde edilen bilgilere dayanmaktadır. Bununla birlikte karbon ve kömür parçacıklarının tek tek yanması üzerine bir çok çalışma mevcuttur (Malik,1991).

Bu kısımda kömürün yanma özellikleri, çeşitli aşamalarla ilgili teorik çalışmalar ve model girişimleri teorik ve deneysel sonuçları ile birlikte verilecektir. Özellikle kekleşerek tek parça haline gelen kömürleri karıştırma şartıyla yakmak için yapılan çalışmalar gözden geçirilmiştir.

Bu, aşağıdaki kategorileri içine alacak şekilde bölünebilir.

- a) Kömür parçacıklarının yanma modeli
- b) Temin edilen havanın dağılımı
- c) Kirlilik düzeyi
- d) Plastikleşme ve kabarmanın yanmaya etkisi
- e) Kabaran kömür yakılırken karıştırılmasının etkisi
- f) Mekanik stokerlerin besleme hızı

3.2. Yanma Kinetiği

Yanma kinetiğini ifade eden denklemlerin temeli Langmuir adsorbsion izotermine dayandırılır. Bu ifade ilk olarak karbon oksijen reaksiyonlarını açıklamak üzere geliştirilmiştir. Bu izoterme göre karbon taneciği yüzeyinde oksijenin kısmi basıncı P_s ile orantılı olarak adsorblandığı aktif adsorbsiyon bölgeleri vardır. Oksijen bölgeleri desorpsiyonla boşalır ve tekrar adsorbsiyona uygun hale gelir. Yüzeyden ayrılan oksijen kendisiyle birlikte karbon atomlarını da CO ve CO₂ oluşturmak üzere taşır. Bu durum aşağıdaki şekilde gösterilebilir.



Burada C^* aktif karbon bölgelerini göstermektedir. Oksijenin aktif adsorbsiyon noktalarına adsorbsiyonu ve desorbsiyonu arasında dinamik denge kurulduğundan, tanecik aktif yüzeyi kısmen oksijenle kaplanmış durumdadır. Aktif adsorbsiyon bölgesi S_T , oksijenle kaplı yüzey kesri S/S_T ve adsorbsiyon hız sabiti k_1 ile gösterilirse adsorbsiyon hızı

$$r_A = k_1 P_s \left(1 - \frac{S}{S_T} \right) \quad (3.3)$$

olur. Desorbsiyon hızı ise;

$$r_D = k_2 \left(\frac{S}{S_T} \right) \quad (3.4)$$

Şeklinde yazılabilir. Dinamik denge halinde $r_A = r_D$ olur. Böylece oksijenle kaplı aktif yüzey kesri aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\frac{S}{S_T} = \frac{k_1 P_s}{k_1 P_s + k_2} \quad (3.5)$$

Buna göre karbon uzaklaştırma hızı desorbsiyon veya adsorbsiyon hızına eşit olur

$$R_s = \frac{k_1 k_2 P_s}{k_1 P_s + k_2} \quad (3.6)$$

Yukarıdaki eşitlik temel reaksiyon denklemi olmakla birlikte, özel önemi olan iki sınırlayıcı duruma sahiptir. Langmuir izoterminin normal analizinde, adsorbsiyon hızı, yüksek basınçlarda sıfırıncı mertebede ve düşük basınçlarda oksijen konsantrasyonuna göre birinci mertebede olmak üzere iki uç durum vardır. k_1 ve k_2 'nin sıcaklıktan farklı etkilenmeleri nedeniyle aynı sonuç sıcaklık değiştirilerek de ortaya konulabilir.

$$\text{Yüksek sıcaklıklarda } k_2 \gg k_1 P_s \text{ böylece } R_s = k_1 P_s \quad (3.7)$$

$$\text{Düşük sıcaklıklarda } k_1 P_s \gg k_2 \text{ böylece } R_s = k_2 \text{ bulunur.} \quad (3.8)$$

Şayet tane yüzeyinden ayrılan gaz yanma ürünleri tekrar yüzeye adsorblanırsa, ileri doğru olan reaksiyon için gerekli olan aktif adsorbsiyon bölgeleri işgal edilmiş

olacağı için birim yüzey başına ifade edilen reaksiyon hızı düşer. Yanma ürünlerinin kısmi basıncı P_3 ve adsorbsiyon hız sabiti k_3 ile gösterilirse yanma ürünlerinin adsorbsiyon hızı,

$$r_{PA} = k_3 \left(1 - \frac{S}{S_T} \right) \quad (3.9)$$

olur ve toplam adsorbsiyon hızı,

$$r_A + r_P = (k_1 P_S + k_3 P_3) \left(1 - \frac{S}{S_T} \right) \quad (3.10)$$

Böylece basit izoterm $k_1 P_S \gg k_3 P_3$ kabulü ile aşağıdaki şekli alır.

$$R_s = \frac{k_1 k_2 P_3}{k_1 P_S + k_2 + k_3 P_3} \quad (3.11)$$

Yukarıdaki eşitliğin CO_2 ve H_2O reaksiyonlarına uyduğu gösterilmiştir.

3.3. Kömür Parçacıklarının Yanma Modeli

Katı kömür parçacıkları ısıtıldıkları zaman, gazlaşarak yanabilen madde miktarı artar. Yanma sonucunda geriye artık kül madde kalır. Bu gazlaşabilen bileşikler, sıvı vakıt

yapılmış deneysel çalışmalar incelendiğinde oldukça farklı sonuçlar ile karşılaşmaktadır. Birçok literatürde uçucu davranışının parçacık boyutu, oksijen konsantrasyonu, yatak sıcaklığı ve kömür özelliklerinin yanısıra kullanılan yatak ve/veya yakıcı özelliklerine bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir (Garner and Henny,1952; Selçuk ve diğerleri,1983; Silver,1952).

Ekinci ve diğerleri (1983), tanecik boyu 1-5 mm olan üç değişik kömür tipi için uçucu madde yanma süresini 2-14 saniye, Regland (1981) tanecik boyu 2-10 mm olan değişik kömür tipleri için uçucu madde süresini 10-60 saniye olarak bulmuştur.

La Nause (1982), uçucu madde çıkışını kontrol eden adımın, uçucuların tanecik içinden yüzeyine difüzyonu olduğunu ileri sürmektedir.

Uçucu madde yanma süresi Nusselt'in damla büzülme teorisi ile hesaplanabilir (Essenhig and Thring,1963). Bu teori, parçacığın ısı enerjisinin sadece iletimle sağlandığı düşüncesine dayanır. Transfer hızı çap azaldıkça parçacığın sabit bir sıcaklığa sahip olması durumuna göre belirlenir. Bu teori aşağıdaki kabullere dayandırılmıştır.

- a) Gazlaşma bir sonlu kinetik süreç içerisinde olduğu halde, sıcaklık etkisi ile taneciğin ani olarak eridiği kabul edilir.
- b) Endotermik enerji ihmal edilir.
- c) İç kısımlardaki katı ile eriyen dış yüzey arasındaki özellik farkları ihmal edilir.
- d) Sıcaklık etkisiyle çıkan gazların, gazı çıkmış kömür üzerindeki etkisi dikkate alınmamıştır.
- e) Parçacığın çapının değişmesiyle sabit sıcaklığa ulaşması için ısınacağı varsayımı geçerli gibi görülmektedir.

Yukarıdaki yaklaşımlara dayanarak ortalama erime hızı ile küre çapı arasındaki aşağıdaki bağlantı verilmektedir. Burada W_0 kürenin ilk ağırlığı, d_0 kürenin ilk çapı, K_p ise bir sabittir.

$$W=K_p \cdot W_0 \cdot d_0^2 \quad (3.12)$$

Essenhig gözenekli bir cisimde gaz çıkış süresini hesaplamak için reaksiyonla birlikte difüzyon akışı için bir matematiksel modelleme yaparak genel bir denklem kullanmıştır. Nusselt aynı kabulleri büzülen damla davranışı ile birleştirilerek gazlaşma emisyon süresi için kare yasası bağıntısı olarak bilinen aşağıdaki bağıntıyı vermiştir.

$$t_v = K_v \cdot d_o^2 \quad (3.13)$$

Burada t_v uçucu madde yayılma zamanı, d_o ilk kömür parçacık çapı, K_v ise erime hız sabitidir. Böyle bir kare yasası bağıntısı 5 mm' ye kadar parçacıkların erimesinden deneysel olarak elde edilmiştir (Essenhig, 1963).

3.3.2. Uçucu madde yanması

Sürekli beslemeli bir kömür yakma sisteminde çıkan gazların yatak sıcaklığında yandığı düşünülürse, gaz çıkma süresinin yanma süresine eşit olduğu kabul edilebilir. Çeşitli hidrokarbonlar olarak tarif edilen uçucu maddeler için, bugün en iyi bilinen tepkimeler CO ve H₂ bileşenlerinin yanma tepkimeleridir. Gaz yakıtın yanma başlangıcı ile sonu arasında çok sayıda ara ürünler oluşup yok olmaktadır. Uçucu maddelerin yanma zamanı, belirli oksitleme şartlarında yatak sıcaklığına, kömür parçacıklarının büyüklüğüne ve kömür tipine göre değişmektedir.

Filint (1984), yatak yüzeylerindeki alevleri gözleyerek uçucuların yanma zamanının 700-925 °C yatak sıcaklığı arasında yatak sıcaklığının artması ile azaldığını bulmuştur.

Pillai (1981, 1985), kömür partükül çapının yanma süresine etkisini incelemiş ve

$$t_v = k \cdot d_o^n \quad (3.14)$$

üstel bağıntısını bulmuş olup sıcaklık arttıkça n değerinin arttığını, k değerinin ise düştüğünü göstermiştir. Burada t_v uçucu madde yanma süresi, k ve n uygun regrasyon analizi katsayılarıdır.

Pehlivan ve diğerleri (1995), önceden ısıtılmış dikey bir kamara kullanarak 1.7-13 mm büyüklük aralığında üç tip kömürün 973 K başlangıç sıcaklığındaki yanma sürelerini ölçerek, $t_v = k \cdot d^n$ üstel ilişkisinin hem uçucu madde hem de karbon yanması için geçerli olduğunu göstermişlerdir.

Stubington (1980), uçucu madde yanmasında hız kontrol edici adımın, uçucu maddelerin oksijenle karışmasının etkili olduğunu ve Reynold sayısının 1 civarında olduğu ortamda karışma süresinde moleküler difüzyonun hakim olduğunu vurgulamıştır.

Yalkın ve Atakül (1986), uçucu madde yanma süresi üzerinde nem ve sabit karbon içeriklerinin etkili olduğunu belirtmektedirler. Uçucu madde yanma süresi için aşağıdaki formülü geliştirmişlerdir.

$$T_v = A + B d + C T \quad (3.15)$$

Burada t_v uçucu madde yanma süresi, A, B, ve C regrasyon analizine göre sabit sayılar, d , tanecik çapı, T sıcaklıktır.

3.3.3. Artık kömürün yanması

Bütün gazların emisyonundan sonra karbonlu malzeme sabit fiziksel özellikli basit katı bir madde olarak kabul edilebilir. Isı üretmek için gazı alınmış kömür yüzeyi difüzyonla okside edilir. Oksijen, karbon yüzeyi ile doğrudan doğruya reaksiyona girer. Üretilen ısının çoğu ışıma ile kaybolur. Katı kok' un yanma hızı, parçacık yüzeylerinde oksijen difüzyon hızına bağlı olabilmektedir. Heterojen reaksiyon aşağıdaki adımları ihtiva etmektedir:

- a) Oksijen taneciğin dış yüzeyine difüze olmalıdır. Bu sınır tabaka difüzyonudur, yani gaz bileşenlerin tanecik dış yüzeyine geçişidir.
- b) Difüze olan oksijen, yüzey tarafından adsorbe edilerek, tanecik içi boşluklardaki poröz ortama nüfuz etmelidir.
- c) Adsorbe edilen oksijen ürün vermek için katı ile reaksiyona girmelidir.
- d) Adsorbe edilen ürünler yüzeyden dışarı verilmek zorundadır.
- e) Dışarıya verilen ürünler difüzyonla dışarı atılmalıdır.

Eğer çevredeki gaz akışı zayıf ve sıcaklık düşük ise o zaman "c" adımı en zayıftır. Bu nedenle işlem kinetik olarak kontrol edilir. Eğer sıcaklık yüksek ve çoğu parçacıklar arasındaki akış hızı fazla ise adım "a" ve adım "e" sınırlı faktörlerdir. Ortalama yanma hızı difüzyon kontrollü olacaktır (Khitrin,1957; Essenhigh,1957).

Karbon yakma mekanizmasının kurulması için, karbon yüzeylerine oksijen difüzyonu yapılarak CO oluşturulur. Yüzeyde CO, artan oksijenle reaksiyona girerek CO₂ oluşturur. CO'in oksitlenme reaksiyonu için Field (1967), tarafından aşağıdaki ifade yayınlanmıştır.

$$\frac{dC_{CO}}{dt} = k \cdot e^{-E/RT} C_{O_2}^{0.3} C_{CO} C_{H_2O}^{0.3} \quad (3.16)$$

şeklindedir. Burada;

C : Konsantrasyon (gmol/cm³)

t : Zaman (s)

R : Gaz sabiti (1.986 cal/mol K)

T : Sıcaklık (K)

k : Reaksiyon hızı sabiti (-3×10^{10} (cm³/gmol)^{0.8}/s)

E : Aktivasyon enerjisi (16 000 cal/gmol)

Howard ve diğerleri (1973) ise aşağıdaki denklemi vermişlerdir.

$$\frac{dC_{CO}}{dt} = k \cdot e^{-E/RT} C_{O_2}^{0.3} C_{CO} C_{H_2O}^{0.5} \quad (3.17)$$

Burada, $k = -1.3 \times 10^{14}$ cm³/gmol-s ve $E = 30\,000$ cal/gmol değerlerini almaktadır. Üretilen CO₂ 'nin bir kısmı tekrar katı yüzeylerde difüze edilir ve orada karbonla CO oluşturur.

Daw ve Krisnan (1982), geniş parçacık durumlarında CO₂ transportu için kütle transport limitinin hesaplanmasında aşağıdaki bağıntıyı vermiştir.

$$R_{MT} = 12 \text{ Sh} \frac{D}{d} \left(\frac{T}{T_1} \right)^{0.75} P \quad (3.18)$$

Burada "D" oksijenin T₁ referans sıcaklığındaki moleküler difüzyon katsayısıdır. T yatak sıcaklığı, "Sh" Sherwood sayısı, P oksijenin kısmi basıncıdır.

3.4. Yanma Çalışmaları

3.4.1. Karbon yanması

Karbon parçacıklarının yanma çalışmalarına ait makaleler ilk defa Nusselt tarafından yapıldı (Nusselt, 1924). Bu geliştirildi ve Spalding tarafından tekrarlandı ve bir yanma oranı için aşağıdaki ifade üretildi:

$$\frac{G_o r_o}{T_{ox}} = \frac{m_{ox}}{S} \quad (3.19)$$

Burada, G_o yanma hızı, r_o yakıt parçacıklarının başlangıç yarıçapları, T_{ox} oksidant transport özellikleri, $m_{ox,o}$ parçacık yüzeylerinde oksidant madde miktarı, S ise oksidant ve yakıtın stokiometrik oranıdır.

Kimyasal kinetik sınırlamaları tesiri Tu, Dawis ve Hottel tarafından araştırıldı (Tu ve diğerleri 1934). Bu araştırma, Spalding (1988), tarafından verilen uygun bir ifade ile sonuçlandı. Buna göre kimyasal kinetiğin etkisi dikkate alındığında karbon parçacıklarının yanma hızı şöyledir ;

$$G_o = M_{ox,o} \left[K_p \exp\left(\frac{-E}{RT_o}\right) \right]^{-1} + \left(\frac{S + m_{ox,o}}{T_{ox}} \right) \quad (3.20)$$

Burada K_p bir sabit, E aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti ve T_o ise ilk parçacık sıcaklığıdır. 3.8 no' lu denklemde $[K_p \exp\left(\frac{-E}{RT_o}\right)]^{-1}$ terimi ile $[(S + m_{ox,o}) / T_{ox}]$ sırasıyla yanmaya karşı gösterilen kimyasal ve fiziksel tepki olarak düşünebilir. En büyük direnç daima baskındır.

3.18 ve 3.19 no' lu denklemlerden, parçacık yanma zamanı için aşağıdaki ifadeyi türetmek mümkündür.

$$t_b = \frac{\rho}{m_{ox,o}} \left\{ r_{o,j} \left[K_p \exp\left(\frac{-E}{RT_o}\right) \right]^{-1} + \frac{1}{2} \left[\frac{r_{o,j}(S - m_{ox,o})}{T_{ox}} \right] \right\} \quad (3.21)$$

Bu denklem incelenirse yanma süresinin, fiziksel kontrollü yanma için, başlangıç yarıçapının karesi ile orantılı olduğu görülür.

3.4.2. Char taneciğinin yanması

Tanecik şekli küresel olarak kabul edilip, pülverize kömür alevinin küçük bir örneği gibi düşünülüp hem teorik hem de deneysel olarak çalışılmıştır. Sistem şu şekilde idealize edilir. Taneciklerin saf karbon olduğu kabul edilip, reaksiyonun taneciğin sadece dış yüzeyinde olduğu ve yanmanın 1000 - 2000 °C arasındaki alev sıcaklığı bölgesinde gerçekleştiği varsayılır. Reaksiyon hızı iç reaksiyonların ihmalı ile aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{k_0 p_0} + \frac{1}{k_1 p_0} \quad (3.22)$$

Bu denklemde k_0 sınır tabaka geçiş bölgesinde hız sabiti, k_1 ise adsorbsiyon hız sabiti olup k_0 çapa bağlıdır, k_1 çapa bağlı değildir. Basitleştirilmiş analizde çap fonksiyonu şu şekilde kurulur. Yanma ürünleri ihmal edilir. Yarıçapı r olan taneciğin etrafı oksijen ve azottan oluşmuş bir gazla çevrilmiş olduğu varsayılır. Bu durumda yüzey reaksiyonları nedeniyle katı yüzeye doğru, difüzyonu sağlayacak şekilde bir oksijen gradyenti söz konusu olur.

Oksijen konsantrasyonunun N (birim hava başına molekül sayısı) olduğu ve tanecik merkezinden x kadar uzak olan bir noktada eğer difüzyon akısı (birim alandan birim zamanda geçen molekül sayısı) G ise Fick kanununa göre aşağıdaki denklem yazılır.

$$G = -D \frac{dN}{dx} \quad (3.23)$$

Akış, radyal karakterli olması nedeniyle şu süreklilik denklemi türetilebilir.

$$r^2 G_s = x^2 G \quad (3.24)$$

Burada G_s katı yüzeydeki difüzyon akısıdır.

$$G_s = -D \frac{x^2 dN}{r^2 dx} \quad (3.25)$$

Sürekli rejim şartları altında G_s bir sabit olduğundan

$$x = r \text{ 'de } N = N_s \quad (3.26)$$

$$x = \delta \text{ 'da } N = N_0 \quad (3.27)$$

alınarak integrasyon sonucunda aşağıdaki denklem elde edilir. Burada δ sınır tabaka kalınlığıdır. Difüzyon yüzeye doğru olduğundan doğal olarak G_s negatiftir.

$$-G_s = \frac{D(N_0 - N_s)}{r \left(1 - \frac{r}{\delta}\right)} \quad (3.28)$$

Çevre havası hareketsiz ise δ 'nın büyük olması sebebiyle r/δ ihmal edilebilir. Bu durumda,

$$k_0 = \frac{D}{r} \quad (3.29)$$

kullanılır. Türbilanslı akışta, ana akışın kenarındaki düzlem yüzey için gerçek sınır tabaka kalınlığı δ kullanılır. Çok yavaş akış içerisindeki bir küre için sınır tabaka kalınlığı tanecik çapına eşit bir dereceye düşer (Nusselt, 1924). Bu durumda Nusselt sayısı 2'ye eşittir ve bu, etkin veya hayali sınır tabaka kalınlığıdır. Bir m kütlesinin tamamı için,

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \quad (3.30)$$

$$\frac{dm}{dt} = (4\pi r^2) \rho \frac{dr}{dt} \quad \text{yazılabilir. Burada } \rho \text{ parçacık yoğunluğudur.}$$

$$R_1 = \frac{-(dm/dt)}{4\pi r^2} \quad \text{olduğundan} \quad (3.31)$$

$$R_1 = -\rho \frac{dr}{dt} = \frac{P_0}{\left(\frac{r}{d} + \frac{1}{k_1}\right)} \quad \text{elde edilir. Bu denklemin} \quad (3.32)$$

$$r = a \quad \text{için} \quad t = 0$$

$$r = 0 \quad \text{için} \quad t = t_b$$

Sınırları arasında entegrasyonu ile taneciğin yanma süresi bulunur.

$$t_b = \frac{\rho}{p_0} \left(\frac{a}{k_1} + \frac{a^2}{2D} \right) \quad (3.33)$$

Burada a tanecik yüzeyinden olan uzaklık, D difüzyon katsayısıdır. Genelde genelel analizlerde Nusselt'de olduğu gibi önemli faktörün difüzyon olduğu, yani ($k_0 \ll k_1$) durumunda kimyasal faktörlerin ihmal edilebileceği kabul edilmiştir. Mamafî bu durum

henüz ispatlanmamıştır. Bu nedenle yukarıdaki eşitlik difüzyon ve kimyasal kontrol gibi iki sınırlayıcı şarta sahiptir. Bunlar uygun bir şekilde ayrı ayrı düşünülür.

Smoot (1985), char parçacığının yanması için gerekli sürenin, kömürün reaksiyon sürecinin önemli bir kısmını oluşturduğunu ve 30 mil sn ile 1 saat arasında değiştiğini bulmuştur.

Essenhight (1963), 1227 °C de, 0.1 ile 0.45 mPa'lık hava basınçlarında hesaplanan yanma süresini deneysel verilerle karşılaştırmaya çalıştı.

Kanury (1975), katı karbon parçacığı yanmasının, sıvıdan 13'lük bir faktör kadar daha yavaş olduğunu gösteren, sıvı damlacıkları ile yaptığı mukayeseyi vermiştir. Bununla beraber kömür parçacıklarının yanma süreleri, sıvı ve karbonunkiler arasında yer alır. Eğer kömürün uçucu madde miktarı yüksek ise, sıvının yanma süresine yaklaşır.

Bu çalışmaların sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

1. Gaz yanma süresi yada gazlaşma süresi tane çapının karesi ile değişir.
2. Char'ın yanma süresi karbonunkinden daha azdır.
3. Char, karbon yanması, düşük sıcaklıklarda kinetik olarak kontrol edilirken yüksek sıcaklıklarda ise difüzyonla kontrol edilir.
4. Tek parçacığın yanma süresi doğrudan doğruya, parçacığın çapı ile doğru orantılıdır.

3.4.2.1. Difüzyon kontrol ($k_0 \ll k_1$)

İşin kimyası ihmal edilirse (3.33) eşitliği çap cinsinden bir kare yasasına indirgenir. Böylece aşağıdaki eşitlik elde edilir. Burada d_0 parçacığın başlangıç çapıdır.

$$T_b = K_D d_0^2 \quad (3.34)$$

$$K_D = \frac{\rho}{3\rho_0 D_0 p_0 (T/T_0)^{0.75}} \quad (3.35)$$

Burada K_D difüzyon kontrol yanma sabiti, ρ parçacık yoğunluğu, ρ_0 hava yoğunluğu, D_0 difüzyon katsayısı, P_0 oksijenin kısmi basıncı, T_0 hava sıcaklığı, T yatak sıcaklığı, sıfır indisi normal basıncı ve sıcaklığı göstermektedir. Bu formülasyonda gram olarak gelen oksijenin yer değiştiren karbona dönüşüm faktörü yani 12/16 yer almaktadır. Hesaplama yoluyla K_D 'nin 1000 mertebesinde olduğu bulunmuştur.

Sıcaklık yükseldikçe tepkime ile tüketilen oksijen miktarı difüzyonla gelenden daha fazla olacağından, oksijen tanecik merkezine kadar ulaşamaz. Yanma tepkimesi belirli bir kabukta meydana gelir ve orta kısımda tepkime olmayan bir çekirdek oluşur. Sıcaklık arttıkça daha büyük taneciklerde yanma tepkimesi, taneciğin dış yüzeyine kadar geriler ve yanma olayı sınır tabaka difüzyon hızı ile kontrol edilir.

3.4.2.2. Kimyasal kontrollü yanma ($k_1 \ll k_0$)

Bu alternatif şart ile (3.33) eşitliği aşağıdaki şekilde yazılan bir lineer konuma dönüşür.

$$t_b = K_C d_0 \quad (3.36)$$

Burada K_C kinetik teoriden aşağıdaki şekilde yazılır.

$$K_C = \frac{(4\rho/3)(2\pi RT/M_0)^{1/2}}{p_0 e^{-E_1/RT}} \quad (3.37)$$

Burada R gaz sabiti, T yatak sıcaklığı, ρ parçacık yoğunluğu, E_1 aktivasyon enerjisidir. M_0 gaz karışımının ortalama molekül ağırlığıdır. $E_1=4$ kcal için 1500°C 'de $M_0 \cong 1$ mertebesindedir (Blyholder, 1957). Bu 1mm'lik büyük parçacıklar için kimyasal direncin ihmal edilebileceği gibi bir gerçek dışı sonucu doğurur. Bununla birlikte 10 mikrondan küçük parçacıklar için geçerlidir. Bu faktörün önemini gösteren veriyi bulmak kolay değildir. Çünkü, kontrol edilebilir deneyler bu faktörlerin önemli sayılmadığı şartlarda gerçekleştirilir ve ifadelerde bu şartlar ihmal edilir.

İki tane ek faktör göz önünde tutularak aşağıdaki şekilde verilen k_1' , efektif k_1 yerine kullanıldığında iç yanma etkisi artar. Bu şartlarda dış sınır tabaka etkisi önemsizdir.

$$k_1' = k_1 (1 + \sqrt{SD/k_1}) \quad (3.38)$$

SD/k_1 oranının bulunması önemlidir. K_1 artarsa K_C yanma sabiti azalacaktır, ancak ne ölçüde değişeceği deneylerle bulunamamıştır. Burada S her birim hacim için iç yüzey alanı, D difüzyon katsayısıdır. Diğer faktör K_D reaksiyon kontrolünün karakterinin bulunuşunda sınır tabaka etkilerini ihtiva eder. Eğer ilk yaklaşım olarak δ 'nın çevresel gaz

akışının türbilans derecesinden bulunduğunu ve r/δ oranının sabit olduğu farz edilerek (3.33) eşitliği şu şekilde yeniden yazılabilir.

$$\frac{p_0}{\rho} t_b = \frac{a}{k_1} + \frac{a^2}{2D} (1 - a/\delta_0) \quad (3.39)$$

Burada δ_0 $r = a$ için gerçek sınır tabaka kalınlığıdır. Eger δ_0 1000 ft/sn'ye kadarlık yüksek akış hızı nedeniyle yeteri ölçüde azalırsa difüzyonal direnç 10 kat azalır (δ_0 , a 'den %11 büyük iken). δ_0 , a 'dan %1 büyük iken bu direnç 100 kat azalır. Tam deneylerin bulunması için deneysel çalışma yapılmalıdır.

Griffin (1930) ve Essenhigh (1959), 700 -2000 °C arasındaki alev sıcaklığında yanma olayını incelediler. Onlara göre, düşük sıcaklıklarda ve küçük taneciklerde yüzey tepkimelerinin hızı, iç ve dış difüzyona göre çok düşükse, yanma olayını sadece yüzey tepkimeleri kontrol eder. Bu durumda oksijen kömürün en iç noktasına kadar yayılabilir ve dengeye ulaştığında bütün kömür taneciği hacminde yanma olayı meydana geldiği görülür. Bu durumda tanecikte bir çap küçülmesi olmaksızın bir bütün halinde yandığı ve küle dönüştüğü gözlenir. Bu, kimyasal kontrollü bir yanma olup genellikle 800 °C den daha düşük sıcaklıklarda meydana gelir.

3.4.3. Çok parça yanması

Çok parça faktörü, bir alev içerisinde parçacıkların başlangıç çapının 25 katı büyüklüğünde stokiyometrik bulut şeklinde, küresel kapalı bir hacim kabul edilerek işlem görür. Bu kabul ile, bir fırındakine benzer kapalı sistemdeki bulutun içinde olmanın etkisi ile oksijen konsantrasyonu, serbest atmosferdeki tek parçacıktakinin aksine artık sabit değildir ve sonuç olarak yanma zamanı artar. Tane yanmasında olduğu gibi iki uç şart düşünülebilir.

$$1. \quad k_0 \ll k_1$$

$$2. \quad k_1 \ll k_0$$

İki durumda da oksijen konsantrasyonu 1. etkendir ve oksijen konsantrasyonu için düzeltme terimi her iki durumda da aynıdır. Oksijen konsantrasyonunun değiştiği bu sonlu sistem için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\frac{dr}{dt} = \frac{p/\rho}{r/D + 1/k_1} \quad (3.40)$$

Mevcut moleküllerin sayısı ile orantılı olan kısmi oksijen basıncı, toz konsantrasyonu (D_C) ile de ilişkilidir. Bu, ocak içerisinde herhangi bir anda ve alevin herhangi bir noktasındaki konsantrasyondur. Eger D_0 başlangıçtaki konsantrasyon ise ve tam yanma için N_0 tane molekül'e ihtiyaç varsa ve N , D ağırlığındaki tozu yakmak için fazla havaya bağlı olarak aşağıdaki denklem yazılır. Burada λ kısmi fazla havadır.

$$\frac{p}{p_0} = \frac{N + N_0\lambda}{N_0(1 + \lambda)} \quad (3.41)$$

Fakat açıkça $(N / N_0) = (D_C / D_0)$ olduğundan

$$p = p_0 \frac{(\lambda + D_C / D_0)}{1 + \lambda} = \frac{p_0(\lambda + r^3 / a^3)}{1 + \lambda} \quad (3.42)$$

Burada r herhangi bir andaki yarıçaptır ve yanma süresi aşağıdaki denklemden bulunur.

$$dt = \frac{\rho(r/D + 1/k_1)(1 + \lambda)}{\lambda + r^3 / a^3} dr \quad (3.43)$$

3.4.3.1. Difüzyon kontrol

Eğer kimyasal terimler ihmal edilir ve yukarıdaki denklem entegre edilirse aşağıdaki eşitlikler bulunur. Bu yanma süresi denkleminin tek tane yanma süresi denkleminde farkı F_D çarpım faktörüdür. F_D için denklem ilk defa Nusselt tarafından tanımlanmıştır.

$$t_b = F_D K_D d_0^2 \quad (3.44)$$

$$F_D = \frac{1 + \lambda}{3\lambda^{1/3}} f(\lambda) \quad (3.45)$$

$$f(\lambda) = 2\sqrt{3} \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}}{2\lambda^{1/3}}\right) - \ln\left[\frac{(\lambda^{1/3} + 1)^3}{\lambda + 1}\right] \quad (3.46)$$

3.4.3.2. Kimyasal kontrol

Benzer olarak difüzyon terimleri ihmal edilir ve yanma süresi denklemi (dt) entegre edilirse aşağıdaki denklemler bulunur. Bu yanma süresi denkleminin tek tane yanma süresi denkleminde farkı F_C çarpım faktörüdür. F_C için denklem ilk defa Nusselt tarafından tanımlanmıştır.

$$t_b = F_C K_C d_0^2 \quad (3.47)$$

$$F_C = \frac{1 + \lambda}{6\lambda^{2/3}} g(\lambda) \quad (3.48)$$

$$g(\lambda) = 2\sqrt{3} \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}}{2\lambda^{1/3}}\right) + \ln\left[\frac{(\lambda^{1/3} + 1)^3}{\lambda + 1}\right] \quad (3.49)$$

3.5. Yataklarda Yanma

Katı yakıt yataklarındaki reaksiyon hızını kontrol eden faktörlerin araştırılması çok sayıdaki değişken bulunduğu ve aralarında etkileşme meydana geldiği için oldukça zordur. Mevcut deneysel veriler, değişken olması yanında kullanılan yakıt türü, yakıt yatağı ve deneysel metoda bağlı olduğundan problem daha da karmaşıktır.

3.5.1. Teorik çalışmalar

Mayers (1942), yakıt yatağının matematiksel olarak anlaşılmasını sağlayan ilk araştırmacıdır. Reaksiyon kinetikleri ve ısı transferini modellemek için yakıt yatağını, yatak tabanından yüzeye havanın akış yönünü izleyen tek yönlü akışa sahip permeable (geçirgen) bir katı olarak farz edip basitleştirilmiştir. Kararlı halde yanma şekli tamamen alttan beslemeli olarak alınmıştır. Isıl dengeler için, sıcaklığı yakıt yatağı yolu ve hava akış hızı ile ilişkilendirilerek, diferansiyel denklemler kurulmuştur. Bu işteki ana zorluk, yakıt yatağı ile yanma gazları arasında uygun ısı transfer katsayısının seçimindedir. Teorik ve deneysel olarak bulunan yakıt yatağı içerisindeki sıcaklık profilleri karşılaştırılmıştır. Teorik olarak bulunan değer 150 °C daha yüksektir. Bunun sebebi yanma gazı doğrultusunda ısı kaybı olmadığı kabulüdür.

Thring (1944), bir “3 bölge teorisi” ortaya koydu. Bununla daha çok kimyasal faktörlerin hakim olduğunu farz ederek uygulamada, yakıt yataklarında oluşan mutlak reaksiyon hız değerlerini hesaplamayı amaçladı. Bunun için 3 bölge gözlemini yaptı.

1. Oksijen, karbonla temastaki tabakaya difüze olur. Burada ani olarak reaksiyona girer.



2. CO kalan oksijenle hemen reaksiyona girer.



3. CO₂'in bir kısmı CO oluşturmak üzere komşu tabakaya yeniden difüze olur.



Hornsby ve Smith (1959), kömür yataklarında reaksiyona karşı bütün direncin (X_t) , X_t=X_p+X_c şeklinde ifade edileceğini ileri sürdüler. X_p ve X_c fiziksel ve kimyasal dirençlerdir.

Essenhig ve diğerleri (1957,1963), kimyasal direncin, düşük ve yüksek sıcaklık dirençleri olarak ikiye ayrılabilceğini söylediler ve fiziksel direncin, özellikle yakıt yatağının yüksek sıcaklık bölgesinde kimyasal dirençten çok daha yüksek olduğu hususunu tartıştılar.

Nag ve diğerleri (1976), yanma hızlarını elde etmek için pot fırın kullandılar ve C_p eksenli bir grafik korelasyonu kullandılar.

Smoot (1985) bir makalesinde, sabit yataklı ve yavaş hareketli yatak modelleri üzerinde az sayıda çalışma yapıldığını ifade etmektedir.

Sonuç olarak, teorik çalışmalarda, hem kimyasal, hem de fiziksel faktörlerin katı yakıt yataklarının yanmasında önemli bir rol oynadığı ve pratik bir yakıt yatağı modeli oluştururken bu faktörlerin birleştirilmesi gerektiği ifade edilmektedirler.

Tek boyutlu modelleme için başlıca basitleştirmeler şunlardır:

1. Gaz ve parçacıkların plug akışta olduğu farz edilir. Bu problemi tek boyuta indirir.
2. Kömürün gazlaştırılması için gerekli süre ihmal edilir, gazlaştırma ürünleri dikkate alınır.
3. Gaz fazı reaksiyonlarının, reaktantlarının var olacağı ana kadar (CO+O₂) veya bölgesel sıcaklıkta (CO+H₂O → CO₂+H₂) farz edilir.
4. Türbülans etkileri ve yatak içinde yavaş hareket eden gazların reaksiyonlar üzerindeki çarpışmaları ihmal edilir.

3.5.2. Deneyisel çalışmalar

Bu kısım pratik ölçümlerin bir sonucu olarak yatakların sınıflandırılması konusuna dikkat çekmektedir. Yüzyılın başlarında Celment (1914) ve Kreisinger (1917,1918), yataklarda kömür yanmasında anlaşılması zor olan karmaşık fiziksel ve kimyasal işlemleri anlamak için temel taşları oluşturmuşlardır. Daha sonraki incelemeler Audibert (1922), Nichols (1934), tarafından tamamlandı. Bu çalışmaların sonuçları daha sonra birçok çalışmalarda desteklendi (Smit, 1954; Allen, 1935; 1939; Martin, and pitsburg, 1941).

1. Yakıt yatağı ilk önce bir gaz üreticisi gibi davranır.
2. Yatak arasından akan oksijen ızgaranın ilk 100 mm üzerinde tükenir.
3. Izgaranın 100 mm üzerindeki uzaklıkta, CO₂ maksimuma erişir.
4. Yaklaşık olarak, maksimum yatak sıcaklığı maksimum CO₂ içeren ızgaranın 75-125 mm üzerine karşılık gelmektedir.
5. Yakıt yatağı yüzeyinde yanabilir gaz olarak CO en çok % 20-30 kadardır.
6. Yatak içerisinde veya yüzeyde gaz kompozisyonu, temin edilen havadan genellikle bağımsızdır.
7. Olağan yanma oranında, 150 mm den daha büyük yakıt yatağı kalınlığı faydasız görülmektedir ve daha büyük kalınlıklar endotermik reaksiyonu artırmaktadır.
8. $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ Bu, klinker oluşumunu artırıcı yönde etkileyerek yakıt yatağı sıcaklığının azalması ile sonuçlanmaktadır.

Nichols başlıca yakıt yatağını 3 tip olarak aşağıdaki gibi tanımladı. Kömür yakma sistemleri bu üç esas üzerine dizayn edildi (Arısoy, 1991).

- I. "Altıtan Besleme" burada yakıt ve hava hareketi aynı yöndedir.
- II. "Çapraz Besleme" yakıt ve hava hareketi birbirine dik açı doğrultusunda hareket etmektedir.
- III. "Üstten Besleme" yakıt ve hava zıt yönden hareket etmektedir.

Klasik olarak derin yakıt yataklarında karbon yanmasının iki bölgeden oluştuğu düşünüldü (Barnes, 1941) . Birinci bölgede asıl ürünün CO₂, ikinci bölgede esas olarak ürünün CO olduğu, iki bölge arasındaki kısımda üç gaz CO₂, CO, O₂ beraber bulunduğu düşünülür. Bununla beraber Bangham ve Thring yaptığı çalışmalarda, bir yakıt yatağında kömür yakması sırasında aşağıdaki bölgeler üzerine dikkat çekmiştir.

1. Karbon ızgarasının üzerindeki birinci veya asıl bölgede kül tabakası CO formu oluşturmak için okside edilir.

2. ikinci bölge gaz fazında, CO_2 formu oluşturmak için CO oksidasyonu gerçekleşir.
3. Son safhada yeni oluşmuş CO_2 'nin azaltılması (redüksiyonu) yer alır. Bu safha kömür partükülleriyle CO_2 'nin tepkimesidir.

3.6. Havanın Dağıtılması

Kömür yakma çalışmalarında kullanılan kamarada, hava kaynağı tam yanmanın sağlanmasında anahtar bir değişkendir. Bu yüzden, hava dağıtım yönteminin de gözden geçirilmesi gerekir.

3.6.1. Primer hava

Primer hava, doğrudan yatağa gönderilen havadır ve kararlı yanmadaki en önemli faktör olduğu gösterilmiştir. Carman (1945), yüksek primer hava hızları sınırının karbon içeren büyük oranda partikül ve gritlerin (ağır partüküller) emisyonu gibi kararsızlıklar olduğu gösterilmiştir. Bunu diğer araştırmacılarda göstermiştir (Marskel, 1946; Barnes, 1940; Rolfe, 1961). Havanın faal (live) yakıt yatağı içerisinde dağıtılması, kömür tipi ve yanma karakteristikleri ile kömür besleme gibi bir çok değişkene bağlıdır.

3.6.2. Sekonder yada alev üstü havanın dağıtılması

Forthergil (1892), duman oluşumunu önlemek için “ateş üstü hava” fikrini sunan ilk kişidir. O zamandan beri bu konuda çalışma yapan araştırmacılar, gaz ürünlerinin ve yatak yüzünden salınan gaz maddenin yanmasının tamamlanması için yatak üzerine ikincil bir havanın gönderilmesine ihtiyaç olduğunu göstermiştir. (Barnes, 1939; Bcell, 1965; Mayers, 1941). Birçok yayında hava ve kömürün yakıt yatağı içinde karıştırılmasının da çok önemli olduğu belirtilmiştir. Alev üstü hava, yanan gazlarla iyice karışacak şekilde gönderilmelidir. Ayrıca sıcaklığın kimyasal reaksiyonları başlatacak (sürdürecekt) kadar yüksek olduğu noktalarda verilmelidir.

Sonuçlar:

1. Ateş yatağı üzerindeki ikincil hava, yanmanın tamamlanması için gereklidir fakat birincil ve ikincil havanın miktarını belirlemek mümkün değildir.
2. İkincil hava kullanıldığı zaman, hava ile yakıtın tamamen karışması ve karışımın sıcaklık değerinin 700-750 °C dan fazla olduğu yerde yer alması gerekir

3.6.3. Aşırı hava

Tam yanma için, gerekli hava miktarı, teorik olarak hesaplanandan daha büyüktür. Stokiyometrik seviyenin üstündeki miktar, oksijen ile yanıcı gazları temas ettirme güçlüğüne yansır. Pratikte %30 ila 50 arasında bir fazla havanın, ısı kaybı ile CO oluşumunu dengeleyerek optimum verimliliği verdiği gösterilmiştir (Gurummel, 1938). Ancak tam yanmayı sağlamak için daha yüksek hava seviyelerde çalışmaktadır.

Macdonalds ve Murray (1955), Nag ve Mahadevan (1976), belli bir yanma aralığı için optimum fazla havayı belirlemeye kalkıştılar. Fakat sadece her yakıt yatağı, yakıt tipi v.s. için optimum bir fazla hava gerektiren nitel bir sonuca varabildiler.

3.7. Kirlenme Seviyesi

Yanmadan kaynaklanan kirlenme birçok çalışmalarda geniş bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmada sadece duman, NO_x , CO_2 , CO, SO_2 ve küldeki hidrokarbon seviyeleri ölçülmüştür.

3.7.1. Duman seviyesi

Kömür dumanı iki ana kısma ayrılabilir: Partikül süspansiyonları ve kahverengi katran buharları. Hızlı ısıtma, oksijen yakıt karışımının iyi sağlanmaması veya ortamda yeterince oksijen bulunmaması gibi hallerde hidrokarbonlar, karbon ve hidrojene parçalanır. Bu olay is oluşması açısından çok önemlidir. Yanma için yeterince zaman yoksa yakılmayan karbon tanecikleri birleşerek is oluşturur. İs oluşturan partikül parçacıkları, fırın sıcaklığı yüksek ve karışım zayıf ise hidrodinamiğe bağlı olarak dışarı atılabilir. Fırın sıcaklığı düşükse, bacadan kahverengi katran buharları atılır.

Underwood (1956), duman üreten bir fırın kullanarak 650-850 °C'lik bir sıcaklık aralığında dumanın metan ve doymamış hidrokarbonlar içerdiğini ve bunların 0.5 sn'den daha az sürede teorik havanın sadece % 60'ını kullanarak yandığını göstermiştir.

Waterhouse (1964), başka bir çalışmada (döner ızgaralı stoklayıcı üzerinde) 700 °C ve üzerindeki yüksek sıcaklık bölgesindeki yetersiz yanmadan dolayı, bütün dumanı 1.5 kg/saat'lık bir hızda yakmanın imkansız olduğunu gösterdi.

Mayers (1937), 760-800 °C bölgesinde uygun miktarda hava sağlayarak, farklı yanma oranlarında dumansız yanmanın başarılabilirliğini göstermiştir.

Dickinson (1970), bitümlü kömürlerin, düşük gazlaşma oranlı kömürlerden daha fazla duman çıkardığını, her iki kömür tipi için yanma oranı arttıkça duman miktarının azaldığını göstermiştir.

Sonuç: Duman seviyesi, ancak kamaranın yüksek sıcaklık bölgesinde uygun miktarda O_2 varsa azaltılabilir. Kömür tipi ve azda olsa kömür büyüklüğü duman seviyesi üzerinde etkilidir (Garner and Henny, 1952).

3.7.2. Azot oksitler

NO_x oluşumu (yanma esnasında) esasen, NO , N_2O ve NO_2 içerir. Bunların atmosfer kirlenmesinde önemli olduğu düşünülmektedir. N kaynağı yakıt ve havadır. %60-80 NO_x yakıttaki azottan gelir (Hakvort, 1992).

Emisyon genellikle alev sıcaklığı, fazla hava, boyler yük yüzdesi ve kömürdeki azotun bir fonksiyonudur. Kömür ve yakıcı tipi emisyon içeriği üzerinde oldukça etkilidir. Alev sıcaklığı esasen yakıcı ve boyler tasarımının bir fonksiyonudur. Kömürün azot miktarı %0.6-2.2 arasındadır. Bununla birlikte, kömürdeki bütün azotun NO_x 'e dönüşmesi gerekmez. Bazı şartlarda onun çoğu moleküler azota dönüşür. Aşırı hava artırıldığında büyük bir kısım NO_x gibi görünür, bu durumda daha sıcak ve türbilanslı bir alev üretilir. NO_x daha düşük boyler yüklerinde düşer, çünkü boyler sıcaklığı daha düşüktür. Aşırı oksijeni azaltma faydalıdır fakat, eksik (yetersiz) yanmaya yol açabilir.

NO_x reaksiyonların oluşumunda NO_x 'lerin N_2 'ye indirgenmesi, indirgeyici olmadan çok yavaş dönüşür (Martens,1884; Chen,1981; Gibs,1979). Ancak hidrojen ve hidrokarbonların bulunduğu ortamda NO , N_2 'ye amonyakın ana ürün yoluyla direk

1972). Bu etki SO_2 yokluğunda veya çok az olması durumunda söz konusu değildir (Martens, 1983).

Pursell vd (1980), sabit yataklardaki NO_x emisyonu seviyesini incelemek amacıyla sabit yataklı bir pot fırın tasarladı ve ürettiler. Onların tüm araştırma programı tamamlanmadığında ilk bulguları şu sonuçları verdi:

- I. NO oluşumu, yanma süresi esnasında üniform değildir. NO oluşumu, yanma en üst hıza ulaşmadan, daha yanmanın ilk aşamalarında maksimuma ulaşır ve sonrada tedricen azalır.
- II. Aşamalı hava ilavesi, NO kontrolünde potansiyel bir etkili vasıtasıdır. Gaz konsantrasyonları, azalan yatak stokiometrisi ile doğrusal olarak azalır.
- III. Yatak ısısının salınmasını artırmak NO_x emisyonunu artırır.

Son zamanlarda Ford ve Cooke (1990), kömürü yakan ünitelerden yayılan NO_x emisyonunun kontrolünü detaylıca gözden geçirdiler. Genelde, aşamalı yanmanın NO_x emisyonunu azaltmada etkili bir teknik olduğu gösterilmiştir.

Isıl NO_x 'in oluşması, gaz dolaştırma ve havayı nemlendirme ile azaltılabilir. Bu teknikten ayrıca, O_2 miktarı da azaltarak, yakıt azotu dönüşümü azaltılabilir. Boylerlerde NO_x emisyonu problemi çok geniş bir şekilde değiştiğinden tipik bir sonuca ulaşmak güçtür.

Maloney (1983), sabit bir yatak ızgarası kullanarak yaptığı bir çalışmada, düşük oksijen çıkış düzeylerinde NO_x 'in 120 ppm'e kadar düştüğünü göstermiştir. NO_x emisyonunu azaltmada tercih edilen yol yanmayı değiştirmektir. Ancak aşamalı yanma ve uçucu gazlara amonyak enjeksiyonu da halen tercih edilen bir metottur.

3.7.3. CO Oluşumu

CO oluşumu eksik hava ve düşük sıcaklıklarda artmaktadır (Arısoy, 1990; Selçuk ve Pekyılmaz, 1983). Alttan beslemeli sabit ızgaralı yatakta, hem uçucu madde yanması, hem de kok yanması ile yatak içerisindeki birinci havadaki oksijen tükenir. Daha yukarı tabakalarda oluşan CO_2 gazı kok ile CO'ya indirgenir. Bu nedenle yatak üstü ikinci hava verilerek yanmanın tamamlanması sağlanır. Yatak yüzeyinden uzaklaşıldıkça CO oranı düşer. Kamaranın arka kısmında hemen yatak üzerinde CO oluşurken orta ve ön kısmında, yatak yüzeyinden daha yükseklerde CO oluşmu düşmektedir (Barnes, 1939).

3.7.4. SO_x Oluşumu

Kükürt oksitler önemli atmosferik kirleticilerden biridir. Yanma sonucu ve bilhassa güç santrallerinde ortaya çıkar. SO₂, SO₃, sülfüroz asit (H₂SO₃) ve kükürt tuzları önemli bileşenlerdir. Güç santrallerinde SO₂ emisyonu SO₃ emisyonunun 40 ile 80 katı kadardır. SO₂, havada SO₃, kükürt tuzları, sülfirik ve sülfüroz asidine dönüşür. Havadaki kükürt di oksit 3 ppm den sonra tehlikelidir.

Yakma sistemlerinde yatak sıcaklığının belirlenmesinde SO₂ oluşumu önemli rol oynar. Genelde yatak sıcaklığı optimum SO₂ sağlayacak şekilde belirlenir (Urkan,1986).

Birçok çalışmada SO₂ yayılımını ölçen araştırmacılar sisteme kireçtaşı ve dolomit ilave ederek SO₂ kontrolü için modeller geliştirdiler (Ekinci vd 1985; Atakül vd 1986).

3.8. Kabaran Kömür Yakılırken Çalkalamanın Etkileri

Bilhassa tek parça hazneli alttan beslemeli stokerlerde yüksek kabarma özelliğine sahip kömürler kullanıldığı zaman, kok bloklarının el ile sık sık dikkatli bir şekilde parçalanması gerekir. Şişleme süresince kabul edilmez kirlilikteki duman emisyonu olabilir. Murrery (1957), bir kaç çeşit kömür için şişlenmenin etkilerini incelenmiştir. Çalışmalarında bir ölçü cihazı kullanarak optimum yanma şartlarını için esasları ve işletme şartlarına bağlı olarak stokerin performansını belirlemiştir. Kuvvetli bir şekilde kekleşen ve yüksek küllü kömürler için daha sık şişleme gerektiği tespit edilmiştir.

Dunningham ve Grumel (1938), kabaran kömür kullanılırken yatak kalınlığı üzerinde kül oranının etkilerini inceledi. Barnes (1939), ise kabaran kömür kullanarak gaz emisyon oranları ve sıcaklıklarının yakıcı içerisindeki dağılımını inceledi. Burke ve Sparhan (1952), gaz üretimi için çalkalama ve kömür seviyesinin etkilerini incelemiştir.

Bütün bu çalışmalar özellikle kekleşen kömürler kullanıldığı zaman herhangi bir tür sürekli çalkalama sisteminin gerekliliğini göstermiştir. Yapılan tavsiyeler, esas fonksiyonu üniform ve geçirgen bir yakıt yatağı muhafaza etmeyi amaçlayan birçok farklı çalkalama mekanizmaları meydana getirmiştir.

Wright ve Spicer (1942), bir küçük stokerde kömür parçacıklarının bütünleşmesini elimine etmek için, havanın hareket etkisi ve yavaş oksidasyon düşüncesinin üzerine kurulmuş bir yol önermiştir. Bunu sağlamak için rotorun altına hava gönderilmektedir. Keza onlar segregasyon tanzim etmek için kömür besleme sonsuz

vidasını daha hızlı devir yapacak şekilde alttan beslemeli stokeri değiştirmişlerdir. Sonuç olarak kuvvetli kabaran kömürlerin bu yeni stokerde iyi bir şekilde yandığı belirlenmiştir. Bu uygulama koklaşmanın önlenmesinde küçük bir etkiye sahip olan ön oksidasyon hava üfleme borusuz yatay dönüşlü kamara kullanmanın temelini oluşturmaktadır.

3.9. Kömürün Yanması Üzerinde Kabarmanın Etkisi

Yüksek kabarma özellikli kömürler yakılırken kok bütünleşmesi oluşarak kömürün hava ile teması zayıflar ve yanma güçleşir. Kömürün şişmesi, uçucu madde çıkışı esnasında olmaktadır. Şişme olayı; ısıtma hızının, ulaşılan sıcaklığın ve çevresindeki gazın bileşiminin fonksiyonudur.

Nichols, Rice Landry ve Ried (1937), katı madde ve su kullanarak kömürün kekleşme özelliğini azaltmaya çalıştılar. Bu katkıların kekleşmesi zayıf kömürlerde kekleşmeyi azalttığı, kömürün kekleşme yatkınlığı fazla ise önemsiz kaldığını buldular.

Yanma işlemi esnasında, bir kere kek oluşumu başlarsa, oluşan plastik tabaka, kömür parçacığına havanın difüze etmesini önler ve kek yanması için sağlanan hava yetersiz kalır. Geçirgenlik de, giren yakıtın basıncı sebebi ile azalır. Bu da kok oluşumunu tahrik eder ve sürekli bir ağaç oluşturur (Brever, 1942; Sherman, 1937).

Sherman ve Kaiser (1938), güçlü kekleşme özelliğine sahip olan kömürün koku yukarı doğru 2 feet uzadığını ve sonra da Alttan beslemeli Stoker'in üst kısmında koptuğunu bildirmişlerdir.

Zane ve Yaney (1940), 500 ila 900 °C'de çeşitli yakıtlar üzerinde yanabilme testleri yapmışlardır. Her tip stoker, her cins yakıtı yakmayacağı sonucuna varmışlardır.

Sonuçlar:

1. Kabaran kömürler, kekleşmiş ağaç oluşumuna yol açar ve yanma işleminin güçleşmesine yol açar.
2. Kömürün kabarma özelliği, kullanım esnasında yada öncesinde kömürün havalandırılmasıyla azaltılabilir.
3. Bir yakıcıda bütün kömür cinslerini yakmak mümkün değildir.
4. Kekleşme özellikleri, kömür tipinin güçlü bir fonksiyonudur.
 - a) Şişme indirgeyici ve nötr ortamda 700°C civarında en yüksek değerine ulaşır
 - b) Tek kömür taneciğinin şişme sayısı ile ocak atmosferindeki kömürlerin şişme derecesi arasında bir ilişki bulunmaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Deney Düzenekinin Tanıtılması

Dünyada kömüre dayalı enerji üretiminde sürekli artış gözlenmektedir. Buna, dünyadaki fosil kaynaklı rezervler içerisinde kömürün en büyük paya sahip olması ve aynı zamanda kömür yataklarının yeryüzünde homojen bir dağılım göstermesinin etkili olduğu söylenebilir. Ayrıca, binaların ısıtılması için gerekli olan ısı enerjisinin kömürden karşılanması, büyük bir potansiyel oluşturmaktadır. Bu nedenlerle, kömürün daha iyi yakılmasıyla ilgili çalışmalar artan bir şekilde devam etmektedir.

Evlerdeki kalorifer kazanlarından, termik santrallara kadar çeşitli boyut ve amaçta kazan ve fırınlarda kömür yakılmaktadır. Kömürün daha iyi yakılabilmesi amacıyla değişik tip yakma sistemleri geliştirilmiştir. Bu yakma sistemlerinde yakıcı bölümün işlevi, yakıt ve havayı istenilen oranda iyi bir şekilde karıştırmak ve kararlı bir şekilde yanmayı devam ettirmektir. Bölüm 2'deki literatür çalışmasında anlatılan kömür yakma sistemlerinin hemen hepsinde var olan bazı olumsuzluklar aşağıdaki şekilde özetlenebilir :

- a) Pülverize kömür yakma sistemlerinde kömürün daha önceden toz haline getirilmesi gerekir. Kül erimesi sonucu, konveksiyon yüzeylerine kül yapışarak tıkanmalara sebep olmaktadır. Tıkanmaları önlemek için duvar yakınlarındaki sıcaklığın düşük tutulması tavsiye edilmektedir.
- b) Akışkan yatakta yakma sistemlerinde, yüksek sıcaklıklarda NO_x oluşumunun artması ve kül yapışma sıcaklığına yaklaşılması nedeni ile yatak sıcaklığı sınırlıdır. Düşük sıcaklık ise kazan verimini azaltmaktadır.
- c) Sabit yatakta yakma sistemlerinde, elle beslemeli olanların kapasiteleri sınırlıdır ve sistemin performansı büyük ölçüde ateşçiye bağlıdır. Mekanik stokerlerde ızgara üzerine yayılan kömür tanelerinin birbirine göre bağıl hareketleri yok denecek kadar düşüktür.

Yüksek kabarma özellikli kömürler yakıldıkları zaman kok blokları oluştururlar. Üniform ve geçirgen bir yakıt yatağı sağlamada en etkili yol, oluşmuş kok bloklarının sürekli olarak parçalanmasıdır. Mevcut stokerler kok bloklarının oluşmasını önleyici etkili bir mekanizmaya sahip değildir. Gerçi alttan beslemeli stokerlerde kömür besleme hızının

etkisi ile kömür taneleri sürekli hareket etmektedir. Ancak bu hareket kok blokları oluşumunun önlenmesi için yeterli bir hareket değildir. Elle beslemeli ızgaralı ocaklarda kok bloklarının parçalanması için kömür yatağının fazla karıştırılması durumunda, ızgaradan düşen yanmamış kömür kaybı fazla olur. Sonuç olarak, bilinen kömür yakma sistemlerinde yüksek kabarma özellikli kömürler, yüksek bir verimle yakılamamaktadır.

Döner bir kamara kullanan mevcut çalışmanın ilk amacı, yüksek kabarma özellikli kömürlerin yanması sırasında oluşan kok bütünleşmesini önleyerek daha iyi yakılabileme şartlarını araştırmaktır. Bu nedenle, bu çalışmada yeni bir kömür yakma düzeneği tasarlanmış ve “döner başlıklı yakma sistemi” olarak tanımlanan düzeneğin imalatı gerçekleştirilmiştir.

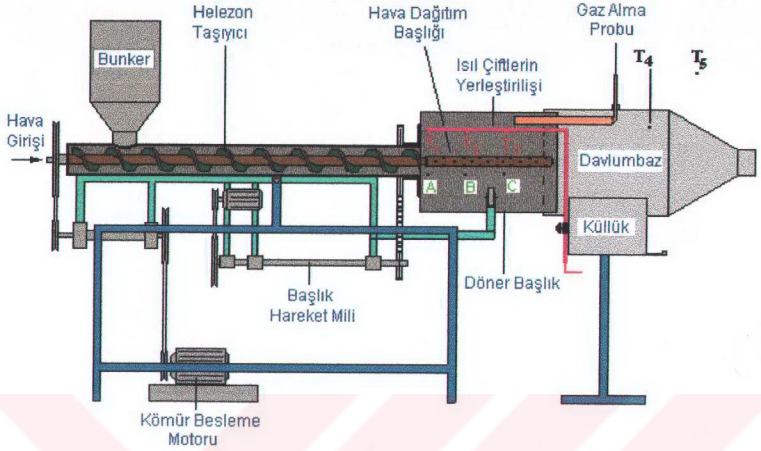
4.1.1. Döner yanma odası

Döner başlıklı yakma sistemi şematik olarak Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Prototip olarak yapılan bu yakma sisteminde, yaklaşık ortalama ısı değeri 5000 kcal/kg olan linyitin, 7 kg/saat’lık besleme hızı ile yaklaşık olarak 40 kW güç elde edilmesi öngörülmüştür.

Başlık tasarımı için, daha önce yapılmış kömür yakma sistemlerinin yanma odası ölçüleri referans olarak alınmıştır (Mak. Müh.Odası Yay., 1983). 40 kW’lık güç için, 36 cm çapı ve 40 cm uzunluğu ile yaklaşık 40 litre hacimlidir. Bu başlık ölçülerine ve yatak eğimine bağlı olarak, önce 7 kg/h kömür besleme hızı için başlıktaki yatak hacmi ve kömürün başlıkta kalma süresi hesaplandı. Yatak hacmi en az 5 dm³, en çok 20 dm³ ve kalma süresi en az 35 dk, en fazla 130 dk olarak bulundu. Hesap yöntemi ile ilgili bilgi Kısım 4.1.3.4’de verilmiştir.

Kömür yataklarında yanma süresi, tek tane yanma süresinden daha fazladır (Nusselt1932; Essenhigh 1957). Tek tane yanma süresinin kömür tipi ve yakma sistemine bağlı olarak bir saate kadar çıkabildiği (Smoot 1985) dikkate alınırsa, hesaplanan kalma süresi değerlerinin yeterli olduğu söylenebilir.

Yakma başlığı, dış çapı 37 cm olan 5 mm kalınlığında C 10 çelik borudan yapıldı. Deney setinin gövde konstrüksiyonunda 1x30x30 ve 1x30x40 mm lik profil malzeme kullanıldı. Gövdenin uzunluğu 160 cm, genişliği 55 cm, yüksekliği 90 cm olarak yapıldı.



Şekil 4.1. Döner Yanma odalı kömür yakma sisteminin şematik görünüşü

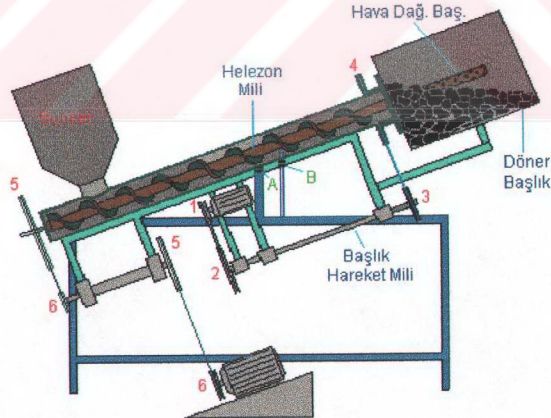
Yakma başlığının döndürülmesinde gücü 800 Watt, devir sayısı 900 d/dk olan tek fazlı 220 Volt gerilimle çalışan motor kullanıldı (Şekil 4.2). Bu motora akuple bir sonsuz vida sistemi ile geçirilerek motor çıkış milinden 20 d/dk'lık devir alınmaktadır. Motor çıkış mili üzerine diş sayıları sırasıyla 12, 14, 16, 18, 21 ve 24 olan 6 adet dişli yerleştirilmiş olup (1 nolu dişli), dişliler motor mili ile beraber dönmektedir. Yakma başlığına hareket veren mil, hareketini bir zincir aracılığı ile bu dişlilerden alır. Milin bu ucundaki dişli diş sayısı 50 dir (2 nolu dişli). Milin dönme hareketi, milin başlık tarafında bulunan ve diş sayısı 14 olan bir zincir dişli aracılığı ile (3 nolu dişli) yakma başlığı üzerinde bulunan ve diş sayısı 55 olan dişliye verilerek başlık döndürülür (4 nolu dişli). Başlığın devir sayısı, başlık hareket motoru üzerindeki 6 adet farklı diş sayısına sahip olan dişlilerden vitesli bisikletlerde olduğu gibi değiştirilir. Hareket bu dişlilerden en küçük olanı ile verildiğinde başlık 1.6 d/dk'lık en düşük devir ile dönmektedir.

4.1.2. Helezon taşıyıcı

Bu sistemde kömür, bir helezon taşıyıcı tarafından bunkerden başlığın içerisine taşınmaktadır. Başlığa taşınacak kömür tanelerinin büyüklükleri dikkate alınarak helezon yapımında çapı 10 cm, uzunluğu 120 cm, kalınlığı 6 mm olan C 10 çelik boru kullanıldı. adımı 11 cm olan helezon taşıyıcıda mil olarak, 1 inçlik boru kullanıldı.

Kömür besleme sisteminde çapları 30 cm olan iki adet kasnak bulunmaktadır; bunlar hareket alan kasnaklardır (5 nolu kasnaklar). Ayrıca biri kömür besleme motoru üzerinde, diğeri ara mil üzerinde iki adet kasnak demeti bulunmaktadır; bunlar hareket veren kasnaklardır (6 nolu kasnaklar). Bu farklı çaplardaki kasnaklardan helezon taşıyıcı miline hareket verilerek milinin devir sayısı değiştirilmekte, buna bağlı olarak helezon taşıyıcının besleme hızı değiştirilmektedir.

Sistemin hareket elemanları, A eksenine göre eğimi değişebilen tabla üzerine yerleştirilmiştir. Eğim açısını değiştirmek için B vidası gevşetilip hareketli tabla yatay düzleme göre istenilen açıya ayarlandıktan sonra tekrar sıkılmaktadır. Böylelikle yanma odası yatak eğimi ayarlanabilmektedir



Şekil 4.2. Eğimli konumda kömür yatağının görünüşü

Eğim açısının değiştirilmesi ile yatak hacmi, yataktaki kömür miktarı ve kömürün yakma kamarası içerisinde kalma süresi etkili bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Şekil 4.2'de kömürün yatak içerisindeki duruşu görülmektedir.

4.1.3. Hava dağıtım başlığı

Mekanik beslemeli ızgaralı ocaklarda hava, kömür besleme şekline göre prensip olarak üç değişik biçimde gönderilir. Üstten beslemede, kömür ve havanın akışı ters yöndedir. Alttan beslemede, kömür ve hava paralel olarak yukarıya doğru hareket ederler. Çapraz beslemede, kömür yatay hareket ederken, hava buna dik yukarı doğru hareket eder. Her üç tip besleme şeklinde birinci hava, kömürün sürekli temas halinde bulunduğu ızgaralar arasından gönderilir. Bu ocaklarda, özellikle alttan beslemeli olanlarında, külü düşük yumuşama özelliğine sahip kömürler kullanılması durumunda, curuf teşekkülü nedeniyle tıkanmalar meydana gelmektedir. Hava giriş kanallarının tıkanmaması için ocak sıcaklığının kül erime sıcaklığının altında tutulması gerekir. Yapılan çalışmalar yatak yanma sıcaklığının üst sınırının, kül erime sıcaklığının 250 °C altında olduğunu göstermektedir (Abbi, vd 1978). Char sıcaklığının ocak sıcaklığına göre 150-200 °C daha yüksek (Davidson and Avedisian 1973) olduğu düşünülürse, kül yumuşama sıcaklığının çok altındaki sıcaklıklarda bile yapışma ve yığılma görülebilir. Bu nedenle kül erime sıcaklığı çok düşük olan kömürler, bu ocaklarda verimli bir şekilde yakılamamaktadır. Eğer soğuk bölgeler uygun şekilde ayarlanmamışsa karbon yanmasının tamamlanması imkansızdır.

İyi bir yanmada, sağlanan havanın faal yakıt yatağı içerisinde dağıtılması önemli bir yer tutar. Mevcut çalışmalarda yatak üstü hava ve birinci hava miktarlarının ayarlanması ve bunların dağıtılmasında farklı yöntemler uygulanmıştır. Birinci havanın yataktaki bölgelere göre uygun olarak dağıtılması önemli bir problemdir. Hava miktarının yeni tutuşmaya başlayan kömür bölgelerine, akkor haldeki bölgeye ve yanmanın büyük ölçüde tamamlandığı bölgelere dağıtımının teorik olarak henüz açıklanması yoktur. Hava dağıtımının kontrolü her zaman problem olmuştur. Bu nedenle hava dağıtımı, yakıt tipi, yanma karakteristikleri ve yakma sistemine göre daha çok deneysel verilere göre düzenlenmiştir. İkinci havanın, yanan gazlarla iyice karışacak şekilde ve sıcaklığı kimyasal reaksiyonları sürdürecekt kadar yüksek olan bölgelere gönderilmesi amaçlanmıştır.

ve sıcaklığı kimyasal reaksiyonları sürdürecektir kadar yüksek olan bölgelere gönderilmesi amaçlanmıştır.

Hava dağıtım başlığı, helezon taşıyıcının borudan yapılmış olan mili ucuna vidalanmıştır ve döner yanma odasının eksenini boyunca yer almaktadır. Dolayısıyla hava yanma odasının ekseninden, çok noktadan radyal yönde yüksek hızla gönderilmektedir. Hava dağıtım başlığının arka kısmı kömür yatağı içerisinde bulunduğundan, bu hava dağıtım şekli ile hem birinci hem de ikinci havanın temini aynı hava dağıtım başlığından sağlanmıştır (Şekil 4.2). Böylece, gönderilen toplam hava miktarının kontrolünde büyük avantaj sağlanmaktadır.

Bir kömür yatağında artan kömür miktarına bağlı olarak, kömür yatağı içerisine gönderilen birinci hava miktarının artırılmasını gerekir. Artan eğime bağlı olarak döner yakma başlığı içerisindeki kömür miktarı da artar. Eğimin değişmesi, aynı zamanda hava dağıtım başlığının kömür hacmi içerisinde kalan kısmının uzunluğu üzerinde de etkilidir. Artan eğim ile hava dağıtım başlığının kömür yatağı içerisinde kalan kısmı arttığından, yataktaki kömür hacmi ile orantılı olarak birinci hava miktarı da kendiliğinden artmaktadır. Kömürün yanma başlığında kalma süresini ve yatak hacmini arttırmak için yanma başlığının açık ağzına, 5 cm genişliğinde bir flanş geçirilerek bir seri deney gerçekleştirilmiştir. İleride Kısım 4.3.2.9 da ayrıntıları verilecek olan bu deneylerde ihtiyaç duyulan, birinci havadaki artış da otomatik olarak sağlanabilmektedir.

Hava çıkış deliklerinin küçük olması jet etkisi yaparak ikinci havanın çok yüksek bir hızla çıkmasını sağlar. Yaklaşık 50 m/s hızla çıkan hava ile yanma ürünleri hızla kömürden uzaklaştırılır. Hızlı hava çıkışı ile havanın uçucu gazlarla daha iyi karışması sağlanır. Gaz yanmasında kimyasal reaksiyonların başlayabilmesi için, ikinci havanın sıcaklıklarının yüksek olduğu bölgelere gönderilmesi gerekir. Bu sistemde, yanma başlığının orta ve ön kısmının eksen boyunca sıcaklığı oldukça yüksektir. İkinci havanın yanma odasında yüksek sıcaklıklı bölgelere gönderilmesi, yine sistem için kendiliğinden sağlanan bir avantaj olduğu söylenebilir.

Deneyler esnasında iki farklı hava dağıtım başlığı kullanıldı. Bu başlıklardan ilki 20 mm çapında paslanmaz çelikten yapılmış ve helezon taşıyıcı miline vidalanmıştır. Hava iç çapı 14 mm olan bu hava başlığının çevresine açılan 3 mm çapındaki 24 adet delikten

4.2. Ölçümler ve Kontrol Teknikleri

Resim 4.1’de görülen gerekli cihaz ve kontrol düzenekleri kullanılarak kamara içerisinde sıcaklık dağılımı, yanma verimi ve baca gazı emisyonu ile külde yanmayan madde miktarı belirlenmektedir. Ölçülen ve belirlenen miktarlar, temel parametreler olarak alınan “kömür debisi”, eğime bağlı olan “kömürün yatakta kalma süresi” ve “hava debisi” göz önünde tutularak değerlendirilmektedir.



Resim 4.1. Deney seti ve ölçüm cihazlarının görünüşü

4.2.1. Hava miktarı ve dağıtımı

Deney düzeneğinin silindirik yanma kamarasının eksenine yerleştirilen, yanal yüzeyleri delik, boru şeklindeki “dağıtıcı başlık” ile yanma havası verilmektedir. Paslanmaz çelikten muhtelif ölçülerde imal edilen hava dağıtıcı başlık, kömür besleme helezonunun bunker tarafındaki ucundan aldığı havayı aktaran 1 inç’lik borudan yapılmış milinin yanma odasına açılan ucuna vidalanmıştır. Benzer çalışmalardan farklı olarak

yapılmış milinin yanma odasına açılan ucuna vidalanmıştır. Benzer çalışmalardan farklı olarak havanın birçok olumsuzluğu giderecek şekilde beslenmesi, bu deneysel çalışmanın ayırt edici temel farklılığı ve özelliğidir. Dağıtım sisteminin avantajları Kısım 4.1.3 'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Gerçek çalışma şartlarında, deney düzeneğinden farklı olarak yanma için yeterli basınçlı havanın, kompresör yerine kapasiteye uygun bir radyal fan ile sağlanması ekonomik açıdan daha uygun olacaktır.

4.2.1.1. Hava debisi ölçme ve kontrolü

Yanma için gerekli olan hava bir kompresörden sağlanmaktadır. Hava akışında dalgalanmaları önlemek ve sabit basınçta hava akışı sağlayabilmek için, kompresör çıkışına bir basınç regülatörü yerleştirilmiştir. Regülatör çıkış basıncı kompresörün işletme basıncının aşağısına ayarlanmış, sistem sabit basınçlı hava ile kesintisiz beslenmiştir.

Hava debisinin ölçülmesinde bir British BS1042, Part1, 1984 standardına göre yapılmış orifis ve eğik manometre kullanılmıştır. Orifisin üst akım ve alt akım bölgeleri arasındaki su yüksekliği olarak basınç farkı ile kütsel debi arasındaki ilişki için, enerji denklemi, süreklilik denklemi ve bernouilli denkleminde yararlanılarak aşağıdaki ifade verilmiştir (Cussons tech.,1994)

$$Q = 0.2087 C Z_D Z_R \epsilon E d^2 (h/\rho_H)^{0.5} \quad (\text{lt/saat}) \quad (4.1)$$

$$Q = 9.992 (h)^{0.5} \quad (\text{m}^3/\text{saat}) \quad (4.2)$$

Burada;

Q : Havanın hacimsel debisi (m^3/saat)

d : Orifis çapı (mm)

D : Orifisin önündeki boru çapı (mm)

ρ_H : Orifisin önündeki hava yoğunluğu (kg/m^3)

h : Manomatreden okunan fark basınç (mm H_2O)

P : Orifisin önündeki mutlak basınç (bar)

C : Orifis katsayısı

Z_R : Reynolds sayısı düzeltme faktörü

Z_D : Boru boyut düzeltme faktörü

ϵ : Genişleme faktörü

E : Hız düzeltme faktörü

Denklem çıkışı ve ölçümle ilgili geniş bilgi Ek 1'de verilmiştir.

4.2.1.2. Hava dağıtımı ve kontrolü

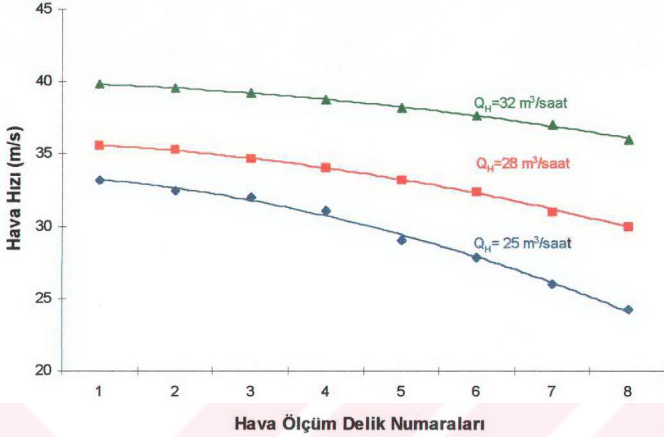
Hava dağıtım başlığına gönderilen havanın debisi, ½ inç çapındaki bir küresel vana yardımıyla kontrol edildi. Hava dağıtım başlığına gelen havanın kamara içerisindeki dağılımı Testoterm 4400 model 0.6-40 m/s hız aralığında ölçme yapabilen bir anemometre kullanılarak ölçüldü. Ölçümlerde anemometre mili, hava çıkış deliklerine dik konumda ve deliklerden 5-10 mm uzaklıkta tutuldu. Cihazın gösterge ekranındaki rakamlar kararlı duruma gelince okunan değerler kaydedildi.

Başlık üzerine açılmış ve eşit çaptaki hava çıkış delikleri üzerine tutulan anemometrede hava çıkış hızlarının, başlığın ön kısmından arkaya doğru gidildikçe arttığı görüldü (Şekil 4.3). Ölçülen değerler Tablo 4.1’de verilmiştir. Havanın büyük bir kısmı dağıtım başlığının arka kısmında bulunan deliklerden çıkması nedeniyle ön kısımdaki deliklerden daha düşük basınçta çıkmakta, tabiatıyla ön kısımdaki deliklerden çıkan hava hızı düşmektedir. Düşük hava debilerinde ön taraftaki deliklerden çıkan havanın hızındaki azalma daha fazla olmaktadır. Sonuçta, hava dağılımının, başlıktaki hava çıkış delik çaplarının değiştirilmesiyle kontrol edilebileceği açıkça görülmektedir. Bu hava dağıtım şeklinin sunulan yakma sistemi için, birtakım avantajları olan bir hava dağıtım şekli olduğu aşağıdaki sonuçlardan anlaşılmaktadır.

1. Sistemin sıfırdan büyük eğim açılarında çalıştırılması durumunda, döner kamaranın arka kısmında yatak derinliği artmakta ve bu kısımda daha fazla kömür toplanmaktadır.
2. Sistemin eğim arttıkça yatak içerisindeki kömürün; hava dağıtım başlığından hava çıkışına karşı oluşturduğu direnç önden arkaya doğru artmaktadır.
3. Hava dağıtım başlığının arka kısmından çıkan hava hem yatak altı (birincil=primer) havayı hem de yatak üstü (ikincil=seconder) havayı oluştururken, uç kısımdan çıkan hava sadece yatak üstü havayı oluşturmaktadır.

Tablo 4.1. Hava dağıtım başlığı deliklerinden çıkan havanın, deliklerdeki hız dağılımı

Delik No	1	2	3	4	5	6	7	8
$Q_{H1}=25 \text{ (m}^3\text{/saat)}$	33.2	32.5	32	31.4	29	27.8	26	24.2
$Q_{H2}=28 \text{ (m}^3\text{/saat)}$	35.6	35.3	34.7	34	33.2	32.4	31	30
$Q_{H3}=32 \text{ (m}^3\text{/saat)}$	39.8	39.6	39.2	38.7	38.2	37.6	37	36



Şekil 4.3. Başlık çıkışındaki hava hızı dağılımı

4.2.2. Sıcaklık ölçümleri

Sıcaklık ölçümlerinde Thepra 2000 model digital göstergeli cihaz kullanıldı. Bu cihaz, 0-2000 °C arasındaki sıcaklıkları doğrudan ölçebilecek kapasitede olup elle otomatik taranabilen 6 kanala sahiptir. Ölçümlerde K tipi (Kromel-Alumel) tipi ısıl çiftler kullanıldı. Cihaz kalibrasyonu bu ısıl çiftlere göre yapılmıştır.

Deneyler esnasında Şekil 4.1’de gösterilen 4 noktadan sıcaklık ölçümleri yapıldı. Burada T_1 , T_2 , T_3 sıcaklıkları döner kamara içerisindeki tabandan itibaren 5, 20 ve 35 cm uzaklıktaki en üst bölgelerdeki sıcaklıkları, T_4 ise başlıktan çıkan gaz sıcaklığını göstermektedir. Yakma başlığı içerisinde, deneyler boyunca sıcaklığı ölçülecek noktalarda sürekli kalan ısıl çiftlerin her biri seçilerek o noktadaki sıcaklık okunmaktadır. Char sıcaklıklarını ölçmek amacıyla döner başlık üzerine ısıl çiftleri yerleştirmek için 2 mm çapında 3 adet delik açıldı (Şekil 4.1 A, B, C delikleri). Bu delikler başlıkta en üst konuma geldiğinde ısıl çiftlerin ucu deliklerden içeriye uzatıldı. Başlık döndürülerek ısıl çiftler başlıkta en alt konuma geldiğinde ısıl çiftlerin yerleştirildiği bölgelerdeki char sıcaklıkları okundu.

4.2.3. Küldeki yanabilir madde miktarının bulunması

Yanmada küldeki yanmayan madde miktarı sabit ağırlık yöntemi kullanılarak bulundu. Bu yöntemde kül örnekleri öğütülüp yaklaşık olarak aynı boyuta getirilir. Yıkamıp 105 °C'de kurutulan porselen krozeler birer saat aralıklarla tartılarak sabit ağırlığa getirilir. Sabit ağırlıktaki krozelere yaklaşık 10 gr kül örneği konulur. Kül içeren kroze etüve tekrar konur, nemi uzaklaştırılarak yine bir saat aralıklarla tartılır, sabit ağırlık belirlenir. Sabit ağırlığa gelen örnekler 700±20°C'ye ısıtılmış fırında 4 saat bekletilir. Örnekler fırından çıkarılıp tamamen soğutulduktan sonra tartılır. Sabit ağırlığa ulaşuncaya kadar bir saat aralıklarla tartma işlemine devam edilir. Sabit ağırlık değerine gelen örneklerin yanmayan madde miktarları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\% \text{ Yanma} = \frac{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} 100$$

Kroze ağırlığı = m_1 (gr)

Nem giderildikten sonra Kroze + Kül = m_2 (gr)

770 ° C'de yakıldıktan sonra Kroze + Kül = m_3 (gr)

4.2.4. Baca gazı emisyonları ve yanma veriminin ölçülmesi

Baca gazı bileşenlerinin ölçümlerinde MRU marka 95/3 CE model baca gazı analiz cihazı kullanıldı. Bu cihaz ile kalorifer sitemlerinde yakılan her türlü sıvı ve katı yakıtların baca gazı emisyonları ve yanma verimi ölçülebilmektedir (Resim 4.2).

Bu cihazda ölçümünden önce yakıt cinsi seçildiğinde cihazın kalibrasyonu seçilen yakıtta göre otomatik olarak yapılmaktadır. Yanma deneyleri esnasında cihazın gaz alma probu döner başlıktan 1.5 m uzaklığa, baca borusu içerisine yerleştirilir. Cihazın ekranında görülen emisyon değerleri kararlı bir duruma gelince bu değerler, cihaz yazıcısından alınmaktadır.



Resim 4.2. Baca Gazı Emisyonları ve Verim Ölçüm Cihazı

4.3. Deneyin Yapılışı

Yakma sisteminin kapasite, çalışma şartları ve performansını incelemek için yapılan deneysel çalışmalar, soğuk ve sıcak deneyler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

4.3.1. Soğuk deneyler

Soğuk deneyler, yakma sisteminin kapasite ve çalışma şartlarının belirlenmesi ile ilgili çeşitli deneylerden oluşmaktadır. Bunlar kömür besleme hızı ölçümleri ve hava debisi ölçümleri olarak ele alınabilir. Kömür debisi ölçümlerinde, farklı ortalama büyüklükteki kömürlerin kamarada kalma zamanı, oluşturdıkları yatak hacmi ve yataktaki kömür miktarları, kömür debisi, eksen eğim ve başlık devir sayısının fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Ölçüm sonuçları Tablo 4.2 ve Ek 2’de verilmiştir.

Hava akış dağılımını belirlemek için, hava akış hızları her hava çıkış deliği için ayrı ayrı ölçülmüş, ayrıca toplam debi belirlenmiştir. Hava akışıyla ilgili ölçümler kısım 4.2.1.1 ve 4.2.1.2’de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Tablo 4.2 . 9.5-19 kömür büyüklüğü ve 0.934 kg/dm³ yığın yoğunluklu Şırnak-Cizre kömürünün döner yakma başlıklı sistemdeki soğuk deneme sonuçları

Eğim Açısı α (derece)	Kömür Debisi Q (kg/saat)	Başlık Devir Sayısı n (dak ⁻¹)	Kömür Yatağı Hacmi (dm ³)	Başlıktaki Kömür Miktarı (kg)	Başlıkta Kalma Süresi t (dk)
10	5.1	1.6	4.96	4.25	50
10	5.1	4.7	4.67	4.00	45
10	6.7	1.6	5.13	4.40	39.4
10	6.7	4.7	4.9	4.20	35.6
10	9	1.6	5.25	4.50	30
10	9	4.7	5.02	4.30	27.7
20	5.1	1.6	9.45	8.10	95.29
20	5.1	4.7	9.22	7.90	88.1
20	6.7	1.6	9.57	8.20	73.4
20	6.7	4.7	9.22	7.90	68.2
20	9	1.6	9.71	8.32	55.5
20	9	4.7	9.57	8.20	50.8
30	5.1	1.6	18.2	15.60	183
30	5.1	4.7	17.97	15.40	170
30	6.7	1.6	17.97	15.40	138.9
30	6.7	4.7	17.7	15.20	134
30	9	1.6	18.08	15.50	103.3
30	9	4.7	17.79	15.25	101

4.3.1.1. Kömür akışı

Gerçek deney şartlarında yanma etkisiyle yakma kamarası içerisinde kömür daha farklı davranış göstermesine rağmen, soğuk deney ölçüm sonuçları, sıcak deneyler esnasında optimum çalışma şartlarının daha kolay elde edilmesine ışık tutan ön bilgiler vermektedir.

4.3.1.1.1. Kömürün başlıkta kalma süresinin ölçümü

Deney düzeneği, kısım 4.1.1'de anlatıldığı gibi eğim 10° 'ye, başlık devir sayısı 1.6 d/dk'ya, helezon taşıyıcı devir sayısı ise en küçük değere ayarlandı. Bunker, debisi ölçülecek olan 4.5-9.5 mm büyüklüğündeki Şırnak-Cizre kömürü ile tamamen dolduruldu. Helezon taşıyıcı ve yakma başlığı motoru çalıştırıldı. İlk kömür tanesi helezon taşıyıcıdan döner başlığa düştüğü an kronometre çalıştırıldı. Yatak hacmi dolup başlığın azından kömür taneleri düşmeye başlayınca kronometre durdurularak geçen süre okundu. Bu süre, yapılan deney için kömürün başlıkta kalma süresi olarak belirlendi. Aynı deney 9.5-19 mm ve 19-32 mm tane büyüklüğündeki kömürler için de tekrarlanarak bunların başlıkta kalma süreleri bulundu.

4.3.1.1.2. Kömür debisi ve yatak hacminin ölçümü

Kalma süresinin ölçümünde, döner başlıktan kömür taneleri düşmeye başladığı anda kronometre tekrar çalıştırıldı. Başlığın önüne başlıktan düşen kömür tanelerinin toplanması için ağırlığı belirlenmiş olan bir teneke kutu yerleştirildi. Bir saat sonunda kutuda biriken kömür tartılıp bu ağırlıktan boş kutu darası çıkarılarak kömür debisi bulundu. Kömür debisi ve kömürün yatakta kalma süresi bilindiğine göre basit bir orantı ile yataktaki kömür miktarı hesaplanır, yataktaki kömür miktarı, kömürün yığın yoğunluğuna bölünerek yatak hacmi hesaplandı. Aynı ölçümler farklı tane büyüklükleri için tekrarlandı.

Aynı ölçüm metotları kullanılarak farklı eğim açıları, değişik helezon taşıyıcı devir sayıları ve değişik başlık devir sayıları için tekrarlanarak, bu işletme şartlarına göre başlıkta kalma süreleri, kömür debileri ve yatak hacimleri bulundu.

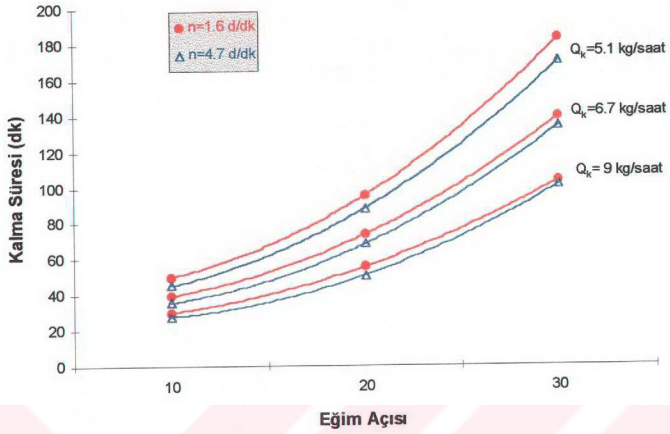
4.3.1.2. Kalma zamanı sonuçları

Yatay konuma göre değişik eksen eğim ve çeşitli döner başlık devir sayılarındaki kömür kalma zamanları Şekil 4.4'de görülmektedir. Yanma odası ağzının ön alt kenarından geçen yatay düzlemin altında kalan hacim, yatak hacmidir (Şekil 4.8). Eğim arttıkça başlık daha dik konuma gelmekte, yatak hacmi artmaktadır. Sabit kömür besleme debilerinde yatak hacmi arttıkça bu hacmin doldurulması için geçen zaman artar. Yatak hacmi başlığa akan kömür ile tamamen doldurulduktan sonra kömür taneleri başlıktan dökülmeye başlar. Sonuç olarak, eğim artınca kömürün yakma başlığında kalma zamanı artar. Kömürün yakma başlığında kalma zamanı, düşük besleme hızlarında daha da artar. Eğim, kalma zamanını değiştirme hususunda en önemli bir değişken olarak bulundu.

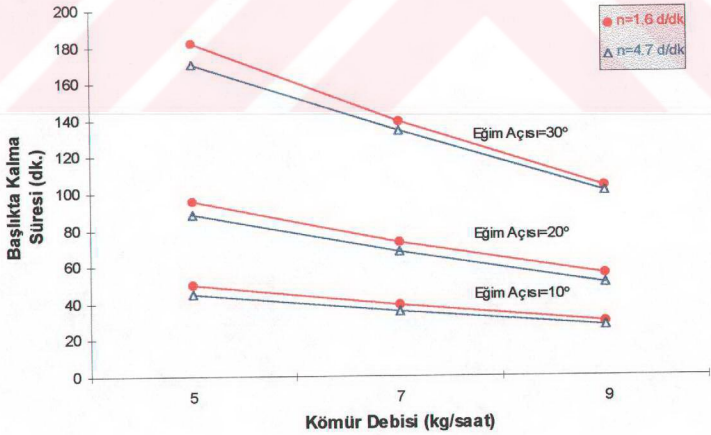
Başlığın dönmesi, kömürlerin birbirlerine göre yer değiştirmelerini ve dolayısıyla başlık içerisinde ilerlemelerini kolaylaştırır. Artan başlık devir sayısı ile kömürlerin başlıktan dökülmeleri nispeten çabuklaşır. Bu nedenle başlık devir sayısının artması, kalma zamanının azalması yönünde çok sınırlı bir etkiye sahiptir.

Döner başlığın 20°'lik eğim ve 1.6 d/dk sayısı için kömür debisi ile kalma süresi arasında aşağıdaki şekilde bir ampirik ilişki bulundu.

$$t_k = a_1 Q_k + b_1 \quad (4.3)$$



Şekil 4.4. Yakma sistemi eğiminin kamarada kalma süresi üzerinde etkisi



Şekil 4.5. Kömürün debisinin, kamarada kalma süresine etkisi

Burada $t_k(\text{dk})$ kömürün yakma başlığında kalma süresi, $Q_k(\text{kg/saat})$ kömür debisi ve a_1 , b_1 deneysel sabitlerdir ve değerleri grafiklerden, sırasıyla -10.034, 144.3 olarak elde edilmişlerdir.

Başlıkta kalma zamanı yatak hacminin tamamının kömür ile doldurulması için geçen süre olarak tanımlanabilir. Değişik kömür debileri için, kömürün başlıkta kalma zamanları Şekil 4.5’de görülmektedir. Yanma odası ağızında sıfırlanan yatak derinliği, eğim arttıkça yanma odası arkasında daha da derinleşir. Büyük eğim durumunda yanma odası taban geometrisi, yatak yüzeyini ve beslenen kömürün yığılmasını etkileyebilir. Kömür debisi arttıkça, herhangi bir eğime denk gelen sabit yatak hacminin doldurulması için geçen zamanın azalacağı açıktır. Büyük eğim açılarında yatak hacminin artması, kömürün başlıkta kalma zamanını artırır.

Şekil 4.5’te görüldüğü gibi kömürün başlıkta kalma süresi eğrilerinin kömür debilerine göre eğimleri, yüksek başlık eğimi için büyük, düşük başlık eğimi için küçük olmaktadır; bu, $V=Q.t$ ilişkisinin tabii sonucudur. Ayrıca, başlık devir sayısı artışı, kalma zamanını sınırlı ölçüde azaltmaktadır.

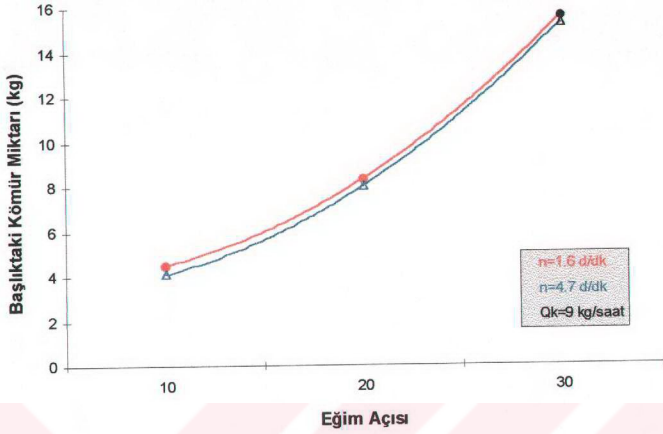
Sonuç olarak, kömür akışı önemli bir ikinci değişken olarak bulundu ve kalma zamanı aynı eğim için kömür besleme hızının artırılmasıyla düşmektedir. Sabit kömür debisi $Q=6.7 \text{ kg/saat}$ için kalma süresi aşağıdaki ampirik ilişki ile gösterilebilir.

$$t_k = a_2 \alpha^2 + b_2 \alpha + c \quad (4.4)$$

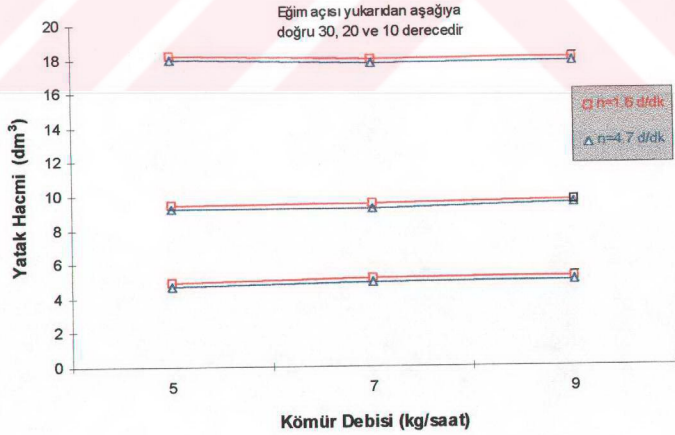
Burada α eğim, a_2 , b_2 , ve c deneysel sabitler olup değerleri sırasıyla 0.2121, 1.834, 47.13 olarak belirlenmiştir.

4.3.1.3. Yatak hacmi, yüzey alanı ve başlıktaki kömür miktarı

Sabit yataklarda yanma üzerinde yatak yüzeyinin önemine karşılık, yataktaki kömürün sürekli karıştığı döner başlıklı kömür yakma sisteminde yatak hacmi önem kazanmaktadır. Şekil 4.6 ’da görüldüğü gibi yatak hacmi, hemen hemen bütünüyle eğime bağlıdır. Başlık devir sayısındaki artmanın, yanal yüzeye kömür sıranması ile bağlantılı olarak yatak yüzeyini ve hacmini artırıcı; yığılma etkisindeki azalmanın etkisi ile yatak hacminde azalma etkisi bulunmaktadır ve bu birbirinden ayırt edilemeyen etkilerin net sonucu ihmal edilebilir seviyededir.



Şekil 4.6. Başlıktaki kömür miktarının eğim ile değişimi



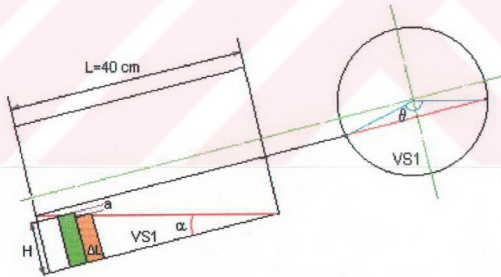
Şekil 4.7. Kömür debisi ile kamaradaki kömür hacmi arasındaki ilişki

Şekil 4.7 'de görüldüğü gibi artan kömür debisi, yığılma nedeniyle az da olsa yatak hacmini artırır. Yine yığılma nedeniyle, artan kömür hızına bağlı olarak yatak yüzey alanı az miktarda artar; bu artma, eksen eğimi büyüdükçe zayıflamaya başlar, 30° eğim için artma değil azalma söz konusudur.

Soğuk deneyler esnasında yatak yüzeyinin, düzlem olmayan eğri bir yüzey şeklini aldığı gözlemlenmiştir. Hacim ve yüzey için elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde, silindirik yanma odasının çap-yükseklik oranı göz ardı edilmemelidir.

4.3.1.4. Yatak hacminin teorik olarak hesaplanması

Kömürün yanma başlığında Şekil 4.8'deki gibi bir düzlem yüzey olduğu kabulüyle kömür yatak hacmi, başlık boyutları, eğim ve geometrik bağlantılar kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Gerçek çalışma şartlarından farklı olan bu hacim, deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapmak üzere fikir vermektedir. Nümerik olarak yatak hacminin hesaplanması Ek 3'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Yatak hacmi ve kalma süresinin hesaplanması

- R : Başlık çapı
- L : Başlık uzunluğu
- ΔL : Adım
- α : Başlık eğim açısı (radyan)
- θ : Kömür derinliğine bağlı merkez açısı

4.3.2. Sıcak deneyler

Sıcak deneylerde çalışmanın amacı doğrultusunda, özellikle Şırnak-Cizre linyiti kullanıldı. Yanma verimi ve emisyon derecesi kriterlerinin değerlendirilmesi esas alınarak, sistem performansına, kömür tane büyüklüğü, kömür/hava oranı, hava dağıtım şekli, besleme hızı, yatak eğimi başlık devir sayısı gibi parametrelerin etkisi araştırıldı. Bu parametrelerden bir kısmı için karşılaştırma yapmak üzere, sistemin Tunçbilek linyitinin yakılmasındaki performansı da incelendi.

Sistemin performansını ortaya koymak için Tablo 4.3’de özellikleri verilen iki tip kömür kullanıldı. Yanma esnasında hava fazlalığı %50 ye kadar arttırıldı. Deneyler iki farklı hava dağıtım başlığı, yakma başlığının iki farklı dönme hızı, yanma kamarasının üç farklı eğimi, farklı tane büyüklüğü ve farklı kömür besleme debileri için tekrarlandı.

Tablo 4.3. Yakma deneylerinde kullanılan linyitlerin analizi

Proximate analiz	Şırnak-Cizre	Tunçbilek
% Nem	0.34	3.31
% Kül	26.17	15.48
% Uçucu Madde	29.59	40.63
% Sabit Karbon	43.90	40.61
Ultimate analiz		
% C	64.08	56.02
% H	4.54	6.70

4.3.2.1. Ön deneyler

Sıcak çalışmalar sırasında karşılaşılabilecek problemleri başlangıçta belirleyerek çözmek ve gerçek çalışma şartlarındaki parametrelerin mertebelerini belirlemek amacıyla bir dizi ön deney yapıldı. Böylelikle sistemin tasarımında belirlenen kömür besleme debisi, başlık devir sayısı, baca kesiti gibi büyüklüklerin uygunluğu deneysel olarak kontrol edildi. Bunun için sisteme kömür doldurularak on saat süresince üç defa yakıldı ve çalıştırıldı. Sistem çalışırken maksimum kömür debisine göre yeterli hava debisinin sağlanması, sistemdeki hava kaçakları ve hareketli mekanik kısımlar gözden geçirildi.

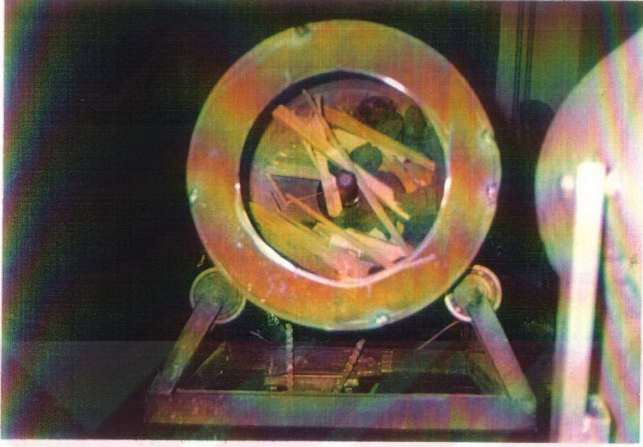
4.3.2.2. Ön deneylerden sonra yakma sisteminde yapılan değişiklikler

İlk deneme çalıştırmalarından sonra, işletme parametrelerinin en üst ve en alt sınırları belirlendi. Bunlara bağlı olarak ve ortaya çıkan imalat eksikleri ışığında, sistem üzerinde şu değişiklikler yapıldı :

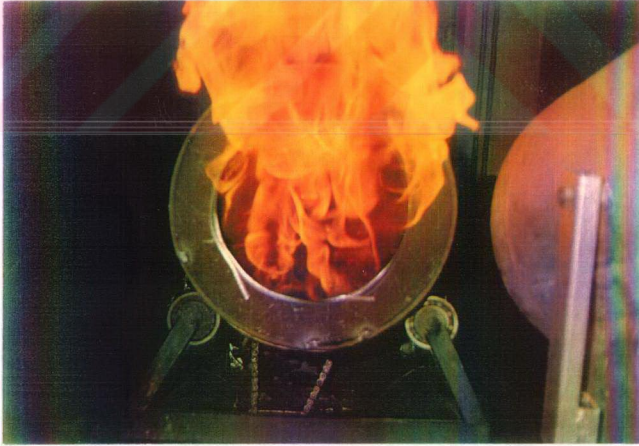
1. Baca kesiti tasarımı uygun olarak 130 cm^2 olarak yapılmıştı. Ancak yüksek kömür debilerinde bu baca kesitinin yeterli olmadığı tespit edildi. En büyük kömür debisine denk gelen baca gazı debisine göre yapılan baca kesiti hesabına uygun olarak baca borusu 400 cm^2 kesitli olarak yeniden yapıldı.
2. Başlığın 4.7 devir/dk olan minimum devir sayısı, sisteme bir zincir dişli sistemi eklenerek 1.6 devir/dk'ya düşürüldü.
3. İlk çalıştırmalar sonucunda 40 kW'lık tesis gücü için kömür besleme debisinin yüksek olduğu anlaşıldı. Kapasiteye uygun kömür besleme hızının en az 2.5 kg/saat, en çok 12 kg/saat olduğu belirlendi. Kömür besleme hızını belirlenen sınırlar arasına getirmek üzere, kayış kasnak sisteminde değişik yapılarak helezon taşıyıcı milinin devir sayısı yeniden düzenlendi.

4.3.2.3. Deney düzeneğinin sıcak deneylere hazırlanması

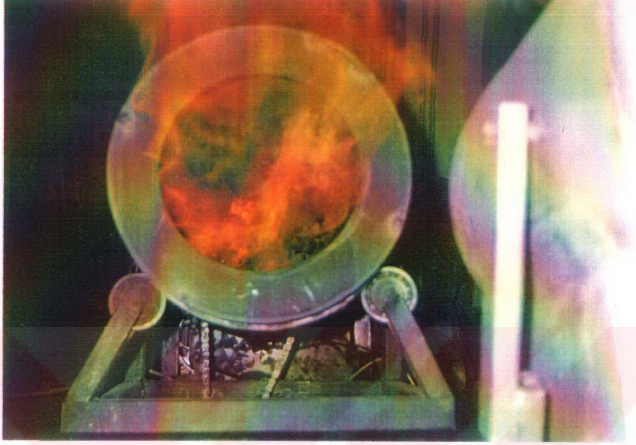
Yanma başlığı temizlendi ve yakmak için maksimum kapasiteye kadar odun ve kömür parçaları ile doldurularak tutuşturuldu. Küresel hava kontrol vanası açılarak eğik manometre $25 \text{ m}^3/\text{saat}$ 'lık hava debisini gösterecek şekilde ayarlandı. Hava debisi beş dakikalık aralıklarla, $10 \text{ m}^3/\text{saat}$ 'lık artışlarla $60 \text{ m}^3/\text{saat}$ 'lık debiye kadar artırıldı. Yaklaşık 15 dakika sonra hava akışı, kömür debisine göre $\text{HFK}=1$ olacak şekilde artırıldı ve uygun bir yanma yatağı görülünce kamaranın dönüşü 1.6 dak^{-1} ile başlatıldı. İstenen hava yakıt oranı seviyesi yaklaşık 45 dakika sonra ayarlandı. Yaklaşık bir saat sonra cihaz kalibrasyon ayarı yapılarak gaz ölçüm cihazının probu yerleştirildi. Cihaz ekranında okunan gaz konsantrasyonlarının değerleri kararlı duruma gelince, yazıcıdan ölçülen değerler alındı. Sıcak deneyler için işlem sırası, Resim 4.3, Resim 4.4, Resim 4.5, Resim 4.6 ve Resim 4.7'de görülmektedir.



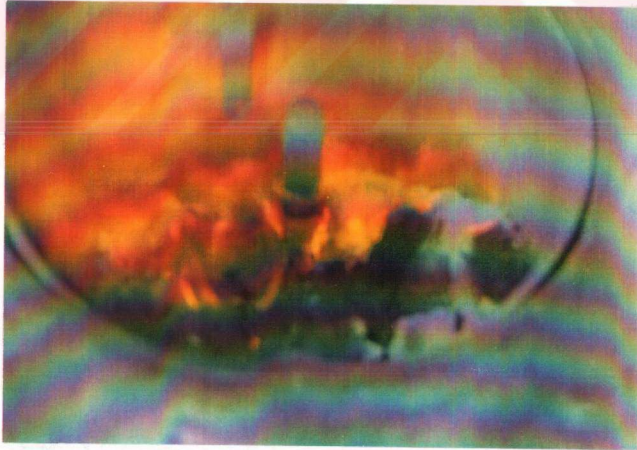
Resim 4.3. Yakma başlığına kömür ve tahta parçalarının yerleştirilmesi



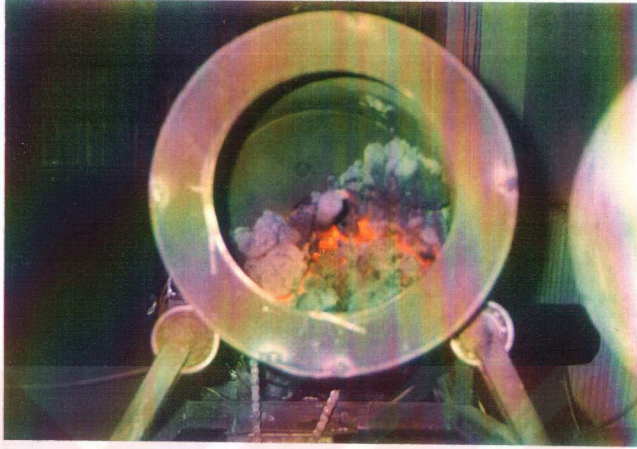
Resim 4.4. Tutuşma ve yanma



Resim 4.5. Kararlı yanma durumunda yatağın görünüşü



Resim 4.6. Yatakta akkor halindeki kömürün görünüşü



Resim 4.7. Yanma sonunda kömür yatağının görünüşü

4.3.2.4. Deney sonuçları ve yorum

Kısım 4.2.2 ve 4.2.4’de açıklandığı gibi, gaz emisyon ölçüm cihazı ve sıcaklık ölçüm cihazı kullanılarak, sürekli besleme ve kararlı yanma şartlarında baca gazındaki O_2 , CO_2 , CO , SO_2 , NO_x konsantrasyonları, sistemin yanma verimi ve yakma kamerasında sıcaklık dağılımları ölçüldü. Ayrıca kısım 4.2.3’de anlatılan şekliyle kül içerisinde yanmayan madde miktarı bulundu. Deneyler sırasında başlık ağzından küllüğe dökülen kül örnekleri, alındıktan sonra yanmanın devam etmemesi için üzerine su dökülerek söndürüldü.

4.3.2.5. Fazla havanın etkisi

Fazla havanın sistem performansına etkisini ortaya koymak üzere yapılan yakma deneylerinde sistemin eğimi 20° ‘ye ayarlandı. Kömür debisi 3.8 kg/saat’e ayarlandı. Hava debisi stokiometrik orandan başlanarak her defasında %10’luk kademelerle artırılarak %50 hava fazlalığına kadar çıkıldı. Kararlı çalışma şartlarında elde edilen veriler Tablo 4.3, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’ da verilmektedir.

Sıcaklığın bütün ölçüm noktalarında artan hava miktarı ile önce arttığı, HFK 1.3 civarında olduğunda en yüksek değerine çıktığı, sonra tekrar düştüğü görülmektedir. Başlıktaki sıcaklık dağılımının, kömür besleme debisinin yetersiz olması nedeniyle yeterince yükselmediği bu nedenle yanmanın sadece yüzey tepkime hızlarının kontrolü ile gerçekleştiği söylenebilir. Bu tür bir yanmada oksijen, kömürün en iç noktalarına kadar yayılabilir ve dengeye ulaştığında bütün kömür tanecığı hacminde yanma gerçekleşerek tanecikte bir çap küçülmesi olmaksızın bütün halinde yandığı ve küle dönüştüğü gözlenir.

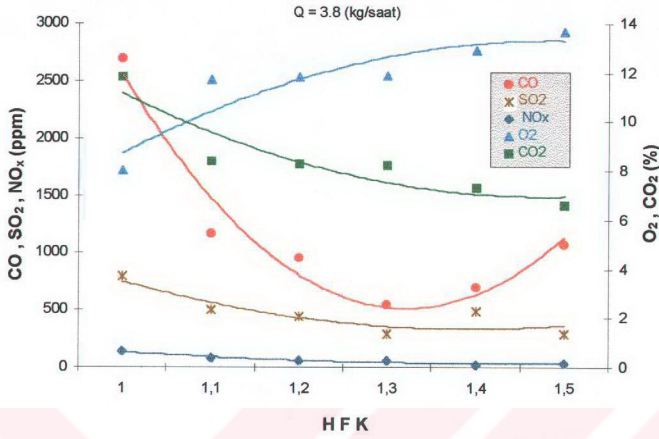
Bu yakma işlemi sonucunda oluşan külün çok incelerek toz haline geldiği görüldü. Bu oluşum yanmanın yüzey tepkimelerinin hızına bağlı olarak gerçekleştiği düşüncesini kuvvetlendirmektedir. Külün toz şeklindeki oluşumu düşük sıcaklık yanmasının belirtileri olarak bilinmektedir. İnce toz halindeki kül, hava başlığından kömür yatağı üzerinde havanın yüksek bir hızda gönderilmesi ile sürüklenerek bacadan atılmaktadır. Bu durum baca gazı emisyonlarını olumsuz etkilemektedir.

Küldeki yanmayan C yüzdesi oldukça düşüktür ve artan HFK ile küldeki yanmayan C oranında, çok belirgin bir değişim görülmemektedir. Yanma verimi üzerinde, küldeki yanmayan madde miktarı etkilidir. Sadece külde, az miktardaki yanmayan C dikkate alındığında yanma veriminin yüksek olması gerekir. Ancak verim sadece küldeki yanmayan karbon yüzdesine bağlı değildir. Verim aynı zamanda sıcaklık ve baca gazı bileşenlerinin de bir fonksiyonudur. Yanmanın düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi ve CO seviyesinin yüksek olması, düşük yanma verimine gerekçe olarak gösterilebilir.

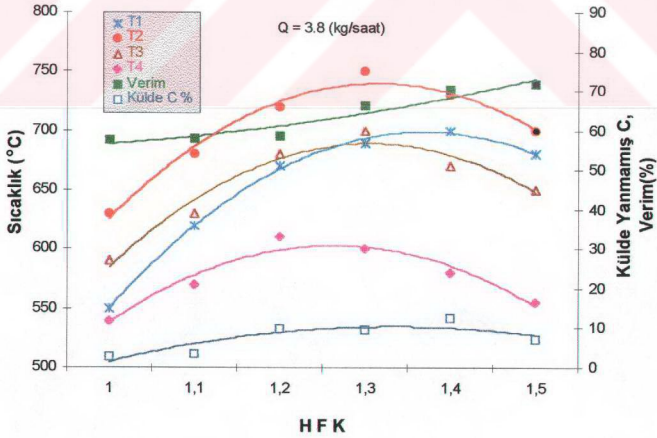
Şekil 4.9'a bakıldığında CO konsantrasyonlarının bir minimumdan geçtiği görülmektedir. CO eğrisindeki minimum CO'nin yanmasının önce O₂ miktarının artması nedeniyle hızlanması, daha sonra ise yatak sıcaklığının düşmesi nedeniyle azalması şeklinde açıklanabilir. Ayrıca HFK ve CO oluşumu arasında yakın bir ilişki olduğu bilinmektedir.

Tablo 4.4. Şımak-Cizre kömürlerinin yanmasında farklı HFK'nda elde edilen yanma verileri

HFK	Q (kg/saat)	O ₂ (%)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	CO ₂ (%)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	Verim (%)	Külde C (%)
1	3.8	8	2698	792	140	11.8	550	630	590	540	57.7	2.78
1.1	3.8	11.7	1169	502	76	8.4	620	680	630	570	57.8	3.54
1.2	3.8	11.8	953	441	56	8.3	670	720	680	610	58.5	9.84
1.3	3.8	11.9	549	292	64	8.2	690	750	700	600	66.3	9.32
1.4	3.8	12.9	698	485	28	7.3	700	730	670	580	70.4	12.46
1.5	3.8	13.7	1076	294	40	6.6	680	700	650	555	71.6	6.95



Şekil 4.9. Gaz konsantrasyonlarının HFK ile değişimi

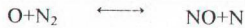


Şekil 4.10. Sıcaklık dağılımı ve yanma veriminin HFK ile değişimi

Yüksek HFK'larda karışım teşkilinin iyi olmaması nedeniyle, bölgesel olarak zengin karışımlar ortaya çıkabilir. Dolayısıyla tam yanma yerine bölgesel eksik yanma sonucu CO oluşumunun arttığı söylenebilir (Borat,1983). Yanma gazında CO konsantrasyonunun yüksek olması ve yüksek HFK'larda CO'nin tekrar yükselmesi, buna kanıt olarak ileri sürülebilir. Hava başlığından havanın jet hızıyla çıkması, yerel soğuk bölgelerin oluşmasına neden olur. Bu bölgelerde CO'nin CO₂'e indirgenmesinde gerçekleşen $CO + O_2 \rightleftharpoons CO_2 + O$ reaksiyonu aktif reaktantlara sahip olmadığından CO'nin CO₂'e dönüşme hızının zayıfladığı düşünülebilir; buna artan HFK ile CO₂'in azalması ve O₂ konsantrasyonun sürekli artış göstermesi kanıt olarak gösterilebilir. Ayrıca CO₂ konsantrasyonunun yanma gazlarının seyrelmesine bağlı olarak azaldığı söylenebilir.

SO₂ miktarının, kullanılan yakma sistemi ve yakıtın özelliklerine bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. SO₂ oluşum ve parçalanma reaksiyonları, yatak sıcaklığına ve besleme şekline göre değişmektedir. SO₂ oluşumunda S+O₂ reaksiyonu bir endotermik reaksiyon olup bu reaksiyonunun düşük sıcaklıklarda zayıfladığı bilinmektedir. Buna göre yanmanın düşük SO₂ verecek şekilde gerçekleşmesi, düşük yatak sıcaklığına bağlanabilir. SO₂ artan fazla hava ile azalması seyrelme etkisi olarak yorumlanabilir.

NO_x'ler genellikle 1400°C 'nin üzerinde gerçekleşmektedir. Bu yakma sisteminde karışımın fakir olması nedeniyle O₂ önce parçalanarak 2O oluştuğu, sonra Zeldovch mekanizmasına göre,



serbest radikallerle NO oluştuğu kabul edilebilir. Yukarıdaki mekanizmayı kontrol eden reaksiyonun N₂ bağının parçalanmasına ait olmasıdır. Bu reaksiyonların aktivasyon enerjileri büyük olduğu için her iki reaksiyonun da düşük sıcaklıklardaki hızları çok küçüktür (Borat, 1983). Keza, reaksiyon hızını kontrol eden oksijen atomu konsantrasyonunun düşük sıcaklıktaki miktarı ihmal edilebilir. Soğuk havanın besleme başlığından jet hızı ile çıkmasının alev sıcaklığının düşmesinde etkili olduğu dikkate alınmalıdır. Sıcaklığın fazla hava nedeniyle daha da düşmesi, NO_x oluşumunu çok düşük seviyede tutmaktadır.

4.3.2.6. Kömür debisinin etkisi

Kömür debisinin sistem performansına etkisini ortaya koymak üzere yapılan yakma deneylerinde eğimi 20° 'ye ayarlandı. Fazla hava %30 değerine ayarlandı. Kararlı çalışma şartlarında elde edilen veriler Tablo 4.5, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12' de görülmektedir.

Sıcaklığın bütün ölçüm noktalarında kömür besleme hızına bağlı olarak artması beklenen sonuçtur. Çünkü üretilen enerji miktarı, kömür miktarına bağlı olarak artmaktadır. Ancak sıcaklığın yüksek kömür besleme hızlarında değişmemesi, sistem kapasitesinin üst sınırına denk gelen miktarı aşan fazlalık kömürün enerji üretimine katkısının olmadığını; besleme hızının yaklaşık 40 kW kapasite civarında olması ise başlangıçta yapılan tasarımın sağlıklı olduğunu göstermektedir.

Küldeki yanmamış C yüzdelerinin yüksek olması, akla ilk olarak bir kömür tanesi ele alındığında yanmanın, tane yüzeyinde fiziksel O₂ difüzyonundan çok CO₂ difüzyonu olayı ile kontrol edildiği görüşünü getirmektedir. Şekil 11'de görüldüğü gibi yanma gazında CO konsantrasyonunun yüksek olması ve artan kömür debisi ile hızla azalması, bunun kanıtıdır. Çünkü yüzey reaksiyonu için temel ürün CO olmaktadır; O₂ fiziksel difüzyonu kontrollü bir yanma mekanizması söz konusu olduğunda, yanma hızının çok yüksek olması gerekir(Lowry,1963). Buna karşılık CO₂ +C yüzey reaksiyonunun C+ O₂ reaksiyonuna göre çok daha yavaş olduğu bilinmektedir (Borat,1983).

Kömür taneleri çevresindeki oksijen konsantrasyonunun havadakinden düşük olması, küldeki yanmamış C yüzdelerinin yüksek olmasının ikinci bir nedeni olarak akla gelebilir. Döner kamara içerisindeki kömür yatağı göz önüne alındığında bu düşünce mantıklı görünmektedir. Çünkü başlığın dönmesi her ne kadar kömür tanelerinin karışmasını ve böylece tane yüzeylerinin hava besleme başlığından üflenen yüksek O₂ konsantrasyonlu hava ile temas etmesini sağlıyorsa da bu etkinin yerel olduğu anlaşılmaktadır. Taze havanın besleme başlığından bir jet hızı ile çıktığı göz önüne alınırsa, kömür tanelerinin yüzeylerinin büyük oranda taze hava ile temas edememiş olması mümkün görülmektedir. Kamaradaki kömür yatağı üst boşluk sıcaklığının, düşük besleme hızlarında baca gazı sıcaklığına göre yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek besleme hızlarında baca gazı sıcaklığının düşük besleme durumlarına kıyasla daha fazla olması, kömür yatağı üzerinde serbest boşluktaki homojen yanma reaksiyonlarının da

önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle sistemdeki kömür yatağının yüksek ölçüde CO, hidrokarbonlar gibi yanabilir bileşenler ortaya çıkardığı ve bunların gaz fazında yandığı söylenebilir.

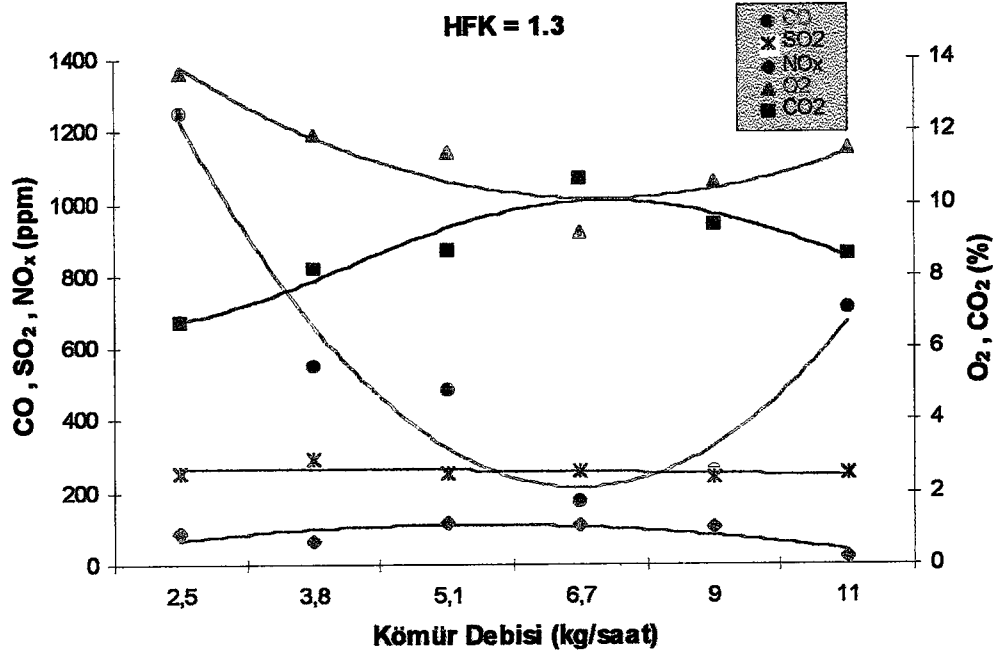
Sabit HFK için küldeki C yüzdesi, artan kömür debisi ile artmaktadır. Öte yandan artan kömür debisi ile kömürün başlıkta kalma süresinin azaldığı soğuk deneylerle gösterilmiştir. Dolayısıyla, yanma kamarasında yeterli süre kalamayan kömür taneciklerinin yeterince yanmaması tabii bir sonuçtur.

Küldeki C miktarının fazlalığına dönme etkisiyle yanma odasında kalma süresinin yetersizliğinin de bir ölçüde neden olduğu söylenebilir : Yanma odasının dönmesi, kömürün başlık içerisinde ilerlemesinde etkili olmaktadır ve tanelerin yanma odasına giriş sıralarından farklı sırada ve belki yeterince yanmadan yanma odasını terk etmelerine sebep olabilir. Bu etkinin yüksek kömür debilerinde daha belirgin olması, iddiayı kuvvetlendirmektedir.

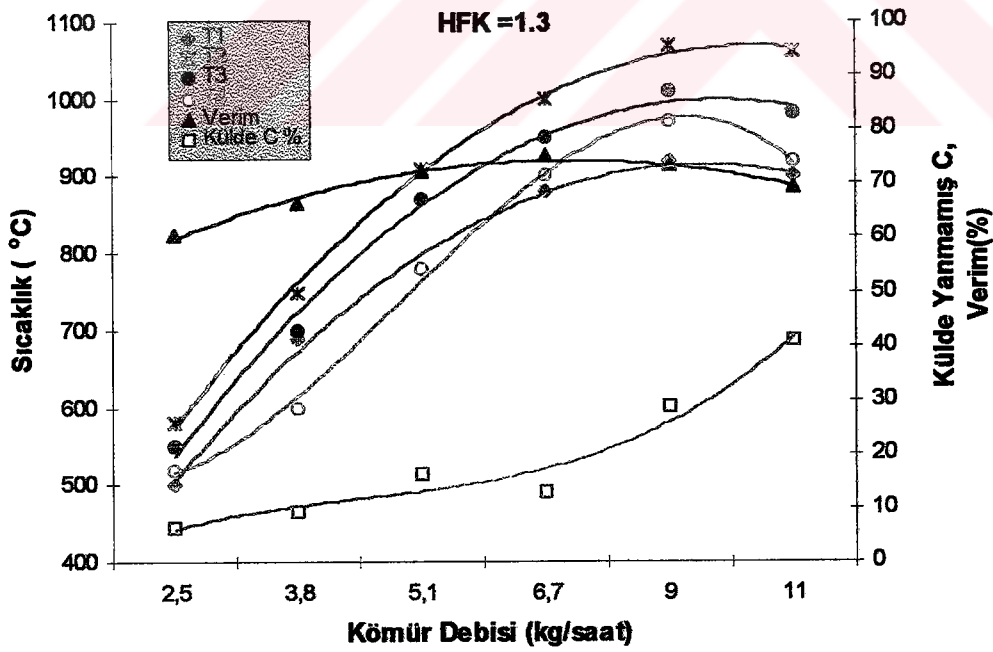
Düşük kömür debilerinde sıcaklığın düşük kalması sonucu normal bir yanma sağlanamamakta CO çok yükselmektedir (Şekil 4.11). O₂ 'nin parçalanarak CO₂ oluşturmak için CO ile reaksiyona girmesi, yatak sıcaklığına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Artan kömür debisi ile O₂ tüketiminin artması sonucu O₂ konsantrasyonunda azalma ve buna bağlı olarak CO₂ konsantrasyonunda artma, beklenen sonuçtur. Sabit HFK için kömür debisi arttıkça CO düşmekte bir minimumdan geçtikten sonra tekrar yükselmektedir. CO oluşumunu önlemenin yolu yatak sıcaklığını artırmaktır (Vural,H.; Urkan, M.K.,1986). CO'ın minimum olduğu nokta civarında yatak sıcaklığının oldukça yüksek olması bunu doğrulamaktadır.

Tablo 4.5. Şımak-Cizre kömürünün yanmasında farklı kömür debilerinde elde edilen yanma verilerinin değerleri

Q (kg/saat)	HFK	O ₂ (%)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	CO ₂ (%)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	Verim (%)	Külde C (%)
2.5	1.3	13.6	1251	254	87	6.7	500	580	550	520	60.4	6.11
3.8	1.3	11.9	549	292	64	8.2	690	750	700	600	66.3	9.36
5.1	1.3	11.4	487	251	113	8.7	780	910	870	780	72.3	16.36
6.7	1.3	9.2	174	261	109	10.7	880	1000	950	900	75.1	13
9	1.3	10.6	261	240	106	9.4	920	1070	1010	970	73.4	28.84
11	1.3	11.5	709	255	24	8.6	900	1060	980	920	69.3	41



Şekil 4.11. Gaz konsantrasyonlarının kömür debisi ile değişimi



Şekil 4.12. Verim ve sıcaklıkların kömür debisi ile değişimi

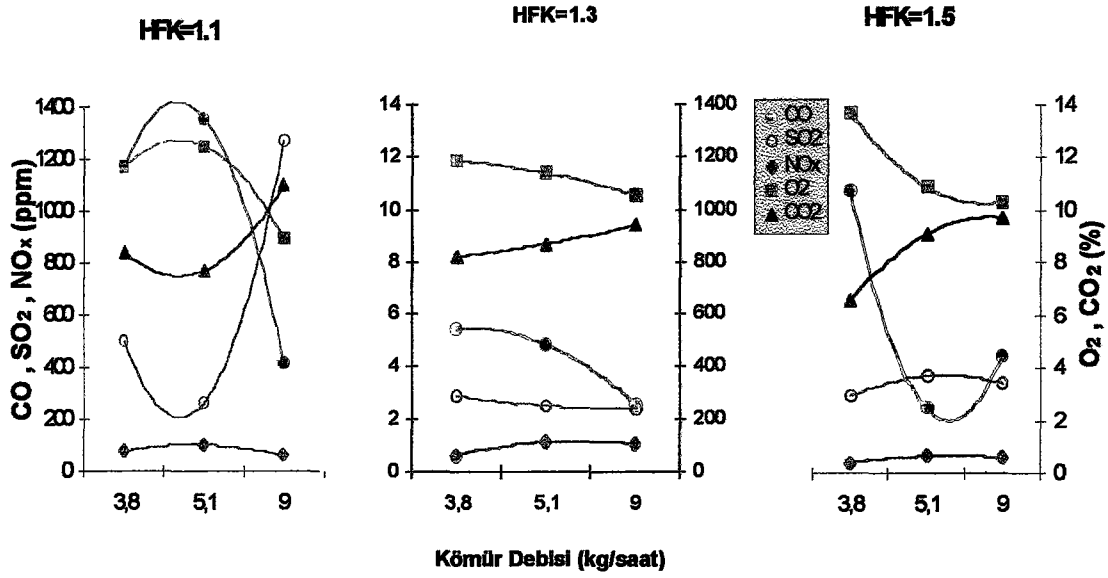
Kömürlerin yakılmasında sıcaklık artıka uçuca madde çıkışı artmaktadır (Urkan,M.K. ‘vd’, 1986). Bu nedenle artan kömür debisiyle CO’nun tekrar yükselmesi, çıkan gazlardaki artmaya yetecek gaz yanmasının gerçekleşemediği şekilde açıklanabilir. Yapılan birçok çalışmada uçuca gazlardaki CO seviyesi çok düşük olarak gerçekleştirildikten sonra yanma verimi, hemen hemen tamamıyla küldeki yanabilirlik oranı üzerine kurulmuştur. Tartışmaların esasları, çeşitli parametreler ve düzenlemelerin etkilerinin incelenmesi 3.6, 3.7, 3.8 ve 3.9’da verilmiştir.

Başlıkta gazın genişmesi sistem sıcaklığının kuvvetli bir fonksiyonudur. Düşük kömür besleme oranlarında sistem sıcaklığı düşüktür, bu nedenle beklenen genişme gerçekleşemez. Buna ek olarak, hava dağıtım başlığının ön kısmındaki deliklerden gereğinden daha fazla hava gönderilmesinin de sebep olduğu düşünülebilir. HFK değeri sabit tutularak kömür debisi artırıldığında verimin bir maksimumdan geçmesi, hava dağılımı ve dolayısıyla hava dağıtım başlığının tasarımı ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.6’da değişik HFK ve değişik kömür debileri için ölçülen yanma verileri, Şekil 4.13’de ise bu verilerin değişimleri görülmektedir. Farklı HFK’nda kömür debisi ile gaz konsantrasyonları değişmektedir; en büyük değişim CO’da görülmektedir. Yatak sıcaklığı ve fazla hava, CO konsantrasyonu üzerinde etkili olmaktadır.

Tablo 4.6. Şınak-Cizre kömürlerinin yanmasında farklı HFK ve farklı kömür debilerinde elde edilen yanma verilerinin değeri

Q (kg/saat)	HFK	O ₂ (%)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	CO ₂ (%)
3.8	1.1	11.7	1169	502	76	8.4
3.8	1.3	11.9	549	292	64	8.2
3.8	1.5	13.7	1076	294	40	6.6
5.1	1.1	12.5	1356	264	99	7.7
5.1	1.3	11.4	487	251	113	8.7
5.1	1.5	10.9	248	369	66	9.1
9	1.1	8.9	416	1269	59	11
9	1.3	10.6	261	240	106	9.4
9	1.5	10.3	450	341	60	9.7



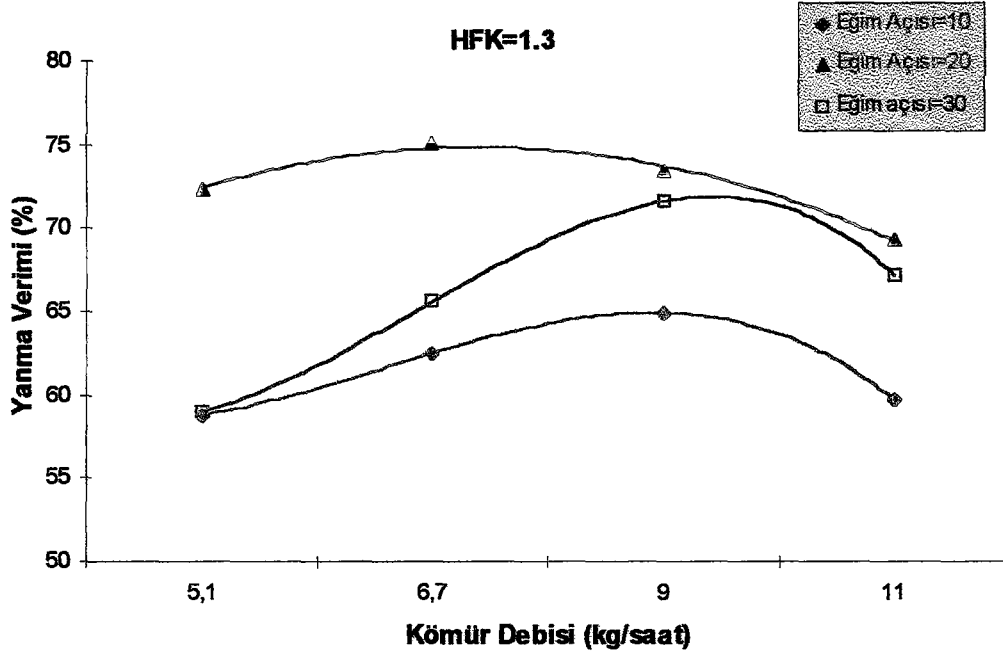
Şekil 4.13. Gaz konsantrasyonlarının kömür debisi ve HFK ile değişim

4.3.2.7. Döner başlıklı yakma sistemi eğiminin etkisi

Yakma kamarası birinci ve ikinci deneylerde belirlenen optimum kömür debisi ve optimum hava debisi ile beslendi. Sistemin eğimi 10°, 20°, 30° 'ye ayarlanarak her bir eğim durumunda 9.5-19 mm büyüklüğündeki kömür yakıldı. Deney sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Şırnak-Cizre Kömürünün yanmasında farklı eğimler için elde edilen yanma verilerinin değerleri

Q (kg/saat)	HFK	Eğim Açısı	n (dak ⁻¹)	D (mm)	O ₂ (%)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	CO ₂ (%)	Verim (%)
5.1	1.3	10	1.6	9.5-19	13.6	1600	552	59	6.7	58.8
6.7	1.3	10	1.6	9.5-19	8.5	1174	299	77	11.3	62.5
9	1.3	10	1.6	9.5-19	8	318	1262	54	11.8	64.9
11	1.3	10	1.6	9.5-19	10.6	1505	856	38	9.4	59.7
5.1	1.3	20	1.6	9.5-19	11.4	487	251	113	8.7	72.3
6.7	1.3	20	1.6	9.5-19	9.2	174	261	109	10.7	75.1
9	1.3	20	1.6	9.5-19	10.6	261	240	106	9.4	73.4
11	1.3	20	1.6	9.5-19	11.5	709	255	24	8.6	69.3
5.1	1.3	30	1.6	9.5-19	11.5	982	497	63	8.6	59
6.7	1.3	30	1.6	9.5-19	9.2	1645	959	42	10.7	65.6
9	1.3	30	1.6	9.5-19	8	1581	614	35	11.3	71.6
11	1.3	30	1.6	9.5-19	7.8	1473	323	60	12	67.2



4.14. Verimin sistem eğimi ile değişimi

Yakma sistemi eğiminin düşük değerlerinde, kömür debisindeki artışa bağlı olarak kömürün yakma başlığında kalma süresi azalmakta, yanma verimi ve sıcaklık olumsuz etkilenmektedir. Şekil 4.14 'de, eğimin 20° olması halinde elde edilen yanma veriminin 10° 'dekine göre daha yüksek olduğu ve yanma veriminin artan kömür debisi ile daha kararlı olduğu görülmektedir. Külde yanabilir madde miktarını en aza indirmek için kömürün yakma kamarasında kalma süresinin yükseltilmesi düşünülebilir. 40 kW güç için optimum kömür besleme aralığı olarak belirlenmiş olan 5-9 kg/^{saat} kömür besleme hızı aralığında 20° eğim için kalma süresinin yanma için yeterli olduğu söylenebilir. 30° eğim durumu için elde edilen verimin 20° eğim açısına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Çünkü, yanma başlığının arka kısmında yatak derinliği çok yükselmekte (250 mm 'den daha fazla) ve kömür için hacim-yüzey ilişkisi, hacim lehine ve yanmayı olumsuzlaştıracak tarzda değişmektedir. Birçok yayında yatak derinliğinin 150mm 'den daha fazla olmasının faydasız olduğu ve endotermik reaksiyonları artırdığı belirtilmektedir. Ayrıca, başlığın arka kısımlarında dönme etkisinin çok zayıflaması da yanmaya olumlu katkı katkısını azaltmaktadır. Yakma başlığının böylelikle sabit yatağa dönüşen arka kısmında, kömürün yeterince karışarak oksijenle iyi temas edemediği açıktır. 30° eğim ile yapılan çalışmalarda bunkerden gaz çıkışı olduğu gözlemlendi. Buna

başlığın arka kısmında yatak derinliğinin fazla, gaz çıkışının yüksek ve sıcaklığın düşük olması nedeniyle basınç oluşmasının neden olduğu söylenebilir.

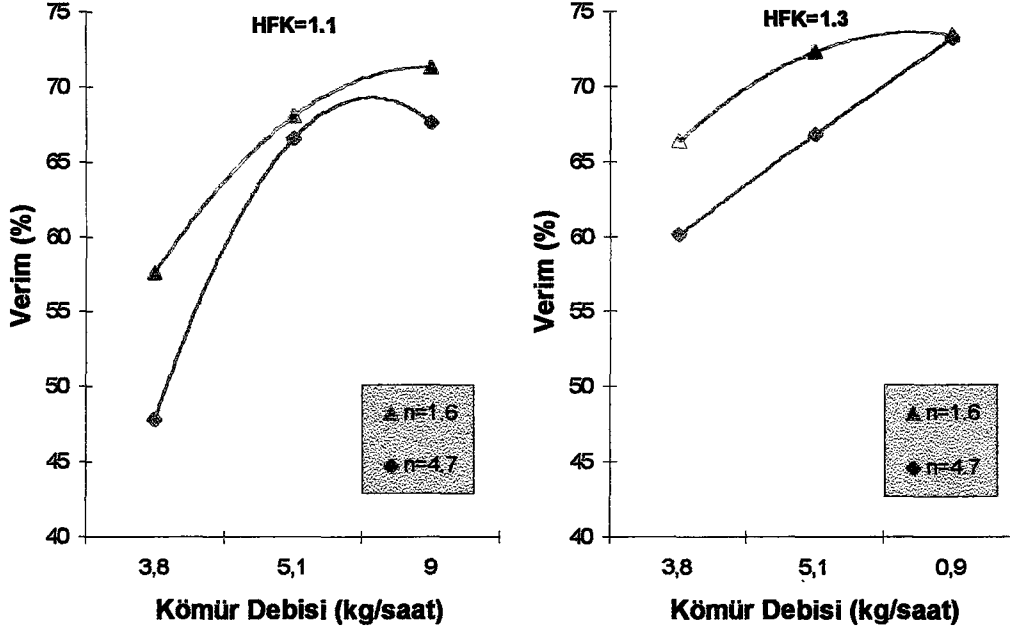
4.3.2.8. Başlık dönme hızının etkisi

Yakma kamarası 1.6 ve 4.7 devirde döndürülerek her devirde önceki deneylerde belirlenen optimum şartlarda kömür yakıldı. Sonuçlar Tablo 4.8’de verilmiştir. Kömür yakma sistemlerinde, kömür yatağı derinliği, yatak yüzeyi alanı ve kömür yatağının karıştırılması, kömür taneciklerinin yanması üzerinde etkilidir.

Düşük devirde yanma veriminin yükseldiği, başlığın 4.7 dak⁻¹ dönme hızında ise verimin düştüğü görülmektedir (Şekil 4.15). Yüksek devirlerde, kamaranın arkasında nisbeten düşük sıcaklıklı bölgede, yeni tutuşmaya başlayan kömür taneciklerinin hızlı yer değiştirme nedeniyle kolayca tutuşamadıkları gözlemlendi. Bu, düşük sıcaklıklı bölgenin(karanlık bölge), toplam başlık uzunluğu içerisinde daha büyük yer kaplaması ve dolayısıyla verimin düşmesi, külde yanmamış madde oranının artması anlamına gelir. Düşük kömür besleme durumunda, küçük HFK’nda yüksek devir sayısının olumsuz etkisinin daha fazla olduğu söylenebilir.

Tablo 4.8. Şınak-Cizre kömürünün yanmasında farklı başlık devir sayısında elde edilen yanma verilerinin değerleri

Q (kg/saat)	HFK	Eğim Açısı	n (dak ⁻¹)	m (mm)	Verim (%)
3.8	1.1	20	1.6	9.5-19	57.6
3.8	1.1	20	4.7	9.5-19	47.8
3.8	1.3	20	1.6	9.5-19	66.3
3.8	1.3	20	4.7	9.5-19	60.1
5.1	1.1	20	1.6	9.5-19	68.
5.1	1.1	20	4.7	9.5-19	66.5
5.1	1.3	20	1.6	9.5-19	72.3
5.1	1.3	20	4.7	9.5-19	66.8
9	1.1	20	1.6	9.5-19	71.3
9	1.1	20	4.7	9.5-19	67.6
9	1.3	20	1.6	9.5-19	73.4
9	1.3	20	4.7	9.5-19	73.2



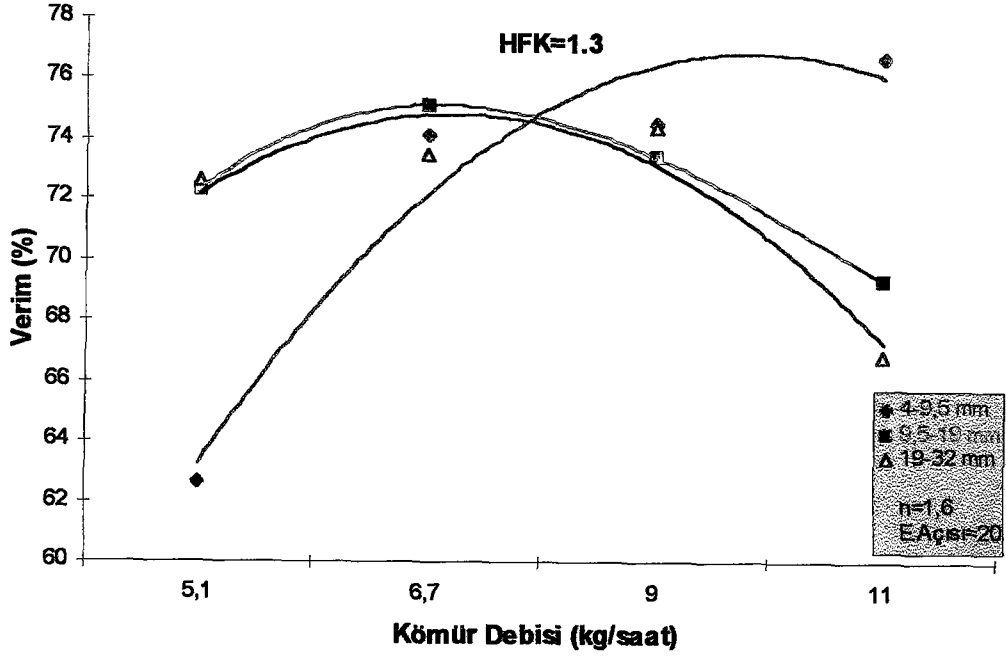
Şekil 4.15. Başlık devir sayısının verim üzerindeki etkisi

4.3.2.9. Kömür tane büyüklüğünün etkisi

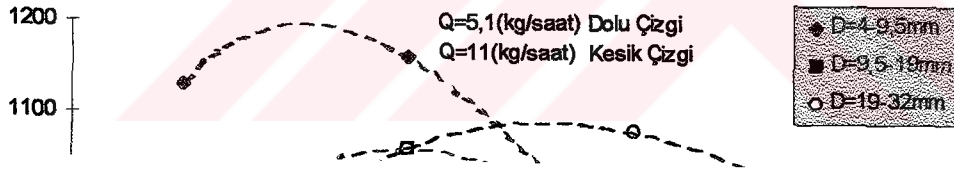
Yakma kamarası önceki deneylerde belirlenen optimum hava debisi ile beslendi. Yakma sisteminin eğimi 20° 'ye ayarlandı ve farklı ortalama tane büyüklüğündeki kömür Şırnak-Cizre linyiti yakıldı. Deney sonuçları Tablo 4.9, Şekil 16 ve 4.17'de verilmiştir.

Tablo 4.9. Farklı ortalama tane büyüklüğündeki Şırnak-Cizre kömürünün yanmasında elde edilen yanma verilerinin değerleri

Q (kg/saat)	HFK	Eğim Açısı	n (dak ⁻¹)	D (mm)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	Verim (%)
5.1	1.3	20	1.6	4-9.5	840	860	740	680	62.6
6.8	1.3	20	1.6	4-9.5	950	970	900	880	74.1
9	1.3	20	1.6	4-9.5	1080	1100	920	850	74.5
11	1.3	20	1.6	4-9.5	1130	1160	950	840	76.7
5.1	1.3	20	1.6	9.5-19	780	910	870	780	72.3
6.7	1.3	20	1.6	9.5-19	880	1000	950	900	75.1
9	1.3	20	1.6	9.5-19	920	1070	1010	970	73.4
11	1.3	20	1.6	9.5-19	900	1060	980	920	69.3
5.1	1.3	20	1.6	19-32	710	900	920	860	72.6
6.7	1.3	20	1.6	19-32	820	980	940	910	73.5
9	1.3	20	1.6	19-32	970	1040	1040	980	74.4
11	1.3	20	1.6	19-32	850	1060	1080	990	66.8



Şekil 4. 16. Verimin kömür tane büyüklüğü ile değişimi



Şekil 4.17' ya bakıldığında, artan kömür debisi ile sıcaklığın yükseldiği görülür. Küçük taneli kömürlerde sıcaklığın daha yüksek olması, tane küçüldükçe gaz çıkış hızının arttığı şeklinde yorumlanabilir. Bu Pillia'nın (1981), uçucu yanma süresinin, (d^n) ile orantılı olduğu görüşüne uygun düşmektedir. Yatak sıcaklığı, artan kömür debisi ile yükselmektedir. Yeterli yatak sıcaklıklarında gaz çıkış hızının artan kömür debisi ile yükselmesi beklenen bir sonuçtur. Küçük taneli kömürlerde yanma başlığındaki sıcaklığın arka bölgelerde daha yüksek olduğu, iri tanelilerde ise başlığın orta ve ön bölgelerinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu, uçucu madde yanmasının küçük taneli kömürlerde daha çabuk gerçekleştiği ve yanmanın büyük bir kısmının başlığın arka bölgelerinde tamamlandığını gösterir. İri taneli kömürlerde sıcaklığın ön bölgelerde yüksek olması gaz çıkış hızının daha yavaş olduğu ve gaz yanmasının ön bölgelerde daha fazla gerçekleştiği şeklinde yorumlanabilir.

Uçucu maddelerin oksijenle karışma hızı, uçucu madde yanma hızını kontrol eder. Stubington (1980), Reynolds sayısının değeri yaklaşık 1 civarında olduğunda, karışma süresinde moleküler difüzyonun hakim olduğunu belirtmektedir. Çok hızlı uçucu madde çıkışı durumlarında, uçucu maddelerin yanma başlığı içerisindeki derişimi, hızlı oksijen transferi ile yanma için uygun duruma getirilebilir. Şekil 4.16'ya bakıldığında artan kömür debisi ile yanma veriminin yükseldiği görülmektedir. Bu gaz yanması için sisteme yeterince oksijen difüzyonu sağlandığı görüşünü desteklemektedir.

Düşük kömür debilerinde küçük taneli kömür tipi daha düşük verimle yanmaktadır. Yanma verimi sıcaklığın da bir fonksiyonudur. Başlık içerisindeki sıcaklık dağılımına bakıldığında düşük kömür debilerinde sıcaklığın düşük olduğu, ancak iri taneli kömür yanmasında sıcaklığın düşük fakat sıcaklık dağılımının daha homojen olduğu görülür (Şekil 4.17). Yüksek kömür debilerinde; iri taneli kömürler için char yanmasının, küçük taneli kömürler için gaz yanmasının daha kötü olduğu söylenebilir.

4.3.2.10. Ön flanş ilavesi ve hava dağıtım başlığı tipinin etkisi

Küldeki yanabilir madde olabildiğince azaltmak için çözüm yollarından biri, kömürün kamarada kalma süresinin artırılmasıdır. Sabit kömür besleme hızında, kömürün yatakta kalma süresi ve yatak hacmi, eksen eğimin değiştirilmesi ile kontrol edilebilir. Ancak bu tür bir uygulamada eğimin 30° 'den büyük olması durumunda 4.3.2.7'de sözü

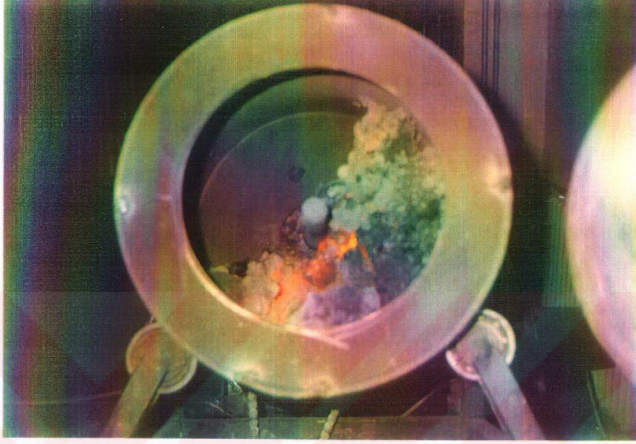
edilen bazı olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Eğimi, gereğinden fazla artırmaksızın uygulanabilecek bir çözüm, döner yakma başlığı uzunluğunun artırılması olabilir; bu başlıca bir araştırma konusudur. Bu çalışmada düşük eğimlerde, yatak derinliği dolayısıyla yatak hacminin artırılması yoluyla kalma süresini uzatmak için, yakma başlığının ağzına 55 mm eninde flanş ilave edildi.

Tablo 4.10 da flanş ilavesi sonrası yapılan deney sonuçları verilmiştir. Flanş ilavesi ile hem birinci hava başlığı kullanılması hem de ikinci hava başlığı kullanılması durumlarında yanma veriminin arttığı görülmektedir (Şekil 4.18). Flanş ilavesi ile başlık içerisindeki kömürün, başlığın dönüş yönünde daha fazla yükseğe kalkarak döküldüğü görüldü (Resim 4.8). Flanşın, başlık tabanındakine benzer sürtünme katkısı nedeniyle kömürün çevreye sıvanması daha fazla olacak, yanan kömür için hacim/yüzey ilişkisi, yüzey lehine gelişmektedir.

Flanş ilavesi ile yakma başlığında bölgesel sıcaklıklar yükselmektedir. İkinci tip hava dağıtım başlığı ile daha yüksek bir sıcaklık dağılımı görülmektedir. Birinci hava dağıtım başlığı ile yürütülen çalışmalarda, en yüksek sıcaklık yakma başlığı içerisinde ikinci bölgede olurken, ikinci hava dağıtım başlığı kullanıldığında en yüksek sıcaklık üçüncü bölgede gerçekleşmektedir (Şekil 4.18). Her üç farklı çalıştırmada artan kömür debisi ile sıcaklıkların arttığı görülmektedir. Gücü 40 kW olarak planlanan bu sistemde Şırnak-Cizre linyiti için optimum besleme debisi 7 kg/saat olarak hesaplandı. Bu besleme hızından daha düşük besleme debilerinde başlıktaki sıcaklık dağılımının düşük olması beklenen bir sonuçtur.

Gaz yanmasında, yanma başlığı içerisindeki gaz konsantrasyonları, oluşacak reaksiyonların mertebeleri açısından önemlidir. Gaz yanma reaksiyonlarının hızı üzerinde yanma odası içeriği, gazların enerji seviyesi, gaz moleküllerinin çarpışma sıklığı ve egzotermik reaksiyon verebilecek çarpışma yoğunluğunun etkili olduğu bilinmektedir. Gaz çıkışı esnasında CO₂ oluşumu CO oluşumuna göre daha fazla ısı enerjisi vermesine rağmen gaz yanması safhasında inert durumda olan CO₂ fazla hava içerisindeki reaksiyona iştirak etmemiş O₂ molekülleri ile çarpışarak ortamın enerji seviyesini düşürebilir. Bu, CO₂ ile aynı olan N₂ için de söylenebilir (Öz, 1973). Hava dağıtımının ve hava hareketinin gaz yanma safhasında kimyasal reaksiyonların hızı üzerinde etkili olduğu

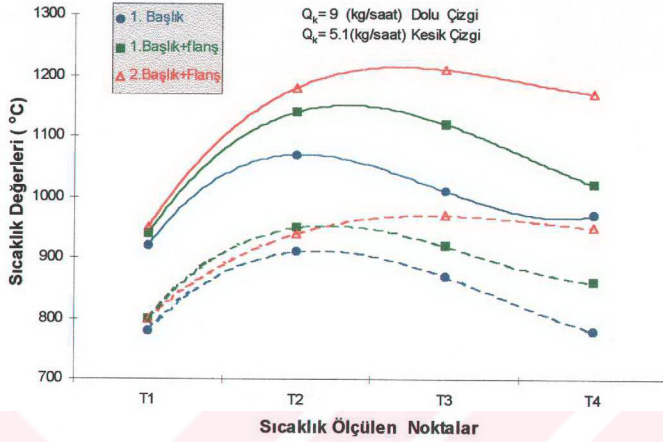
birçok araştırmada belirtilmiştir. Ancak hava dağıtım şeklinin etkisinin teorik olarak tamamen açıklanması oldukça zordur.



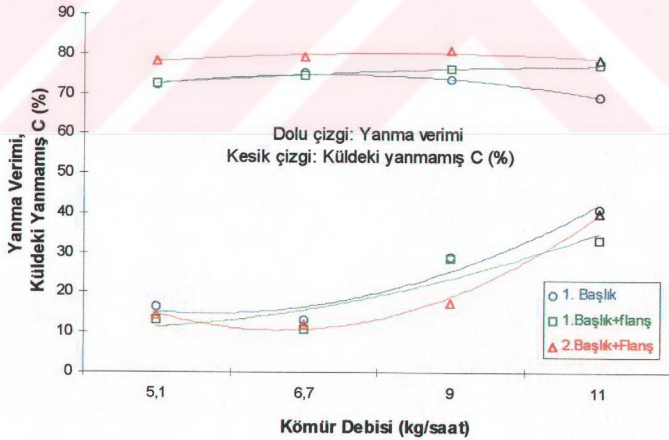
Resim 4.8. Dönme sırasında başlık içerisindeki kömür yatağının görünüşü

Tablo 4.10. Şımak-Cizre linyitinin yanmasında flanş ilavesi ve farklı hava dağıtım başlığı ile elde edilen yanma verilerinin değerleri

Q (kg/saat)	HFK	O ₂ (%)	CO (%)	SO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	CO ₂ (%)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	Verim (%)	Külde C (%)
Flanşsız												
5.1	1.3	11.4	487	251	113	8.7	780	910	870	780	72.3	16.36
6.7	1.3	9.2	174	261	109	10.7	880	1000	950	900	75.1	13
9	1.3	10.6	261	240	106	9.4	920	1070	1010	970	73.4	28.84
11	1.3	11.5	709	255	24	8.6	900	1060	980	920	69.3	41
Flanş + Kısa Hava Dağıtım Başlığı												
5.1	1.3	10.8	239	912	42	9.2	800	950	920	860	72.6	13.05
6.7	1.3	10.2	482	361	79	9.8	910	1050	1010	970	74.7	10.62
9	1.3	9.3	368	833	47	10.6	940	1140	1120	1020	76.3	28.57
11	1.3	9.1	408	278	112	10.8	950	1160	1050	970	77.1	33.35
Flanş + Uzun Hava Dağıtım Başlığı												
5.1	1.3	12.1	1003	731	51	8	800	940	970	950	78.2	14.36
6.7	1.3	11.5	946	763	52	8.6	900	1060	1100	1060	79.3	12.13
9	1.3	10	707	525	65	10	950	1180	1210	1170	80.8	17.60
11	1.3	11.2	309	368	69	8.9	980	1200	1250	1190	78.7	40



Şekil 4.18. Flanş ilavesi ve hava başlığı tipinin yakma başlığı bölgelerindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi



Şekil 4.19. Yanma veriminin ve küldeki yanmayan C %'sinin flanş ilavesi ve hava dağıtım başlığı tipi ile değişimi

Yanma başlığında doğrudan yatağa gönderilen birincil hava kararlı yanmada en önemli faktördür. Uçucu ürünlerin ve yatak yüzeyinden salınan gazların yanmasının tamamlanması için yatak üzerine ikincil havanın gönderilmesi gerektiği bilinmektedir. Bu hava miktarlarını teorik olarak hesaplamak mümkün değildir. Birincil ve ikincil hava miktarları, kömür cinsi, yakma sistemi ve hava dağıtım şekline göre değişir. Bunların oranları, yanma sırasında yanma verimi ve gaz konsantrasyonları dikkate alınarak deneysel verilere göre düzenlenebilir. Şekil 4.19'da uzun hava dağıtım başlığı kullanıldığında yanma veriminin yükseldiği görülmektedir. Uzun hava dağıtım başlığı, kısa hava dağıtım başlığı boyu 10 cm daha uzatılıp bu kısma 12 adet 3 mm çapında hava çıkış delikleri açılarak yapılmıştır. Bu ilave hava çıkış delikleri, ikincil hava yüzdesini artırmaktadır. Uzun hava dağıtım başlığı kullanıldığında yanma veriminin yükselmesi, bu başlık tipi ile uçucu madde yanmasının daha iyi gerçekleştiği şeklinde açıklanabilir.

4.3.2.11. Farklı kömür tiplerinin yakılması

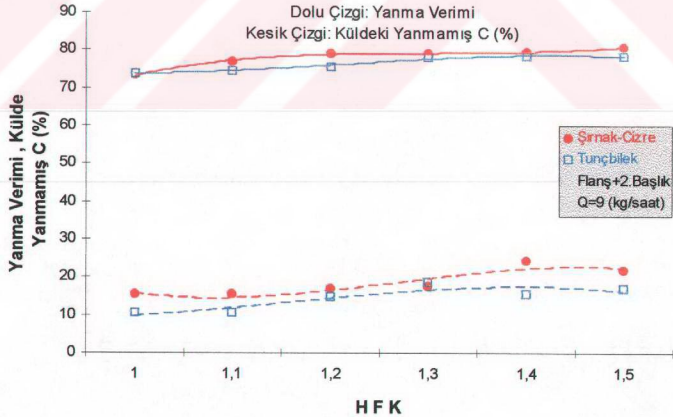
Aynı işletme şartlarında, Şırnak-Cizre linyitinin Tunçbilek linyitinden daha yüksek verimle yandığı görülmektedir (Şekil 4.20). Uçucu madde ayrılma ve yanma hızı belirli oksitlenme koşullarında, yatak sıcaklığı, tane büyüklüğü ve kömür tipinin fonksiyonudur. Tunçbilek linyitinin uçucu madde içeriğinin Şırnak-Cizre linyitine oranla daha fazla olduğu görülür. Buna göre uçucu madde yanma süresinin Tunçbilek linyitinde daha uzun sürmesi beklenir. Tunçbilek linyitinden çıkan uçucu maddelerin daha fazla olması, bu uçucu maddelerin, kamarada kalma süresi içinde Şırnak-Cizre kömürlerindeki kadar fazla hızla yanmalarını gerektirir. Gaz yanması için gönderilen ikincil hava, uçucu madde miktarı fazla olan kömürlerin yakılmasında, uçucu maddesi az olan kömürlere nazaran daha önemlidir ve daha fazla miktarda olması gerekir. Tunçbilek linyitinin aynı şartlarda yakılan Şırnak-Cizre linyitinden daha düşük verimle yanmasına ikincil havanın yeterince verilmemesinin sebep olduğu söylenebilir. Yüksek HFK'ında verimin yükselmesi bu düşüncüyü kuvvetlendirmektedir.

Kül miktarı az, ancak kül erime sıcaklığı düşük olan kömür, kül miktarı fazla, ancak kül erime sıcaklığı daha yüksek olan diğer bir kömürden daha düşük bir verimle yakılabilir. Tunçbilek kömürünün yakılmasında yüksek sıcaklıklarda kül yumuşaması

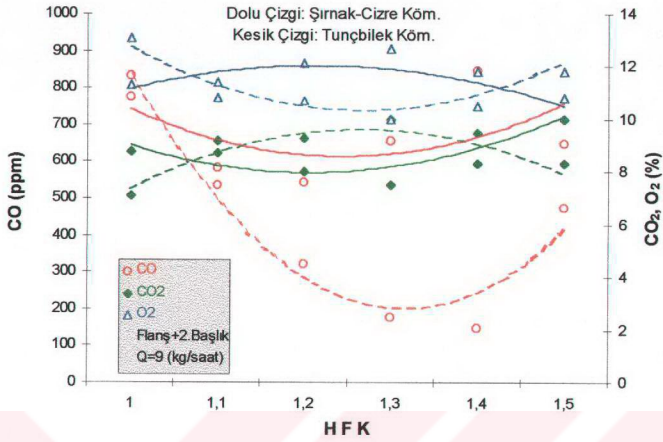
nedeniyle kömür taneleri topaklaşmakta, dolayısıyla yataktaki tane iriliğini artırarak verimi düşürmektedir.

Tablo 4.11. Şırnak-Cizre ve Tunçbilek linyitinin yanmasında edilen yanma verilerinin değerleri

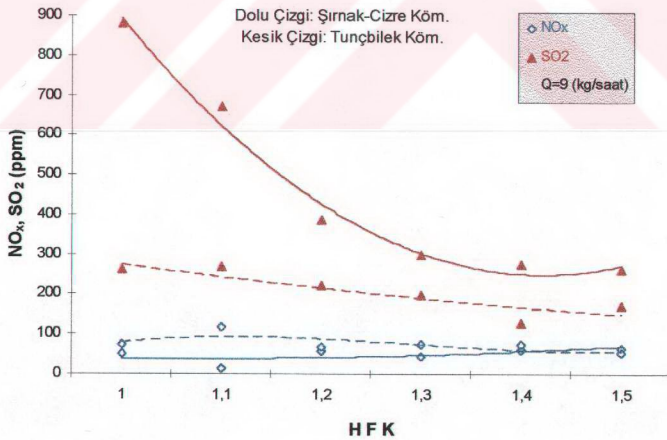
Q (kg/saat)	HFK	O ₂ (%)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	CO ₂ (%)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	Verim (%)	Külde C (%)
Şırnak-Cizre Linyiti												
9	1	11.3	835	880	49	8.8	870	970	1000	980	73.3	15.57
9	1.1	11.4	537	670	12	8.7	890	1000	1040	1000	77	15.49
9	1.2	12.1	544	386	56	8	940	1100	1120	1160	79.1	16.8
9	1.3	12.7	655	299	44	7.5	960	1150	1200	1140	79.2	17.6
9	1.4	10.5	848	274	62	9.5	880	1120	1180	1100	79.4	24.4
9	1.5	10	647	263	65	10	830	1060	1140	1050	809	22
Tunçbilek Linyiti												
9	1	13.1	777	261	73	6.7	900	1000	1030	1010	73.8	10.46
9	1.1	10.8	582	267	116	8.2	920	1050	1080	1030	74.6	10.48
9	1.2	10.7	323	221	68	8.7	980	1140	1170	1190	75.7	15
9	1.3	10	177	199	73	10.7	1000	1200	1250	1200	78.1	18.6
9	1.4	11.8	147	129	73	9.4	920	1180	1230	1140	78.3	15.4
9	1.5	11.8	475	171	53	8.6	880	1010	1170	1010	78.3	17



Şekil 4.20. Şırnak-Cizre ve Tunçbilek kömürlerinin yanma verimlerinin HFK ile değişimi



Şekil 4.21.A. Şırmak-Cizre ve Tunçbilek kömürlerinin yanmasında konsantrasyonlarının HFK ile değişimi



Şekil 4.21.B. Şırmak-Cizre ve Tunçbilek kömürlerinin yanmasında gaz konsantrasyonlarının HFK ile değişimi

Yüksek kül oranı gaz çıkış hızını yavaşlatır. Şırnak-Cizre kömürünün kül oranının daha yüksek ve uçucu maddesinin daha az olması nedeniyle uçucu madde yanması daha kısa sürebilir. Ayrıca, Şırnak-Cizre kömürünün uçucu madde yanma süresi artan sıcaklıkla fazla değişmemektedir (Deveci, N.,1994). Her iki kömür tipi için gaz konsantrasyonları Şekil 4.21.A ve Şekil 4.21.B de verilmiştir.

Şırnak-Cizre kömürü külü içerisinde daha fazla yanabilir madde olduğu görülmektedir. Kömürün ultimate analiz sonuçlarına bakıldığında Şırnak-Cizre kömürünün daha yüksek karbonlu olduğu görülür. Külde daha fazla karbon oluşması karbonun düşük reaktivitesinden olabilir. Buna göre Şırnak-Cizre linyitinin yanma veriminin daha düşük olması beklenir. Ancak bu kömür tipinin Tunçbilek kömüründen daha yüksek verimle yakılabilmesi, Tunçbilek kömüründe uçucu madde yanması için gerekli olan ikincil hava teminin yeterli olmadığı bu dağıtım şeklinin Şırnak-Cizre linyitine daha uygun olduğu düşünülebilir.

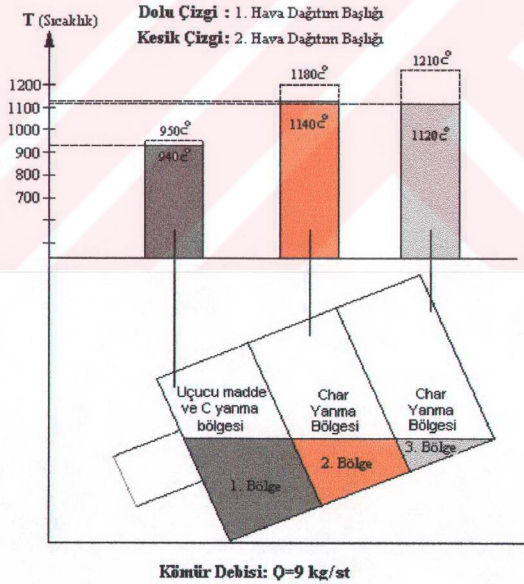
Artan hava ile kömür tipine göre yanma verimi ve küldeki yanmamış C yüzdesi farklı olmaktadır (Şekil 4.20). Bu, fazla havanın optimizasyonu, ısı kaybı ve CO oluşumunu dengeleyecek şekilde belirlenmesi yanında, kömür tipinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Yapılan çalışmada her iki kömür tipi için HFK'nın 1.3 civarında tutulmasının uygun olacağı, ancak Tunçbilek kömüründe ikincil hava miktarının daha fazla olması gerektiği kanaatine varılmıştır.

5. YANMA MODELİ

Modelleme için yakma başlığı bölgelere ayrılarak ilk bölgeler gaz çıkış bölgeleri sonraki bölgeler char yanma bölgeleri olarak kabul edilebilir. Gaz çıkışı ve char yanması hesaplamalarında bu bölgelerde ölçülen sıcaklıklar esas alınır.

5.1. Bölge Seçimi

Yakma başlığındaki kömür akışı her bölgenin karıştırıldığı ekstenel akış olarak kabul edilebilir. Yanma verimi ve külde yanabilirlik için model hesaplamalarda; çeşitli kömür besleme debilerinde iki tip hava dağıtım başlığı için yatağın eksen boyunca 3 noktadan ölçülen ortalama gaz ve tane sıcaklıkları kullanıldı. Yanma bölgelerinin açıklanması için şematik model Şekil 5.1'de verilmiştir



Şekil 5.1. Yanma modeli

Döner yakma başlığı, ortalama sıcaklık değerlerine dayanan 3 bölgeye bölünmüştür. Bu bölgelerden birinci bölge uçucu madde ve C yanma bölgesi diğer iki bölge char yanma bölgesi olarak kabul edilebilir. Bu her iki hava başlığı için uygulanmıştır. Ortalama sıcaklık dağılımı 9 kg/st besleme hızında sadece Şırnak-Cizre kömürü için alınmış ve her hava başlığı verileri farklı olarak çizilmiştir. Sürekli çizgi 1.başlığı, noktalı çizgi 2. başlığı göstermektedir. 2. Başlık daha üniform bir sıcaklık dağılımı vermektedir. Farklı kömür besleme debilerinin farklı sıcaklık ve farklı yanma bilgisi vereceği açıktır.

5.1.1. Gaz çıkış bölgesi

Şekil 5.1'de görülen birinci bölge için, geometrik yatak şekli işletme şartları ve başlık boyutlarından hacim (VS) hesaplanır. Bu kullanılır, besleme hızı (FW) ve yığın yoğunluğu (ROC) girilerek kömür hacimsel debisi (FV) bulunur. Her adımda bölgede ortalama kalma süresi $TT(R)$ hesaplanır. Bu kullanılarak 10 adım aralıklarla 1., 2. ve 3. Bölgelerdeki (TTR1), (TTR2) ve (TTR3) bulunur. Birinci bölgede kalma süresi esnasında kömür kütlesindeki azalmayı hesaplamak mümkündür. Birinci bölgede gazlaşma süresi (TD), bölge sıcaklığını esas alarak hesaplayan bir alt program ile bulunur. Bu değer birinci bölgede kalma süresinden çıkarılarak kalan süre 1. bölgede char yanma süresi (CYANMA 1) olarak değerlendirilir. Bu adım; sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gaz çıkış süresinin deneysel olarak laboratuvar ölçeğinde tespit edilmesi esasına dayanır. Yakma sisteminin dizaynında belirli şartlarda uçucu madde yanma süresinin bulunması önemli bir yer tutar. Laboratuvar şartlarında elde edilen bu bilgi kömür yataklarında yanma için kullanılması tam olarak doğru değildir, sonuç nispeten doğru sayılabilir. Ancak zamanı hesaplamak sadece bu bilgi ile mümkün olabilir. Birinci bölgede kalma süresi gazlaşma süresinden az ise ve gazlaşma için kabul edilmiş birden fazla bölge varsa; 2. ve sonraki bölgeler için, kalma süresi toplamı kadar yukarıdaki işlem tekrarlanır. Her bir safhada kütledeki kaybı kullanarak yeni parçacığın kütlesini hesaplamak mümkündür. Yanma için gerekli formüller akış şeması içerisinde verilmiştir.

5.1.2. Char tüketim (yanma) bölgesi

Char yanması için kalan toplam süre (TT) 1. Bölgede gazlaşma süresinden sonra artan kalma süresi ile 2. Ve 3. Bölgelerdeki kalma süreleri toplanarak bulunur. Bölgelerde gerçek char yanma süreleri için bir reaksiyon oranı denklemi kullanımla zorunluluğu vardır. Bu oran denklemi olarak; kömür yataklarında yanma için geliştirilmiş denklemler kullanılır. Veya yakılan aynı kömür tipi için laboratuvar ölçeğinde yapılan çalışma sonuçlarından elde edilen denklem kullanılır. Bu denklemler tek tane sıcaklığı ve tane büyüklüğü üzerine kurulmuştur. Tane sıcaklığı yerine bölgelerdeki tane sıcaklıkları esas alınır. Tane sıcaklıkları bu bölgelerdeki yanma odası sıcaklığından yaklaşık 150-200 derece daha yüksek olarak alınabilir. Hesaplamalarda tane büyüklüğü olarak; her bir bölge aralığındaki ortalama tane büyüklüğü alınır. N Bölgede (Gaz emisyonu bölgesinden sonraki ilk bölge), yanma süresi (TBDJ); bir parça büyüklüğü (DJ) ve bölgenin ortalama sıcaklığı kullanılarak kabul edilen denklemden hesaplanır. İlk char yanma bölgesine ortalama tane büyüklüğü (DJ) ve bölge sıcaklığı, standart şartlardaki kısmi basıç (PG), atmosferik basınç (PS), mol hacmi; ve karbonun mol ağırlığı girilir. Tane sıcaklığı hesaplanır. Havadaki CO ve gazlaşma sonrası kömür ağırlığı hesaplanır. Kömür ve yakma havası özellikleri girilerek, genel reaksiyon denklemden yanma süresi (TBDJ) hesaplanır. Bulunan değer char'ın bölgelerde toplam kalma süresi ile karşılaştırılır.

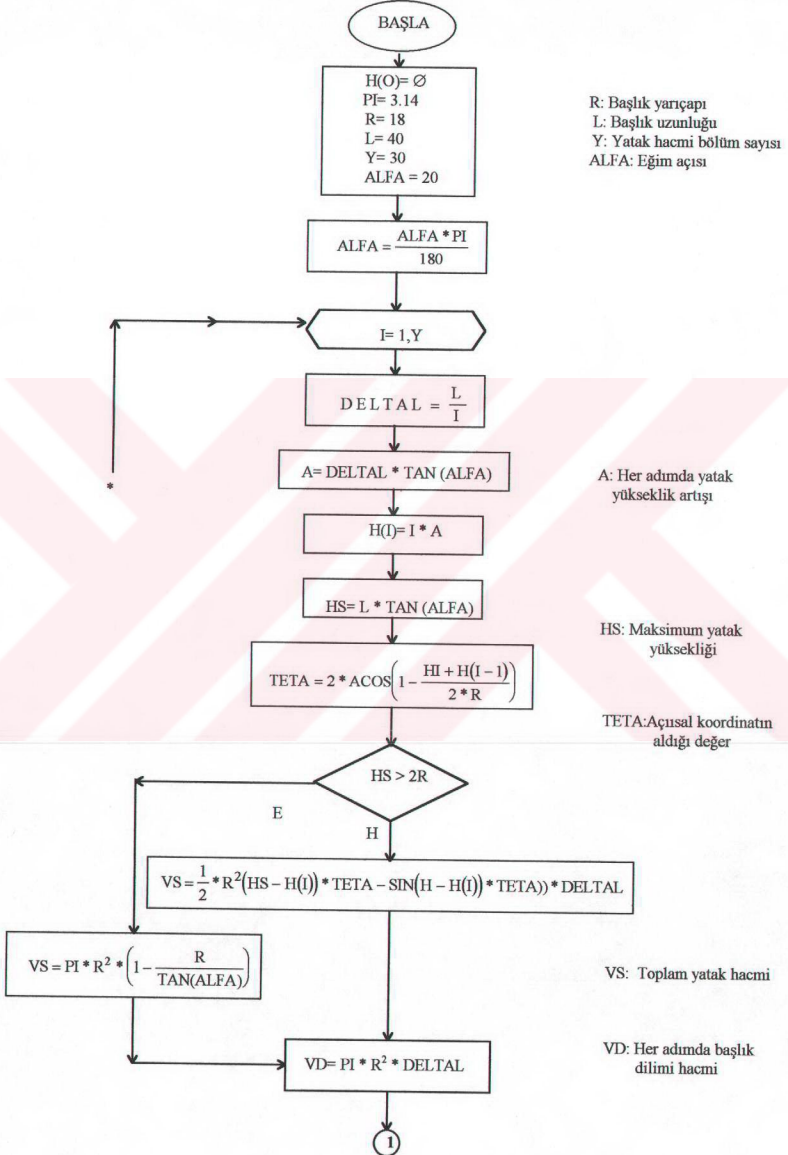
5.2. Model Sınırlılıkları

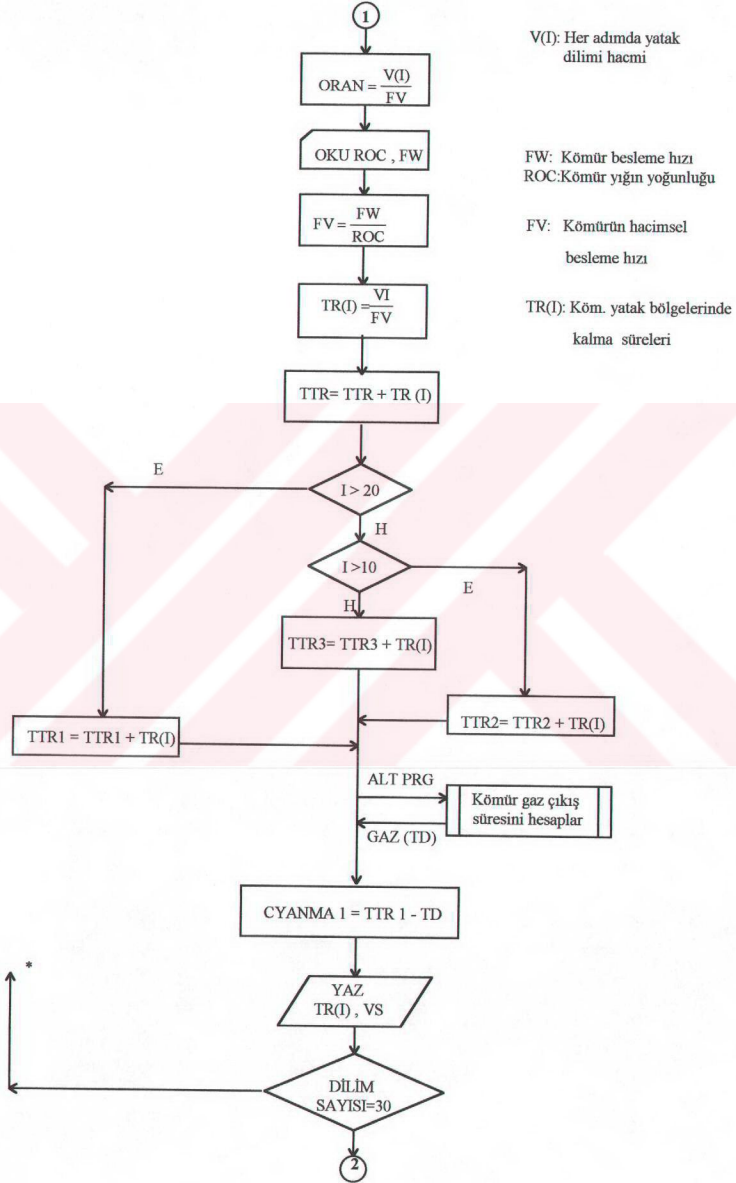
- a)-Bu modelin geliştirilmesinde kullanılan veriler sadece Şırnak-Cizre kömürü ile sınırlıdır
- b)-9 kg/h kömür akışı ve HFK=1.3 için ölçülen sıcaklık değerleri esas alınmıştır.
- c)-Bölgelerdeki kalma süresi model başlık için geçerlidir.
- d)-Bölge hacimleri, başlık boyutları ve işletme şartlarına göre değişir.

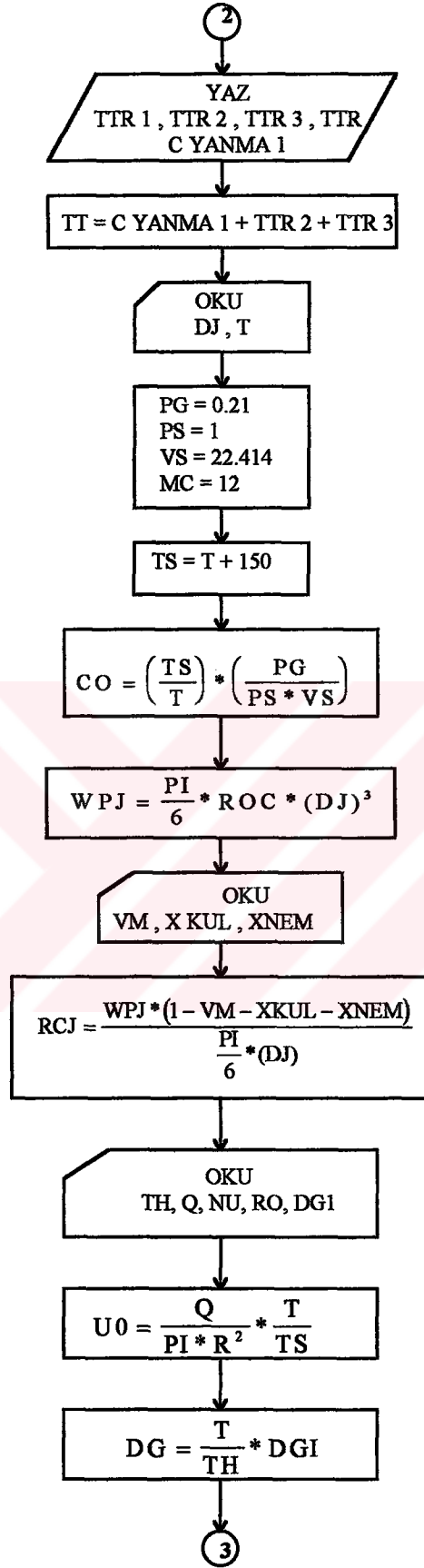
5.2.1 Hesap yöntemi

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi başlığın bölgelerinde gazlaşma ve char yanmasını belirlemek mümkündür. Bunlar; Şekil 5.2'de akış şeması verilen bilgisayar programı ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

Yanma Süresinin Hesaplanması







DJ: Kömür Çapı
T: Bölge Sıcaklığı

PG: Kısmi Basınç
PS: Standart Şartlar
(1 atm)

TS: Tane sıcaklığı

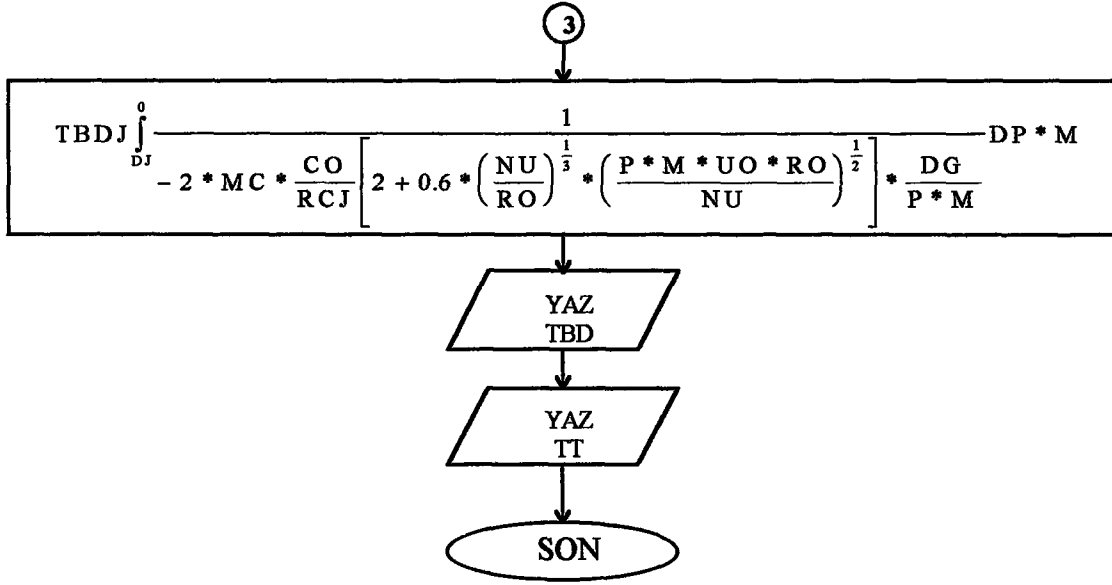
VPJ: Kalan kömürün
ağırlığı

RCJ: Uçucu madde
yanmasından kalan
kömür yoğunluğu

TH: Referans sıcaklık
Q : Hava Debisi
RO: Kömür yoğunluğu
DG1: Oksijenin TH
sıcaklığındaki havada
difüzyon katsayısı

UO: Havanın lineer hızı

DG: Oksijenin sistem
şartlarında hava içindeki
difüzyon katsayısı



Ek 4’de laboratuvar ölçeğinde belirlenmiş bir reaksiyon denklemi ile yanma süresi, bir bilgisayar programı ile hesaplanmıştır.

6. SONUÇLAR

Bu kısımda döner başlıklı yakma sistemi deney sonuçları tartışılmıştır.

1. Yeni tasarlanmış bir döner başlıklı yakıcının işletme karakteristikleri, sıcak ve soğuk çalıştırma durumlarına bağlı olarak açıklanmıştır. Düşük duman emisyonları şartları altında çalıştırmak kaydıyla yanma verimi % 80'in üzerine çıkmasının başarılması rotorun işletme şartlarının optimizasyonu ile mümkün olabilmektedir.
2. Yanmasız durumda kömürün başlıkta kalma süresi “ t_k ” yakıcının eğim açısı, kömür besleme hızı ve başlığın dönme hızının bir fonksiyonudur.
3. Kalma süresi eğimin kuvvetli bir fonksiyonu olarak bulundu. Sabit kömür besleme hızı için kalma süresi “ t_k ” aşağıdaki ampirik formüle göre bulunur :

$$t_k = 0.2121 \alpha^2 + 1.834 \alpha + 47.13$$

Burada α eğim açısıdır

Kalma süresi için diğer bir parametre olarak kömür besleme hızı bulundu. Kalma süresi; eğim açısına bağlı olarak aşağıdaki şekilde bulunur.

$$t_k = -10.034 Q + 144.3$$

Burada “Q” kömür debisidir.

4. Yanma verimi, kömür yatağı arasında havanın dağıtılmasının kuvvetli bir fonksiyonudur. 2. Hava dağıtım başlığı kullanıldığı zaman maksimum verim %78'den % 82'ye yükseldi.
5. Sonuçlar yanma veriminin; yanma odası sıcaklığı, küldeki yanmamış C yüzdesi ve uçucu madde yanmasının güçlü bir fonksiyonu olduğunu gösterdi. Küldeki en düşük C oranı % 2.78 en fazla % 41 olarak bulundu.
6. Yüksek karbonlu (Şırnak-Cizre) kömürlerin düşük yatak derinliklerine sahip yataklarda yakılması durumunda küldeki karbon (C) oranı; düşük karbonlu (Tunçbilek) kömürlere göre daha yüksektir. Bunların yanma verimini artırmak için yatak derinliği artırılabilir. Bu durumda daha fazla kalma süresi gereklidir. Yüksek karbonlu kömürler yakılırken eğim artırılarak kalma süresi artırılmalıdır.

7. Zayıf kekleşen kömürler yakılırken; aglomerasyon ve kek bütünleşmesini önlemek için yakma başlığı düşük bir devirle döndürülerek zayıf bir çalkalama sağlanması yeterlidir.
8. Yüksek kabarma özellikli kömürlerin yanma esnasında kek bütünleşmesini önlemek için daha fazla çalkalamaya ihtiyaç duyulur. Bunun için; eğimin azaltılması veya iç karıştırıcı ilavesi düşünülebilir.
9. Döner başlıklı yakma sistemi üzerinde bazı uçucu gazların kirlilik düzeyleri izlendi. NO_x , CO , SO_2 ve duman seviyesi emisyonları ölçüldü, aşağıdaki sonuçlar bulundu.
 - a) Yatak derinliği NO_x emisyonu üzerinde etkilidir. Ancak yatak derinliği arttıkça NO_x önemsiz bir artış gösterir. Uçucu gazda NO_x emisyonunun artmasında yüksek sıcaklık etkili olmaktadır. Yapılan bütün deneyler içerisinde NO_x oranı maksimum 140 ppm (192 mg/m^3) olarak gerçekleşti. Çevre bakanlığı yeni tesisler için bu değer sınırını 800 mg/m^3 olarak belirlemiştir (T.Çevre Mevzuatı,1992).
 - b) Kararlı yanma durumuna geçildikten sonra bütün deneylerde duman ısılık derecesi Ring elman ölçeğine göre maksimum 0.5 olarak ölçüldü. Bu değer çevre bakanlığı mevzuatına göre yeni tesisler için maksimum 2 olarak belirlendiği dikkate alınır; yanmanın oldukça iyi bir ısılık derecesi ile gerçekleştiği söylenebilir.
 - c) Sıcaklık, hava hareketi ve yatak derinliği CO oluşumu üzerinde etkilidir. CO sıcaklık ve hava hareketinin artması ile azalırken, yatak derinliğinin artması ile artırmaktadır. Optimum işletme şartlarında CO emisyonu “174 ppm (217 mg/m^3)” oldukça az bir değere kadar düşmektedir.
 - d) SO_2 oranı artan HFK ile azalmaktadır. Optimum işletme şartlarında SO_2 emisyonu 240 ppm (686 mg/m^3) olarak gerçekleşti. Bu değer çevre bakanlığı mevzuatına göre düşük kükürt oranlı kömür yakan tesisler için maksimum 2000 mg/m^3 , yüksek kükürt oranlı kömür kullanan tesisler için 2500 mg/m^3 olarak belirlendiği dikkate alınır; SO_2 emisyonun çok iyi bir değer olduğu söylenebilir.
10. Başlık içerisindeki sıcaklık dağılımı 2. hava dağıtım başlığı kullanılması durumunda daha üniform olduğu görüldü.
11. Darbeli kömür besleme; yanma başlığının arka kısmında aksel olarak çok az (ihmal edilebilir) bir çalkalama etkisi yapmaktadır.
12. Kömürlerin içerdiği kül miktarı yanma verimi üzerinde büyük ölçüde etkilidir. Daha aktif olması beklenen düşük karbonlu kömürler artan kül oranı ile aktivitesi azalarak

12. Kömürlerin içerdği kül miktarı yanma verimi üzerinde büyük ölçüde etkilidir. Daha aktif olması beklenen düşük karbonlu kömürler artan kül oranı ile aktivitesi azalarak char yanma süresi uzamaktadır. Ancak yanma odasının döndürülmesinin külün yanma üzerindeki bu olumsuz etkisini azalttığı sonucuna varılmıştır.
13. Hava dağıtım başlığı deliklerinden havanın basınçlı olarak çıkması, külün yanma üzerindeki olumsuz etkisini azaltmaktadır.
14. Yüksek hava debilerinde dağıtım başlığından çıkan hava hızının artması Grit emisyonu üzerinde etkili olmaktadır.
15. Yapılan çalışmada her iki kömür tipi için HFK'nın 1.3 civarında tutulmasının uygun olacağı ancak Tunçbilek kömüründe ikincil hava miktarının daha fazla olması kanaatine varılmıştır.
16. Küldeki yanmamış C miktarını azaltmak için kömürün yanma başlığında kalma süresinin artırılması gerektiği, bunun, başlık boyunun uzatılarak sağlanmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

ABBI, Y.B., BANERJI, M., vd (1978). Developmend of Fluidised Combustion Boilers For Indian Coals. **The American Institue of Mining and Metalurgical Engineers**

ALLEN, J.,(1939). Performance Expectancy of Domestic Underfeed Stokers for Anthracite. **The American Institue of Chemical Symposium Series,V 74, 176**

ARISOY, A.,(1991). **Sabit Katı Yakıt Yatağındaki Yanmanın Deneysel İncelenmesi.** İ.T.Ü. Enerji UYGAR Merkezi. Araştırma Projesi. 73, 9.

ARISOY, A.,(1991). **Kömürlerin Yakılması.** İ.T.Ü. Mak. Fak. Yay.

AUDIBERT, M.E., (1922). Rev. Ind. **Minerale**,37,251.

BALL, G.,(1965). Heat Transfer,Combustion and temperature in a Furnace Tube Model. **Journal of the Enstitüe of Fuel**, March. 115-123.

BARKLEY, J.F. and BUDRICK, L.R.,(1933). Operation of Horizantal Underfeed Stokers. **Power Plant Engineering**, September, 377-379.

BARKLEY, J.F.,(1933). Some Operating Result on Small Heating Plant Stokers. **Pover Plant Eng.** Vol. 8.,11, 541.

BARNES, C.A., (1939).Fundamentals of Combustion in Small Underfeed Stokers. **Fuel in Science and Practive**, 18, 11, 247-249.

BARNES, C.A., (1940).Fundamentals of Combustion in Small Underfeed Stokers. **Fuel in Science and Practive**, 18., 5, 154-160

BARNES, C.A., (1940).Fundamentals of Combustion in Small Underfeed Stokers. **Fuel in Science and Practive**, 18, 11, 320-324.

BARNES, C.A., (1940). Fundamentals of Combustion in Small Underfeed Stokers. **Fuel in Science and Practice**, 18., 7, 204-212.

BARNES, C.A., (1941). Fundamentals of Combustion in Small Underfeed Stokers. **Fuel in Science and Practice**, 18., 9, 260-265.

BAŞOL, K., **Doğal Kaynaklar Ekonomisi**. 138-139. Anadolu Matbaası, İzmir.

BERKOWITZ, N., (1979). **An Introduction to Coal Technology**, Academic Press, 201-209, New York.

BLYHOLDER, G. D., and EYRING, H., (1957). **J. Phys. Chem.**, 61 682-8

BİRİN, C., ESKİKAYA, Ş., ÖZ, D., (1979). **Dünya Madencilik Konferansı**. Türk Tarih Kurumu Basımevi, İstanbul, Türkiye.

BORAT, O., (1983). Yanma Stokiyometrisi, İTÜ Makine Fakültesi

BREWER, R.F., (1942). Bureau of Mines. **Bull**, 445.

BURKE, S.A., SPARHAM, G.A., (1952). **Bull**, Mon., 16, 18, 349.

CARMAN, E.P., (1945). Trans. Amer. Soc. Mech., **Eng.**, 67, 425.

CONF. ON COAL, (1983). Coal-New Industrial Opportunities an Overview of Combustion Equipment. **Conference cent.**, London.

CHEN, L., (1981). Fluidized Bed Coal Freeboard Phenomena Study. **Ph.D. Thesis**. Morgantown West Virginia.

CLEMENT, J.K., FRAZIER, J.C.W., AUGUSTINE, C.E.,(1917). U.S. Bureau of Mines, **Tech.,Paper,63.**

DAVIDSON, J.F., AVEDISIAN, M.M. Combustion of Carbon Particles in a Fludisied Bed. **Transections of Institue of Chemical Engineers, 51.**

D.P.T. PROGRAMI (1989).

DEVECİ, N. (1994). **Kömürün Akışkan Yatakta Yakılması.** Yüksek Lisans Tezi F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.

DUNNINGHAM, A.C. and Grummel, E.S., (1938).The Swelling of Coal During Combustion. **Fuel in Science and Practice.** Vol. 17., 11, 324.

EDWARDS, H.W., (1972). Interaction of NO with Graphite. **A.I.Ch.E., Symp.Ser.,126, 68, 91.**

EKİNCİ, E., TOLAY, M., KADIOĞLU. E., (1983). Akışkan yatakta Uçucu Madde Davranımı. **1. Yanma Sepozyumu, 63-73.** Uludağ Üniversitesi, Bursa,

EKİNCİ, E., TOLAY, M., ATAKÜL,H., TEOMAN,Y., (1986). Akışkan yataklı Yakıcılarda Kimyasal Ortam Olarak Serbest Bölge. **Isı Bilimi ve Tekniği.** 9, 1, 21-29

ESSENHIGH, R.H.,(1981). **Chemistry of Coal Utilization,Second Supplemetary Volume (Ed.M.A.Elliot),1313-1389,Canada.**

ESSENHIGH, R.H.,(1957). Proc. 2 nd. Pulverised Fuel Conf., **Inst. Fuel, London,B17.**

ESSENHIGH, R.H.,(1959)., **Ph.D. Thesis,** University of Sheffield

- ESSENHUGH, R.H. and THRING, M.W., (1963). **Thermodynamics and Kinetics of Solid Combustion**. Chepter 17, 754-772. University of Sheffield, England.
- FORD, N., COOKE, M.J.,(1990). The Institue of Chemical Engineers. **Environmental Bull**, 9, 3-9.
- FORTHERGIL, R.J.,(1982). Trans. NECst.,**Inst. Engrs.**, 4,43.
- FLINT, W.L., and KARMI, E.R., (1984). **Third International Fludisation Conferance**. Institue of Energy, 299.
- FUROSOWA, T. Ve diğerleri (1972). Abatement of Nitric Oxide Emission in Fluidised Bed Combustion of Japan. 1, 5.
- GARNER, F.H. and HENNY, V.E., (1952). Behaviour of Sprays Under High Altitude Conditions. **Coal Combustion**, 151-160.
- GIBBS, B.M. and HEDLAY, A.B.,(1978). Combustion of Large Coal Particles in a Fluidised Bed. **Fludisation**, Cambiridge Univ.
- GIBSON, J.,(1979).**Combustion of fuels of Low Calorific Value in Fludised Bed**. 10. Dünya Madencilik Konferansı, İstanbul,Türkiye.
- GIVEN, D.M., (1955). **Power Engineering**. June, 82-84.
- GRIFFIN, H.K., Godbert, a.l., **Fuel**, 9, 57-75
- GÜVENİLİR, Y., (1984). **Akışkan Yatakta Dağıtıcı Tasarımı**. Yüksek Lisans Tezi. İ.T.Ü., Kimya-Metalurji Anabilimdalı, 3-5.
- HONSBY- SMITH, P.M.,(1959). U. Of Shefild, **Fuel**. Soc. Journ.,10.

HAKVOOTRH, G., (1992). Environmental Effects of Coal Combustion. **Journal of Thermal Analysis**, 38, 9-16.

HELFINSTINE, G.H. and CADY, G.H.,(1949). Correlation of Performance Characteristics of Domestic-Stoker Coals With Their Chemical and Petrographic Composition. **Transactions of the ASME**.

JONES, M. BEER.,(1991) **Massachusetts Institute of Technology**. MA, 18, 85-86 U.S.A.,Cambridge.

JONKE, A.A. Ve diğerleri, (1972). Pollution Control Capabilities of Fluidised Bed Combustion. . **A.I.Ch.E., Symp.**

KANURY, A.M., Introduction to Combustion Phenomena, **Gordan and Breach Science**.

KHITRIM, L.M., (1957). **Physics of Combustion and Detonation**, Moscow University,143.

KREISINGER, H., OVITY, F.K., AUGUSTINE, C.E., (1918).U.S. Bureau of Mines. **Tech.**,paper,137.

KURAL, O., (1991). **KÖMÜR**. İ.T.Ü. Maden Fakültesi Yayınları.

LA NAUSE, R.D., (1964). Coal Devolatilisation in Fluidized Bed Combustors. **Fuel**. 61,771.

MAC DONALD, E.J. and MURREY, M.V.,(1955). **J. Inst. Of Fuel**, Oct.

MAKİNE MÜH. YAY.,(1983). **Kalorifer Tesisatı Proje Hazırlama Teknik Esasları** No.84

MALONEY, L.K., (1983). Pollution Control, Reduce Flue Gas to Cat Emissions, Improve Boiler Performance. **Pover**, June, 97-99.

MALIK, A.A., **Ph. D. Thesis**. Newcastle Univ., 1991.

MARSICEL, G.W., MILLER, J.M., (1946). **Fuel**, 25, 159.

MARTENS, F.J., (1984). Free Board Phenomena in a Fluidized Bed Coal Combustor. **Ph.D. Thesis**, Univ of Delft.

MARTIN, A.M., PITTSBURGH, P.A. (1941). Flow Processes in Underfeed Stokers. **Transactions of the A.S.M.E.**, 479-489.

MARKSKELL, G. W. and MILLER, J.M., (1946). Mode of Combustion of Coal on a Chain Grate Stoker. **Fuel**. 25, 159.

MAYERS, A.M., (1937). Trans. Amer., **Soc. A.Engrs.**, 59.

MAYERS, A.M., (1941). Flow Processes in Underfeed Stokers. **Transactions of the A.S.M.E.**, 479-489.

MURREY, M.V., (1957). The Performance on Overfeed Coking Stoker Using ½ in - O Smalls., J. Inst, **Fuel**. 30, 276.

NAG, P.K., MAHADEVAN, V., (1976). **A Graphic Correlation for Fuel**, June, 83-87.

NICHOLS, P., (1934). U.S. Bureau of Mines Bull. 378.

NICHOLS, P., RICE, W.E., LANDRY, B.A., REID, W.T., (1937). U.S. Bur. Min., **Bull.**, 404.

NUSSELT, W.,(1924). Z. VDI., 68, 124-128.

ÖZ, H., (1973). **Termodinamik Esaslar**. İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, Cilt 1, 78-80

PEHLİVAN, D., PAMUK, V., BİÇER, Y., (1995). Combustion of Single Coal Particles. **Tr. J. Of Engineering and Environmental Sciences**. 19, 35-41.

PURCEL, S.P.,SLAUGHTER, D.M.,MUNRO, J.M.,(1980). Jooint Symposium on Stationary NO_x Control. **Denver, Columbus**,216.

PILLAI, K.K., (1981). The Inflance of Coal Type on the Devolatilization and Combustion in Fluidizied Beds. **Jour.Inst. of Energy**. 1142-1150.

PILLAI, K.K., (1985). Devolatilization and Combustion of Large Coal Particle in a Fluidizied Bed. **Jour.Inst. of Energy**. 54, 3-7.

PITT, G.J., MILWARD, G.R., (1981). Coal and Modern Coal Procesing on Untroduction. **Acedemic**. London.

REGLAND, K.W., JEHN, T.C., JANG. T., (1981). Coal Combustion at High Reynolds Number. **Symposium on Combustion**, 1295-1303.

ROLFE, T.J.K. and MECH, A.M.I., (1961). Distribution of Primary Air in Chain-Grate Stokers. **Journal of the Institue of Fuel**, 482-491.

SELÇUK, N. ve PEKYILMAZ, A.,(1983). Akışkan Yataklı Kömür Yakıcılarının Modellenmesi. **İş Bilim ve Tekniği Dergisi**.,6,2,39-43.

SHERMAN, R.A., KAISER, E.R., LIMBACHER, H.L., (1937). Bit. Coal.Rev.Inc. **Tech.Rept.1** (pt-II).

- SILVER, R.S., (1952). Theoretical Treatment of Combustion in Fuel Beds I-Gas Composition and Heat Release. **Research Department, Federated Foundries Ltd.**, 121-137. Glaskow, Scotland.
- SILVER, R.S., (1952). Theoretical Treatment of Combustion in Fuel Beds II-Temperature Attained in Combustion. **Research Department, Federated Foundries Ltd.**, 138-149. Glaskow, Scotland..
- SIMIT, W.D., (1954). The Small Underfeed Stoker. **The Coal Utilisation Research Association**. 18,5, 189-203.
- SMOOT, L.D., SMITH, P.J. (1985). **Coal Combustion and Gasification**. Plenum Press.
- SPALDING, D.B., (1988). **Combustion and Mass Transfer**, Pergamon.
- STEPHAN, L., (1980). Time to Leap Aboard the Coal Wagon. **Building Services and Environmental Engineering**. 12, 14-16.
- STUBINGTON, J.F., (1980). The Role of Coal Volatiles in Fluidized Bed Combustion. **Journal of the Institute of Energy**. 53-55, 191-195.
- THRING, M.W. (1944). **Coal Research**, sept., 77.
- THRING, M.W., ESSENHIGH R.H., (1963). **Chemisstry Of Coal Utilizations** r University of Sheffield. Chapter 17,754
- T.K.İ.İŞLETME DAİRE BAŞKANLIĞI, (1991). T.K.İ. 1990 Yılı Üretim ve Dağıtım Programı. İşletme Daire Başkanlığı Üretim Takip Şube Müd., Şubat, 1990.
- TU, C.M., DAVIS, H., and HOTTEL, H.C., (1934). **Industrial and Engineering Chemistry**, 26, 749-757.

TÜRK ÇEVRE MEVZUATI, (1992). **Türkiye Çevre Vakfı Yayını**, Haziran, 1992

UNDERWOOD, G., (1956). **Ph.D. Thesis**, Sheffild Univ.

URKAN,M.K.,(1986) Akışkan Yatakta Yakma Teknolojisi Uygulamalar. Isı Bilimi ve Tekniği.9.1.55-59

WATERHOUS ,W.G.,(1964). **Ph.D. Thesis**, Sheff. Univ.

WRIGHT, C.C. AND SPICER, T.S.,(1952). Amer. Ins. Min., Met. Engrs. **Coal Div.**,149-270.

YALKAN, G., ATAKAN.,(1983). ve Diğerleri, Akışkan Yataklı Kömür Yakıcılarının Modellenmesi-Reaksiyon Hız İfadesinin Etkisi. **Isı Bilimi ve Tekniği**. 6,2,39-43.

YALKIN, G., ATAKÜL, H., (1986). Bazı Türk Kömürlerinin Akışkan Yatakta Uçucu Madde Yanma Süreleri. **Isı Bilimi ve Tekniği**. 9,1,47-54.

YEGER, E. K., (1990). Coal in The 21 st Century. **Energy World**.

ZENE, R.E., and YANCY, H.Y., (1940). U.S. Bureau of Mines, **Rept. Inves.**,3349.

EKLER

Ek 1.

Hava Debisinin Ölçülmesi

Hava debisinin ölçülmesinde bir British BS1042, Part1, 1984 standardına göre yapılmış orifis ve eğik manometre kullanıldı. Orifisin üst akım ve alt akım bölgeleri arasındaki su yüksekliği olarak basınç farkı ile kütleli debi arasındaki ilişki için; enerji denklemi, süreklilik denklemi ve bernoilli denkleminde yararlanılarak aşağıdaki ifade verilmiştir (Cussons tech.,1994).

$$Q = 0.2087 C Z_D Z_R \epsilon E d^2 (h/\rho_H)^{0.5}$$

$$\epsilon = 1/(1-m^2)^{0.5}$$

$$m = (d/D)^2$$

$$\rho = P/RT$$

Burada;

- Q : Havanın hacimsel debisi (m³/saat)
- d : Orifis çapı (mm)
- D : Orifisin önündeki boru çapı (mm)
- ρ_H : Orifisin önündeki hava yoğunluğu (kg/m³)
- h : Manomatreden okunan fark basınç (mm H₂O)
- P : Orifisin önündeki mutlak basınç (bar)
- C : Orifis katsayısı
- Z_R : Reynolds sayısı düzeltme faktörü
- Z_D : Boru boyut düzeltme faktörü
- ϵ : Genişleme faktörü
- E : Hız düzeltme faktörü

4.1 Eşitliğinde verilen katsayı ve düzeltme faktörlerinin değerleri, orifis geometrisi için deney sonuçlarına dayandırılarak çizilmiş grafiklerden alındı. Bizim deney düzeneğimiz için; C = 0.60 , Z_D = 1.003 olarak bulundu. 4.2. Eşitliğinden E=1.0145 olarak hesaplandı. Z_R ve ϵ ihmal edilerek bulunan değerler 4.1 eşitliğinde yerlerine konulursa;

$$Q = 0.12532 d^2 (h/\rho_H)^{0.5} \quad \text{bulunur.}$$

Barometrik basınç, $P = 0.9799$ (bar), $T = 309$ (K) ve $R = 287$ (J/kgK) değerleri ile 4.4. eşitliğinden $\rho_H = 1.1049$ (kg/m³) bulunur. Bu değer 4.5 eşitliğinde yerine konulursa; $d = 37$ mm orifis çapı için hacimsel hava debisi bulunur.

$$Q = 9.992 (h)^{0.5} \quad (\text{m}^3/\text{saat}) \quad (1)$$

Teorik yakma havası miktarı yakılan kömürün debisine göre aşağıdaki denklemden bulunur.

$$Q = W \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} \right) \frac{100}{21} \left(\frac{T}{273} \right) \left(\frac{760}{P} \right) 22.4141 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \quad (2)$$

1 ve 2 denklemleri eşitlenerek her kömür debisi (W) ve hava fazlalık katsayısı (λ) için manometre yüksekliği (h) bulunur.

Ek 2.

Tablolar

Ek Tablo 1. 4-9.5 mm kömür büyüklüğü ve 0.934 kg/dm³ yığın yoğunluklu Şırnak-Cizre kömürünün döner yakma başlıklı sistemdeki soğuk deneme sonuçları

Kuyruk Açısı α (derece)	Kömür Debisi Q (kg/h)	Başlık Devir Sayısı n (dak ⁻¹)	Kömür Yatağı Hacmi (dm ³)	Başlıktaki Kömür Miktarı (kg)	Başlıkta Kalma Süresi t (dak)
10	20,52	4,7	5.1	4,76	10,40
10	20,52	5,4	4.7	4,39	10,10
10	20,52	6,0	4.2	3,92	9,70
10	15,75	4,7	3.9	3,64	13,83
10	15,75	5,4	3.7	3,45	13,50
10	15,75	6,0	3.5	3,27	13,05
10	12,83	4,7	3.5	3,27	18,39
10	12,83	5,4	3.3	3,08	17,95
10	12,83	6,0	3	2,80	17,40
20	20,52	4,7	7.8	7,28	20,50
20	20,52	5,4	7.3	6,81	19,00
20	20,52	6,0	6.9	6,44	18,20
20	15,75	4,7	7	6,54	27,25
20	15,75	5,4	6.7	6,26	25,30
20	15,75	6,0	6.3	5,88	24,20
20	12,83	4,7	7	6,54	33,50
20	12,83	5,4	6.3	5,88	31,10
20	12,83	6,0	6	5,60	29,80
30	20,52	4,7	16	14,94	45,00
30	20,52	5,4	15.6	14,57	43,80
30	20,52	6,0	15.1	14,10	42,20
30	15,75	4,7	16.2	15,13	59,85
30	15,75	5,4	16	14,94	58,70
30	15,75	6,0	15.7	14,66	57,20
30	12,83	4,7	17	15,88	73,60
30	12,83	5,4	16.5	15,41	72,20
30	12,83	6,0	16.1	15,04	71,40

İÇ. YÜKSEK LİSE KURULU
DOKÜMANLAMA MERKEZİ

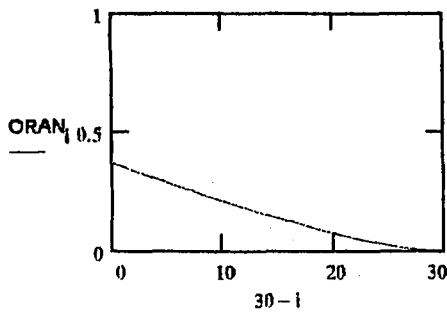
Ek Tablo 2. 9.5-19 mm kömür büyüklüğü ve 0.934 kg/dm³ yığın yoğunluklu Şırnak-Cizre kömürünün döner yakma başlıklı sistemdeki soğuk deneme sonuçları

Kuyruk Açısı α (derece)	Kömür Debisi Q (kg/h)	Başlık Devir Sayısı n (dak ⁻¹)	Kömür Yatağı Hacmi (dm ³)	Başlıktaki Kömür Miktarı (kg)	Başlıkta Kalma Süresi t (dak)
10	18,20	4,7	4,760	4,08	15,00
10	18,20	5,4	4,670	4,00	14,60
10	18,20	6,0	4,450	3,81	14,10
10	14,01	4,7	4,760	3,99	19,80
10	14,01	5,4	4,670	3,94	19,20
10	14,01	6,0	4,450	3,77	18,50
10	11,48	4,7	4,760	3,90	24,10
10	11,48	5,4	4,670	3,88	23,40
10	11,48	6,0	4,450	3,74	22,70
20	18,20	4,7	9,450	8,10	26,60
20	18,20	5,4	9,330	8,00	26,00
20	18,20	6,0	9,220	7,90	25,10
20	14,01	4,7	9,450	7,97	34,50
20	14,01	5,4	9,330	7,80	33,40
20	14,01	6,0	9,220	7,82	33,40
20	11,48	4,7	9,450	7,93	44,30
20	11,48	5,4	9,330	7,82	43,70
20	11,48	6,0	9,220	7,73	43,00
30	18,20	4,7	18,430	15,60	52,00
30	18,20	5,4	18,320	15,44	51,40
30	18,20	6,0	18,180	15,30	49,70
30	14,01	4,7	18,430	15,40	68,70
30	14,01	5,4	18,320	15,27	68,00
30	14,01	6,0	18,180	15,08	67,40
30	11,48	4,7	18,430	15,28	89,20
30	11,48	5,4	18,320	15,10	88,40
30	11,48	6,0	18,180	14,980	88,00

Ek Tablo 3. 19-32 mm kömür büyüklüğü ve 0.934 kg/dm³ yığın yoğunluklu Şırnak-Cizre kömürünün döner yakma başlıklı sistemdeki soğuk deneme sonuçları

Kuyruk Açısı α (derece)	Kömür Debisi Q (kg/h)	Başlık Devir Sayısı n (dak ⁻¹)	Kömür Yatağı Hacmi (dm ³)	Başlıktaki Kömür Miktarı (kg)	Başlıkta Kalma Süresi t (dak)
10	14,80	4,7	5,40	4,40	17,50
10	14,80	5,4	5,27	4,30	17,60
10	14,80	6,0	5,17	4,22	17,10
10	11,40	4,7	5,39	4,32	20,36
10	11,40	5,4	5,27	4,13	20,30
10	11,40	6,0	5,17	4,08	20,60
10	8,80	4,7	5,39	4,08	24,36
10	8,80	5,4	5,27	3,97	24,70
10	8,80	6,0	5,17	3,84	24,00
20	14,80	4,7	11,02	8,99	38,00
20	14,80	5,4	10,85	8,85	37,50
20	14,80	6,0	10,20	8,32	37,10
20	11,40	4,7	10,80	8,81	49,50
20	11,40	5,4	10,65	8,69	49,00
20	11,40	6,0	10,50	8,57	48,60
20	8,80	4,7	10,60	8,65	62,37
20	8,80	5,4	10,50	8,65	61,74
20	8,80	6,0	10,35	8,45	60,10
30	14,80	4,7	22,41	18,28	72,00
30	14,80	5,4	22,18	18,10	71,40
30	14,80	6,0	22,00	17,95	71,00
30	11,40	4,7	22,20	18,10	92,80
30	11,40	5,4	22,00	17,95	91,60
30	11,40	6,0	21,85	17,83	90,90
30	8,80	4,7	22,00	17,95	115,00
30	8,80	5,4	21,75	17,75	114,00
30	8,80	6,0	12,55	17,62	113,00

Döner başlık kömür yatağı hacminin ve kalma süresinin hesabı

 $i := 1 .. 30$ Başlık çapı : $R := 18 \cdot \text{cm}$ Başlık uzunluğu : $L := 40 \cdot \text{cm}$ Uzunluk artışı : $\Delta L := \frac{40}{30}$ Başlık eğim açısı (radyan) : $\alpha := \pi \cdot \frac{20}{180}$ Yatak uzunluğu boyunca her adımda yükseklik artışı : $a := \Delta L \cdot \tan(\alpha) \cdot \text{cm}$ Yatak uzunluğu boyunca yatak yükseklikleri : $H_i := i \cdot a$ Maksimum yatak yüksekliği : $HS := L \cdot \tan(\alpha)$ Her yükseklik için açısal koordinatın aldığı değer : $\theta_i := 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{H_i + H_{i-1}}{2 \cdot R}\right)$ Maksimum yüksekliğe kadar toplam yatak hacmi : $VS1 := \sum_i \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot (\arccos(1 - \frac{HS - H_i}{R}) - \sin(\arccos(1 - \frac{HS - H_i}{R}))) \cdot \Delta L \cdot \text{cm}$ Maksimum yükseklik aşıldığında toplam yatak hacmi : $VS2 := \pi \cdot R^2 \cdot \left(L - \frac{R}{\tan(\alpha)}\right)$ Maksimum yatak yüksekliği şartı : $rmin := 2 \cdot R - L \cdot \tan(\alpha)$ if($rmin > 0 \cdot \text{cm}$, $VS1$, $VS2$) = $6.453 \cdot 10^3 \cdot \text{cm}^3$ $VS1 = 6.453 \cdot 10^3 \cdot \text{cm}^3$ $VS2 = -9.624 \cdot 10^3 \cdot \text{cm}^3$ Her adımda başlık diliminin hacmi : $VD := \pi \cdot R^2 \cdot \Delta L \cdot \text{cm}$ $VD = 1.357 \cdot 10^3 \cdot \text{cm}^3$ Yatak boyunca her adımda yatak diliminin hacmi : $V_i := \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot (\arccos(1 - \frac{HS - H_i}{R}) - \sin(\arccos(1 - \frac{HS - H_i}{R}))) \cdot \Delta L \cdot \text{cm}$ Yatak boyunca yatak hacminin başlık hacmine oranı : $ORAN_i := \frac{V_i}{VD}$ 

Şekil 1 Yatak boyunca yatak hacminin başlık hacmine oranının değişimi

Kömürün Termal İletkenliği

T<400 °C (Stubington,J., Sumoryano, Fuel, 1984,63,7,1013-10)

$$k := 0.23 \text{ J/s.m.K}$$

Buna göre 400 °C ye kadar
sabit termal yayınlılık kullanılabilir

$$\alpha := \frac{k}{1.92 \cdot 10^6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Kömür neminin ısı kapasitesi :

$$C_{pnem} := 4187 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

Proximate analizde bulunan nem ve kül kütle kesirleri :

	Yoğunluk (kg/m ³)	Nem kütle kesri	Kül kütle kesri	Kömürün Proximate Uçucu madde kesri	Kömürden sonsuz zaman için salına bilecek uçucu mad de kesri (daf temel)
Zonguldak Taşkömürü:	ROC := 1161	Xnem := 0.0093	Xkul := 0.1167	VM := 0.2485	VMS0 := 0.26
Cizre Linyiti :	ROC := 1257	Xnem := 0.0034	Xkul := 0.2617	VM := 0.2959	VMS0 := 0.3466
Tunçbilek Linyiti :	ROC := 1225	Xnem := 0.0331	Xkul := 0.1548	VM := 0.4063	VMS0 := 0.42

Kararsız hal ısınma denklemindeki parametreler, küresel kömür taneciği kabul edilirse:

Yanma kamarasında 1.bölge sıcaklığı:

$$T1 := 700 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kömür besleme sıcaklığı :

$$T0 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tamsayılar:

$$n := 0..10$$

İterasyon sayısı :

$$i := 0..80$$

Kömür tane büyüklüğü :

$$ra := 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

İterasyonda zaman adımı :

$$d := 4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{ra^2}{T1}$$

Toplam zaman :

$$ta_i := i \cdot d \text{ s}$$



Kömürün yığın yoğunluğu

$$\rho_c := 0.978 \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Kömür besleme hızı :

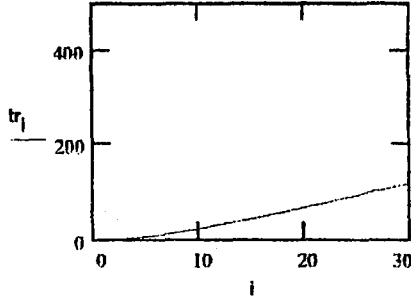
$$FW := 15 \cdot 10^3 \cdot \text{g} \cdot \text{hr}^{-1}$$

Kömürün hacimsel besleme hızı :

$$FV := \frac{FW}{\rho_c}$$

Kömürün yatak bölgelerindeki kalma süreleri :

$$tr_i := \frac{V_i}{FV}$$



Şekil Yatak başlangıcından itibaren kalma sürelerinin değişimi

Kömürün döner başlıkta toplam kalma süresi :

$$\frac{\text{if}(r_{\min} > 0 \cdot \text{cm}, VS1, VS2)}{FV} = 1.515 \cdot 10^3 \cdot \text{sec}$$

Bu sürenin tek dilimlerdeki kalma süreleri toplamına eşit olması gerekir.

$$\sum_i tr_i = 1.515 \cdot 10^3 \cdot \text{sec}$$

KÖMÜRÜN UÇUCU MADDE YANMASI

Kömürün başlığın 1. bölgesinde kalma süresi :

$$\sum_{i=20}^{30} tr_i = 1.013 \cdot 10^3 \cdot \text{sec}$$

Kömürün pratik yanma sistemlerinde yanması aynı zamanda yürüyen iki prosesle olur:

1. Kömürün ısınması, uçucu maddelerin salınması ve yanması
2. Geride kalan karbonun yanması

1. Kömürün ısınması : yanma sistemine kömürün normal şartlarda girdiğini düşünürsek, başlangıçta bir kararsızlık ısınması vardır. Bu süreçte etkili parametreler aşağıda verilmektedir. 400 °C ye kadar sabit fiziksel özellikler alınabilir.



Farklı çaplı tane sayısı : $j := 1..8$

Diğer tane yarıçapları : $r_j := 3 \cdot j \cdot 10^{-3} \text{ m}$

İterasyondaki zaman artışı : $dt_j := 4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(r_j)^2}{T_1}$

Herbir adım için zamanlar : $t_{j,i} := i \cdot dt_j$

Kömürün kararsız hal ısınmasını yöneten eşitlik küresel şekilli tane kabulü ve tane ortalama sıcaklığı için yazılırsa

$$TA_j := T_1 - (T_1 - T_0) \cdot \sum_n \frac{6}{(n+1)^2 \cdot \pi^2} \cdot \exp \left[\frac{-ta_j \cdot \alpha \cdot \pi^2 \cdot (n+1)^2}{ra^2} \right]$$

Kömür tanesi ortalama sıcaklığının ne zaman 400 °C olacağını interpolasyonla bulabiliriz.

$$f_j := \text{interp} \left[\text{cspline} \left[TA, (t^T)^{<I>} \right], TA, (t^T)^{<I>}, 400 \right]$$

Kömür tanesi ortalama sıcaklığının
400 °C ye eriştiği zamanlar

Tane
yarıçapı

Zaman

r_j	f_j
0.003	2.985
0.006	11.94
0.009	26.865
0.012	47.76
0.015	74.626
0.018	107.461
0.021	146.266
0.024	191.042

m

s

Tane ortalama sıcaklığı 400 °C yi aştığında termal özelliklerin sıcaklıkla değişimi hesaba katılırsa

Kömürün Termal İletkenliği : Stubington, J., Sumaryono, Fuel, 1984
63,7,1013-1019

$$k = 0.23 + 2.24 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 400)^{1.8} \quad \text{J / m.K.s} \quad >400 \text{ °C için}$$

KÖMÜR KARBONUNUN YANMASI

Uçucu madde yanmasından geriye hemen hemen saf karbon ve külden ibaret bir artık kalır. Bu artığın yanması ana akımdan tane yüzeyine doğru oksijenin difüzlendiği ve burada karbonla CO veya CO₂ vermek üzere heterojen bir yüzey reaksiyonu ile tüketilmesi şeklindedir.

Tablo verileri sayısı : $k := 1..5$

Standart şartlar :

PS := 1·atm TS := 273.01·K VS := 22.414·liter·gm⁻¹

Havanın çeşitli sıcaklıklardaki fiziksel özellikleri

Sıcaklık $T_k := K$	Viskozite $\mu_k := \text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}$	Termal iletkenlik $ter_k := \text{kcal} / \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$	Isı kapasitesi $Cp_k := \text{kcal} / \text{kg} \cdot \text{K}$	Yoğunluk $\rho_k := \text{kg} / \text{m}^3$
500	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$0.965 \cdot 10^{-5}$	0.2461	0.6964
600	$3.06 \cdot 10^{-5}$	$1.113 \cdot 10^{-5}$	0.2511	0.5804
800	$3.7 \cdot 10^{-5}$	$1.378 \cdot 10^{-5}$	0.2625	0.4354
1000	$4.24 \cdot 10^{-5}$	$1.627 \cdot 10^{-5}$	0.2726	0.3482
1200	$4.73 \cdot 10^{-5}$	$1.871 \cdot 10^{-5}$	0.2807	0.2902

$x_k := T_k \cdot K$ $vy_k := \rho_k \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ Kamaradaki kömür yatağı sıcaklığı : $T := 1173 \cdot K$

Havanın sistem şartlarındaki yoğunluğu : $\rho := \text{linterp}(x, vy, T)$

$y_k := \mu_k \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$

Havanın sistem şartlarındaki viskozitesi : $\mu := \text{linterp}(x, y, T)$

Oksijenin 900 C de hava içindeki difüzyon katsayısı : $DG1 := 2.08 \cdot 10^{-4} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$

Oksijenin sistem şartlarında hava içindeki difüzyon katsayısı : $DG := \left(\frac{T}{1173 \cdot K} \right)^3 \cdot DG1$ $DG = 2.08 \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$

Tane çevresindeki gazdaki oksijenin kısmi basıncı : $PG := 0.21 \cdot \text{atm}$

Yakma sisteminin dizaynında önemli olan belirli şartlardauçucu madde salınma zamanının tahmin edilmesidir. Bunun için yukarıdaki denklemin belirli bir uçucu madde kesrinin salınması için ne kadar zaman geçmesi gerektiği hesaplanmalıdır. Yanma başlangıcında salınan uçucu madde kesri olarak, kömürün proximate analizinde bulunan uçucu madde kesrini almak mantıklı bir yaklaşım olabilir.

$$TD_j := \text{linterp}[VMB, (t^T)^{<j>}, VM]$$

$$TD_j := \text{interp}[cspline[VMB, (t^T)^{<j>}], VMB, (t^T)^{<j>}, VM]$$

$$D_j := r_j \cdot 2$$

Tane çapı

700 °C deki yakma sisteminde
uçucu madde emisyon süresi

Tanenin ısınma
hızı yaklaşık olarak

$$D =$$

0
0.006
0.012
0.018
0.024
0.03
0.036
0.042
0.048

TD_j	s dir
3.419	
13.677	
30.774	
54.709	
85.483	
123.095	
167.546	
218.836	

$T1 - T0$

TD_j	°C / s olarak belirtilebilir.
197.408	
49.352	
21.934	
12.338	
7.896	
5.484	
4.029	
3.085	

Kömürün 1. bölgede kalma süresi :

$$\sum_{i=20}^{30} tr_i = 1.013 \cdot 10^3 \cdot \text{sec}$$

1. bölgede C yanması için kalan zaman :

$$t1_1 := \left(\sum_{i=20}^{30} tr_i \right) - TD_j \cdot \text{sec}$$

400 °C ye kadar salınan uçucu madde kesri

$$VMD := \text{linterp}(TA, VMA, 673)$$

Bu kesrin tane ortalama sıcaklıklarının 400 °C ye ulaştığı zamanlar için de aynı olması gerekir

$$tv := \text{linterp}(ta, VMA, f_1)$$

KONTROL : $VMD = 0.112$ $tv = 0.112$

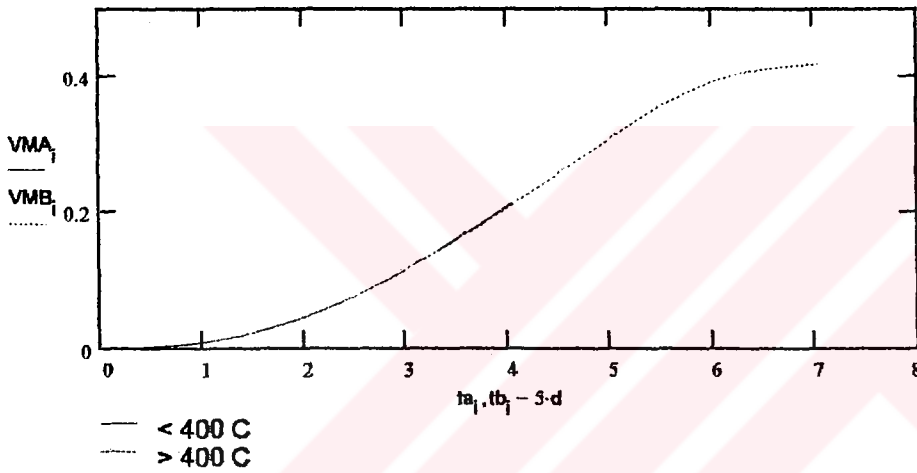
İkinci periyot için başlangıç uçucu madde salınma kesri :

$$VMB_0 := VMD$$

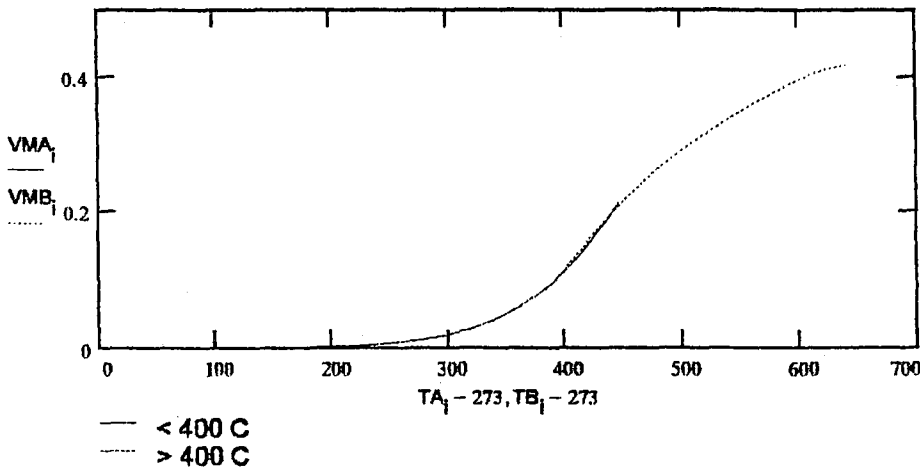
İkinci periyot için sıcaklıklar : $TB_1 := TB_1 + 273$

$$TBORT_1 := \frac{TB_1 + TB_{i+1}}{2}$$

$$VMB_{i+1} := VMS0 - (VMS0 - VMB_1) \cdot \int_0^{2 \cdot E0} \exp\left(-k \cdot d \cdot \exp\left(\frac{-E}{RG \cdot TBORT_1}\right)\right) \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(E - E0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right] dE$$



Şekil 2. Uçucu madde salınmasının zamanla değişimi



Şekil 3. Uçucu madde salınmasının tane sıcaklığı ile değişimi

Uçucu madde çıkış zamanını bulmak için belirli zamanlardaki ortalama sıcaklıklara dayanan uçucu madde salınma kesirlerinin iterasyonla bulunması gerekir.

Kömürün termal bozunması dolayısıyla uçucu madde çıkışı prosesinin birbirine paralel yürüten bir dizi birinci merteye parçalanma reaksiyonu yoluyla olduğu ve bu reaksiyonların aktivasyon enerjilerinin belirli bir standart sapması olan normal bir dağılım gösterdiği kabul edilirse,

Bütün reaksiyonlar için eşit alınabileceği farzedilen preexponansiyel faktör :

Aktivasyon enerjilerinin ortalama değeri :

Aktivasyon enerjileri dağılımının standart sapması :

Kuvvetle kekleşen kömürler için Anthony et.al.,(1976)

$$k := 1.67 \cdot 10^{10} \text{ sn}^{-1} \quad E_0 := 54.8 \text{ kcal / mol} \quad \sigma := 17.2 \text{ kcal / mol}$$

Linyitler için Anthony et.al.(1975)

$$k := 1.07 \cdot 10^{10} \text{ sn}^{-1} \quad E_0 := 48.72 \text{ kcal / mol} \quad \sigma := 9.38 \text{ kcal / mol}$$

İdeal gaz sabiti : $RG := 1.988 \cdot 10^{-3} \text{ kcal / mol.K}$

Başlangıç şartı: $VMA_0 := 0$

$$TA_i := TA_i + 273 \quad i := 0..79 \quad TAORT_i := \frac{TA_i + TA_{i+1}}{2}$$

İlk olarak, 400 °C ye kadar salınan uçucu madde kesrinin bulunması için her bir adım sonunda tanenin, ulaştığı sıcaklıkta bu süre kadar kaldığı ve tanede kalan henüz salınmamış uçucu madde miktarının başlangıçtaki miktarla her bir kademede salınanların toplamalarının farkına eşit olduğu düşünülürse

$$VMA_{i+1} := VMS_0 - (VMS_0 - VMA_i) \cdot \int_0^{2 \cdot E_0} \exp\left(-k \cdot d \cdot \exp\left(\frac{-E}{RG \cdot TAORT_i}\right)\right) \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(E - E_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right] dE$$

Tane ortalama sıcaklığının 400 °C den büyük olduğu ikinci kararsız hal ısınma periyodu sıcaklıklarındaki uçucu madde salınma kesrinin bulunmasında başlangıçta tanede bulunan uçucu madde kesri ilk periyot sonunda tanede kalan kesir olarak alınmalıdır. İlk periyotta 400 °C ye kadar salınan miktar ikinci periyotta başlangıç kesridir. O zaman,



Kömür külünün ısı kapasitesi : (Merrick,D.,Fuel,1983,62,540) $C_{pkul} = (754 + 0.584 \cdot T) \text{ J / kg } ^\circ\text{C}$

Kömürün organik kısmının ısı kapasitesi :

(Blick,A.,et.all. 1985, AICHE. J.,31,1966)

$$C_{pnkk} = (870 + 2.55 \cdot T) \text{ J / kg } ^\circ\text{C}$$

Kömürün nemsiz-külsüz kesri : $nkk := 1 - X_{kul} - X_{nem}$

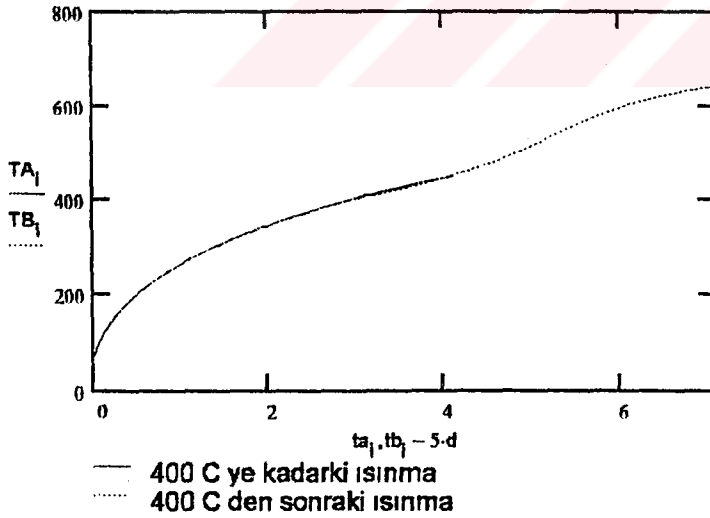
Kömürün ısı kapasitesi : $C_p = C_{pkul} \cdot X_{kul} + C_{pnem} \cdot X_{nem} + C_{pnkk} \cdot nkk \text{ J / kg } ^\circ\text{C}$

Herbir adım için zamanlar : $tb_i := d \cdot (i + 5) + f_i$

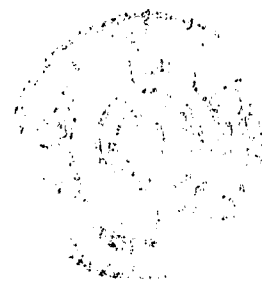
İkinci iterasyon için başlangıç sıcaklığı : $TB_0 := 400 \text{ } ^\circ\text{C}$

Burada her iterasyon sonunda bulunan tane ortalama sıcaklığındaki termal özellikler sonraki adımda kullanılacak şekilde kararsız hal ısınma denklemi düzenlenmelidir.

$$TB_{i+1} := T1 - \sum_n \frac{6 \cdot (T1 - T0)}{(n+1)^2 \cdot \pi^2} \cdot \exp \left[\frac{- \left[0.23 + 2.24 \cdot 10^{-5} \cdot (TB_i - 400)^{1.8} \right] \cdot \pi^2 \cdot (n+1)^2 \cdot tb_i}{ROC \cdot ((754 + 0.584 \cdot TB_i) \cdot X_{kul} + (870 + 2.55 \cdot TB_i) \cdot nkk) \cdot ra^2} \right]$$



Şekil 1. Tane ortalama sıcaklığının zamanla değişimi



Havadaki oksijenin konsantrasyonu : $CO := \left(\frac{TS}{T} \right) \cdot \left(\frac{PG}{PS \cdot VS} \right) \quad CO = 2.181 \cdot 10^{-6} \cdot \text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$

Kömür karbonu yüzey sıcaklığı : $TS := T + 150 \cdot K$

$WP_j := \frac{\pi}{6} \cdot ROC \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot (D_j)^3 \quad MC := 12$

Uçucu madde yanmasından geride kalan kömür karbonunun yoğunluğu : $RC_j := \frac{WP_j \cdot (1 - VM - X_{kul} - X_{nem})}{\frac{\pi}{6} (D_j)^3}$

Hava debisi : $Q := 18 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{sec}^{-1} \quad \text{Havanın lineer hızı : } U0 := \frac{Q}{\pi \cdot R^2 \cdot TS}$

Kömür karbonunun difüzyon kontrollü yanma rejiminde yanma zamanı :

$$tbd_j := \int_{D_j}^0 \frac{1}{-2 \cdot MC \cdot \frac{CO}{RC_j} \left[2 + 0.6 \cdot \left(\frac{\mu}{\rho \cdot DG} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\rho \cdot m \cdot U0 \cdot \rho}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot \frac{DG}{\rho \cdot m}} dp \cdot m$$

$$tbd = \begin{bmatrix} 0 \\ 24.215 \\ 69.81 \\ 129.359 \\ 200.197 \\ 280.782 \\ 370.073 \\ 467.307 \\ 571.89 \end{bmatrix} \cdot \text{sec}$$

Kömürün 2. bölgede kalma süresi : $\sum_{i=10}^{20} tr_i = 489.072 \cdot \text{sec}$

Kömürün 3. bölgede kalma süresi : $\sum_{i=1}^{10} tr_i = 103.77 \cdot \text{sec}$

