

**PÜLVERİZE KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN
YÜKSEK FIRIN PROSESİNE ETKİLERİ VE
KARDEMİR 4. YÜKSEK FIRIN UYGULAMASI**

**2013
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ ve MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

Fikret FURTUN

**PÜLVERİZE KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN YÜKSEK FIRIN PROSESİNE
ETKİLERİ VE KARDEMİR 4. YÜKSEK FIRIN UYGULAMASI**

Fikret FURTUN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Mart 2013**

Fikret FURTUN tarafından hazırlanan “PÜLVERİZE KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN YÜKSEK FIRIN PROSESİNE ETKİLERİ VE KARDEMİR 4. YÜKSEK FIRIN UYGULAMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Memiş IŞIK

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 29/03/2013

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç Dr. Hayrettin AHLATÇI (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Yusuf ÇAY (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Memiş IŞIK (KBÜ)

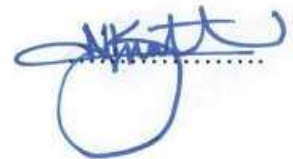


...../...../2013

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Fikret FURTUN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PÜLVERİZE KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN YÜKSEK FIRIN PROSESİNE ETKİLERİ VE KARDEMİR 4. YÜKSEK FIRIN UYGULAMASI

Fikret FURTUN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Memiş IŞIK

Mart 2013, 110 sayfa

Pülverize kömür enjeksiyonu, yüksek fırınlarda kok oranını azaltmak, proses kontrol kolaylığı sağlamak, fırın verimliliğini artırmak ve sonuç olarak maliyet tasarrufu sağlamak amacıyla yapılan bir ilave yakıt enjeksiyon sistemidir.

Bu çalışmada, pülverize kömür enjeksiyonunun yüksek fırın prosesine etkileri incelenmiş, 2011 yılında Kardemir 4. Yüksek Fırın'a pülverize kömür enjeksiyonunun başlaması ile birlikte proses değişimi incelenerek optimum çalışma şartları belirlenmeye çalışılmıştır.

Yüksek fırınlarda sıcak metal üretiminin yaklaşık yarısı kadar kok kullanıldığı düşünülecek olursa, kok miktarında elde edilecek çok küçük bir tasarruf bile maliyetlerin önemli ölçüde düşmesine neden olacaktır. Bu noktadan hareketle, pülverize kömürün yakıt enjeksiyonu olarak kullanılması oldukça yüksek avantajlar

getirecektir. Pülverize kömür enjeksiyonu, maliyetlerde sağladığı düşüş ve kömürün en yaygın yakıt olmasından dolayı, en önemli ilave yakıt enjeksiyonu olma özelliğini devam ettirecektir.

Anahtar Sözcükler : Yüksek fırın, pülverize kömür enjeksiyonu, metalurjik kok.

Bilim Kodu : 915.1.038

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE EFFECTS OF PULVERIZED COAL INJECTION ON BLAST FURNACE PROCESS and APPLICATION OF KARDEMIR BLAST FURNACE No:4

Fikret FURTUN

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Material Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Memiş IŞIK

March 2013, 110 pages

Pulverized coal injection is an additional fuel injection which is used for reducing coke rate, involving process utility and as a result reducing costs at blast furnaces.

In this study, the effects of pulverized coal injection on blast furnace process are investigated. In 2011, with the start of pulverized coal injection to Kardemir blast furnace 4, it is tried to determine the optimum operating conditions for observation of changes in the process.

If it is assumed that, the coke used as fuel approximately by the half of hot metal at blast furnaces, a small amount of coke saving will also cause to reduce of costs significantly. So, the usage of pulverized coal injection can get enormous

advantages. By the ascend being common fuel, pulverized coal injection is the most preferable additional fuel injection now, and so on.

Key Word : Blast furnace , pulverized coal injection, metallurgical coke.

Science Code : 915.1.038

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı Őekillendiren danıŐman hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Memiş IŞIK'a teŐekkürlerimi sunarım.

Meslek hayatım boyunca her zaman beni destekleyen, çalıŐmam esnasında da teknik bilgilerini benimle paylaŐan Kardemir A.Ő Yüksek Fırınlr ve Sinter Müdürü Sn. Ahmet AYCAN'a da teŐekkürlerimi sunarım.

Tez çalıŐmam esnasında teorik ve pratik bilgilerini benimle paylaŐan Paul Wurth firması Kurutma, Đtme ve Enjeksiyon Teknolojileri Uzman Mühendisi Sn. Emanuele CENSI'ye, Paul Wurth Türkiye temsilcisi İLKSAN A.Ő'nden Sn. Can ERCAL'a teŐekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ ve AMAÇ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
BÖLÜM 3	7
PÜLVERİZE KÖMÜR	7
3.1. PÜLVERİZE KÖMÜRÜN YANMA KARAKTERİSTİĞİ	8
3.1.1. Tutuşma	9
3.1.2. Uçucu Maddenin Ayırışması	11
3.1.3. Char Yanması	11
3.2. YANMA	11
3.2.1. Tek Bir Kömür Partikülünün Yanma Karakteristiği	11
3.2.2. Pülverize Kömür Grubunun Yanması	13
3.3. PÜLVERİZE KÖMÜRÜN YÜKSEK FIRINDAKİ YANMA DAVRANIŞI.....	15
3.3.1. Pülverize Kömürün Raceway’de Yanması	16
3.3.2. Kömürün Raceway’de Yanması Sonrasında Gaz Dağılımı	18
3.3.3. Kömürün Raceway’de Yanması Sonrasında Sıcaklık Dağılımı.....	20

3.4. PÜLVERİZE KÖMÜR YANMA VERİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER	23
3.4.1. Kömür Özelliklerinin Etkisi	25
3.4.1.1. Kömür Türünün Etkisi	25
3.4.1.2. Kömür Uçucu Madde Miktarının Etkisi	28
3.4.1.3. Kömür Kül Miktarının Etkisi.....	30
3.4.1.4. Kömür Rutubet İçeriğinin Etkisi.....	31
3.4.1.5. Kömür Sabit Karbon Miktarının Etkisi.....	32
3.4.1.6. Kömür Maseral Yapının Etkisi	32
3.4.1.7. Kömür Ebadının Etkisi	33
3.4.2. Yüksek Fırın Proses Şartlarının Kömür Yanma Verimine Etkisi	36
3.4.2.1. Havadaki Oksijen Oranının Etkisi	36
3.4.2.2. Hava Sıcaklığının Etkisi	37
3.4.2.3. Tüyer Hızının Etkisi	38
3.4.2.4. Fırın İçi Şarj Dağılımının Etkisi	39
3.4.2.5. Şarj Malzeme Kalitesinin Etkisi	40
3.4.2.6. Kömüre Yapılacak İlavelerin Etkisi.....	43
3.4.2.7. Enjeksiyon Miktarının Etkisi	44
3.4.3. Enjeksiyon Lans Sisteminin Etkisi	45
3.4.3.1. Lans Geometrisinin Etkisi	46
3.4.3.2. Çift Lans Sisteminin Etkisi	49
3.4.3.3. Oxy-Coal Lans Sisteminin Etkisi	51
3.5. PÜLVERİZE KÖMÜR ENJENKSİYONUNUN YÜKSEK FIRIN PROSESİNE ETKİSİ	53
3.5.1. Raceway Koşulları Üzerine Etkisi	55
3.5.2. Alev Sıcaklığı Üzerine Etkisi	57
3.5.3. Fırın Geçirgenliği Üzerine Etkisi.....	58
3.5.4. Deadman Kok Yapısına Etkisi.....	59
3.5.5. Fırın Verimliliği Üzerine Etkisi.....	60
3.5.6. Sıcak Metal Kalitesi Üzerine Etkisi.....	61
3.5.7. Curuf Özellikleri Üzerine Etkisi.....	62
3.5.8. Fırın Duvarındaki Isı Yüğü Üzerine Etkisi.....	62
3.5.9. Baca Tozu Üzerine Etkisi	64

	<u>Sayfa</u>
3.5.10. Fırın İşletme Şartlarının Kontrolü Üzerine Etkisi	65
3.5.11. Kok Oranının Azaltılması Üzerine Etkisi.....	65
3.5.12. Maliyetler Üzerine Etkisi.....	67
BÖLÜM 4	68
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	68
4.1. KARDEMİR YÜKSEK FIRINLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ.....	68
4.1.1. 1 No'lu Yüksek Fırın Özellikleri	68
4.1.2. 2 No'lu Yüksek Fırın Özellikleri	69
4.1.3. 3 No'lu Yüksek Fırın Özellikleri	69
4.1.4. 4 No'lu Yüksek Fırın Özellikleri	70
4.1.5. Yüksek Fırınlar Yardımcı Birimleri	71
4.1.5.1. Sobalar	71
4.1.5.2. Şarj Tesisleri	72
4.1.5.3. Gaz Temizleme Tesisi.....	72
4.1.5.4. Pülverize Kömür Tesisi.....	73
4.2. KULLANILAN HAMMADDELER	75
4.2.1. Enjeksiyon Kömürleri.....	75
4.2.2. Kok	75
4.2.3. Sinter.....	75
4.2.4. Pelet	76
4.2.5. Parça Cevher.....	76
4.3. KULLANILAN CİHAZ, ALET ve MALZEMELER	76
4.4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	78
4.4.1. Kömür Enjeksiyonunun Alev Sıcaklığı Üzerine Etkisi	78
4.4.2. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Gaz Geçirgenliği Üzerine Etkisi.....	78
4.4.3. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Verimliliği Üzerine Etkisi	79
4.4.4. Kömür Enjeksiyonunun Baca Tozu Üzerine Etkisi.....	80
4.4.5. Kömür Enjeksiyonunun Kok Oranı Azaltılması Üzerine Etkisi.....	80
BÖLÜM 5	82
DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	82

Sayfa

5.1. KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN ALEV SICAKLIĞI ÜZERİNE ETKİSİ...	82
5.2. KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN GEÇİRGENLİK ÜZERİNE ETKİSİ	87
5.3. KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN FIRIN VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ	92
5.4. KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN BACA TOZU ÜZERİNE ETKİSİ.....	97
5.5. KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN KOK ORANI ÜZERİNE ETKİSİ.....	98
BÖLÜM 6	104
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	110

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Pülverize kömürün yanma süreci.....	9
Şekil 3.2. Tutuşma sürecinde kömürün yapısal değişimi.....	10
Şekil 3.3. Tek bir kömür partikülü çevresinde oluşan alevin yüksek hızlı bir kamera ile çekilmiş görüntüsü.....	12
Şekil 3.4. Tek bir kömür partikülünün yanma mekanizması	13
Şekil 3.5. Yanma bölgesindeki parçacık konsantrasyonuna göre yanma oranı değişimi.....	14
Şekil 3.6. Pülverize kömür grubunun yanması	14
Şekil 3.7. Deney düzeneği.....	15
Şekil 3.8. Enjeksiyon lans pozisyonu ve oksijen zenginleştirmenin yanma verimi üzerine etkisi.....	16
Şekil 3.9. Raceway reaksiyonlarının şematik görünümü.....	18
Şekil 3.10. 1250 °C hava sıcaklığında ayrıışan uçucu gazların enjeksiyon noktasından uzaklığa göre değişimi	19
Şekil 3.11. Enjeksiyon noktasında uzaklığa göre gaz konsantrasyonu değişimi.....	20
Şekil 3.12. Raceway’de gaz dağılımı.....	21
Şekil 3.13. Oksijen oranına ve enjeksiyon noktasından uzaklığa bağlı olarak ortam gaz sıcaklığı ve kömür yanma verimi değişimi	22
Şekil 3.14. Pülverize kömürün yanma alevi görüntüsü.....	23
Şekil 3.15. Yanmakta olan iki farklı kömürün kesit görüntüsü	27
Şekil 3.16. Enjeksiyon kömürü kalorifik değerinin kömür enjeksiyon miktarı üzerine etkisi	28
Şekil 3.17. Uçucu madde miktarının kömür yanma verimi üzerine etkisi.....	29
Şekil 3.18. Uçucu madde miktarının kömür enjeksiyon miktarı üzerine etkisi.....	30
Şekil 3.19. Kömür külünün enjeksiyon miktarı üzerine etkisi.....	31
Şekil 3.20. Kömür tane ebadının yanma verimi üzerine etkisi	33
Şekil 3.21. Sabit kömür tane boyutunda değirmen gücü ile HGI arasındaki ilişki....	34
Şekil 3.22. Kömür sabit karbon miktarının kömür öğütülebilirliğine etkisi	35
Şekil 3.23. Kömür enjeksiyon tesisi akış şeması	35
Şekil 3.24. Oksijen zenginleştirmenin kömür yanma verimi üzerine etkisi	36

Sayfa

Şekil 3.25. Hava sıcaklığının kömür enjeksiyon miktarı üzerine etkisi	38
Şekil 3.26. Kok reaktivitesinin kömür yanma oranına ve kok tozlaşması üzerine etkisi	41
Şekil 3.27. Sinter kırılgenlik indeksi ve enjeksiyon oranına göre fırın içi termal ısı değişimi	43
Şekil 3.28. Kömür enjeksiyon miktarı artışının yumuşama-ergime bölgesi üzerine etkisi	45
Şekil 3.29. Geleneksel tek lans tipi enjeksiyon sistemi	46
Şekil 3.30. Geometrik lans tipleri	47
Şekil 3.31. Lans geometrisinin pülverize kömürün saçılması üzerine etkisi	48
Şekil 3.32. Enjeksiyon lansı et kalınlığının kömürün tutuşabilirliği üzerine etkisi ...	48
Şekil 3.33. Yüksek türbülanslı lansın kömür yanma verimi üzerine etkisi.....	49
Şekil 3.34. Eksantrik çift lans sistemi	50
Şekil 3.35. Enjeksiyon lans tipine göre yanma yüzey alanı değişimi	50
Şekil 3.36. Lans tipine göre yanma verimi değişimi.....	51
Şekil 3.37. NKK'da kullanılan oxy-coal lansın kesit resmi.....	52
Şekil 3.38. Oxy-coal enjeksiyon lansı kullanımının dead-man çevresindeki kok tozlarını azaltılması üzerindeki etkisi.....	52
Şekil 3.39. Kömür enjeksiyonu yaparken karşılaşılabilecek problemler.....	54
Şekil 3.40. Raceway çevresi kok yapısı.....	56
Şekil 3.41. Kömür enjeksiyon miktarının raceway ve dead-man kok sıcaklığı üzerine etkisi	60
Şekil 3.42. Tüyer hızının fırın duvarındaki ısı yüküne etkisi	63
Şekil 4.1. Kardemir A.Ş 4 No'lu yüksek fırını ve yardımcı tesisleri	70
Şekil 4.2. Kardemir A.Ş kömür enjeksiyon tesisi	73
Şekil 4.3. Kardemir A.Ş kömür enjeksiyon tesisi akış şeması.....	74
Şekil 5.1. Kömür enjeksiyon miktarının alev sıcaklığı üzerine etkisi.....	84
Şekil 5.2. Kömür enjeksiyonun fırın gaz geçirgenliği üzerine etkisi.....	88
Şekil 5.3. Kömür enjeksiyon miktarının cevher/kok oranına etkisi.....	89
Şekil 5.4. Kömür enjeksiyon miktarının fırın verimliliği üzerine etkisi	93
Şekil 5.5. Kömür enjeksiyon miktarının baca tozundaki % C içeriğine etkisi	93
Şekil 5.6. Kömür enjeksiyon miktarının kok oranının azaltılması üzerine etkisi ..	100
Şekil 5.7. Kömür enjeksiyon miktarının toplam yakıt oranı üzerine etkisi	102

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan kömürlerin özellikleri.....	26
Çizelge 3.2. Uçucu madde miktarı ve enjeksiyon noktasından uzaklığa göre kömürün gazlaşma oranındaki değişim.....	30
Çizelge 3.3. Lans geometrisinin pülverize kömür yanma verimi üzerine etkisi.....	47
Çizelge 4.1. Kardemir yüksek fırınlarının genel özellikleri.....	71
Çizelge 4.2. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan kömürleri analiz değerleri ...	75
Çizelge 4.3. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan kokun analiz değerleri.....	75
Çizelge 4.4. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan kok külünün analiz değerleri.....	75
Çizelge 4.5. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan sinterin ortalama analiz değerleri.....	75
Çizelge 4.6. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan peletlerin ortalama analiz değerleri.....	76
Çizelge 4.7. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan cevherlerin ortalama analiz değerleri.....	76
Çizelge 4.8. Sistemde bulunan ve deneysel çalışmalarda kullanılan dataların alındığı başlıca sensörler ve bulunduğu bölgeler	77
Çizelge 5.1. Kömür enjeksiyonunun alev sıcaklığı üzerine etkisi incelenmeye başladığında yüksek fırına verilen harman	83
Çizelge 5.2. Kömür enjeksiyonunun alev sıcaklığı üzerine etkisi incelenmeye başladığında yüksek fırın proses parametreleri.....	83
Çizelge 5.3. Kömür enjeksiyonunun alev sıcaklığı üzerine etkisi incelenirken kömür miktarı-alev sıcaklığı ilişkisi	84
Çizelge 5.4. Kömür enjeksiyonu cevher-kok oranı ilişkisi.....	90
Çizelge 5.5. Kömür enjeksiyonu – sıcak maden üretimi- fırın verimliliği ilişkisi.....	94
Çizelge 5.6. Pülverize kömür – kok – toplam yakıt ilişkisi	100

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al_2O_3	: alüminyum oksit
CaO	: kalsiyum oksit
$CaCO_3$: kalsiyum karbonat
CO	: karbonmonoksit
CO_2	: karbondioksit
CH_4	: metan
Fe	: demir
Fe_2O_3	: hematit
Fe_3O_4	: manyetit
FeO	: wüstit
H_2	: hidrojen
$KMnO_4$: potasyum permanganat
MgO	: magnezyum oksit
N_2	: azot
SiO_2	: silisyumdioksit
μ	: mikron
ΔP	: basınç farkı
V	: hava miktarı
$<, >$: küçük, büyük

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing Materials
CRI	: Coke Reactivity Index
CSR	: Coke Strength After Reaction
DCS	: Distributed Control System
HGI	: Hardgrove Grindability Index
kg/TSM	: ton sıcak maden başına kilogram
TSM/m ³	: metre küp başına ton sıcak maden
m/sn	: saniyede katedilen metre
M40	: Micum40
msn	: mili saniye
PCI	: Pulverized Coal Injection
RDI	: Reduction Degration Index
RI	: Reduction Index
CaO/SiO ₂	: bazite
kcal/Nm ³	: normal metreküp başına kilo kalori
Nm ³ /dk	: dakika başına normal metre küp
kg/cm ²	: santimetre kare başına kilogram

BÖLÜM 1

GİRİŞ ve AMAÇ

Yüksek fırınlara tüyer yoluyla kömür enjeksiyonu 1840'lı yıllarda Fransa'da başlamıştır. Basit bir vidalı konveyör ve bir kürek ile kömür, hava akımına karıştırılarak ilk enjeksiyonlar yapılmıştır.

Kömürün pnömatik olarak başarılı bir şekilde enjekte edilebilmesi 1959-1960 yıllarına rastlamaktadır. Kömür hazırlama teknolojisindeki ilerlemeye rağmen, 60'lı yıllardan sonra ekonomik sebeplerle, doğal gaz ve fuel-oil yüksek fırınlarda kullanılan başlıca enjektanlar olmuştur. Bu durumdan istisna olarak başıca iki işletme olmuştur. Bunlar kömür enjeksiyonuna 1960'lı yılların ortalarında başlayan ABD'de Armco ve Çin'de Shoudu demir-çelik fabrikalarıdır [1].

1970'li yıllardan sonra petrol ürünlerindeki yüksek maliyet ve kısıtlamaların sonucu enerji krizi meydana gelmesi ile birlikte bir çok yüksek fırın, enjeksiyon sistemlerini durdurup, tamamen kok kullanım pratiğine geri dönmüşlerdir [1].

Kömürün diğer enjektanlara göre dünya üzerinde yaygın olarak bulunması, ekonomik olması, yüksek oranlarda enjekte edildiğinde diğer enjektanlara göre proses üzerinde daha az yan etkisinin olması gibi sebeplerden dolayı, kömür enjeksiyon sistemleri çok hızlı bir gelişme ve artış göstermiş ve göstermeye devam etmektedir.

Kömür enjeksiyon miktarının artışı ile kok kullanımında bir düşüş yaşanmaktadır. Bu ise, kömür enjeksiyon miktarı verimli bir şekilde artırıldığında kullanılan kok miktarının belirli bir noktaya kadar düşürülebileceği ve maliyet tasarrufu elde edileceği anlamına gelmektedir. Kokun yüksek fırında yakıt amaçlı kullanılmasının haricinde başka görevleri de olduğu için kömür enjeksiyonunun tamamen kokun yerini alması gibi bir şey düşünmek mümkün değildir.

Yüksek fırınlarda kömür enjeksiyonunun her ne kadar 140-150 yıllık bir geçmişi bulunsa da son 20 yıl içerisinde ciddi gelişmeler kaydedilmiştir. Geliştirilmeye çok açık noktasının bulunması ve maliyetlerde sağladığı düşüş nedeniyle, bu alanda büyük bir rekabet ve çok geniş araştırmalar ortaya çıkarmıştır.

Bu çalışmada, pülverize kömür enjeksiyonunun geliştirilmesi ve verimli bir şekilde yüksek fırınlarda kullanımının sağlanması amacıyla yönelik olarak yüksek fırın prosesine olan etkileri incelenmiştir. Çalışmanın yapılması ve sonuçların ortaya konmasında bizzat yüksek fırın işletme şartlarında yapılan gözlem, araştırma, denemeler ve dünyadaki yüksek fırınların bu alandaki tecrübelerinden yararlanılmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Pülverize kömür enjeksiyonu, uygulanmaya başlandığı günden bugüne kadar pek çok araştırmaya konu olmuş ve bu alanda çok önemli gelişmeler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların birçoğu bizzat kullanıcı olan Demir Çelik fabrikaları tarafından yapılmış, bir kısmı ise laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Günümüz Yüksek Fırın maliyetinin % 45-55'ini yakıt maliyetlerinin oluşturduğu düşünüldüğünde, bu çalışmaların ne kadar gerekli ve önemli olduğunu anlamak kolaylaşmaktadır.

Pülverize kömür enjeksiyonu hakkında yapılan çalışmaların sıralayacak olursak;

- 1- Pülverize kömür kullanılabilirliğinin araştırılması
- 2- Kalitesiz ve ucuz kömürlerin kullanılabilirliğinin araştırılması
- 3- Yüksek pülverize kömür enjeksiyon oranlarına çıkılabilirliğinin araştırılması
- 4- Yüksek pülverize kömür enjeksiyon oranlarında fırın verimliliğinin stabilizasyonu

olarak sıralamak mümkündür.

Yakın dönemde pülverize kömür enjeksiyonu için yapılmış çalışmaları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- 1- Bortz ve Flament yaptıkları çalışmada; tüyer önünde meydana gelen reaksiyonlar ve fırına etkilerini incelemişlerdir. Tüyerin hazne çapı

genişledikçe fırın merkezinde aktif olmayan bölgenin büyüdüğü sonucuna varmışlardır [2].

- 2- Sugata ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; pülverize kömür enjeksiyonu veriminin tek lans yerine çift lans kullanılarak %58'den % 74'e çıkarılabileceği sonucuna varmışlardır [3].
- 3- Delassat ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; enjeksiyon miktarı ile curuf oluşum prosesi arasında belirgin bir etkileşim olduğunu; tüyer önünde yanamayan kömür tozlarının curuf akışkanlığını düşürdüğü ve bunun sonucunda curuf akışkanlığının seviyesine bağlı olarak fırından curuf alınmasının güçleşerek fırın prosesini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varmışlardır [4].
- 4- Kobe Steel Ltd. yaptığı çalışmada; pülverize kömür oranının artışı ile birlikte ortam oksijen konsantrasyonunun düştüğü bunun da kömür yanabilirliğini azalttığını, yanmayan kömürün de raceway'i aşarak deadmande toplanıp fırın çalışmasını olumsuz etkilediği sonucuna varmıştır [5].
- 5- Maldonado ve Hartley yaptıkları çalışmada; fırın içinde yanmayan pülverize kömürün fırın merkezinden yükselen sıcak gaz ile birlikte baca tozu içerisine karıştığı ve enjeksiyon miktarının artmasıyla birlikte baca tozundaki karbon miktarının düştüğü sonucuna varmışlardır [6].
- 6- Maldonado ve Hartley yaptıkları çalışmada; kararlı bir yüksek fırın prosesinin ve sıcak metal kalitesinin sağlanması için alev sıcaklığının mümkün olduğu kadar sabit olması, belirli bir optimum seviyede olması gerektiği ve tüyer alev sıcaklığının kömür yanma kontrolünden ziyade fırın kararlılığını sağlayan bir regülatör olduğu sonucuna varmışlardır [6].
- 7- Bouman ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; pülverize kömür enjeksiyonu ile yüksek fırın üretim maliyetlerinin düştüğü, normal operasyonun (sadece kok ile çalışma) çevreye verdiği zararların azaldığı sonucuna varmışlardır [7].
- 8- Yamagata ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; fırın kararlılığını sağlamak için, kömürün tüyer önünü terk etmeden yanması ve deadman kokunu koruyacak şekilde önlemlerin alınması gerektiği sonucuna varmışlardır [8].
- 9- Hutny ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; kömür yanmasında kül miktarının etkisinin olduğu ve kok reaktivitesinin pülverize kömür yanma verimini etkilediğini, fakat aynı zamanda kok reaktivitesi artışının gaz kompozisyonu

dağılımını değiştirerek, yanma bölgesinin tüyer yönünde kaymasına sebep olduğu sonucuna varmışlardır [9].

- 10- Thomson ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; etkili bir pülverize kömür enjeksiyonu için gerekli şartların; enjekte edilen kömürün yanma özelliklerine, kömürün uçucu oranına, kömürün enjeksiyon hızına, kömür enjeksiyon basıncına, metalurjik kok kalitesine ve fırın yapısına bağlı olduğu sonuçlarına varmışlardır [10].
- 11- Steeghs ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; enjeksiyon oranının artışı ile kok tane boyutunun düştüğü bu sebeple deadman geçirgenliğinin düşerek yanma verimini azalttığı sonucuna varmışlardır [11].
- 12- ABD Enerji Enstitüsü 2001-2003 yılları arasında laboratuvar ve normal operasyon şartlarını paralel olarak araştırmış ve pülverize kömür kullanımının enerji tasarrufu, maliyetlerin düşmesi ve çevresel etki yönünden yararlı olduğu sonucuna varmıştır [12].
- 13- Ching Wen Chen yaptığı çalışmada; pülverize kömürün tüyer içinden çoklu akış dinamiklerini incelemiş ve en etkin operasyonun çift lans kullanarak elde edildiği sonucuna varmıştır [13].
- 14- Yansong ve arkadaşları üç boyutlu yüksek fırın matematik modellemesi yapmışlardır. Modelleme, kömür partikülleri ve katı kok tanelerinin termokimyasal akış davranışlarının belirlenerek, yanma veriminin artırılması üzerine odaklanmıştır [14].
- 15- Shinichiro Nomura ve Thomas G. Callcott yaptıkları çalışmada; 190-210 kg/TSM kömür enjeksiyon oranlarında çalışan fırınların proses parametrelerini kıyaslayarak, ortak noktaları tespit etmişlerdir. Ayrıca bu çalışma sonucunda, sıcak havanın oksijen ile zenginleştirilmesi ve nem miktarının değiştirilmesi ile birlikte pülverize kömürün kok tüketimi üzerine etkileri, sıcak maden üretim kapasitesi ve bosh gazı sıcaklığı değişimi incelenerek kıyaslamalar yapılmıştır [15].
- 16- Tao Jiang ve arkadaşları pülverize kömür içine demir içerikli atık maddelerin ilave edilmesinin yanma verimi üzerine etkilerini incelemişlerdir [16].

17- Chun Yan Song yaptığı çalışmada; pülverize kömür taşıma dinamikleri incelemişler ve bitümlü kömürlerin antrasite göre daha kolay taşındığı sonucuna varmışlardır [17].

BÖLÜM 3

PÜLVERİZE KÖMÜR

Pülverize kömürün yüksek fırına enjeksiyonundaki temel amaç, kullanılmakta olan kok'u optimum seviyeye kadar azaltarak, bunun yerine maliyeti daha düşük olan pülverize kömür kullanmaktır. Optimum kok seviyesinden kasıt, kok miktarının yüksek fırın proses şartlarını bozmadan düşürülebileceği minimum seviyedir. Şüphesiz, kokun yüksek fırında yakıt olma görevi haricinde gaz geçirgenliğine izin veren gözenekli bir yapı oluşturması, şarj dağılımını düzenlemesi, termal stresleri absorblama ve fırın iç basıncını düzenleme gibi görevleri de bulunduğundan yüksek fırında kok kullanımının sıfırlanması mümkün değildir. Ancak, verimli bir enjeksiyon sistemi ile kok miktarı, yüksek fırın proses şartlarını bozmayacak değerlere kadar düşürülebilir. Yüksek fırın kok oranı, kullanılan enjeksiyon sistemi, yüksek fırın karakteristikleri, proses şartları, kullanılan ham madde özellikleri ve yanma şartlarına bağlı olarak değişim gösterir.

Yüksek fırınlarda sıcak metal üretiminin yaklaşık yarısı kadar kok kullanıldığı düşünülecek olursa, kok miktarında elde edilecek çok küçük bir tasarruf bile maliyetlerin önemli ölçüde düşmesine neden olacaktır. Bu noktadan hareketle, pülverize kömürün yakıt enjeksiyonu olarak kullanılması oldukça yüksek avantajlar getirecektir. Fakat gerekli tedbirler alınmaz ve verimli yanma şartları oluşturulmaz ise kömür enjeksiyonu, yüksek fırın proses şartlarının olumsuz yönde etkiler, yakıt tasarrufu ve proses kolaylığı sağlama avantajları tam tersine yüksek fırın proses şartlarının kötüleşmesine, fırın verimliliğinin düşmesine ve yakıt oranının artmasına neden olur.

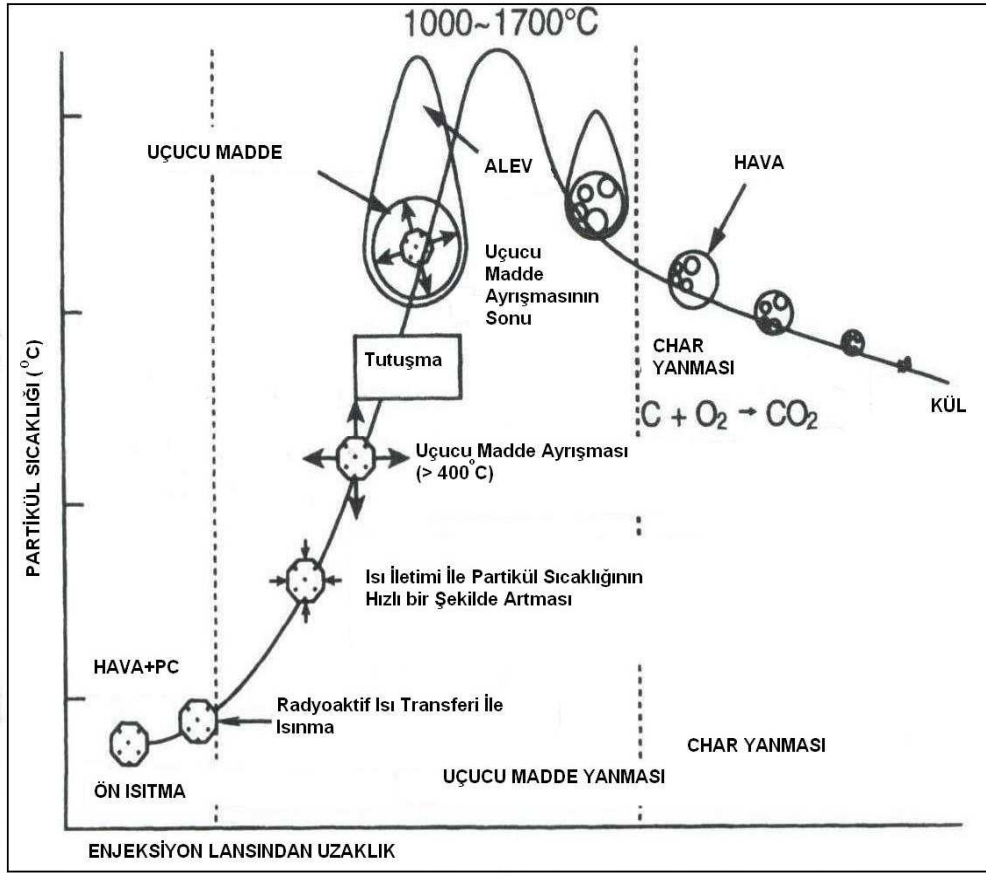
3.1. PÜLVERİZE KÖMÜR YANMA KARAKTERİSTİĞİ

Kömürün yüksek fırında yanması ile ilgili temel prensip, ‘‘kömürün raceway’i terk etmeden önce yanması gerekir’’ prensibidir. Bu durumun gerçekleşebilmesi için gerekli tüm şartların sağlanması gerekir. Aksi takdirde, kömür enjeksiyonu yüksek fırın proses şartlarını negatif yönde etkiler ve maliyetleri artırır [10].

Kömür, karbon haricinde yanma verimini etkileyecek boyutlarda kül ve inorganik bileşenlerden oluşur. Kül ve char partiküllerinin artışı ile zaman zaman basınç yükselmesi (ΔP artışı) ile fırın geçirgenliği de düşer [10].

Bu problemleri çözebilmek için pülverize kömürün yüksek fırın koşullarındaki yanma sürecinin tam olarak aydınlatılması gerekir. Bu bölümde kömürün özellikleri, fırın içerisindeki temel reaksiyonları, uçucu madde miktarının yanma, tutuşma, char yanması üzerine etkisi, kül oluşumu vb. gibi özellikler detaylı olarak incelenerek kömürün yüksek fırındaki davranışı aydınlatılacaktır. Kömür davranışının belirlenmesi için laboratuvar test fırını ve gerçek fırın koşullarından örnekler verilecektir [10].

Şekil 3.1’de pülverize kömürün yüksek fırındaki yanma süreci görülmektedir. Kömür partikülleri fırına enjekte edilirken, önce alev sıcaklığının etkisi ile bir ön ısıtmaya maruz kalır. Sonrasında, uçucu madde ayrışır ve tutuşma ile birlikte gaz fazına geçiş başlar. Uçucu maddenin ayrışması esnasında kömür türüne bağlı olarak sabit karbonda yanmaya başlar. Yanma süresi içerisinde partikül sıcaklığı hızlı bir şekilde artar. Uçucu maddelerin ayrışmasından sonra char yanması başlar. Char’ın yanması, uçucu maddenin yanmasından daha yavaştır. Sonuç olarak, yanma sonrasında enerji ve kül açığa çıkar [10].

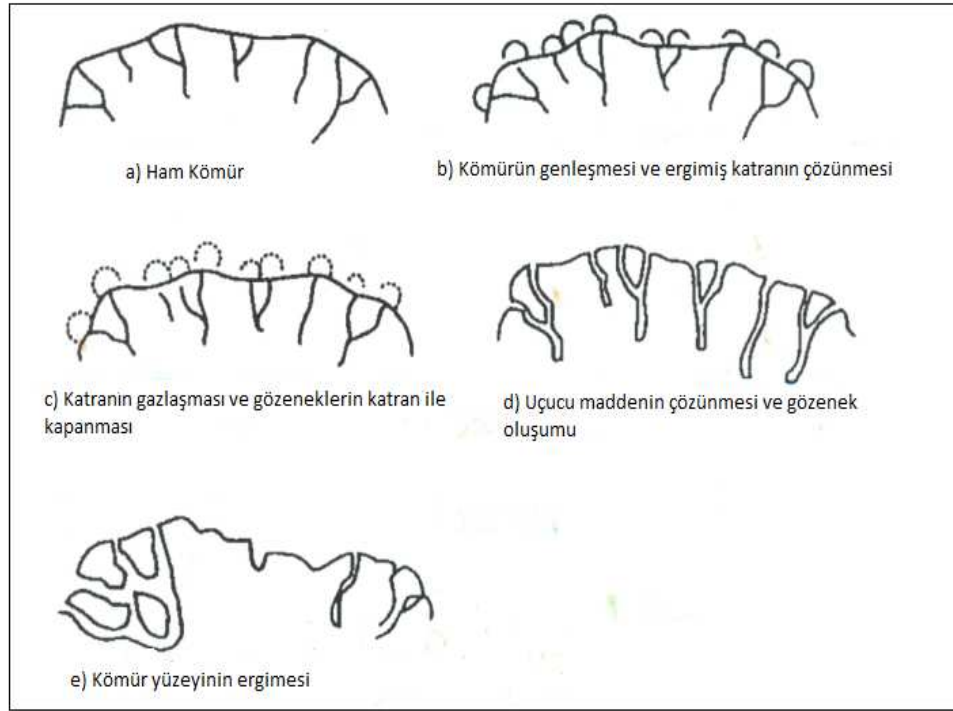


Şekil 3.1. Pülverize kömürün yanma süreci [10].

Yanma sürecinin daha iyi anlaşılması için aşağıdaki adımların incelenmesi gerekir.

3.1.1. Tutuşma

Kömür partiküllerinin tutuşması çok aşamalı bir süreçtir. Bir parçacık homojen yada heterojen bir şekilde tutuşur. Küçük boyutlu parçacıkların sıcaklığı hızlı bir şekilde yükselir, uçucu madde hızlı bir şekilde ayrışır ve homojen bir tutuşma gerçekleşir. Diğer taraftan büyük boyutlu parçalar (> 100 µm) daha yavaş, heterojen bir şekilde tutuşur [10].



Şekil 3.2. Tutuşma sürecinde kömürün yapısal değişimi [10].

Pülverize kömürün tutuşma mekanizması, yanma olayına ışık tutması açısından oldukça önemlidir. Tutuşma ve yanma, ısı, kütle transferi ve kimyasal reaksiyon ile yönlendirilir. Bu aşamalar maseral yapı, spesifik yüzey alanı, gözenek yapısı, uçucu madde, karbon içeriği gibi kömürün temel özellikleri ile doğrudan ilgilidir.

Farklı pülverize kömürlerin farklı tip lanslardan enjeksiyonu ile kömür dağılım alanı artırılarak yanma reaksiyonunun hızını artırmak mümkündür.

Bu sonuçlara göre;

- 1- Kömürün genişmesi ile birlikte yüzey alanı artar.
- 2- Yüzeyde ve gözeneklerdeki katran çözünür.
- 3- Tutuşma tüm yüzey boyunca yayılır, katran, uçucu madde ayrışır.
- 4- Külün ergimesi ile birlikte yüzey alanı küçülür.
- 5- Yüzey tamamen ergir ve ayrışır.

3.1.2. Uçucu Maddenin Ayrışması

Pülverize kömürün yanması aşamasında uçucu madde yaklaşık 10 msn içerisinde tamamen ayrışır. Uçucu madde kömürü bu kısa sürede terk etmesine rağmen alev stabilizasyonu ve yanma üzerinde büyük rolü vardır [18].

Genellikle, uçucu maddenin ayrışma prosesi daha önce belirtilmiş olan kömür özelliklerine bağlıdır.

3.1.3. Char Yanması

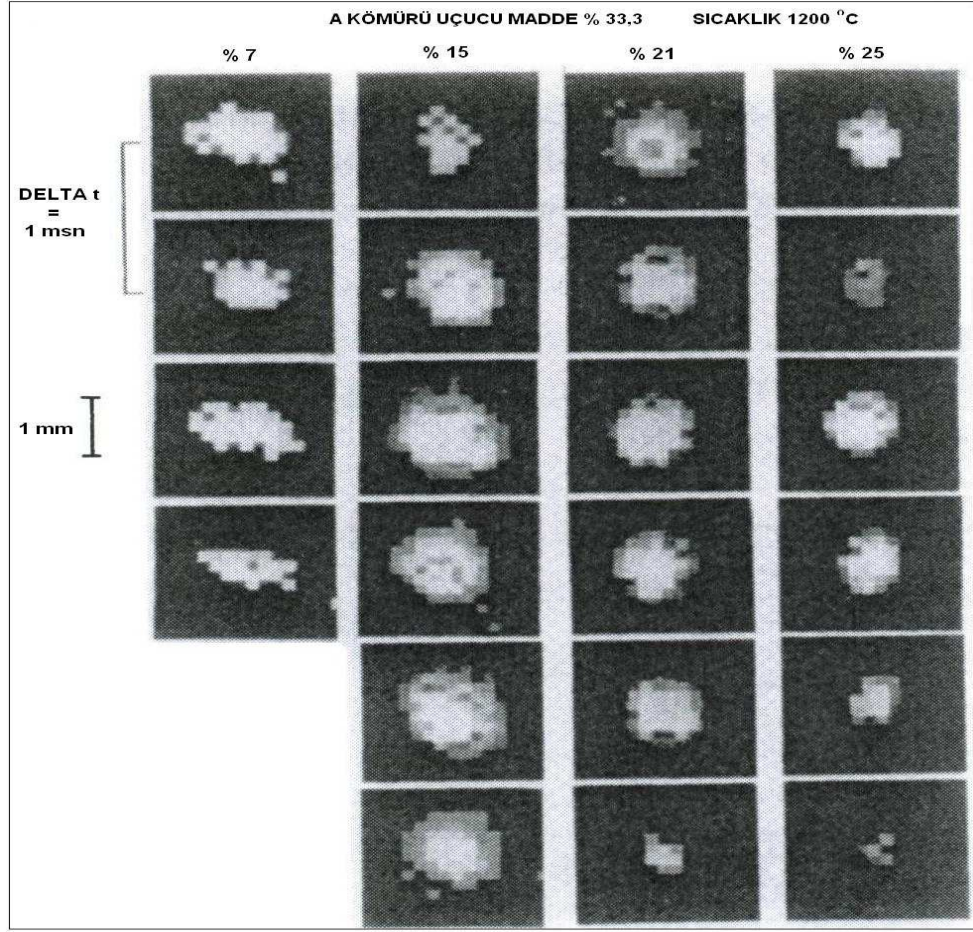
Uçucu madde uzaklaştıktan sonra geri kalan kül, inorganik bileşenler ve karbondan oluşan sıcak kütleyle char denir. Char yanması süreci de en az bu ana kadarki süreç kadar kompleks bir davranış gösterir. Bu sebeple, bu aşamadaki reaksiyon karakteristikleri, reaksiyon kontrolü, tane sınırlarında difüzyon kontrolü ve kül katmanlarında difüzyon kontrolü olarak 3 aşamada incelenebilir.

3.2. YANMA

3.2.1. Tek Bir Kömür Partikülünün Yanma Karakteristiği

Tutuşma sonrasında kömür partikülünün çevresinde oluşan alev Şekil 3.3 'de görülmektedir. Bu fotoğraflar çok yüksek hızlı fotoğraf makinesi ile görüntülenmiştir. % 33,3 oranında uçucu madde içeren tek bir kömür partikülü ortam oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak, yanma karakteristiği hakkında bilgi vermektedir [10].

Tutuşmanın hemen sonrasında partikülün çevresinde geniş bir alev boyutu görülür. Alev hızlı bir şekilde genişler, daralarak kaybolur ve hemen sonrasında char yanmaya başlar.

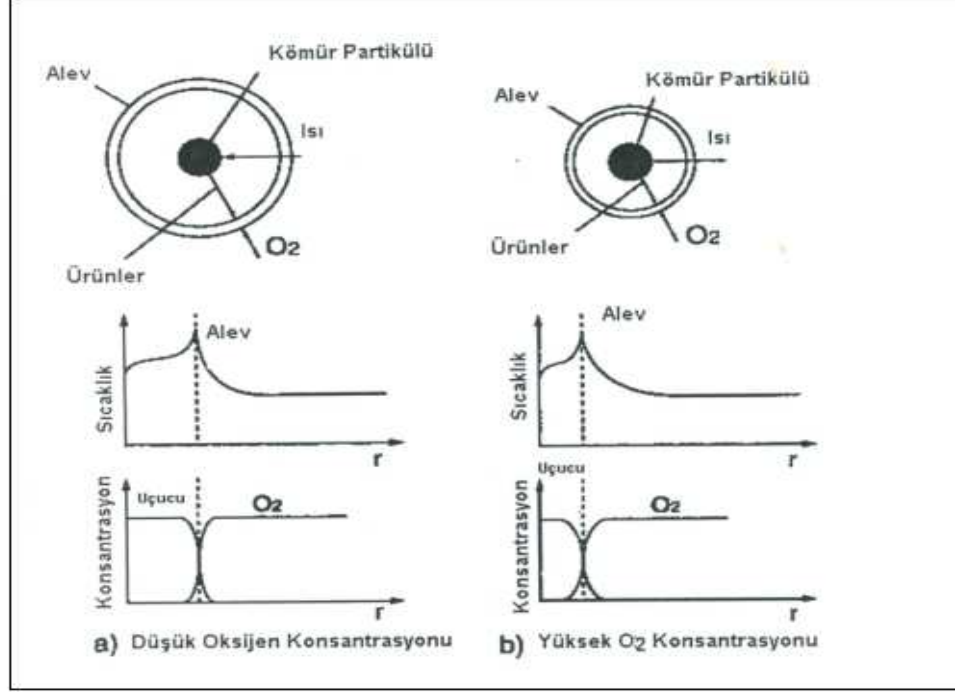


Şekil 3.3. Tek bir kömür partikülü çevresinde oluşan alevin yüksek hızlı bir kamera ile çekilmiş görüntüsü [10].

Şekil 3.3'te tutuşmanın hemen sonrasında tek bir taneciğin çevresindeki alevler görülmektedir. % 33,3 uçucu madde içeren bir partikülün oksijen konsantrasyonundaki değişime bağlı olarak yanma değişimi görülmektedir. Tutuşmanın hemen sonrasında parçacığın etrafında maddenin yaymış olduğu geniş alevler görülmüştür. Alevler genişler, büzülür, kaybolur ve sonrasında char yanması başlar. Genişleyen alevler büyütüldüğünde, oksijen konsantrasyonundaki artışla birlikte alevlerde küçülme gözlenir. 300 mm uzaklıktaki bir partikülün % 7 oksijen içeren bir ortamdaki yanma verimi % 50 iken, % 25 oksijen içeren bir ortamda % 70'e ulaşır. Tek bir parçacığın yanma mekanizması ise Şekil 3.4' teki gibidir [10].

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, oksijen konsantrasyonu ne kadar yüksek ise parçacıktan ayrılan uçucu maddenin de yanma hızı o kadar yüksek olur. Bu ise, bir sonraki aşama

olan pirolizi artırır. Oksijen konsantrasyonu düşük ise, alevler enine genişleyerek çevreleyen alana ısı yayar.

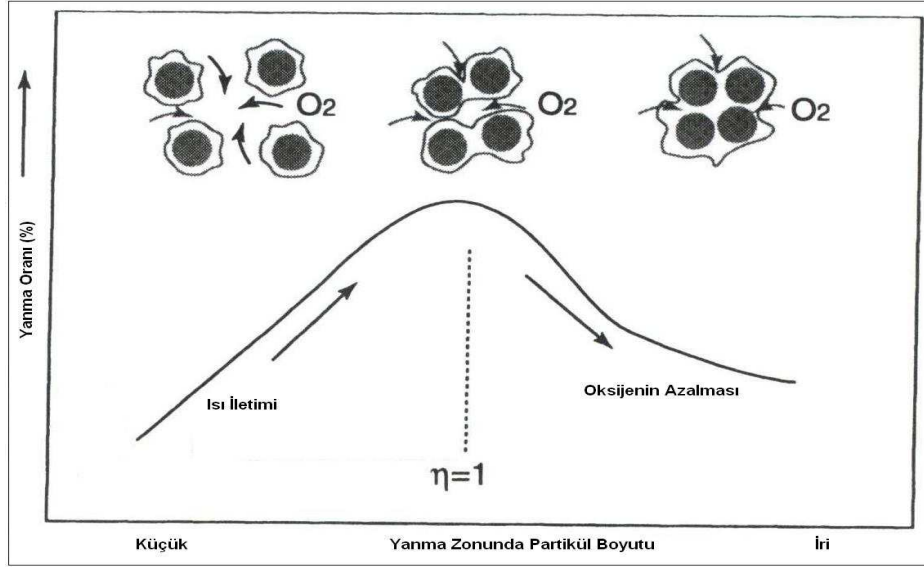


Şekil 3.4. Tek bir kömür partikülünün yanma mekanizması [10].

Bu sonuçlar, bir partikül grubu için genellenecek olursa, oksijen konsantrasyonu yüksek ise oluşan alev daha kompakt ve her bir parçacığın yanması bağımsız olur. Oksijen konsantrasyonu düşük ise, alevler daha dağınık, her bir parçacığın yanması iç içe ve yanma verimi düşük olur [10].

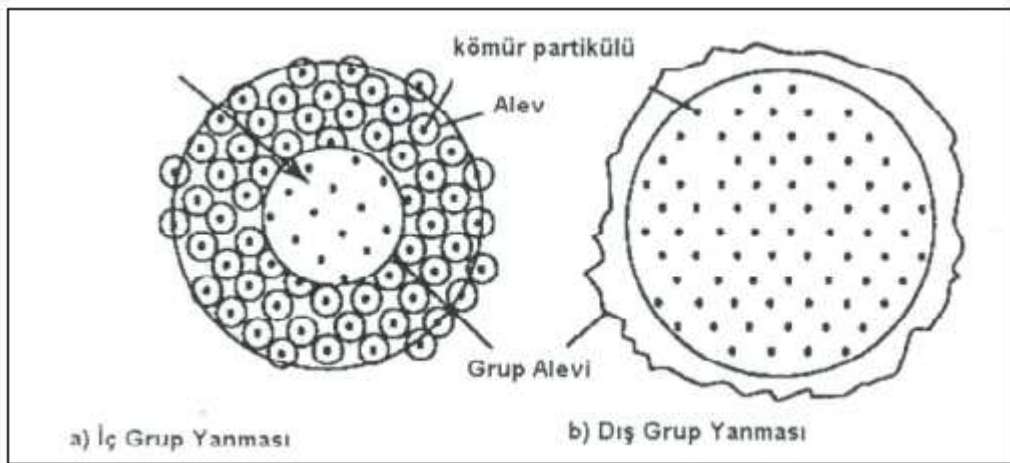
3.2.2. Pülverize Kömür Grubunun Yanması

Şekil 3.5’de, lokal bir partikül grubunun yanma modeli görülmektedir. Şekil 3.5’in sol yarısında görüldüğü gibi kömür partiküllerinin birbirinden ayrı olarak bulunması oksijenin her bir partiküle daha kolay ulaşmasına ve doğal olarak yanma reaksiyonunun hızlanmasına sebep olur. Bu hızlanma, pülverize kömür yanma verimini artırır. Şekil 3.5’in sağ yarısında görüldüğü gibi kömür partiküllerinin birbiriyle iç içe girmesi oksijenin temas yüzeyini küçülttüğünden dolayı reaksiyon verimini de düşürür [19].



Şekil 3.5. Yanma bölgesindeki parçacık konsantrasyonuna göre yanma oranı değişimi [10].

Şekil 3.6'da bir pülverize kömür grubunun kesit resmi görülmektedir. Bu partikül grubu, yüksek konsantrasyonlu bir oksijen kaynağı ile karşılaşırsa Şekil 3.6'daki gibi birbirinden bağımsız ve homojen bir şekilde iç grup yanması şeklinde yanar. Oksijen kaynağı yetersiz partiküller birbiri ile iç içe geçmiş ve düzensiz bir formda ise dış grup yanması şeklinde yanar. Bu şekilde bir yanmada ise yanma verimi düşme yönünde eğilim gösterir. İyi bir yanma verimi için pülverize kömür parçalarının mümkün olduğu kadar geniş bir alana dağılması gerekir [19].

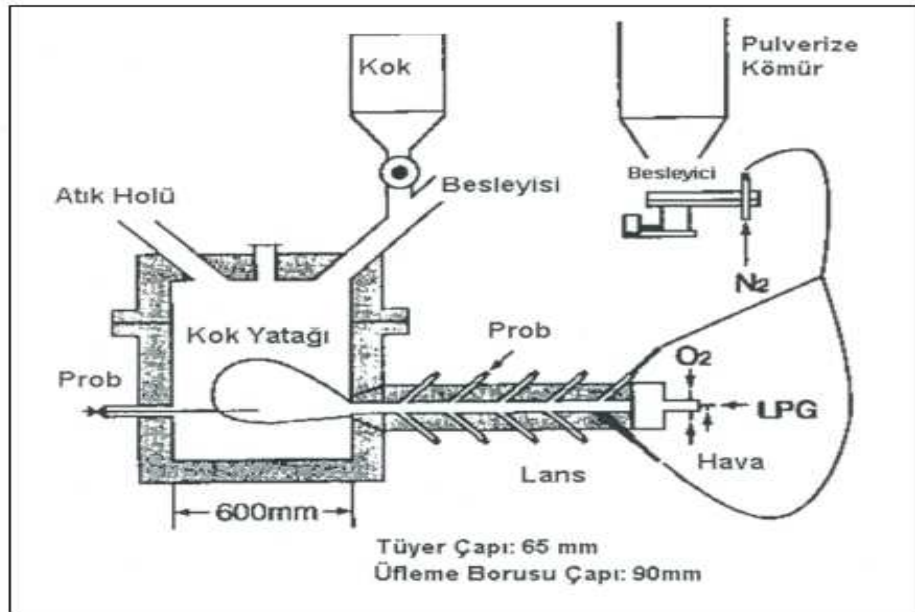


Şekil 3.6. Pülverize kömür grubunun yanması [10].

3.3. PÜLVERİZE KÖMÜRÜN YÜKSEK FIRINDAKİ YANMA DAVRANIŞI

Pülverize kömür yüksek fırına verilen sıcak havanın içerisine küçük çaplı bir lanstan enjekte edilir. Sıcak hava sıcaklığı 1000 °C – 1200 °C civarında ve sıcak hava hızı 200-230 m/sn'dir. Bu koşullar altında enjekte edilen kömür tanecikleri hızlı bir şekilde ısınır, tutuşur ve yanmaya başlar. Kömür partikül grubunun yanması ile bir kömür tanesinin yanması prensip olarak aynıdır. Fakat kömür taneciklerinin birbiri ile etkileşimi ve ayrışma yüzeyi de yanma davranışını etkiler.

Yanma verimi ve yanma sıcaklığı Şekil 3.7'deki düzenek sistemi ile belirlenmiştir. Yanma verimi, yanma sonrası kömür içerisindeki yanabilir maddenin değişimi prensibine göre ölçülmüştür. Yanma verimi, enjeksiyon noktasından 600 mm sonra hızlı bir şekilde artmaya başlar. Bu mesafede kömürün hızlı pirolizi sonrasında açığa çıkan uçucu maddenin yanması büyük rol oynamaktadır [20].



Şekil 3.7. Deney düzeneği [20].

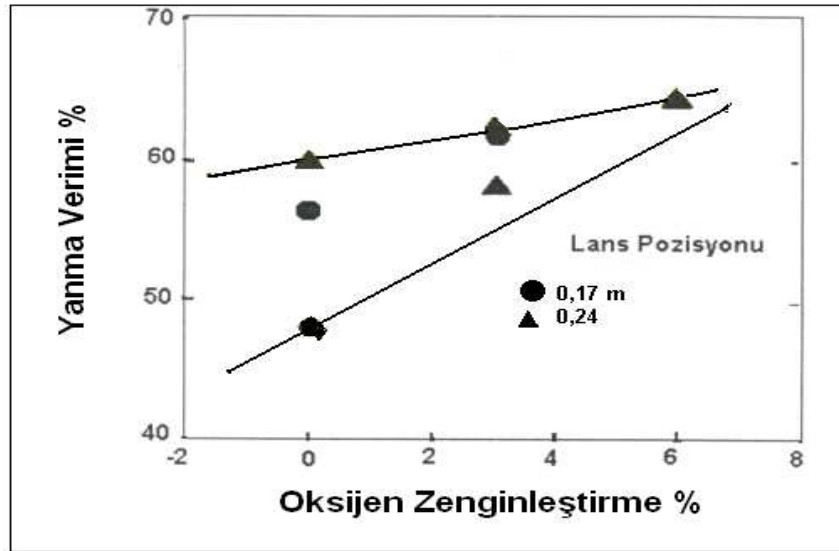
Aynı miktarda kömür, tek lans yerine, çift lanstan enjekte edildiğinde yanma veriminde belirgin bir artış gözlenmiştir. Tek lanstan enjeksiyonda yanma verimi % 40 civarlarında iken, çift lansa çıkıldığında yanma verimi de % 60 civarlarına

yükselmiştir. Bu artıştaki en büyük etken, kömür tanecikleri arasındaki mesafenin açılması ve reaksiyon hızının artmasıdır [20].

3.3.1. Pülverize Kömürün Raceway’de Yanması

Raceway’de pülverize kömürün yanması ile kokun yanması arasında adeta bir rekabet vardır. Raceway’deki yanma karakteristiklerini incelemek için Şekil 3.7’deki deney düzeneği kullanılarak gaz konsantrasyonları incelenmiştir. Optik fiberler kullanılarak aynı anda çift yönlü olarak sıcaklık dağılımı ölçülmüştür. Optik fiberler su soğutmalı metal tüplerle korunarak raceway’e sokulmuştur. Optik fiberler raceway’e ulaştığında termal radyasyon iletilerek değerler çevrilir [20].

Şekil 3.8’de aynı zamanda lans pozisyonuna bağlı olarak yanma verimindeki değişim görülmektedir. Enjeksiyon lans ucu, tüyer ucundan 24 cm geride tutulduğundan oksijen zenginleştirme miktarının artışı ile birlikte yanma verimi de artar. Lans pozisyonunun kömürün yanma verimi üzerinde belirgin bir etkisi vardır.



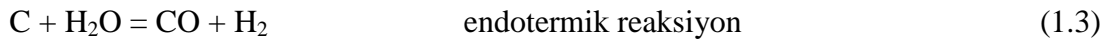
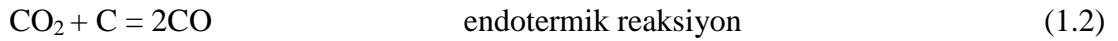
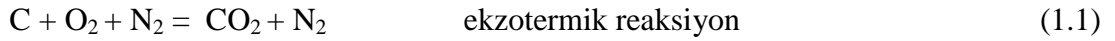
Şekil 3.8. Enjeksiyon lans pozisyonu ve oksijen zenginleştirmenin yanma verimi üzerine etkisi [10].

Lans ucu ile tüyer ucu arasındaki mesafesinin optimum değerde olması (20-25cm) kömürün ön ısıtılması için zaman kazanılması dolayısıyla kömürün raceway'de yanmasını hızlandırmak anlamına gelir [20].

Kömür, ilave yakıt olarak tüyerlerden enjekte edildiğinde, raceway'deki yanma sistemi yakıt olarak sadece kokun kullanıldığı duruma göre çok daha kompleks bir hal alır [2].

Şekil 3.9'da da görüldüğü gibi, uçucu maddelerin ayrışması sonrasında C ve H₂'nin oksidasyonu sonucu ve CO₂ ve H₂O oluşumu gerçekleşir. Bir sonraki adımda ise, endotermik çözelti kaybı reaksiyonları (solution loss reaksiyonları) gerçekleşir. Proses şartlarında tüm endotermik reaksiyonların mümkün olduğu kadar minimize edilmesi gerekir. Bunun için ortam oksijen konsantrasyonu ve hava sıcaklığını artırmak en etkili çözümdür.

Kömürün raceway'deki reaksiyonları;



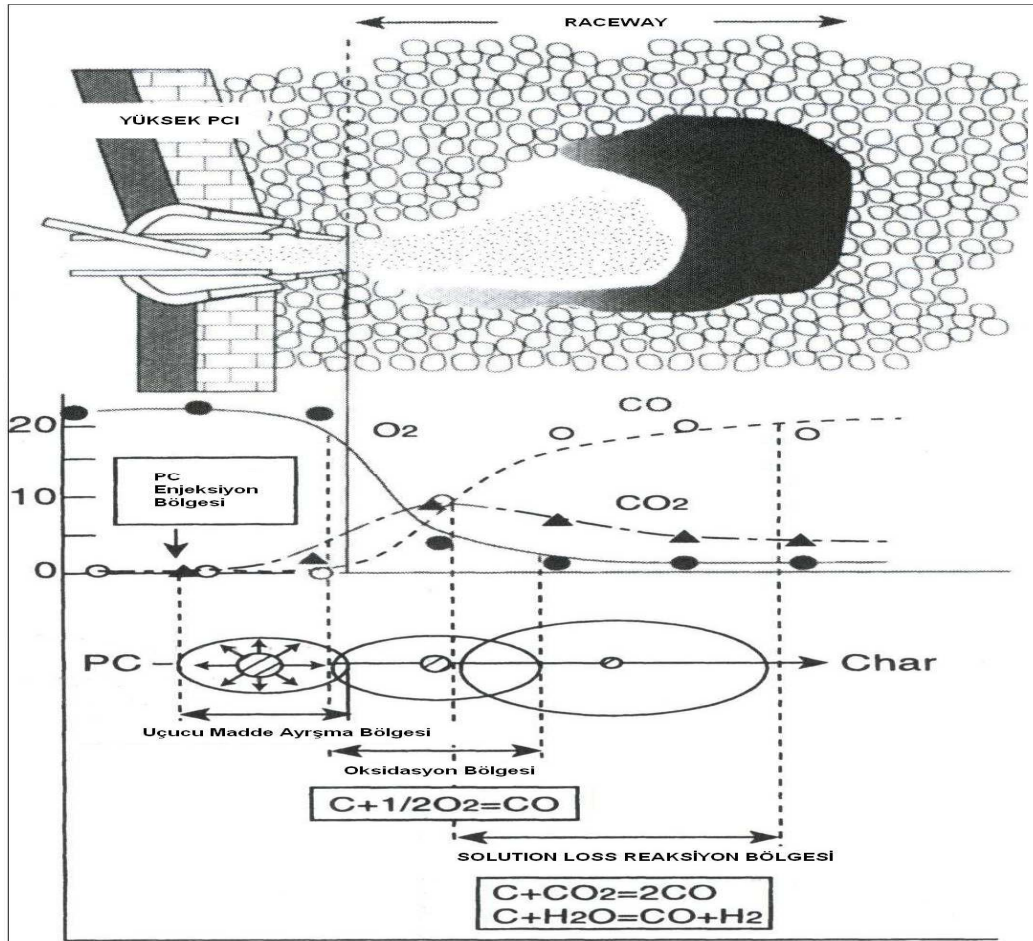
Kömür parçacıklarının üfleme borusu-tüyer-raceway sisteminde kalma süresi ortalama 10-20 ms'dir. Bu süre ise yanmanın tam olarak gerçekleşebilmesi için çok kısadır. Yanmamış kömüre ilave olarak, fırın tepesinden şarj edilen kokun raceway'e inmesi ile birlikte oksijen tüketimi artar. Sonuç olarak, yanmamış kömürün reaktivitesi yanma prosesi üzerinde çok önemli bir rol oynamaktadır [3].

Yüksek fırın prosesinde yanma verimi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerden bir kaç tane üfleme borusu-tüyer-raceway sistemindeki fazla oksijen ve hava sıcaklığı gibi bazı teknolojik limitlerin artırılabilmesi ile ilgilidir. Enjeksiyon modelinin seçimine göre de bazı kısıtlamalar olabilmektedir. Öte yandan, kömürlerin farklı yanma özellikleri göz önünde bulundurularak yapılan seçim ile yanma veriminde belirgin bir artış kaydedilebilir. Ayrıca, oksijen zenginleştirme, yüksek hava sıcaklığı, düşük

tüyer hızı, uygun fırın içi şarj dağılımı da kömür yanma verimini etkileyen en önemli etkenlerdir [3].

3.3.2. Kömürün Raceway’de Yanması Sonrasında Gaz Dağılımı

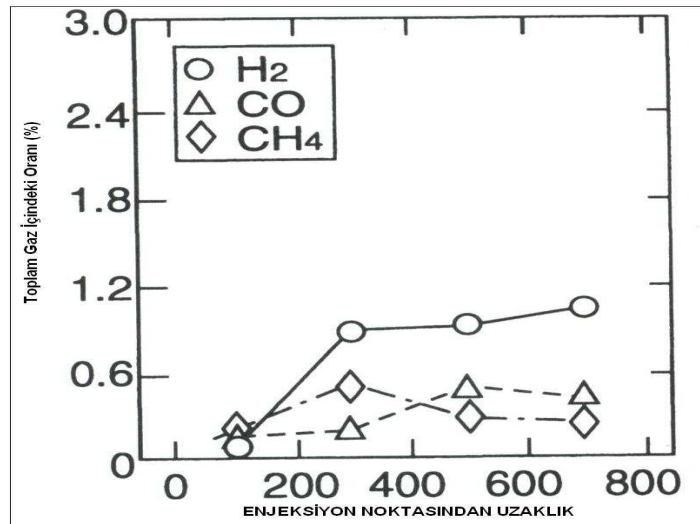
Kömürün yanması, ortam koşulları nedeniyle kompleks ve çok aşamalı bir süreçtir. İyi bir yanmanın gerçekleşebilmesi için yanma prosesinin üfleme borusu içinde başlayıp raceway içinde tamamlanması gerekir. Aksi takdirde yakıt oranında artışta, işletme problemlerine, raceway’in bloke olmasına, fırın geçirgenliğinin düşmesine, duvar gaz geçirgenliğinin artmasına, W tipi kohesive bölge oluşumuna, dolayısıyla duvarda ısı kaybına ve fırın verimliliğinin düşmesine sebep olur [8].



Şekil 3.9. Raceway reaksiyonlarının şematik görünümü [20].

1900'lü yılların başında her tüyerin önünde sabit uzunlukta "raceway" adı verilen küresel bir yanma bölgesi olduğu tespit edildi. Bu, yüksek fırın prosesi için en önemli ve bariz gelişmelerden biriydi. Kinney'in bulguları, o zamana kadar hakim olan raceway'in fırın merkezine kadar uzadığı görüşüne karşılık, hazne çapı büyüdükçe, fırın merkezinden aktif olmayan bölgenin büyüdüğünü göstermiştir [2].

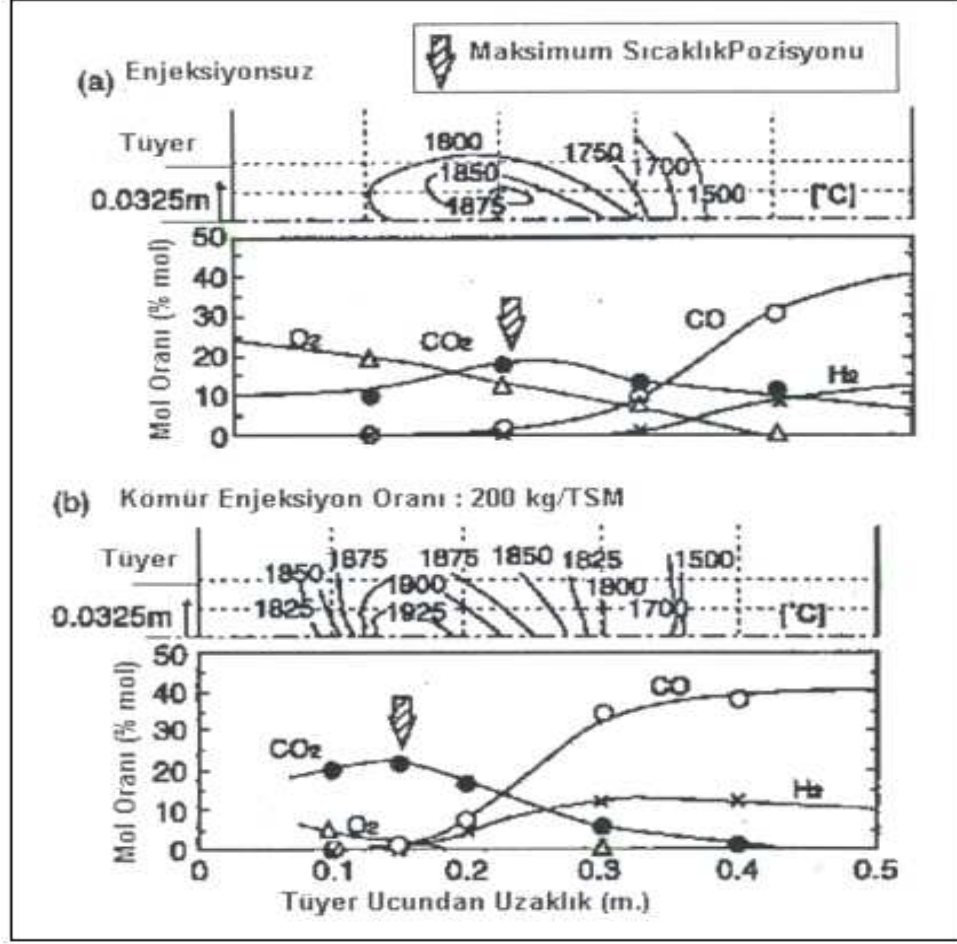
Kömürün yanma esnasında öncelikle uçucu maddeler ayrışır. Şekil 3.10 kömürün 1250 °C hava sıcaklığı ile pirolizi sonrasında oluşan gaz dağılımını göstermektedir. Uçucu madde, çok yüksek oranlarda H₂, CO ve CH₄ gazlarından oluşmaktadır. CH₄'ün ayrışması düşük sıcaklıklarda, H₂ ve CO'in ayrışması ise daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir [3].



Şekil 3.10. 1250 °C hava sıcaklığında ayrışan uçucu gazların enjeksiyon noktasından uzaklığa göre değişimi [3].

En yüksek sıcaklığa tüyer merkez eksenini boyunca ulaşılır. Raceway'deki oksijen, enjekte edilen pülverize kömür tarafından hızlı bir şekilde tüketilir ve sıcaklığın maksimum olduğu noktada CO₂ konsantrasyonu da maksimuma ulaşır. Sıfır kok ile çalışan (enjeksiyonsuz) durumda gaz kompozisyonu ve sıcaklık dağılımı, sıcak kok ve raceway'deki oksijen miktarı ile belirlenir. Pülverize kömür enjekte edildiğinde, yanmanın ilk periyodunda hızlı bir şekilde uçucu madde yanar ve geri kalan serbest karbonun yanma karakteristikleri raceway'deki gaz kompozisyonu ve sıcaklık

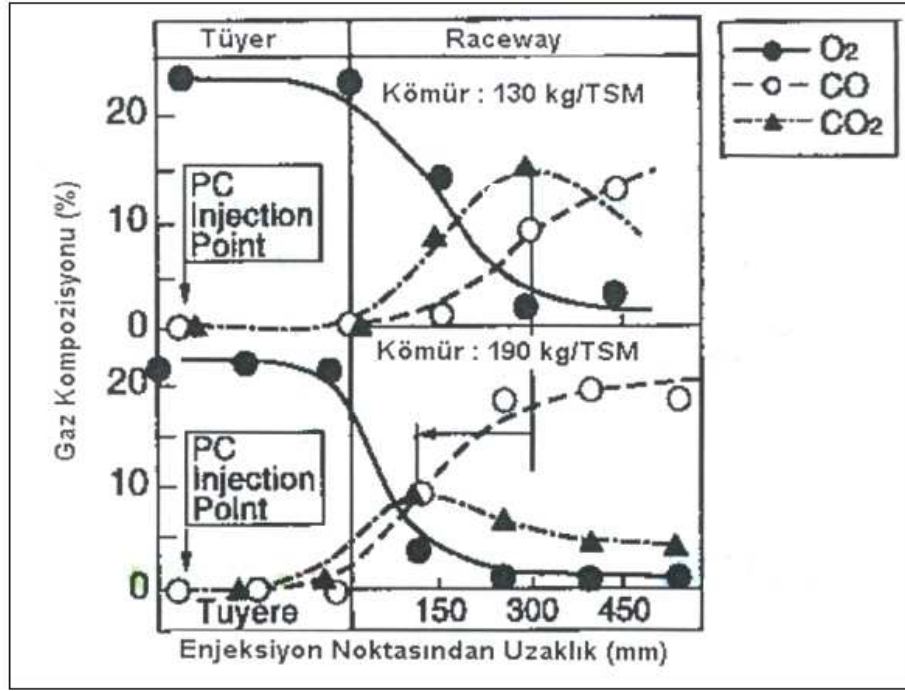
dağılımında belirleyici rol oynar. Enjeksiyon miktarının artması, oksijen tüketiminin artması ve yanma noktasının tüyer yönüne doğru kayması anlamına gelir.



Şekil 3.11. Enjeksiyon noktasından uzaklığa göre gaz konsantrasyonu değişimi [10].

Şekil 3.11'de Kokogawa (Japonya) 1. yüksek fırınında, pülverize kömürün raceway'deki gaz kompozisyonu üzerinde etkisi görülmektedir. Tüm durumlarda tüyer ucundan fırın içine doğru gidildikçe oksijen konsantrasyonu hızla düşmeye başlar, CO₂ konsantrasyonu ise hızlı bir şekilde artar. Pülverize kömürün raceway'de yanması için oldukça kısa bir yanma mesafesi ve yanma süresi vardır [8].

Şekil 3.12'de görüldüğü gibi, yanma reaksiyonun en efektif gerçekleştiği nokta olan, CO₂'nin en yüksek olduğu nokta, aynı zamanda en yüksek sıcaklığın olduğu nokta, kömür enjeksiyon oranının artışı ile birlikte tüyer yönüne kayar.

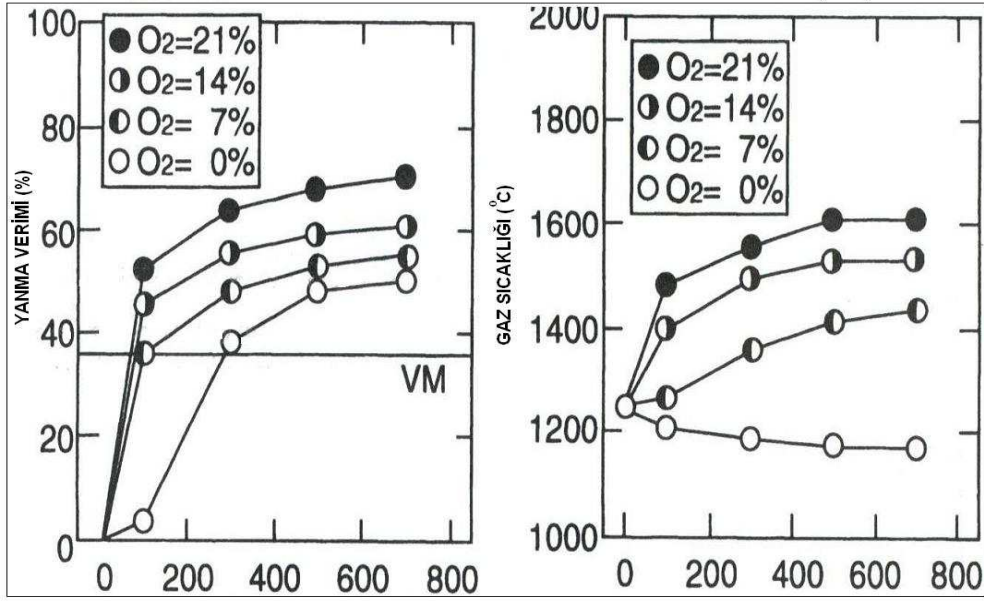


Şekil 3.12. Raceway'de gaz dağılımı [8].

Bu sonuca göre, yüksek uçucu içerikli kömürler kullanılarak yapılan kömür enjeksiyonunda daha önceki sonuçta olduğu gibi yanma bölgesi tüyer yönünde kayar ve duvar sıcaklığında artışa neden olur. Ayrıca, kül miktarının da yanma üzerinde belirgin etkisi vardır ve pülverize kömürün yanma verimi kok reaktivitesinin değişiminden etkilenmektedir. Fakat, kok reaktivitesi artışının gaz kompozisyonu dağılımını değiştirdiği ve yanma bölgesinin tüyer yönünde kaymasına neden olduğu görülmüştür [9].

3.3.3. Kömürün Raceway'de Yanması Sonrasında Sıcaklık Dağılımı

Tüyer önü oksijen konsantrasyonu artırıldığında, ilk olarak uçucu maddelerin yanması ile birlikte ortam gaz sıcaklığı artışı ivme kazanır. Uçucu gazların sıcaklığındaki bu artış oranı kömürün yanma verimi ile doğrudan ilgilidir [4].



Şekil 3.13. Oksijen oranına ve enjeksiyon noktasından uzaklığa bağlı olarak ortam gaz sıcaklığı ve kömür yanma verimi değişimi [21].

Mororan (Japonya) 2 No'lu yüksek fırının da sırf kok ile çalışan durum ile 150 kg/TSM kömür enjeksiyonu ile çalışan durumu karşılaştırmak için yapılan deneyde, kömür enjeksiyon miktarı artırıldıkça tüyer çevresindeki sıcaklık dağılımında artış, raceway'in derinliği yönündeki sıcaklık dağılımında düşüş olduğu gözlenmiştir. Bunun anlamı ise kömürün yanması sonucunda açığa çıkan ısının bir kısmının efektif olarak yanma bölgesinde kullanılamaması, ısının bir kısmının duvar kenarında kaybolması şeklinde özetlenebilir.



Şekil 3.14. Pülverize kömürün yanma alevi görüntüsü

3.4. PÜLVERİZE KÖMÜR YANMA VERİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Kömür enjeksiyon yapılmasının amacı, maksimum miktarda kömürü raceway'de yakabilmek ve buna bağlı olarak kok oranını azaltmaktır. Raceway'de maksimum miktarda pülverize kömür yakabilmek için ise kömür yanma veriminin artırılması gerekir.

Yüksek pülverize kömür enjeksiyonu oranına başarılı bir şekilde ulaşabilmek için fırın gaz geçirgenliğinin iyileştirilmesi ve ısı kayıplarının minimize edilmesi gerekir. Her ikisini de elde etmek için kömürün yanabilirliğinin iyileştirilmesi en önemli faktördür.

Kömür enjeksiyonu ile birlikte fırın kesiti boyunca etkili gaz dağılımını mümkün olduğu kadar sabit tutmak gerekir. Yüksek uçuculu kömür kullanılarak, yüksek enjeksiyon uygulandığında yüksek gaz hızı ve gaz sıcaklığından dolayı raceway derinliği artar. Tüyerler önünde kömür taneciklerinin koklara çarpması, kok üzerinde termo-mekanik bir stres oluşturur. Kokun parçalanması sonucu oluşan parçacıklar ve

yanmayan kömür taneleri raceway'in arkasında kalın bir birikim oluşturur. Bu birikim gazı merkezden uzaklaştırarak fırın duvarına yönlendirir ve fırın refrakterindeki ısı yükü artar. Aynı zamanda fırın merkezi gaz akışının zayıflaması sonucu fırın ısı potansiyeli, ergimenin merkeze göre daha zayıf olması gereken duvar kenarında, kaybolur. Bu durumda fırın merkezi geçirgenliğinin artırılması için fırın merkezine ilave kok şarjı yapılır. Ayrıca mevcut kullanılan tüyer çapları büyütülerek gaz hızı yavaşlatılır [5].

Pülverize kömür enjeksiyon oranının artışı ile birlikte ortam oksijen konsantrasyonu düşer ve buna bağlı olarak kömürün yanabilirliği de düşer. Yanmayan kömür partikülleri raceway'i aşarak deadman'e fırın içerisine yönelir. Bunun sonucunda ise, fırın içi gaz geçirgenliği düşer, sıvı geçirgenliği ve deadman'in özellikleri bozulur. Ayrıca, bouduard reaksiyonlarının artmasıyla yakıt oranı artar [11].

Yukarıda, pülverize kömürün yüksek fırın prosesine olan önemli negatif etkilerinden örnekler verilmiştir. Tüm bu negatif etkiler, "yakıt oranını düşürmek" temel felsefesi olan pülverize kömür kullanımını amacından uzaklaştırır. Bu nedenle, pülverize kömürün verimli bir şekilde kullanılabilmesi için kömür yanma veriminin iyileştirilmesi ve prosese olan kömür enjeksiyonu yüksek olan fırın prosesine olan negatif etkilerinin alınacak önlemler ile bastırılması gerekir. Aksi takdirde büyük bir avantaj olan kömür enjeksiyonu kullanımı, büyük dezavantajlar zincirine dönüşebilir.

Kömürün yanma verimini etkileyen faktörleri sıralayacak olursak;

- 1- Kömür Özellikleri
 - 1.1- Uçucu Madde Miktarı
 - 1.2- Maseral Yapı
 - 1.3- Karbon İçeriği
 - 1.4- Kömür Külü
 - 1.5- Rutubet Miktarı
 - 1.6- Boyut
- 2- Proses Şartları
 - 2.1- Kömür Oranı

- 2.2- Hava Sıcaklığı
- 2.3- Sıcak Hava Basıncı
- 2.4- Oksijen Miktarı
- 2.5- Tüyer Hızı
- 2.6- Hammadde kalitesi
- 3- Enjeksiyon Sistemi
 - 3.1- Enjeksiyon lans tipi
 - 3.2- Enjeksiyon Lans Pozisyonu
 - 3.3- Enjeksiyon Modeli

Raceway’de maksimum miktarda kömür yakabilmek için;

- 1- Ortamda yanma için yeterli oksijen miktarı bulunmalı,
- 2- Enjekte edilen kömür ve sıcak hava hızlı bir şekilde karışmalı, mümkün olduğu kadar geniş yanma yüzey alanına dağılarak yanma kısa bir süre içerisinde gerçekleşmeli,
- 3- Kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri uygun olmalı,
- 4- Raceway koşullarındaki kokun karbonunun oksijenle yanmasından önce kömürün karbonu yanmalı,
- 5- Kömürün raceway’e giriş hızı düşük olmalı,
- 6- Kömür haricinde kullanılan sinter, pelet, kok gibi ham maddelerin kalitesi uygun olmalı,
- 7- Fırın gaz geçirgenliğini arttırıcı tedbirler alınmalı [10].

3.4.1. Kömür Özelliklerinin Etkisi

3.4.1.1. Kömür Türünün Etkisi

Kömür başlıca 4 adımla sınıflandırılabilir.

- 1- Derecelerine göre
- 2- Sertliğine göre
- 3- Toplam rutubet ve karbon miktarına göre

4- Kahverengi kömürler ve linyitler

ASTM D 388 standardı, kömürü metamorfizm yada linyitten antrasite doğru doğal serisi içerisinde incelemektedir. Bu sıralamada sabit karbon ve ısı kapasitesi, derecelendirme kriteri olarak dikkate alınmıştır. Yüksek dereceli kömürler kuru bazda ve karbon miktarına göre, daha düşük dereceli kömürler ise yaş bazda ve ısı kapasitesine göre sınıflandırılırlar [10].

Linyit, en düşük dereceli sıkı paket hale dönüşmüş kömürdür. Rengi kahverengi ile siyah arasında değişir. Yapısında odunsu ve bitkisel mineraller belirgin biçimde gözlenir. Linyit kömürü, diğer türlere göre daha düşük ısı kapasitesi ve yüksek rutubet içeriğine sahiptir.

Alt bitümlü kömürler siyah renklidir ve yapısında az miktarda odunsu mineraller içerir. Fazla rutubet içermemesine rağmen düşük ısı kapasitesine sahip bir kömürdür. Linyite göre hava şartlarında dağılma özelliği daha azdır. Rutubet içeriği düşük, uçucu madde miktarı yüksekte ortaya doğru değişen ve ısı kapasitesi değeri yüksek olan bir türdür.

Antrasit, sert, kırılğan, siyah renkte, oldukça metamorfazlaşmış bir kömürdür. Isı kapasitesi alt bitümlü kömürlerden daha düşük, rutubet içeriği düşük ve karbon içeriği yüksektir. Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi, kömür örneği olarak A ve B kömürleri kullanılmıştır [10].

Çizelge 3.1. Deney sırasında kullanılan kömürlerin özellikleri [10].

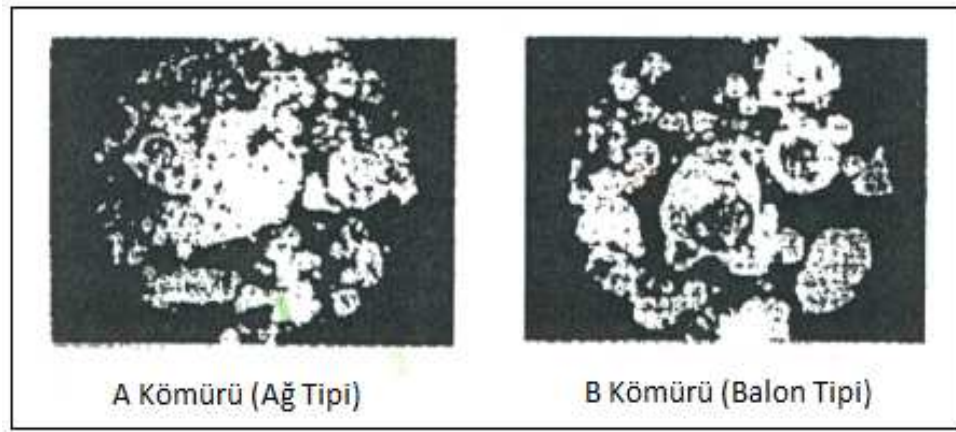
Kömür Adı	Uçucu Madde (%)	Sabit Karbon (%)	Kül (%)	Nem (%)
A	39,2	63,5	2,5	4,8
B	18,8	70,2	10,4	0,6

A kömüründe sıcak hava sıcaklığının artışı ile uçucu madde emisyon oranında da artış görülmüştür. Fakat sabit karbondaki bir dönüşüm olmamıştır. Bir diğer değişim

ise uçucu madde emisyonunun artışı ile alev yüzey alanının genişlemesi şeklinde olmuştur.

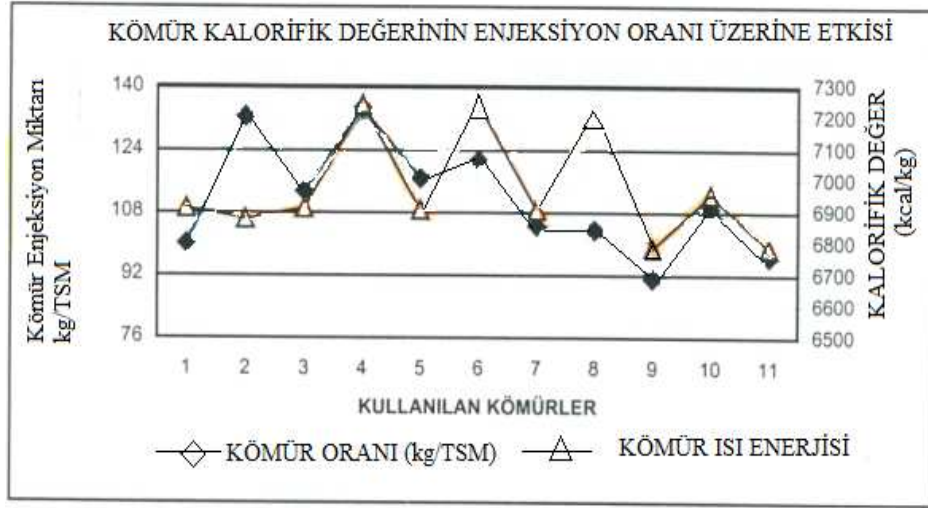
B kömüründe de A kömüründeki oran kadar olmasa bile, sıcak hava sıcaklığının artışı ile birlikte uçucu madde emisyonu artar. Fakat, sabit karbon dönüşümünde azalma gözlenir. Ayrıca, spesifik yüzey alanında düşme gözlenmiştir. Bu durumun temel sebebi; B kömürünün kül ergime sıcaklığının düşük olması ve ergiyen külün partikül yüzeyindeki gözenekleri kapatması olmuştur.

Bu iki farklı kömürün spesifik yüzey alanı üzerinde göstermiş olduğu değişimin sebebinin char yapısındaki farklılıktan kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 3.15, deney sırasında kullanılan her iki kömürün de yanmadan yapısını göstermektedir. A kömürü char partikülleri ağ yapısı tipinde ve genişleyen yüzey eğilimde, B kömürü ise balon tipi yapı örneği göstermektedir. Bu gözlemler, char yapısının kömürün reaktivitesini belirleyici bir rol oynayan, tutuşma özelliğini etkileyen önemli bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır [10].



Şekil 3.15. Yanmakta olan iki farklı kömürün kesit görüntüsü [10].

Pülverize kömürün yanma prosesi, kömür tipine, sabit karbon miktarına, uçucu madde miktarına göre değişir. Ortam sıcaklığı, uçucu madde emisyonunu etkiler. Fakat sabit karbonun reaksiyon verimi üzerine olan etkisi ise char yapısı ve kül içeriğine bağlı olarak değişir. Bu değişimler pülverize kömürün alev yapısını belirgin biçimde etkiler.



Şekil 3.16. Enjeksiyon kömürü kalorifik değerinin kömür enjeksiyon miktarı üzerine etkisi [22].

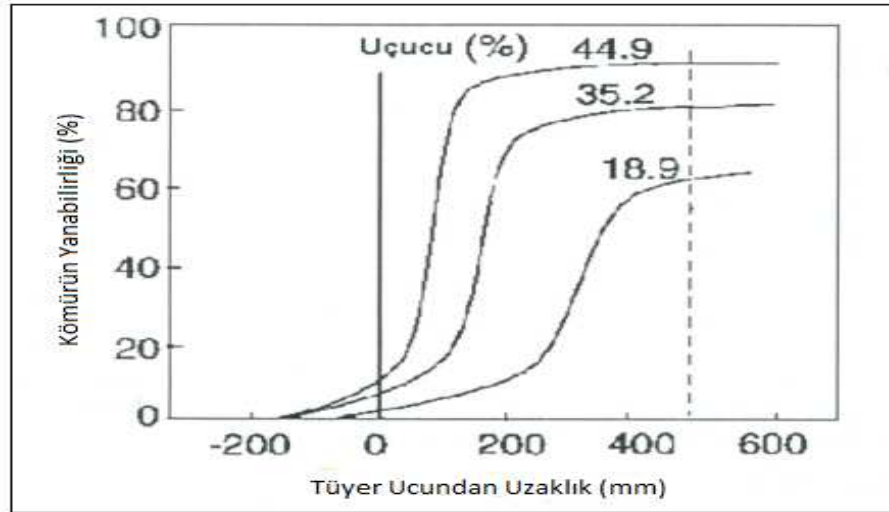
Şekil 3.16’da, farklı kalorifik değerlere sahip 11 farklı kömürün, enjeksiyonun artırılması üzerine etkisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kömür kalorifik değerinin artışı ile birlikte enjeksiyon oranında, bir başka deyişle kömür yanma veriminde artış olduğu görülmüştür.

3.4.1.2. Kömür Uçucu Madde Miktarının Etkisi

Kömürün pirolizi sırasında açığa çıkan hidrojen, karbon monoksit, metan, diğer hidro karbonlar gibi yanıcı gazlardan ve CO₂, su buharı gibi yanıcı olmayan gazlardan oluşan bileşime uçucu madde denir. Kömürün derecesi ve maseral yapısı uçucu madde miktarını doğrudan etkiler [4].

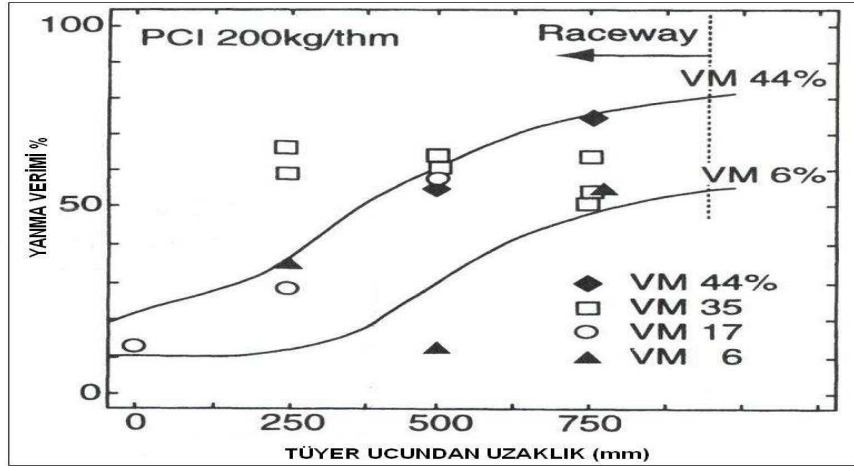
Kömür uçucu madde miktarının kömür enjeksiyonunun artırılması üzerindeki etkisi iki farklı açıdan yaklaşılabilir. Birinci yaklaşım, düşük uçuculu kömürün karbon miktarı yüksek olduğu için kömür-kok yer değiştirme oranı da yüksektir. Bu sonuca göre, düşük uçuculu kömür kullanarak yüksek oranda kok azaltılabilmesi gerekir. İkinci yaklaşım ise, yüksek uçuculu kömürün yanma reaksiyon hızı yüksektir ve kömür verimli bir şekilde yakılmasına imkan sağlayarak yüksek oranda enjeksiyon yapılmasına ve kok oranının azaltılmasına imkan sağlar. İki yaklaşım da incelendiğinde, yüksek oranda kömür enjeksiyonu yaparak, yakıt olarak

kullanılmakta olan kok miktarını azaltma hedefine en uygun seçim yüksek uçuculu kömür kullanmaktır. Çünkü düşük uçuculu kömürün teorik olarak her ne kadar daha fazla kokun yerini alabilme potansiyeli olsa bile, yanma verimi düşük olduğu için kok oranının azaltılması yönündeki etkisi yüksek uçuculu kömüre göre daha düşük olacaktır [9].



Şekil 3.17. Uçucu madde miktarının kömür yanma verimi üzerine etkisi [3].

Uçucu miktarının artması bir bakıma sabit karbonun düşmesi anlamına gelmiş olsa da yanma reaktivitesinin artması, karbon miktarındaki düşmeden kaynaklanan kaybı fazlasıyla telafi etmektedir. Bu konuda ortak olan görüş, orta uçuculu kömür kullanımınıdır. Böylelikle, yüksek kömür-kok yer değiştirme oranı ve yüksek reaksiyon hızı ile daha verimli bir enjeksiyon yapılabilir. Fakat bilindiği gibi orta uçuculu, sürekliliği olan homojen bir kömür kaynağı bulabilmek hem ekonomiklik açısından, hem de kaynakların kısıtlı olması açısından tercih edilmemektedir. Fakat, düşük uçuculu kömürler ile yüksek uçuculu kömürleri homojen bir şekilde karıştırıp yüksek fırınlara enjekte eden tesisler mevcuttur. Bu durumda ise tam homojen bir karışımın oluşturulamaması yanma verimi açısından en büyük problemi oluşturmaktadır [23].



Şekil 3.18. Uçucu madde miktarının kömür enjeksiyon miktarı üzerine etkisi [10].

Hoogovens Ijmuiden (Hollanda) fabrikalarında Çizelge 3.2’de görülen dört farklı uçucu miktarına sahip kömürler kullanılarak yapılan laboratuvar test çalışmaları sonucunda, uçucu madde miktarı artışı ile ve enjeksiyon noktasından uzaklığa göre kömürün gazlaşma oranı arttığı görülmüştür.

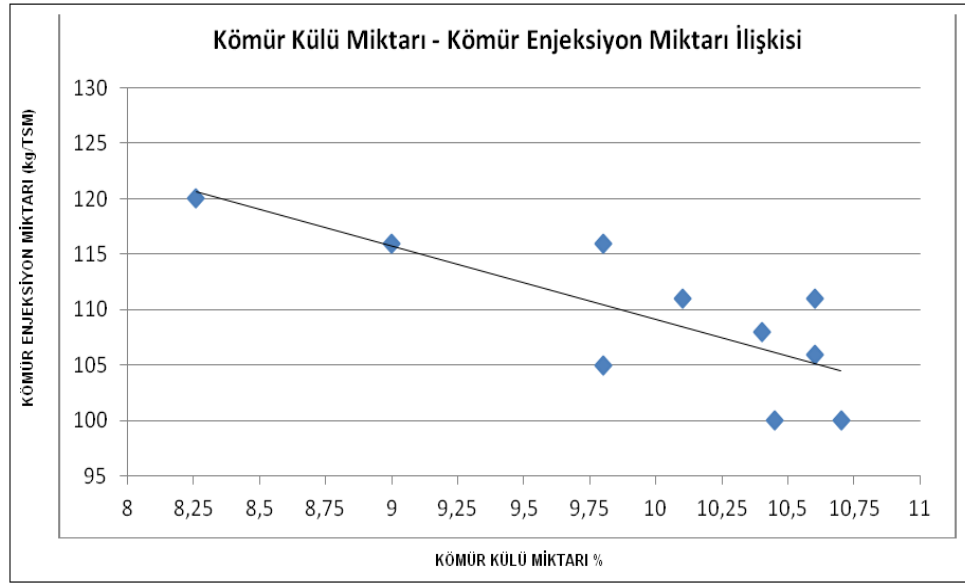
Çizelge 3.2. Uçucu madde miktarı ve enjeksiyon noktasından uzaklığa göre kömürün gazlaşma oranındaki değişimi [3].

Kömürün Adı	Uçucu Madde Miktarı (%)	Enjeksiyon Noktasından Uzaklığa Göre Gazlaşma Yüzdesi (%)		
		1 metre	2 metre	3 metre
A	4	20	25	45
B	18	45	55	75
C	33	50	70	80
D	38	65	70	80

3.4.1.3. Kömür Kül Miktarının Etkisi

Kömür kül miktarı, curuf kompozisyonu, curuf hacmi ve curuf ergime sıcaklığı üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, kül miktarının yüksek olması, karbon miktarının düşük olması anlamına geleceği için yakıt oranının artmasına neden olur ve kömürün soğutma etkisini artırır [9].

Kömürün kül miktarının düşük olması kömürün yanma performansını olumlu yönde etkiler. Kömür külü çeşitli mineral ve bileşenleri içerisinde bulunduran kompleks bir yapıdır. Bu inorganik kömür bileşenleri, yanma esnasındaki kimyasal ve fiziksel dönüşümlere maruz kalarak gaz, sıvı ve katı fazında orta dereceli kül yapısını oluşturur. Şekil 3.19’da farklı kül içeriğine sahip enjeksiyon kömürlerinin enjeksiyon oranına etkisi görülmektedir. Kül miktarının düşük olması, en basit ifade ile karbon oranının yada uçucu miktarının yüksek olması ve curuf hacminin düşük olması anlamına geleceği için, kömürün yanabilirliği üzerinde olumlu etki yapacaktır.



Şekil 3.19. Kömür külünün enjeksiyon miktarı üzerine etkisi [24].

3.4.1.4. Kömür Rutubet İçeriğinin Etkisi

Yüksek fırına enjekte edilen kömürün rutubet içeriği, kömürün raceway’deki soğutma etkisini, dolayısıyla yanma verimini olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle kömür, yüksek fırına enjekte edilmeden önce kömür enjeksiyon tesisinde kurutularak rutubeti % 1’in altına düşürülmelidir. Kömür rutubetinin yüksek olması, daha fırına girmeden önce hatlarda tıkanıklığa yol açacağı, taşınmada enjeksiyonun sürekliliğini bozacağı için istenmez [21].

3.4.1.5. Kömür Sabit Karbon Miktarının Etkisi

Sabit karbon miktarı, kömürün uçucu, kül ve rutubet miktarı dışında kalan aktif karbon miktarıdır. Kömürün karbonunun yanması sonucunda açığa çıkan enerji ne kadar yüksek ise, kömür-kok yer değiştirme oranı da o kadar yüksek olur. Yer değiştirme oranı, enjeksiyon için gerekli kömür miktarına karşılık azaltılan kok miktarı olarak açıklanabilir. Kömür-kok yer değiştirme oranını etkileyen önemli faktörler, kömürün karbon miktarı, kömür kalorifik değeri ve kömürün oksijenle vereceği reaksiyonun hızıdır. Yapılan denemeler sonucunda, yüksek uçuculu kömürlerin karbon miktarı düşük uçuculu kömürlere göre daha düşük olmasına rağmen daha yüksek yer değiştirme oranı elde edilmiştir. Bunun nedeni, daha önce de belirtildiği gibi yüksek uçuculu kömürlerin reaksiyon hızı, düşük uçuculu kömürlere göre daha yüksek olduğundan karbon miktarının düşük olması reaksiyon hızının fazla olması ile kapatılmakta ve daha yüksek yanma verimi elde edilmektedir [10].

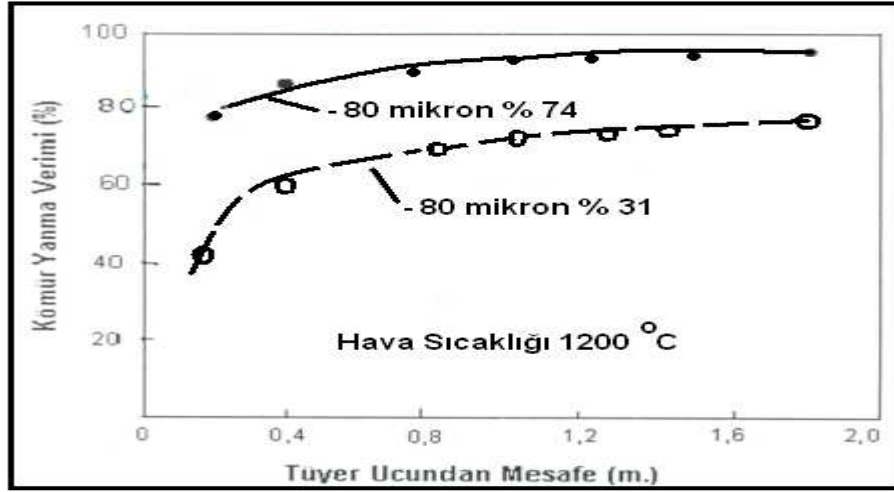
3.4.1.6. Kömür Maseral Yapısının Etkisi

Kömürün yanma verimi, maseraller ve metamorfizma derecesi ile doğru orantılıdır. Bu nedenle, yüksek fırın enjeksiyonu için kullanılan kömürlerin seçimi ve maseral yapı özellikleri çok büyük önem taşır.

Maseral yapının özellikle uçucu madde miktarı üzerine büyük etkisi vardır. Liptinit ve vitrinit, düşük inertinit madde içeren yüksek uçuculu kömürlerdir ve yanma verimleri yüksektir. Kömür maserallerinin yanma ve piroliz sırası; liptinit>vitrinit>inertinit (fusinit) şeklindedir. Aktif madde (vitrinit-liptinit) bileşeni kömür maserallerinin yanabilirlik parametresi olarak kullanılır. Vitrinitten oluşmuş charın yanabilirliği en iyi yanabilirliğe sahiptir. İnertinitlerden oluşmuş charın yanma verimi ise düşüktür [25].

3.4.1.7. Kömür Ebadının Etkisi

Kömürün raceway'e girdiğinde yanması için gerekli süre çok kısadır. Bu süre, yüksek fırın karakteristiklerine ve raceway derinliğine bağlı olarak değişen bir durum arz etmekle birlikte, ortak kanı kömürün raceway'e girdikten sonra yaklaşık 20 msn gibi bir sürede yanması gerektiğidir. Bu süre içerisinde kömürün yakılabilmesi, reaksiyonun hızının artırılmasına bağlıdır. Kömürün tane boyutunun düşürülmesi ile yanma yüzey alanı genişler, oksijenle reaksiyona girme hızı artar, daha homojen bir dağılım elde edilir ve bunlara bağlı olarak da yanma verimi artar. Bu nedenle kömür ebadının mümkün olduğu kadar düşük olması gerekir.



Şekil 3.20. Kömür tane ebadının yanma verimi üzerine etkisi [3].

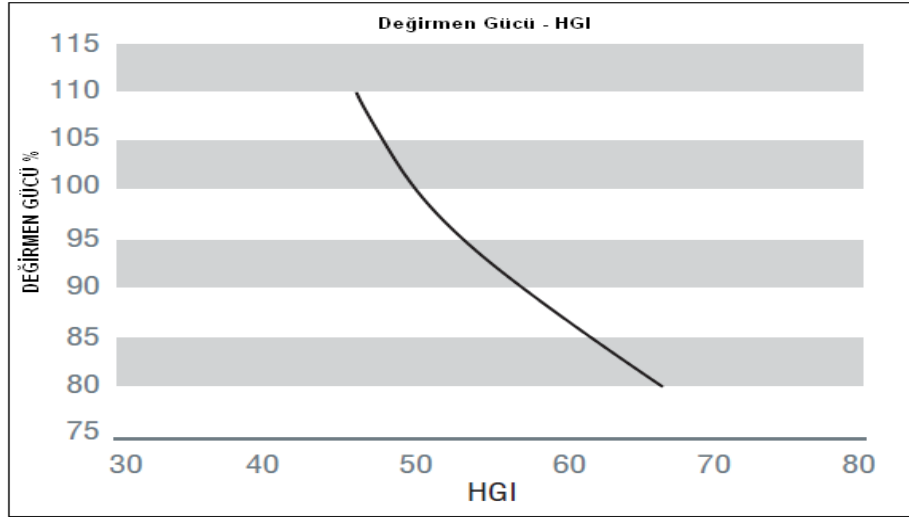
Dünya üzerinde kömür enjeksiyonu kullanan yüksek fırınların bu konu ile ilgili hem fikir olduğu nokta enjekte edilen kömürün % 80'inin 200 mesh'in (80 mikron) altında olması gerektiği şeklindedir. Şekil 3.20'de kömür boyut dağılımının yanma verimi üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu sonuca göre 80 mikron altındaki kömür oranı % 31'den % 74'e çıkarılması ile yanma veriminin de % 60'dan % 80'e çıkmaktadır [3].

Kömürün tane ebadının düşürülmesinin kömür taşınması esnasında hatlarda tıkanıklığa yol açma ve enjeksiyonun homojen yapılamaması gibi problemlerin

işletme şartlarında çözülerek mümkün olduğu kadar, minimum tane ebadında kömür enjeksiyonu yapılmalıdır [21].

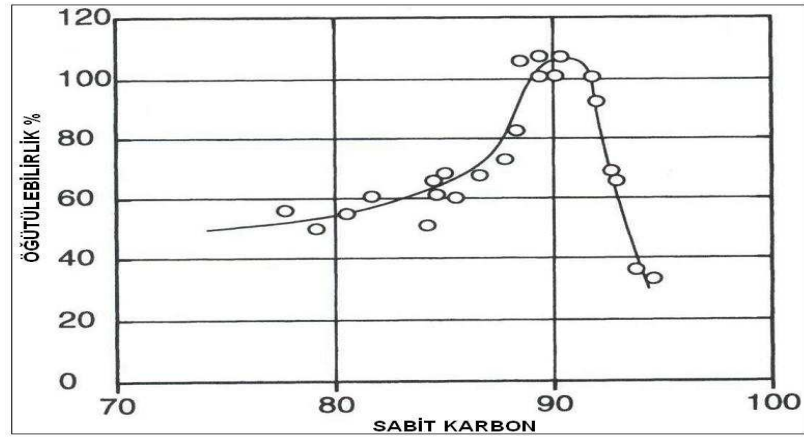
Kömürün öğütülebilirlik indeksinin kömürün öğütülmesi, hatlarda taşınması ve yanabilirliği üzerinde oldukça önemli etkisi vardır. Öğütülebilirlik indeksi (HGI), düşük olan kömürlerin sertliği yüksektir. Ayrıca, bu tür kömürlerin kullanımı sırasında hatlarda taşınma zorluğundan dolayı enjeksiyonun homojenliği, dolayısıyla yanma verimi ve proses kararlılığı bozulur [9].

Şekil 3.21’de görüldüğü gibi öğütülebilirlik indeksi (HGI) 45’nin altına düşerse değirmenin elektrik sarfiyatı artar ve öğütme kapasitesi düşer.



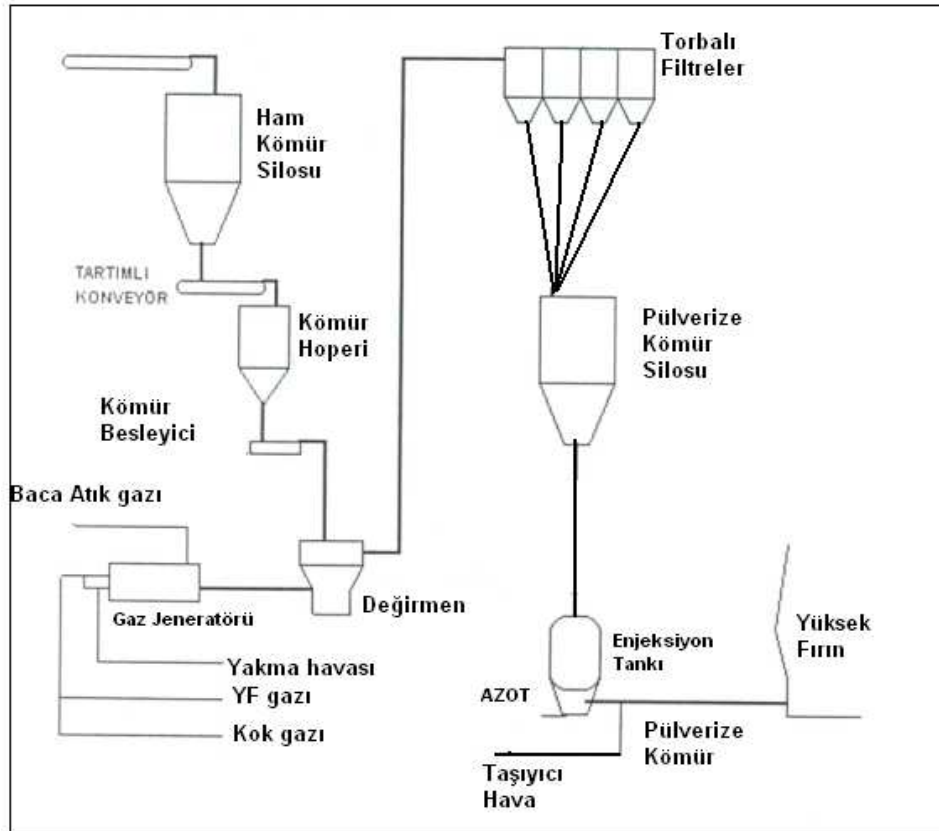
Şekil 3.21. Sabit kömür tane boyutunda değirmen gücü ile HGI arasındaki ilişki [26].

Yaygın olarak tercih edilen öğütülebilirlik indeksi (HGI) 50-60 arasında olan enjeksiyon kömürlerinin kullanımındır [21].



Şekil 3.22. Kömür sabit karbon miktarının kömür öğütülebilirliğine etkisi [21].

Kömürün öğütülebilirliğine etki eden en önemli faktör, kömürün sabit karbon miktarıdır. Sabit karbon miktarının artışı ile birlikte kömürün öğütülebilirliği (HGI) artar. Sabit karbon miktarı % 90'ı geçerse öğütülebilirlik düşer, enerji sarfiyatı artar [21].

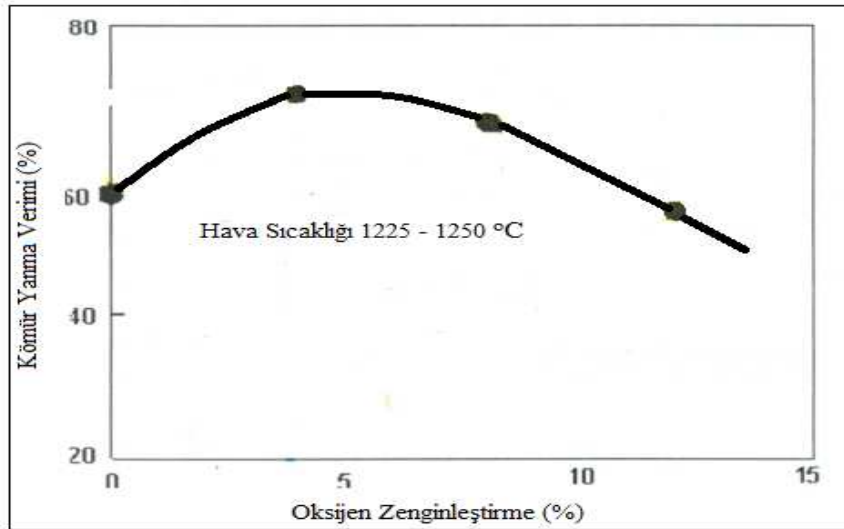


Şekil 3.23. Kömür enjeksiyon tesisi akım şeması

3.4.2. Yüksek Fırın Proses Şartlarının Kömür Yanma Verimine Etkisi

3.4.2.1. Havadaki Oksijen Oranının Etkisi

Tüyerlerden enjekte edilen kömürün ideal olarak raceway içerisinde tamamen yanması gerekir. Bu süre ise her fırının karakteristik yapısına ve proses şartlarına göre değişmekle beraber yaklaşık 20-30 msn'dir. Bir başka ifade ile kömürün verimli bir şekilde yanabilmesi için raceway'de kömür tanecikleri ile oksijen reaksiyonunun mümkün olduğu kadar hızlı gerçekleşmesi ve üflenen hava oksijen oranının yüksek olması gerekir. Bu noktadan hareketle, kömür enjeksiyonu yapılan yüksek fırınlarda oksijen zenginleştirme yapılarak, üflenen havanın oksijen oranı artırılır ve kömürün yanması için elverişli şartlar oluşturulur. Şekil 3.24'de laboratuvar test fırınında oksijen oranının kömür yanma verimi üzerine etkisi incelenmiş ve oksijen zenginleştirme oranının belirli bir değere kadar kömür yanma verimini arttırdığı görülmüştür [3].



Şekil 3.24. Oksijen zenginleştirme oranının kömür yanma verimi üzerine etkisi [3].

Kömürün reaktivitesi, koka göre daha fazla olduğundan yanma verimi daha yüksektir. Kömür, tüyerlerden verilen oksijen ile hızlı bir şekilde reaksiyona girer. Tüyer önünde yanan kok miktarı ise kömürün gazlaşmasından sonra tüyer önünde kalan oksijen miktarına bağlıdır.

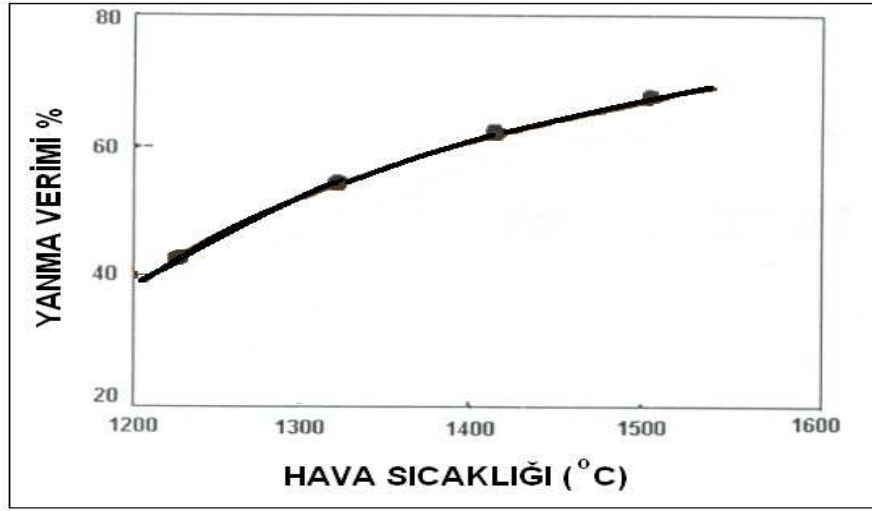
Oksijen zenginleştirme ile;

- 1- Kömürün yanma reaksiyonu hızlandırılır.
- 2- Optimum alev sıcaklığı ve ergime şartları elde edilir
- 3- Fırın içi gaz geçirgenliği ve gaz hızı kontrol altına alınır.

3.4.2.2. Hava Sıcaklığının Etkisi

Kömür raceway'e girdiğinde öncelikli olarak ortamın ısısını alır. Bir başka deyişle kömür enjeksiyon miktarının artışı ile tüyer alev sıcaklığı düşer. Alev sıcaklığının düşmesi ise kohesive bölgenin ergitme kapasitesinin düşmesi anlamına gelir. Bu nedenle, bu düşüşe izin vermemek için sıcak hava sıcaklığı artırılarak alev sıcaklığı kontrol altına alınır.

Sıcak hava sıcaklığının artırılması, kömürün yanma reaksiyonunun hızlandığı ve tüyer önündeki soğutma etkisini karşıladığı için kömürün yanma verimini artırır. Şekil 3.25'te hava sıcaklığının artırılmasının kömür yanma verimi üzerine etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi üflenen havanın sıcaklığının artırılması, kömürün yanma verimini artırmış ve kömür oranı artırılarak kok oranı azaltılmıştır. Kömür enjeksiyon kullanımındaki öncelikli amaç, kok oranını azaltmaktır. Bu nedenle, hava sıcaklığını arttırmak, kömür oranını arttırmak ve kok oranında bir değişim yapmamak zaman zaman prosesdeki dengeleri ayarlamak için kullanılan bir metot olsa bile, enjeksiyonun amacına tam olarak hizmet etmez.



Şekil 3.25. Hava sıcaklığının kömür enjeksiyon miktarı üzerine etkisi [3].

3.4.2.3. Tüyer Hızının Etkisi

Pülverize kömür, yüksek fırına enjeksiyon lansı-üfleme borusu-tüyer sistemini takip ederek ulaşır. Pülverize kömür oldukça yüksek miktar, basınç ve sıcaklıktaki sıcak hava ile birlikte tüyerlerden geçerek fırın içerisine üflenir. Fırına üflenen sıcak havanın hızı yaklaşık 210-250 m/sn civarındadır. Bu hız, pratik uygulamada daha çok tüyer çaplarının ayarlanması ile kontrol edildiği için tüyer hızı tabiri daha yaygın kullanılmaktadır. Tüyer hızı aynı zamanda enjekte edilen kömürün hızıdır. Daha öncede bahsedildiği gibi kömürün yanma veriminin artırılması açısından kömürün oksijenle homojen ve mümkün olduğu kadar geniş yüzey alanı ile reaksiyona girmesi gerekir. Tüyer hızının düşürülmesi, kömür parçacıklarının raceway'de yanma şansını artırdığı için, doğal olarak yanma verimini artırıcı etki gösterir [4].

Tüyer hızının, yüksek fırın yumuşama-ergime bölgesi olarak bilinen ve fırının en kritik bölgesi olan kohesive bölgenin şekillendirilmesi üzerinde çok büyük önemi vardır. Tüyer hızının çok yüksek olması yumuşama- ergime bölgesinin üst bölgelere kayması ve fırın iç basıncının yükselerek fırın içi gaz geçirgenliğinin düşmesine neden olur. Ayrıca, yüksek tüyer hızlarında raceway'de yanma fırsatı bulamayan kömür partikülleri deadman kokunun gözeneklerini kapatarak deadman gaz geçirgenliğini ve sıcak metal süzme kapasitesini düşürür. Tüyer hızının çok düşük

olması ise yumuşama-ergime bölgesinin fırının alt bölgelerine kaymasına ve redüksiyonun tam yapılamamasına ve deadman kok yapısının bozulmasına neden olur [4].

Bu konu ile ilgili olarak yapılan araştırma, işletme pratikleri ve dünyadaki kömür enjeksiyonlu yüksek fırınlar açısından bakıldığında, kömür enjeksiyonu yapılan durumda ideal tüyer hızının 210-220 m/sn civarında olması gerektiğidir [4].

3.4.2.4. Fırın İçi Şarj Dağılımının Etkisi

Fırın içi şarj dağılımının yüksek fırın proses şartları, pülverize kömür yanma veriminin artırılması, enjeksiyon oranının artırılarak kok oranının düşürülmesi üzerinde çok önemli etkisi vardır. Yüksek enjeksiyon oranlarında cevher/kok oranı arttığı için fırın gaz geçirgenliği zayıflar, dead-man kokunun geçirgenliği bozulur ve deadman'ın süzme kapasitesi düşer. Ayrıca, raceway balonu fırın duvarı yönünde kayarak fırın içi reaksiyonlarda harcanması gereken ısı enerjisinin bir kısmının fırın duvarında kaybolmasına neden olur [8].

Yüksek enjeksiyon oranlarında istikrarlı proses şartlarının oluşturulabilmesi için fırının merkezi gaz geçirgenliğinin iyileştirilmesi gerekir. Merkezi gaz geçirgenliğinin iyileştirilmesi ile raceway'de üretilen gazın ergime bölgesine yönlendirilmesi sağlanır ve fırın duvarında ısı kaybı önlenir. Bu amaçla uygulanan etkili yöntem, merkezi kok şarjı yapılmasının aynı zamanda dead-man kokunun yenilenmesi ve deadman kok geçirgenliğinin artırılması üzerinde de büyük faydası vardır [8].

Enjeksiyon oranının artması ile güçlenmiş olan duvar kenarı gaz akışını zayıflatmak için merkezi kok şarjının artırılması, duvar kenarı gaz akışının zayıflatılması gerekir. Merkezi gaz geçirgenliğinin artırılmasına yönelik diğer bir metot ise, duvar kenarına ince olan sinter ve küçük ebatlı kok şarjı (findık kok) yapılmasıdır [18].

Kwangyang (Japonya) yüksek fırınlarında her iki metot da etkili bir şekilde kullanılarak düşük sinter kalitesi ile çalışılan durumda bile fırın geçirgenliği kontrol

altına alınmış ve sorunsuz bir şekilde 150 kg/TSM kömür enjeksiyon oranına ulaşılmıştır. Genel olarak ifade edilecek olursa, merkezi kok şarjı ile birlikte, 90 kg/TSM'den 110 kg/TSM'ye, duvar kenarına fındık kok şarjı ile 110 kg/TSM'den 130 kg/TSM'ye, duvar kenarına ince sinter şarjı ile 130 kg/TSM'den 150 kg/TSM kömür enjeksiyon seviyesine ulaşılmıştır [18].

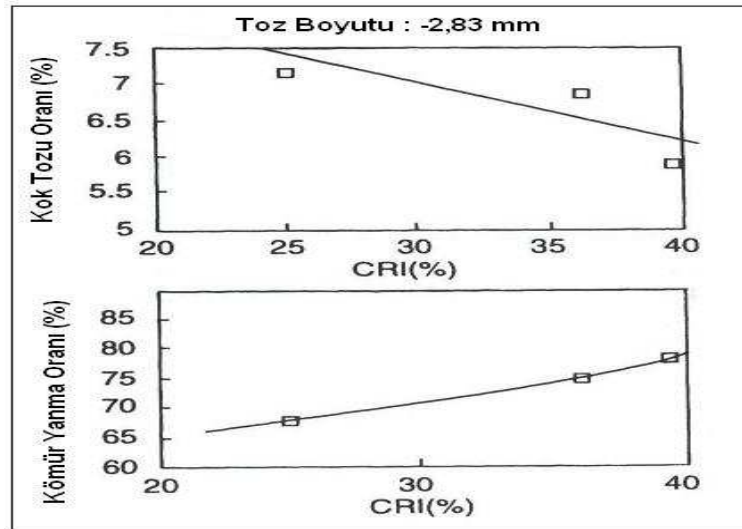
Yüksek pülverize kömür enjeksiyonunun yapıldığı fırınlarda, merkezi geçirgenliğin artırılması ve deadman kokunun bouduard reaksiyonlarına karşı korunması ve sürekli olarak yenilenmesi için fırın merkezine ilave kok şarjı yapılır [13]. Bu, aynı zamanda fırın içi gazlarının duvar kenarlarından kohesive bölgeye doğru kaydırarak, duvarda kaybolan ısı yükünü düşürür. Duvar kenarındaki kok miktarının artışı ve merkezdeki kok miktarının düşüşü ve kohesive bölgenin "S" şeklini almasına sebep olur. Böyle bir kohesive bölge şekli ise ısı kaybının artmasına, basınç kaybına, sıcak hava basıncının dalgalanarak düzensiz fırın prosesine yol açar. Uygun bir ergime bölgesi (kohesive bölge) elde etmek ve yüksek kömür enjeksiyon oranlarında bile kararlı bir fırın çalışması sağlayabilmek için iyi bir malzeme dayanımı şarttır [10].

Dolayısıyla, yüksek kömür enjeksiyon seviyelerinde kararlı bir fırın prosesi sağlayabilmek için fırın içi malzeme dağılımının kontrol altına alınması gerekmektedir.

3.4.2.5. Şarj Malzeme Kalitesinin Etkisi

Kömür enjeksiyonu kullanılan fırınlarda verimli kullanım şartlarına bağlı olarak kok girdisi düşürülür. Kok katman kalınlığının azalması ve fırın kesiti boyunca cevher/kok oranının artması ile fırın gaz geçirgenliği düşer. Kömür enjeksiyonun kullanıldığı şartlarda kok kalitesi artırılarak kokun azaltılmasından kaynaklanan dezavantajların önüne geçilebilir. Proses şartlarında ve hammadde şarj malzeme kalitesinde gerekli iyileştirmeler yapılmadan, kömür enjeksiyonu kullanımı işletme şartlarının bozulması ve fırın verimliliğinin düşmesi, yakıt oranının arttırılması yönünde etki gösterir.

Yüksek fırın şartlarında kok, yüksek basınç ve sıcaklığın etkisiyle sürekli olarak bir mekanik aşınma ve parçalanmaya maruz kalır. Kömür enjeksiyon miktarının artması ve kok miktarının azalması ile birlikte şarj edilen kokun parçalanması hızlanır, gaz geçirgenliği düşer, dead-man kok yapısı bozulur. Ayrıca, kok, yüksek fırın içerisinde termal ve mekanik şokları absorblayan bir yapıya sahip olduğundan, kok miktarının azalması ile birlikte düzensiz şarj hareketlerinde artış gözlenir. Tüm bu etkenler, kömür enjeksiyonunu sınırlayan ve yanma verimini düşüren etkenlerdendir [4].



Şekil 3.26. Kok reaktivitesinin kömür yanma oranına ve kok tozlaşması üzerine etkisi [10].

Bu nedenle, kömür enjeksiyonu yapılan bir yüksek fırında, kokun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin enjeksiyonsuz şartlara göre daha iyi olması gerekir. Özellikle, kok stabilitesinin 60'dan büyük, kok reaktivitesinin (CRI: Kok Reaktivite İndeksi) 35'ten küçük olması ve ortalama tane boyutunun ise 50 mm'nin üzerinde olması gerekir [6].

Kömür enjeksiyon oranının artmasıyla birlikte fırın içi kok boyutunda düşme görülmekte ve fırının alt bölgelerinde geçirgenlik düşmektedir. Şarj edilen kokun mukavemetinin artmasıyla birlikte kok boyutunda artış sağlanır ve kok tozlaşması azalır. Bu durum, fırın geçirgenliğini artırıcı yönde etki gösterir [7].

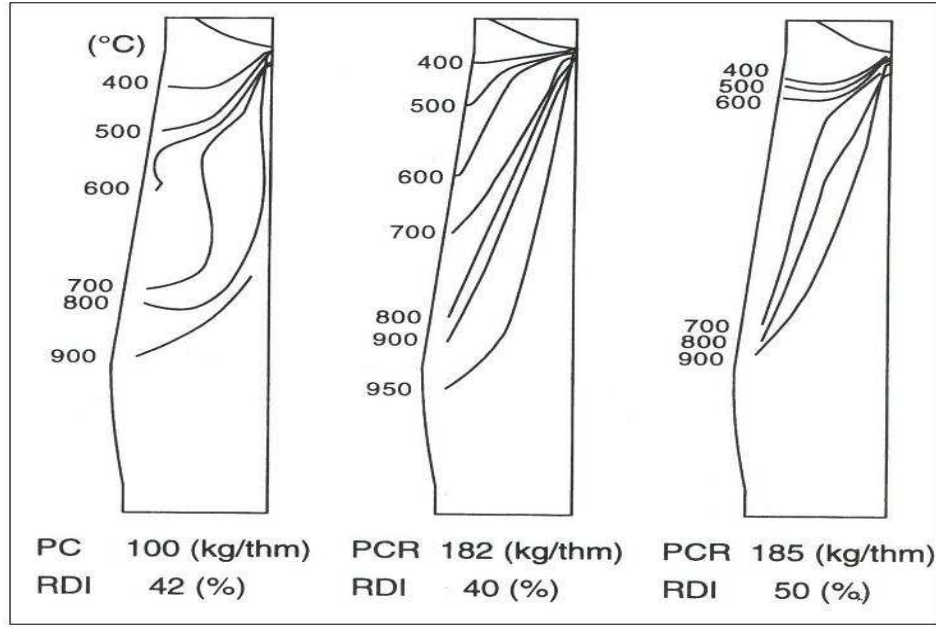
Kömür enjeksiyon oranındaki artışla birlikte cevher/kok oranındaki artışın, fırın içi termal ısı kapasitesine, fırın gaz geçirgenliğine, girdi sıcaklık profiline, redüksiyon dağılımına büyük etkileri vardır. Bu etkiler, fırın içi şarj dağılımının düzenlenmesiyle kontrol altına alınabilir. Fakat, yüksek kömür enjeksiyon oranlarında şarj dağılımından daha önemli olan husus, şarjdaki demirli malzeme kalitesidir [10].

Yüksek enjeksiyon oranlarında fırın geçirgenliği üzerinde en önemli etkiye sahip hammaddelerden biri sinterdir. Sinter'in tane boyutunda homojenlik sağlanması pelet'e göre daha zordur ve yapı olarak parçalanmaya daha müsaittir. Özellikle, yüksek sinter oranıyla çalışıldığı durumlarda fırın geçirgenliğini belirleyen en önemli etkileyen etmenlerden biri sinter kalitesidir [10].

Merrillville (ABD) yüksek fırınlarında +6,3 mm tane boyutu için sinter oranı % 70'ten % 75'e çıkarılarak, kok mukavemeti (M40) ise % 78'lerden % 88'lere çıkarılarak yüksek enjeksiyon ve sinter oranlarında düzgün bir fırın çalışması sağlanmıştır [6].

Sinter kalitesini belirleyen en önemli kriterlerden, indirgenme kırılma indeksi (RDI), indirgenebilirlik indeksi (RI) ve yumuşama-ergime özelliklerini özellikle yüksek kömür enjeksiyon oranlarında büyük önemi vardır. Şekil 3.27'de sinter RDI oranı artışının fırın içi termal ısı dağılımı üzerine etkisi görülmektedir. RDI oranı artışı ile birlikte duvar kenarı gaz akışının da artmasının etkisiyle düşük sıcaklık termal zonu fırının üst bölgelerine doğru kaymaktadır [10].

Sinter indirgenme kırılma indeksi (RDI), sinter bazitesinin (CaO/SiO_2) ve % FeO miktarının artışı ile birlikte düşer. Sinter CaO/SiO_2 değerinin % 1,8'den % 2,2'ye artırıldığı durumda indirgenme kırılma indeksinin (RDI) % 45'ten % 27'ye düştüğü, sinter % FeO miktarın % 6'dan % 10'a çıktığı durumda ise % 45'ten % 26'ya düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca, sinter % Al_2O_3 ve % MgO değerinin artması ise sinter kırılma indeksi artırır. Sinter indirgenebilirliği, sinter CaO/SiO_2 oranının artışı ve % FeO miktarının azalması ile artar [27].



Şekil 3.27. Sinter kırılmalık indeksi ve enjeksiyon oranına göre fırın içi termal ısı değişimi [10].

Özellikle, sinter indirgenme kırılmalığının fırın gaz geçirgenliği üzerine oldukça belirgin etkisi vardır. Yüksek kömür enjeksiyon oranlarında çalışırken indirgenme düşük tutulmalıdır. Bu amaçla, Japon ve Avrupa yüksek fırınlarında sinter kırılmalık indeksini (RDI), % 40'ın altında tutmak, sinter indirgenebilirlik indeksini (RI) % 65'in üstünde tutmak yönünde bir eğilim vardır [21].

3.4.2.6. Kömüre Yapılacak İlavelerin Etkisi

Kömüre, yanma verimini artıracak ilaveler karıştırmak, yüksek enjeksiyon oranlarına ulaşabilmek için kullanılacak yöntemlerden biridir. Fakat bu yöntemin en son olarak ele alınması ve diğer tüm metotlar denendikten sonra düşünülmesi daha mantıklıdır. Çünkü yapılacak en iyi ilave bile kömür enjeksiyon oranını 2-3 kg/TSM civarlarında artırabilir. Buna ilave olarak curuf kompozisyonu ve proses şartlarına yan etkileri de vardır.

Bu konu ile ilgili olarak Hoogovens (Hollanda) demir-çelik fabrikalarında yapılan laboratuvar testleri çok olumlu sonuçlar vermiş, fakat gerçek prosese uygulandığında çok verimli olmadığı sonucuna varılmıştır. Schwelgern (Almanya) yüksek

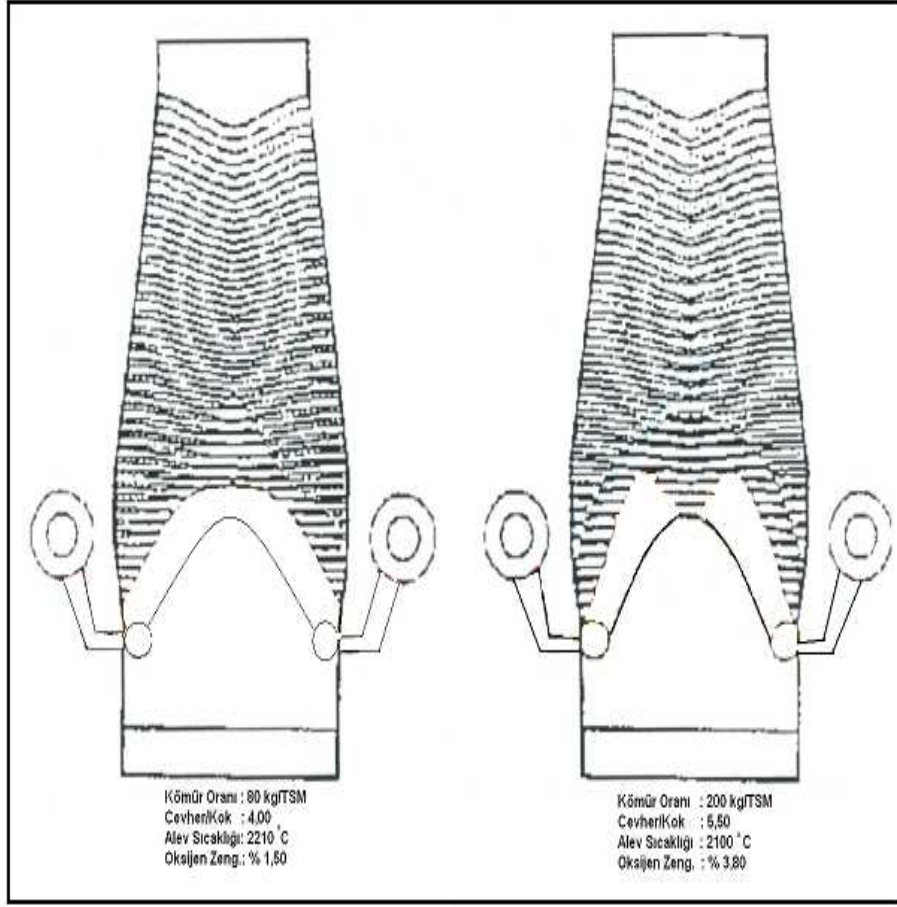
fırınlarında kömüre % 2 oranında CaCO_3 karıştırılarak tüm tüyerlerde kömür enjeksiyonu yapılmış ve kömür enjeksiyon yanma verimini bir miktar arttığı ve üretilen baca tozu miktarının azaldığı belirtilmiştir. CaCO_3 ilavesindeki amaç, ortamda var olan oksijenin reaksiyonu sonucu ilave CO gazı üretmek, dolayısıyla redükleyici gaz miktarını artırmaktır. Fakat, bu reaksiyon sonucunda aynı zamanda CaO'de üretilir. Bu ise doğrudan curuf kompozisyonunu etkiler, curuf bazitesini, curuf ergime sıcaklığını, curuf viskozitesini artırır ve fırın haznesinden curufun alınamaması gibi sorunlar ortaya çıkartabilir [4].

Kömüre KMnO_4 karıştırılarak da kömürü yanma verimini artırılacağı ortaya konulmuştur. Shen'in yaptığı araştırmaya göre kömüre KMnO_4 ilavesi ile yanma zamanı kısaltılabilir. Fakat bu tür ilavelerin curuf kompozisyonu ve diğer fırın parametreleri üzerine olan etkiler de düşünüldüğünde en son çare olarak ele alınmasına fayda vardır [10].

3.4.2.7. Enjeksiyon Miktarının Etkisi

Enjeksiyon miktarının artışı ile kısıtlı bir süre içerisinde kömürün oksijenle reaksiyona girip yanabilme olasılığı azalır ve yanma veriminde düşüş gözlenir. Yüksek enjeksiyon oranlarında raceway'de yanma fırsatı bulamayan kömürün bir kısmı fırın içerisinde bouduard ve diğer reaksiyonlarla tüketilmekte, bir kısmı ise yüksek fırın gazları ile birlikte taşınarak fırını terk etmektedir. Ayrıca, fırın içerisinde yakılamayan kömür fırın gaz geçirgenliği, deadman geçirgenliğini bozar, yakıt oranında artışa ve fırın prosesinin bozulmasına neden olur [18].

Sonuç olarak, kömürün raceway'deki yanma verimi artırıldıktan ve fırın geçirgenliğini artırıcı tedbirler alındıktan sonra kömür enjeksiyonu kademeli olarak artırılmalı ve limit değeri üzerine çıkılmamalıdır. Kömür enjeksiyonundaki limit değer, proses şartlarının iyileştirilmesi, gerekli tedbirlerin alınmasına ve fırın karakteristik özelliklerine bağlı olarak değişim gösterilebilir. En iyi proses şartları sağlansa bile kömür enjeksiyonunu belirli bir değerin üzerinde artırılması fırın çalışmasını bozar, yakıt oranının artmasına ve verimliliğin düşmesine neden olur.



Şekil 3.28. Kömür enjeksiyon miktarı artışının yumuşama-erime bölgesi üzerine etkisi [10].

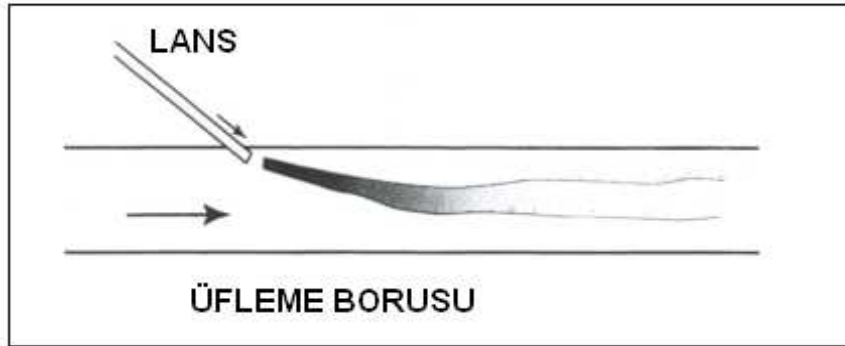
Yüksek fırın enjeksiyonu ile çalışan şartlarda kömür yanma verimi düşer ve proses parametreleri ayarlanmazsa yumuşama-erime bölgesinin şekli bozulur. Şekil 3.28’de görüldüğü gibi 200 kg/TSM enjeksiyon seviyesinde kömürü verimli bir şekilde yakabilmek zordur. Fırın içi geçirgenliğin düşmesi ve raceway balonunu duvar kenarına kaymasının sonucu olarak W şeklinde kohesive bölge yapısı oluşur. İdeal olan kohesive bölge yapısı ters “V” şeklindeki yapıdır [10].

3.4.3. Enjeksiyon Lans Sisteminin Etkisi

Bir enjeksiyon lans tipinde aranan en önemli özellik, enjekte edilen kömürü en geniş alana dağıtabilmesi, yanma yüzey alanını genişletmesidir. Kömürün saçılma yüzey alanı ne kadar geniş olursa, kömürün yanabilirliği de o kadar yüksek olur. Enjeksiyon lans sisteminde yapılacak olan çok küçük bir iyileştirme ile yanma verimi

oldukça büyük oranda arttırılabilir. Bu bağlamda, kömürün yanma verimini arttırmak için yapılacak en önemli değişikliklerden biri enjeksiyon lans sisteminin iyileştirilmesidir.

Pülverize kömür, enjeksiyon tesisinde basınçlı hava ile transfer edilerek enjeksiyon lansı vasıtasıyla üfleme borusu içerisine gönderilir. Üfleme borusu içerisindeki 200-250 m/sn hıza sahip sıcak hava (1100 °C – 1200 °C) ile birlikte tüyer içerisinden geçerek yüksek fırına enjekte edilir [26].



Şekil 3.29. Geleneksel lans tipi enjeksiyon sistemi [26].

Enjeksiyon lansı ile tüyer burnu arasındaki mesafeyi arttırmak da kömür yanma verimini arttıran bir metottur. Buradaki temel amaç ise, kömürün ısıtılmasının daha önce başlatılarak yanma prosesine zemin hazırlamak ve kömürün raceway'deki yanma süresini kısaltmaktır.

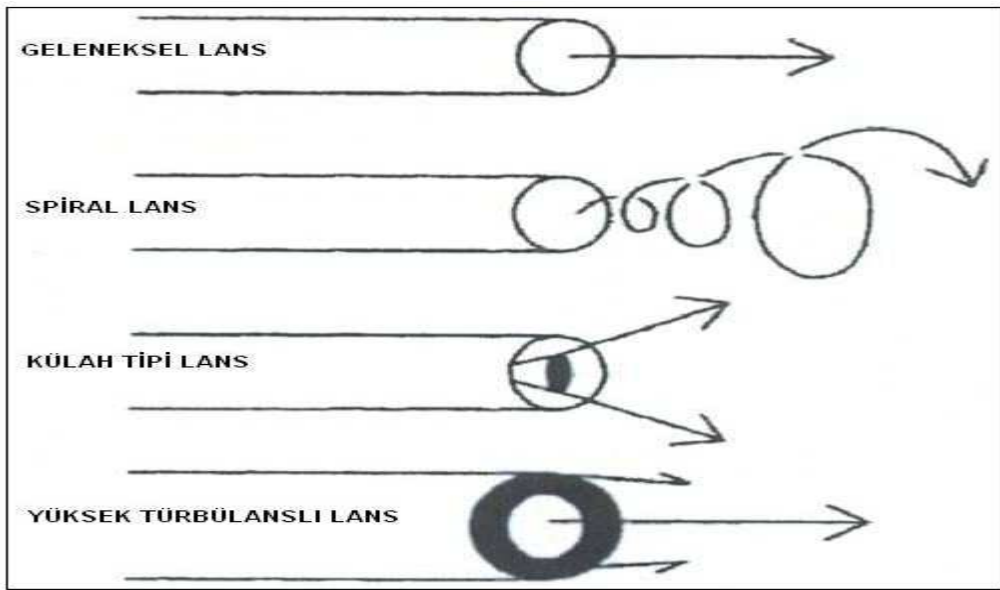
Kömürün verimli bir şekilde yanabilmesi için çok kısa bir süre içerisinde raceway bölgesinde tamamen gazlaşması gerekir. Aksi takdirde, fırın prosesinde olumsuz etkiler meydana getirir. Pülverize kömürün yanma süresini azaltılması ve verimli yanmanın sağlanabilmesi için çeşitli enjeksiyon lans dizaynları geliştirilmiştir [10].

3.4.3.1. Lans Geometrisinin Etkisi

Enjeksiyon lansına gelen pülverize kömür tanecikleri çok yüksek bir momentuma sahiptir. Bu nedenle yönlerini değiştirmek ve maksimum saçılma sağlamak çok kolay

değildir. Lanslarda yapılacak geometri değişiklikleri ile kömürün saçılma alanı genişletilebilir.

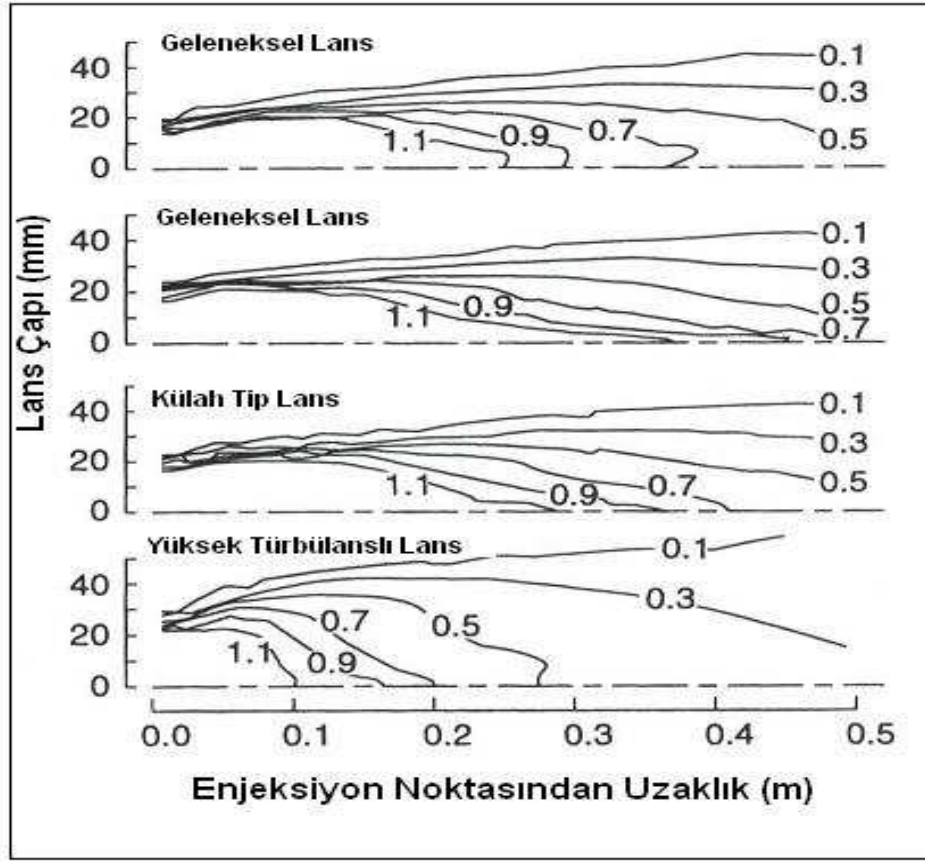
Takeda, Şekil 3.30'da görülen 4 farklı tür geometrik enjeksiyon lansının, kömürün maksimum alana saçılması ve yanma verimi üzerine etkilerini incelemiştir. Bu sonuçlara göre, maksimum alana saçılma, yüksek türbülanslı lans tipinde elde edilmiştir. Çizelge 3.4'te matematiksel modelleme yapılarak, lans geometrisinin kömürün yanma verimini üzerinde olan etkisi görülmektedir [28].



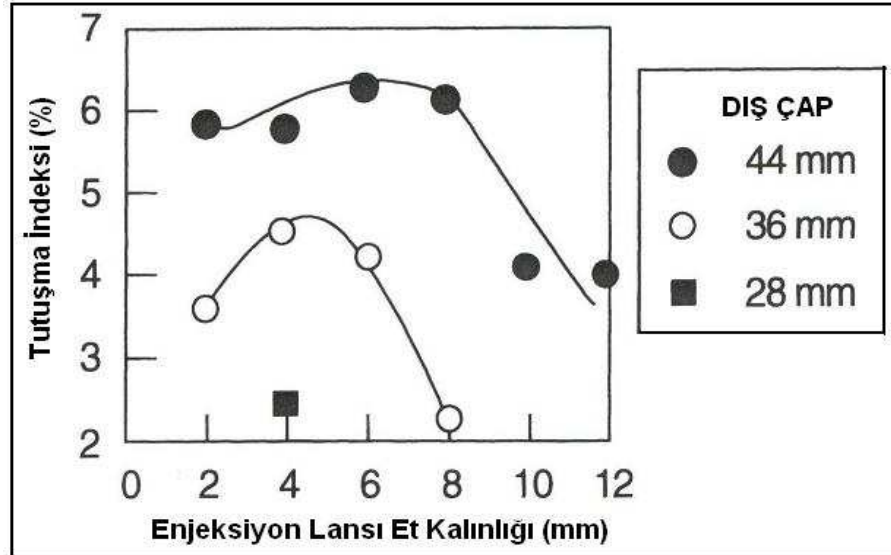
Şekil 3.30. Geometrik lans tipleri [26].

Çizelge 3.3. Lans geometrisinin pülverize kömür yanma verimi üzerine etkisi [28].

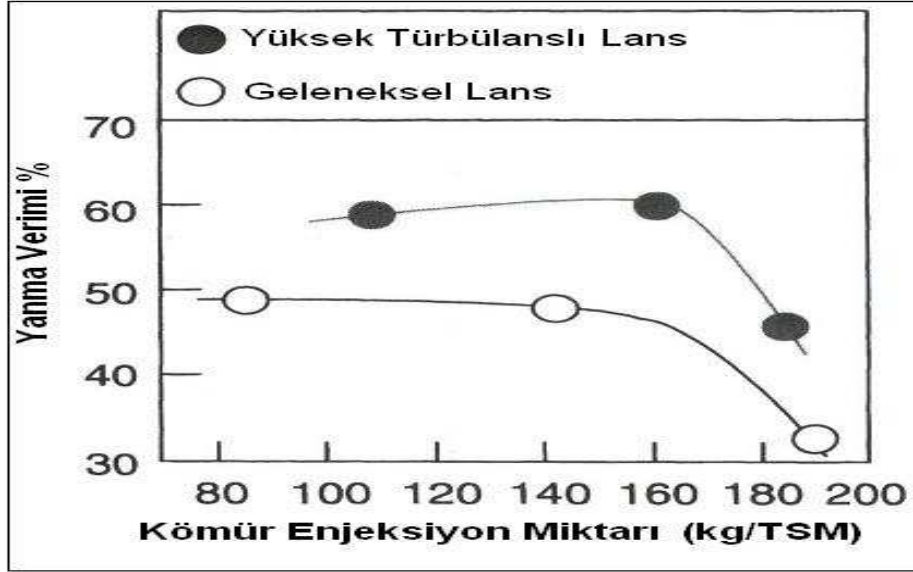
Lans Tipi	Yanma Verimi (%)
Geleneksel lans	86,7
Spiral tip lans	87,2
Külâh tip lans	87,1
Yüksek Türbülanslı Lans	90,5



Şekil 3.31. Lans geometrisinin pülverize kömürün saçılması üzerine etkisi [28].



Şekil 3.32. Enjeksiyon lans et kalınlığının kömür tutuşabilirliğine etkisi [10].



Şekil 3.33. Yüksek türbülanslı lansın kömür yanma verimine etkisi [10].

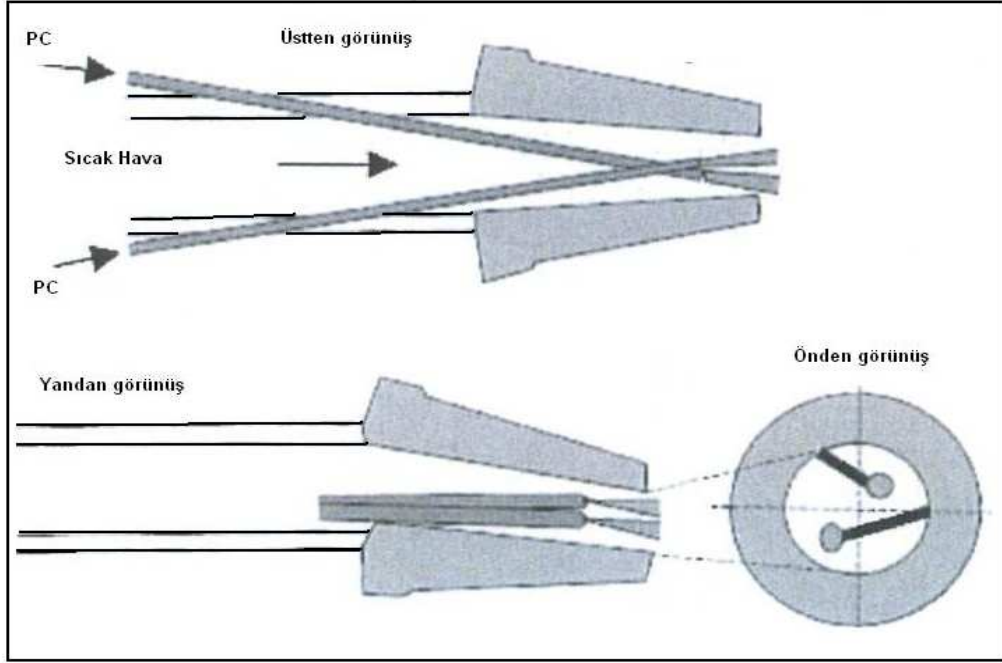
Takeda, yapılan araştırmalar sonucunda, lans çapı sabit tutularak lans et kalınlığının artırılmasının partiküllerin tutuşma oranını, dolayısıyla yanma verimini arttırdığını ortaya koymuştur. Fakat, lans et kalınlığı belirli bir değerden sonra enjeksiyon hızını arttırıp kömürün saçılma oranı azaltılarak yanma verimini düşürür [28].

Sonuç olarak, lans geometrisini değiştirerek kömürün saçılma alanı genişletilir ve yanma verimi artırılır. En yüksek yanma verimi, yüksek türbülanslı ve et kalınlığı yüksek enjeksiyon lansları kullanılarak elde edilir. Yüksek türbülanslı lans kullanıldığı durumda yanma verimi geleneksel lans kullanılan duruma göre % 10 artar. Pülverize kömürün saçılma oranı arttırılırken, kömür tozlarının tüyere çarpmamasına dikkat edilmesi gerekir. Aksi takdirde tüyerlerde aşınma problemi görülür [10].

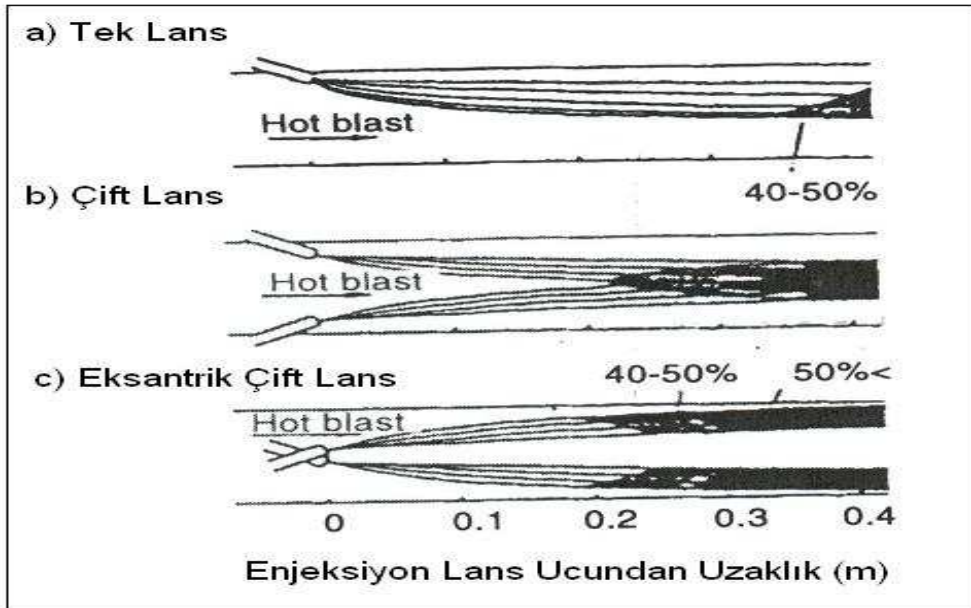
3.4.3.2. Çift Lans Sisteminin Etkisi

Çift lans ile kömürün saçılma oranı arttırılarak kömür yanma verimi arttırılır. Şekil 3.35'de 3 farklı lans sistemi matematiksel modelleme yoluyla kömür yanma verimleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bu sonuçlara göre, eksantrik çift lans ile en iyi yanma sağlanır. NKK (Japonya) yüksek fırınlarında eksantrik çift lans ile yapılan enjeksiyon ile tek lans ile yapılan enjeksiyona göre % 25 daha fazla yanma verimi

elde edildiği belirtilmiştir. Ocak 1994'te NKK Fukuyama 4 no'lu yüksek fırınında, eksantrik çift lans sistemi kullanılarak 218 kg/TSM enjeksiyon seviyesi yakalanarak rekor kırılmıştır [21].

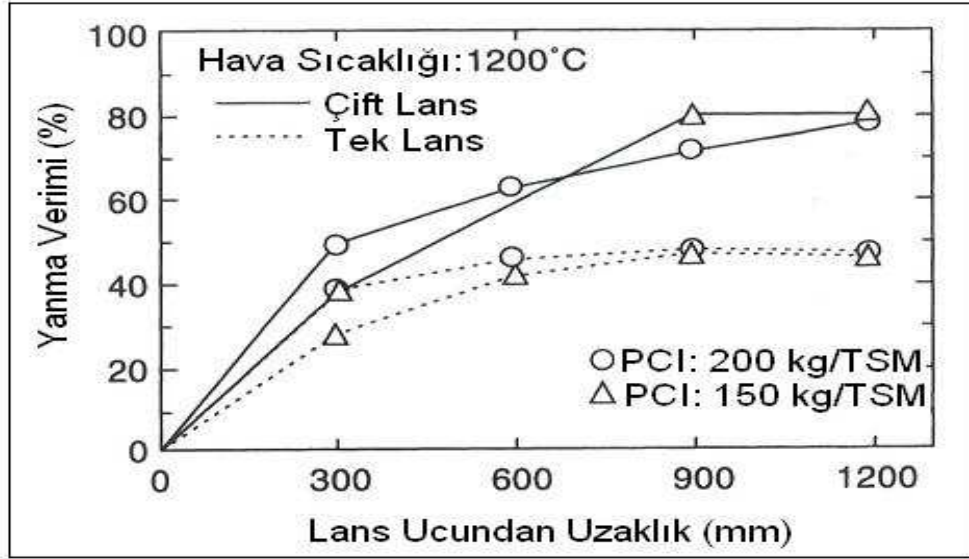


Şekil 3.34. Eksantrik çift lans sistemi [26].



Şekil 3.35. Enjeksiyon lans tipine göre yanma yüzey alanı değişimi [26].

Şekil 3.35'te görüldüğü gibi, eksantrik çift lans sistemi ile maksimum kömür yanma yüzey alanı elde edilmektedir. Şekil 3.36'da ise Fukuyama (Japonya) 4 No'lu yüksek fırınında 230 kg/TSM enjeksiyon seviyesinde tek lans sistemi kullanılarak yapılan enjeksiyonda kömür yanma verimi % 58 iken, çift lans sistemine geçildiğinde yanma veriminin % 74'ü yükseldiği görülmektedir [21].



Şekil 3.36. Lans tipine göre yanma verimi değişimi [10].

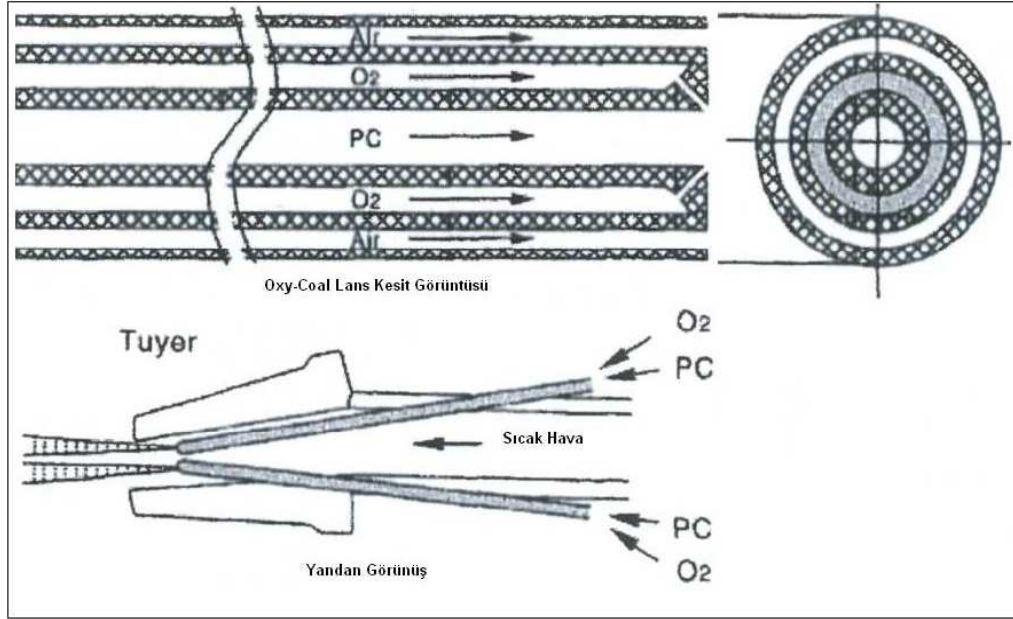
Çift lanstan yapılan enjeksiyon ile kömür parçacıklarının dağılım yüzeyi daha fazla genişletilir. Yanma yüzeyinin genişlemesi ise reaksiyon hızını artıran önemli bir etkendir [10].

3.4.3.3. Oxy-Coal Lans Sisteminin Etkisi

Bu sistemde zenginleştirme amaçlı olarak verilen soğuk oksijen doğrudan lanstan kömürle birlikte verilmekte ve yanma veriminin artırılması hedeflenmektedir. SSAB (İsveç) yüksek fırınlarında spiral tip oxy-coal lanslar verimli bir şekilde kullanılmaktadır [26].

Kullanılan lansların iç çapı 9,8 mm, dış çapı 13,8 mm'dir. Oxy-coal lansın dış çapı ise 27,6 mm'dir. Şekil 3.37'de oxy-coal lansın kesit şekli görülmektedir [26].

Thyssen (Almanya) oxy-coal lans kullanımı ile ilgili olarak, soğuk oksijenin gaz sıcaklığı ve gaz kompozisyonu üzerine etkileri üzerine yoğun araştırmalar yapılmıştır. Araştırmalar sonucunda gaz kompozisyonları, sıcaklık dağılımını izlemiş ve enjeksiyon lansından verilen saf oksijenin kömürün yanma verimini arttırdığını net olarak ortaya koymuştur [18].



Şekil 3.37. NKK'da (Japonya) kullanılan oxy-coal lansın kesit resmi [26].

	Oksijen (m ³ /saat)	Kömür Oranı (kg/TSM)
	7120	86
	4800	97
	10000	130
	12000	132

(Oxy-Coal Lans Kullanımı)

Bosh Kok Tozları Raceway Kok Tozları Kuş Boynu Kok Tozları Dead-man Kok Tozları

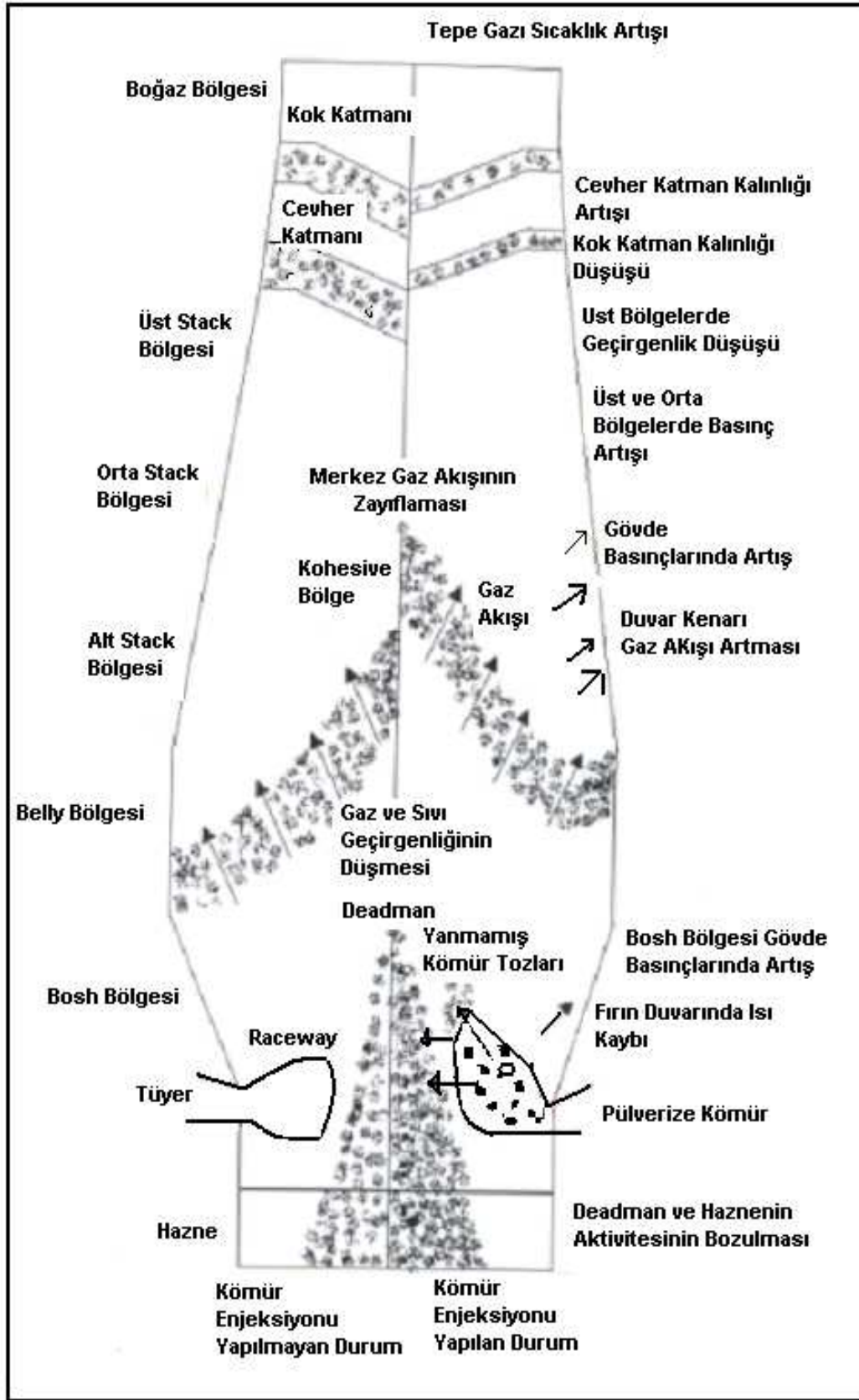
Şekil 3.38. Oxy-coal enjeksiyon lansı kullanımının deadman çevresindeki kok tozlarını azaltması üzerindeki etkisi [26].

Kwangyang (Japonya) yüksek fırınlarında da oxy-coal lansı kömür yanma verimini artırılması ve deadman çevresinde bulunan kok tozlarının azaltılması üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Şekil 3.38’de POSCO (G.Kore) yüksek fırınlarında oxy-coal lansı verimli bir şekilde kullanılması ile raceway çevresindeki tozların özellikle kuş boynu tozlarının azaldığı görülmektedir.

Sonuç olarak; kömür yanma enjeksiyon yanma verimini arttırmak için gelişmiş enjeksiyon lansları kullanımı bir zorunluluk haline gelmiştir. Özellikle son zamanlarda, kömür enjeksiyon yanma mekanizması daha da aydınlatılmış ve yeni enjeksiyon lans dizaynları geliştirilmeye başlanmıştır. Bu alanda özellikle çok yakın bir gelecekte daha da önemli gelişmeler beklenmektedir.

3.5. PÜLVERİZE KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN YÜKSEK FIRIN PROSESİNE ETKİSİ

Şekil 3.39’da yüksek kömür enjeksiyon oranını yüksek fırın prosesine olumsuz etkileri görülmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi kömür enjeksiyonu yapılan şartlarda cevher/kok oranında artış, tüyer alev sıcaklığında düşüş, fırın duvarlarında ısı kaybı, merkezi gaz geçirgenliğinde zayıflama, deadman kok aktivitesinin bozulması gibi problemler yüksek fırın proses şartlarını ciddi oranda etkiler. Özellikle yüksek kömür enjeksiyon oranlarında tüyer seviyesi ve fırın içi basınç farkında (ΔP) artış ve fırın duvar kenarında ısı kaybında artış, yanma şartlarının bozulması ve kömür yanma veriminin düşmesi gibi belirgin durumlar gözlenir. Bu bölümde, kömür enjeksiyonunun yüksek fırın prosesi üzerine olan olumlu, olumsuz etkileri teorik olarak incelenecek ve olumsuz etkilerini nasıl minimize edileceği anlatılacaktır.



Şekil 3.39. Kömür enjeksiyonu yapılırken karşılaşılabilecek problemler [26].

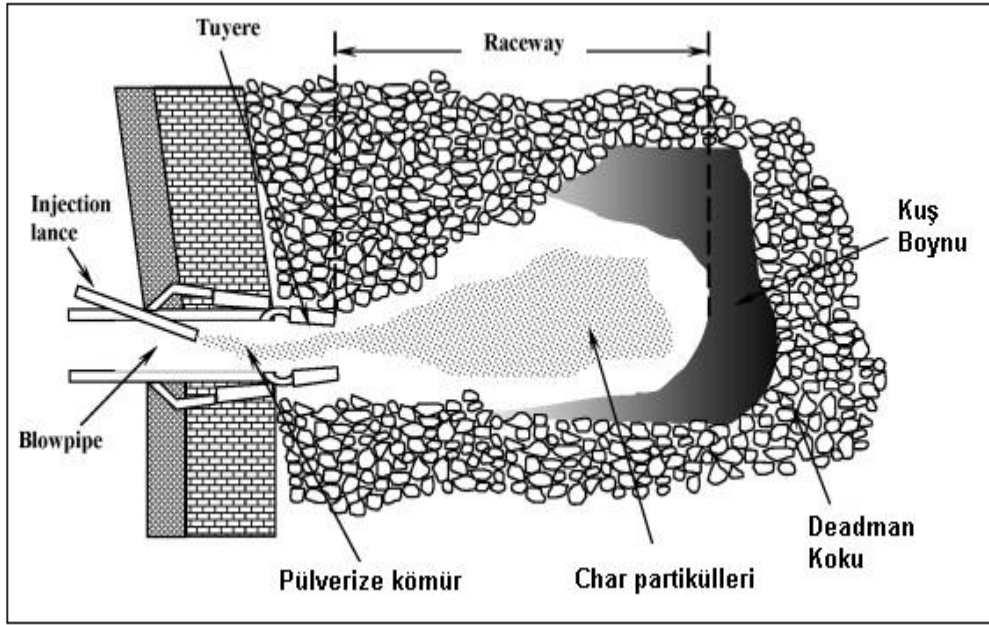
3.5.1. Raceway Koşulları Üzerine Etkisi

Raceway bölgesi, yüksek fırında bir gaz jeneratörü gibi davranır. Raceway, üretilen gazları üst bölgelere doğru yönlendirir. Raceway koşullarının elverişsiz olması, hazne ve deadman geçirgenliğini düşürür, fırın duvarında ısı kaybını artırır. Bu nedenle, yüksek enjeksiyon oranlarında ve yüksek fırın verimliliği ile çalışılan durumlarda raceway koşullarının çok büyük etkisi vardır [1].

Kömür enjeksiyon oranının artışı ile beraber oksijen zenginleştirme de artırılırsa raceway derinliği artar. Enjeksiyon oranının artışı ile raceway'deki sıcaklık dağılımı ve kömür yanma veriminin de kontrol altına alınması gerekir. Enjeksiyon oranı artışı ile birlikte raceway'deki CO₂ konsantrasyonu da tüyer ucuna doğru artış göstermektedir. Raceway'deki kütle ısı transfer hesabına göre maksimum ısının bulunduğu yerde, maksimum CO₂ konsantrasyonu bulunmaktadır. Bu sonuca göre, enjeksiyon oranı artışı ile beraber maksimum sıcaklık bölgesinin tüyer ucuna yaklaştığı söylenebilir [8].

Fırın bosh bölgesinden inen koklar hava kesilir kesilmez raceway boşluğuna düşer ve üfleme sırasında raceway balonunun üst bölgesinde bulunur. Bu koklara “bosh kok'u” denir. Raceway bölgesini fırın merkezi yönünde çevreleyen küçük boyutlu ve yuvarlaklaşmış koklara ise “raceway kok'u” denir. Raceway koku sürekli olarak sıcak havadaki yoğun termal ve mekanik aşınmaya maruz kalır. Raceway kokunun hemen dışında ise “kuş boynu” olarak tabir edilen toz partikül oranının % 50'lere çıktığı kompakt bir yapı takip eder. Kuş boynu, daha aktif olan raceway ve daha ilerisinde bulunan “deadman” ile karşılaştırıldığında daha düzgün köşegenel bir kok yapısına sahiptir. Kuş boynu raceway ve deadman arasında bir kabuk gibidir [11].

Şekil 3.40'de genel olarak bir tüyer seviyesi kok yapısı görülmektedir.



Şekil 3.40. Raceway çevresi kok yapısı [11].

Yukarıdaki bilgiler ışığında, Hogoovens (Hollanda) yüksek fırın duruşlarında, tüyer seviyesinden numune alma probu ileriye doğru uzatılıp 4 farklı kok yapısından numuneler alınmıştır. Alınan numunelerde deadman kokuna rastlanmamıştır. Bu ise kuş boynu kabuk yapısının çok genişlemiş olduğunu göstermiştir. Değişik enjeksiyon seviyelerinde alınan numunelerde, tüyer önü kok yapısının boyut değişimi takip edilmiştir. Bu sonuçlara göre, enjeksiyon miktarının artırılması ile raceway koku içerisindeki tozlar % 10 seviyelerinden % 20 seviyelerine çıkarken kuş boynu kok yapısındaki tozların ise % 50 seviyelerinden % 60 seviyelerine çıktığı görülmüştür. Ayrıca, değişik enjeksiyon oranlarında bosh, raceway, kuş boynu kok yapılarının ortalama kok tane boyutu incelenmiş ve raceway koklarının daha düşük kok boyutuna sahip olduğu görülmüş ve enjeksiyon oranının artışı ile kok tane boyutunun düştüğü görülmüştür [11].

Bu sonuçlara göre, enjeksiyon miktarı artırıldığında raceway’de yanamayan kömür partikülleri kuş boynu yapısına geçerek deadman’in önünü kapatır ve deadman geçirgenliğini düşürür.

Yüksek kömür enjeksiyon oranında çalışılırken raceway çevresinde meydana gelen bu değişimler fırının alt bölgelerindeki ısı kaybını, fırın basıncını ve basınçtaki dalgalanmaları artırmakta ve fırın gaz geçirgenliğini düşürmektedir. Enjeksiyon noktası raceway'e yaklaştırıldığında CO₂ konsantrasyonu raceway derinliğine doğru kayar. Enjeksiyon noktası ile raceway arasındaki mesafenin azaltılması partiküllerin raceway'de kalma süresini azaltır, yanabilme şansını ve dolayısıyla yanma verimini düşürür [10].

Oksijen zenginleştirme, kömürün yanma verimini arttıran en önemli faktördür. Isı kaybını minimize ederek, sıcak hava sıcaklığını arttırarak, sıcak hava basıncını arttırarak, basınç dalgalanmalarını kontrol altına alarak, yeterli yanma verimliliğinin sağlanması yüksek pülverize kömür enjeksiyonunda kararlı fırın çalışmasını en önemli anahtardır. Yüksek kömür enjeksiyonunda raceway derinliğini muhafaza etmek için üflenen sıcak havanın hızı, 210 m/sn civarında olmalıdır [29].

Kömür enjeksiyon miktarının arttırılması sırasında özellikle yüksek fırın verimliliği ile çalışırken bosh gaz hacminde büyük artış olur. Bosh gaz hacminin artması, fırın duvarında ısı yükü artışı, fırın içi kayma hareketleri, sıcak metal sıcaklıklarının düşmesi gibi problemleri beraberinde getirir. Eğer buna birde curuf hacmini ve curufta % Al₂O₃ miktarının yüksek olması gibi etkenlerde eklenirse, gerekli tedbirler alınmadığı takdirde proseste çok ciddi sorunlarla karşı karşıya kalınabilir. Bu sorunlarda başa çıkabilmek için öncelikle; oksijen zenginleştirme limit seviyeye kadar arttırılmalı ve tepe basıncı düşürülmelidir, hava rutubeti kesinlikle minimize edilmelidir [18].

3.5.2. Alev Sıcaklığı Üzerine Etkisi

Enjeksiyon kömürünün yanması sonucu açığa çıkan yanma ürünleri CO, CO₂ ve H₂O' dur. Öte yandan açığa çıkan ısının bir kısmı enjekte edilen kömürün raceway sıcaklığına çıkarılması, sıcak kok ile yanma ürünleri arasında gerçekleşen endotermik reaksiyonların etkisi ile harcanır. Kömür ile birlikte fırına giren yüksek orandaki hidrojen, su ve karbon arasında gerçekleşen endotermik reaksiyonların artmasına neden olur. Kömür fırına enjekte edildiğinde raceway sıcaklığı sadece kok

ile çalışılan duruma göre daha düşük olur. Fakat hava sıcaklığını arttırarak, hava rutubetini düşürerek ve havadaki oksijen oranını arttırarak bu düşüş önlenir. Bununla birlikte kömür miktar ve özellikleri kontrol edilerek de kömürün alev sıcaklığını düşürme etkisi ve fırın termal rejimine olan olumsuz etkisi engellenir. Kömürün raceway'deki soğutma etkisi ne kadar düşük olursa o kadar fazla kömür enjeksiyonu yapabilme imkanı vardır [9].

Kararlı bir yüksek fırın prosesinin ve sıcak metal kalitesinin sağlanması için alev sıcaklığını mümkün olduğu kadar sabit olması, dalgalanmaması ve belirli bir optimum seviyede olması gerekir. Alev sıcaklığının değişken olması yumuşama-ergime bölgesinin yapısının, fırın çalışmasının ve sıcak metal kalitesinin bozulmasına neden olur. Tüyer alev sıcaklığı, kömürün yanma kontrolünden ziyade, fırın kararlılığı sağlayan bir regülatör görevi görür [6].

3.5.3. Fırın Geçirgenliği Üzerine Etkisi

Kömür enjeksiyon seviyesinin düşük olduğu şartlarda kömür tamamen raceway'de yanar. Fakat, enjeksiyon oranı yavaş yavaş arttırıldığında belirli bir değerden sonra kömür partikülleri raceway'de tamamen yanamaz. Yanmada raceway'in dışına çıkan kömür tozlarının bir kısmı CO_2 ve H_2O ile reaksiyona girerek gazlaşır. Buna rağmen yanma fırsatı bulamamış partiküller raceway'in hemen ilerisinde bulunan deadman yapısına ve fırın içerisine yönelir. Raceway'in dışına çıkan tozların bir kısmı deadman koku yapısına geçer, bir kısmı yüksek fırın gaz akışı yada curuf ile fırını terk eder, bir kısmı ise fırın içerisinde direkt redüksiyonlarla harcanır. Fırını terk eden kömür tozları gereksiz yere yakıt oranının artmasına, enjekte edilen kömürden faydalanılamamasına neden olur. Deadman yapısına geçen ve şarj malzemeleri arasına karışan kömür tozları ise fırın proses şartlarının bozulmasına ve fırın gaz geçirgenliğinin zayıflamasına neden olur [30].

Yüksek kömür enjeksiyon oranlarında tüyer seviyesindeki ortalama kok boyutunda CO_2 hücumunda etkisiyle büyük bir düşüş görülür.

Sonuç olarak, yüksek enjeksiyon oranlarında kok katmanlarının geçirgenliği ve süzme kapasitesi düşer, fırın geçirgenliği zayıflar. İyi bir fırın için malzeme dağılımı ve hammadde kalitesi ile fırın içi gaz geçirgenliği iyileştirilir [30].

Genellikle, yüksek kömür enjeksiyon oranlarında fırın içi basınç düşüşündeki (ΔP) artış, yüksek cevher/kok oranlarında kok katman kalınlığının düşmesi, raceway'ın duvar kenarına kayması ve fırın duvarında ısı kaybı, cevher/kok oranının artması ile birlikte boudard reaksiyonun da artış, şarjdaki demirli malzeme miktarının artışı ile kokun parçalanması, fırın merkezi bölgesinde kok tozu miktarının artışı sonucunda fırın geçirgenliği ve deadman geçirgenliği düştüğü gözlenir [6].

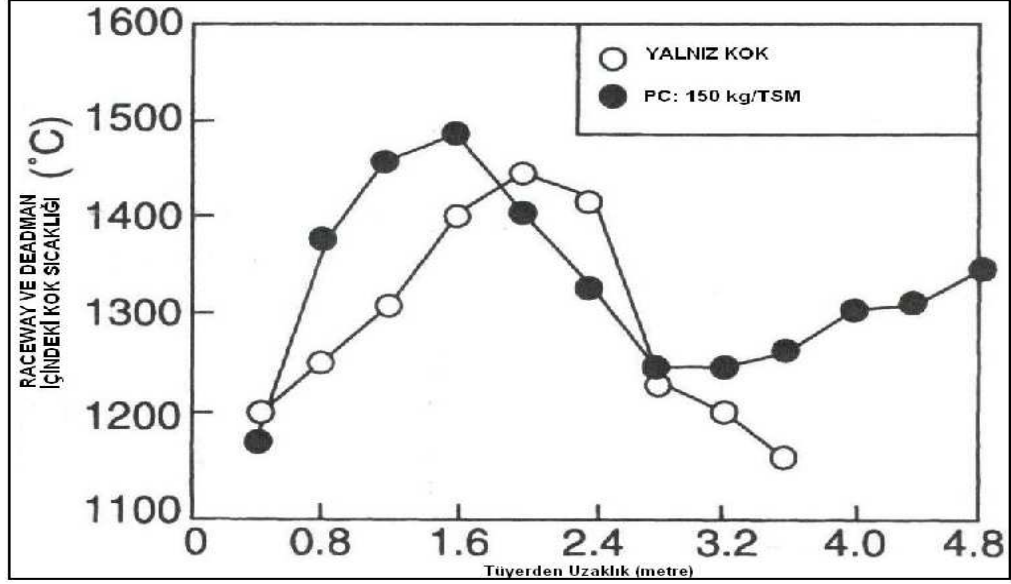
3.5.4. Deadman Kok Yapısına Etkisi

Raceway içerisinde yanamayan kömür parçacıklarının bir kısmı deadman kok yatağına gider. Bu ise deadman'ın sıvı ve gaz geçirgenliğinin düşmesine neden olur. Ayrıca raceway gazların önünü keserek, raceway balonun fırın duvarı yönüne kaymasına, dolayısıyla fırın duvarında ısı kaybına ve yumuşama ergime bölgesinin şeklinin değişmesine neden olur. Bu problemin çözümü için kömürün raceway'i terk etmeden yakılması ve deadman kokunu koruyacak önlemlerin alınması gerekir [8].

Yüksek kömür enjeksiyon oranlarında fırın prosesinin kontrol edilmesinde tüyer önünde yanan kok miktarının çok büyük önemi vardır. Deadman koku sürekli olarak fiziksel özelliklerini ve dolayısıyla geçirgenliğini kaybetme ile karşı karşıyadır. Yanan kokun büyük bir kısmı yukarıdan tekrar şarj edilen kok ile yenilenmekle beraber deadman'ın bir kısmı da yanarak harcanır. Bu nedenle, deadman'ın tamamı üniform değildir. Enjeksiyon oranının arttırılması ile birlikte deadman'ın yenilenme zamanı da artar. Yenilenme zamanındaki bu artışın sınır bir noktaya ulaşması neticesinde fırının alt bölgesinde geçirgenlik problemi yaşanabilir [31].

Gaz ve sıvı fazların rahatlıkla geçebilmesi için dead-man kokunun geçirgenliği çok elverişli bir seviyede olmalıdır. Yüksek enjeksiyon oranlarında kok kullanımının azalması fırın boyunca gaz geçirgenliğinin azalmasına sebebiyet verir ve kömürün yanması sonucu kokun fırında kalma süresi artar [31].

Merkezi kok şarjı yapılması, deadman kokunun korunmasında boudard reaksiyonlarının önünü kestiği için büyük bir öneme sahiptir. Bu sayede deadman geçirgenliğinin düşmesine mahal vermeden düzgün bir fırın çalışması sağlanır [18].



Şekil 3.41. Kömür enjeksiyon miktarının raceway ve deadman kok sıcaklığı üzerine etkisi [31].

Şekil 3.41’te yüksek kömür enjeksiyon oranını raceway ve deadman kok sıcaklıkları üzerine etkisi görülmektedir. Bu ilişkiden de anlaşıldığı gibi, yüksek enjeksiyon oranında, enjeksiyonsuz şartlara göre raceway kok sıcaklıkları daha yüksektir, fırının iç bölgelerine doğru gaz geçirgenliğinin de etkisi ile deadman kok sıcaklıklarında, enjeksiyonsuz şartlara göre artış gözlenir.

Enjeksiyon oranı artışı ile deadman yapısındaki toz miktarı ve deadman kokunun parçalanması artar. Buna bağlı olarak deadman’ın geçirgenliği düşer [8].

3.5.5. Fırın Verimliliği Üzerine Etkisi

Kömür enjeksiyonun fırın verimliliğini artırma yönünde bariz bir etkisi vardır. Enjeksiyon miktarının artırılması beraberinde oksijen zenginleştirme miktarı ve hava sıcaklığının da artırılmasını gerektirdiğinden fırının verimi de gözle görülür oranda artmaktadır. Yüksek fırın verimliliğini arttıran en önemli etken girdi oksijenin

arttırılmasıdır. Bununla en ideal yolu, kömür enjeksiyonu ile birlikte oksijen zenginleştirme yapmak ve oda sıcaklığını arttırmaktan geçer [10].

Enjeksiyon miktarıyla birlikte oksijen miktarının arttırılması, demir cevherinin redüksiyonu için daha fazla gaz üretilmesini, dolayısıyla ergime hızının artmasını sağlar. Ayrıca, enjeksiyon sonucu kok azaltılması ile fırın iç hacminde göreceli bir artış sağlanır. Kokun azaltılmasında kazanılan bu hacim uygun alev sıcaklığı ve termal ısı balansı ayarlaması ve demirli malzeme tenörünün arttırılması ile takviye edildiğinde fırın verimliliğinde gözle görülür bir artış sağlanır. Fırın verimliliğinde görülen bu artışı, doğrudan doğruya kömür enjeksiyonuna bağlamak doğru değildir. Buradaki en önemli etken kömür enjeksiyonunun oksijen zenginleştirmeye imkan tanınması ve üretim artışının sağlanmasıdır [10].

3.5.6. Sıcak Metal Kalitesi Üzerine Etkisi

Kömür enjeksiyonunun sıcak metal kalitesi üzerine tek başına doğrudan ve keskin bir etkisi olmamakla birlikte, girdi kalitesinde değişim olmaksızın enjeksiyon miktarı artışı ile proses parametrelerinin de uygun bir şekilde değiştirilmesi sonucunda sıcak metal kalitesi artar.

Sıcak metal kalitesini belirleyen en önemli kriterler sıcak metal kükürt miktarı, silis miktarı, sıcak metal sıcaklığıdır.

Sıcak metal kükürt miktarını etkileyen en önemli faktör ise hammadde girdilerinin kükürt içeriğidir. Kükürt içeriği en yüksek olan hammadde ise kok olduğu düşünülecek olursa kok miktarı azaltılarak, yerine kükürt içeriği daha az olan kömür enjekte edilecek olursa sıcak metal kükürt miktarı düşer [6].

Hammadde girdilerindeki silis (Si) miktarı değişmeden, sıcak metal silis miktarının artması, curuf içerisinde bulunan SiO_2 bileşiminin fırın içi yüksek ısı potansiyelinin etkisi ile sıcak deadman kokunun karbonu (C) ile reaksiyona girerek ve SiO_2 'nin Si'e redüklenerek sıcak metaldeki Si miktarını artması şeklinde ifade edilebilir [10].

Sıcak metal sıcaklığı ise sıcak metalin kalitesini belirleyen en önemli kriterlerden biridir. Sıcak metal sıcaklığının yüksek olması, fırın için ısı potansiyelinin yüksek olduğunu ifade etmekle birlikte verimli bir sıcak metal curuf ayrışımı, yüksek sıcak metal ve curuf akışkanlığı, yüksek kükürt giderme kapasitesi ve bir sonraki proses olan çelikhane prosesinde enerji tasarrufu ve proses kolaylığı sağlar [10].

3.5.7. Curuf Özellikleri Üzerine Etkisi

Kömür kül miktarının curuf oluşum süreci üzerine belirgin etkisi vardır. Curufu kükürt giderme kapasitesi ve curuf ergime sıcaklığı, kömür külü özelliklerine bağlı olarak etkileşim gösterir. Ayrıca, yanmamış kömür tozları ve yüksek fırın curufunun etkileşimi sırasından curufun viskozitesi düşer. Bunun sonucunda, hazneden curufun zamanında alınmaması, fırın içi basınç yükselmesi ve proses şartlarının bozulması gibi durumlar yaşanabilir. Asidik curuf bileşenlerinin curuf ergime sıcaklığını arttırdığı bilinmektedir. Curuf ergime artması ise curuf metal ayrışımını güçleştiren ve curuf alma aşamasını olumsuz etkileyen bir etkidir [4].

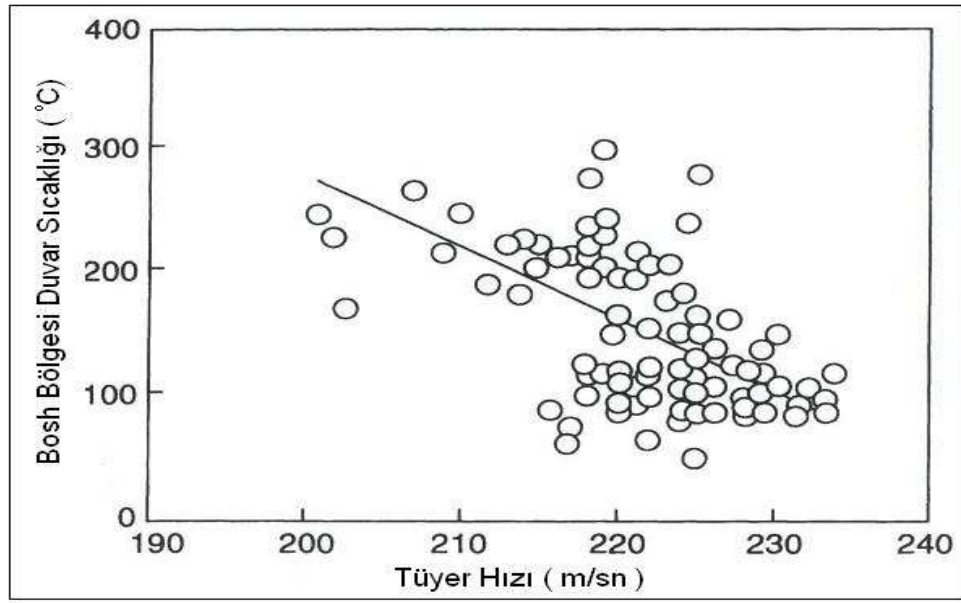
Kömür enjeksiyon miktarının artırılmasının hazneden curuf alınması üzerine oldukça baskın bir etkisi vardır. Raceway'de yanmayan kömür tozları curufun akışkanlığını düşürür. Bu durumda fırından curuf alınması güçleşir, haznede curuf seviyesi limit değerinin üzerine çıktığında, proseste olabilecek en küçük bir etki bile fırın basıncının yükselmesi, gaz geçirgenliğinin düşmesi, yumuşama-ergime bölgesinin (kohesive bölge) şeklinin değişmesine, fırının üretiminin düşmesi ve proses şartlarının kötüleşmesine neden olur [10].

3.5.8. Fırın Duvarındaki Isı Yüğü Üzerine Etkisi

Kömür enjeksiyonun artırılması ile enjeksiyonsuz duruma göre fırın duvarındaki ısı yükünde artış gözlenir. Enjeksiyon miktarının artırılması ile birlikte diğer proses parametreleri (oksijen miktarı, hava sıcaklığı, fırın içi malzeme dağılımı vb.) de uygun olarak değiştirildiği takdirde, yüksek enjeksiyon oranlarında fırın duvarındaki ısı yükündeki artış engellenebilir. Kömür yanma verimi için gerekli şartlar sağlanmaz ise fırın duvarındaki ısı yükünde ciddi oranlarda artış görülür. Bu ise, fırın enerjisinin

gereksiz yere harcanması, yakıt sarfiyatının artması ve önlem alınmazsa fırın refrakterinin hasarlanmasına yol açar.

Pülverize kömür enjeksiyon oranının artışı ile birlikte raceway'de yanma fırsatı bulamayan kömür partikülleri, deadman geçirgenliğinin ve merkezi gaz akışının düşmesine neden olur. Bu koşullarda, tüyer hızının da yüksek olması durumunda merkezi geçirgenlik iyice bozulur ve yanma bölgesi tüyerler yönünde kayarak fırın refrakteri üzerindeki ısıyı arttırır [6].



Şekil 3.42. Tüyer hızının fırın duvarındaki ısı yüküne etkisi [18].

Şekil 3.42'de tüyer hızının bosh bölgesi duvar sıcaklıklarına etkisi görülmektedir. Tüyer hızının yüksek olması kömürün raceway'de yanma şansını düşürür, raceway'in fırın merkezine doğru kaymasına ve fırın duvarındaki ısı yükünün azalmasına neden olur. Burada önemli olan, fırın duvarında kaybolacak ısıdan elde edilen kazanç ile kömür yanma veriminden verilen tavizin dengelenmesi ve optimum seviyesinin tespit edilmesidir. Özellikle, fırın refrakterinde ciddi hasarlanmalar var ise tüyer hızları bir miktar yükseltilebilir. Fakat, bu uygulama mümkün olduğu kadar kohesive bölgenin şeklini bozmadan tüyer hızının düşürülmesi şeklinde yapılmalıdır. Eğer tüyer hızı çok yüksek olursa (> 260 m/sn) deadman gaz geçirgenliği düşer ve sıcak gazlar geriye yansiyarak fırın duvarı yönüne kayar [4].

Yüksek kömür enjeksiyon oranlarında raceway'deki CO₂ konsantrasyonundaki değişimin de etkisi ile maksimum sıcaklık bölgesi, tüyer yönünde kayar. Bu ise, fırının alt bölgelerinde ısı kayıplarının artmasına sebebiyet verir. Genellikle, yüksek enjeksiyon oranlarında fırın içi basıncının artması ile yüksek cevher/ kok oranlarında kok katman kalınlığının düşmesi, raceway'in tüyerler yönünde kayması, fırın duvarında ısı kaybına neden olur. Ayrıca, enjeksiyon artışı ile birlikte cevher/kok oranının artması bouduard reaksiyonun da artışı, şarjdaki demirli malzeme miktarının artışı, fırın içi kok boyutunun düşmesi, fırın merkezi bölgesinde kok tozu miktarının artışı sonucunda fırın gaz geçirgenliği ve deadman geçirgenliğinin düştüğü gözlenir [31].

Ilva Taranto (İtalya) yüksek fırınlarında değişik fırın içi şarj dağılımları denenerek, kararlı bir merkezi gaz akışı sağlanmış, fırın duvarındaki ısı yükü kontrol altına alınmış ve kömür enjeksiyonu sorunsuz bir şekilde arttırılmıştır. Bu bağlamda, yüksek kömür enjeksiyon oranlarında duvar kenarında kok oranını düşürerek merkezdeki kok miktarını arttırmak iyi bir merkez geçirgenliği elde edilmesini sağlar [31].

3.5.9. Baca Tozu Üzerine Etkisi

Baca tozu içerisindeki karbon miktarı, enjekte edilen kömürün yanma verimini gösteren en önemli kriterlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu kritere göre, fırın içerinden yanmayan pülverize kömürün bir kısmı fırın merkezinden yükselen sıcak gaz ile birlikte fırını terk ederek baca tozu içerisine karışmaktadır [6].

Kömürün yanması için elverişli şartlar hazırlanmayıp tek başına enjeksiyon miktarı arttırıldığında, baca tozundaki karbon ve baca tozu miktarında artış gözlenir. Oysa, daha öncede bahsedildiği gibi tek başına enjeksiyon miktarını arttırmak, kömür enjeksiyonunun amacına terstir. Enjeksiyon miktarının artışı ile birlikte üflenen havanın oksijen oranı ve sıcak hava sıcaklığı artırılarak fırın içi termal ısı korunur. Kömürün yanması sonucu ortaya çıkan ısı enerjisinin etkisiyle kömürün yanması için gerekli şartlar hazırlandığında, enjeksiyon miktarının artması ile birlikte baca tozundaki karbon miktarında düşüş gözlenir [6].

3.5.10. Fırın İşletme Şartlarının Kontrolü Üzerine Etkisi

Pülverize kömür enjeksiyonu, fırın termal ısısının kontrolünün sağlanması ve beklenmeyen proses dalgalanmalarının kontrol altına alınmasında etkili bir rol oynamaktadır. Bilindiği gibi yüksek fırına şarj (kok, sinter, pelet, flux) fırın tepesinden yapılır ve fırın tepesinden şarj edilen bir malzeme hazneye yaklaşık 6-8 saat sonra ulaşır. Diğer bir ifade ile kömür enjeksiyonsuz bir sistemde, fırın içinde oluşan bir proses uygunsuzluğu yada şarj malzeme kalitesinde meydana gelen bir dalgalanmaya müdahale edebilmek için, 6-8 saat geçmesi gerekir. Halbuki tüyerlerden enjekte edilen kömür miktarı ayarlanarak çok kısa bir süre içerisinde proses şartları ve sıcak metal kalitesine müdahale edilebilir.

Ancak, yüksek enjeksiyon oranlarında arızı sebeplerden dolayı enjeksiyonun kesilmesi fırın termal ısısının büyük oranda düşmesine sebep olur. Bu durumda prosesin kontrol altına alınabilmesi oldukça güçtür. Bu nedenle, enjeksiyonun kesilmesine neden olabilecek arızaların önüne geçilmesi gerekir. Yüksek fırın duruşları esnasında fırının iç termal ısısını kaybetmesi ve duruşun uzaması ihtimali göz önüne alınarak duruştan 8-10 saat önce enjeksiyon oranı düşürülmelidir. Özellikle, 24 saati geçecek duruşlarda 6-8 saat önce enjeksiyon tamamen sıfırlanmalıdır. Yüksek kömür enjeksiyonu ile çalışılan fırınlarda daha kararlı bir proses sağlanır. Fırın termal bağlantısı kontrolü iyi olmasından ve meydana gelebilecek muhtemel düzensizlikler durumunda kontrol kolaylığı ve çabukluk sağlandığından sıcak metal kalitesinde iyi bir seviye elde edilir [11].

3.5.11. Kok Oranının Azaltılması Üzerine Etkisi

Yüksek fırına kömür enjeksiyonu yapılmasının en temel sebebi kok yerine maliyeti daha düşük olan kömürün kullanılmasıdır. Kardemir yüksek fırınlarında düşük uçuculu yüksek enerjili kömürler kullanıldığından, yaklaşık olarak 10 kg kokun sağladığı ısı enerjisi 9 kg pülverize kömür ile sağlanmaktadır. Ayrıca enjeksiyon kömürünün maliyeti kok maliyetinin yarısı kadar olduğundan toplam yakıt maliyetinde önemli miktarda tasarruf sağlamaktadır.

Kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile birlikte fırına yakıt olarak verilmekte olan kok miktarı azaltılır. Fakat, kokun yüksek fırında yakıt olarak kullanılması haricinde en önemli görevi gözenekli yapısı ile gaz ve sıvı geçirgenliği sağlayarak, fırına maksimum miktarda hava üflenmesine izin vermesi ve kararlı bir fırın prosesinin sağlanmasına yardımcı olmasıdır [32]. Bu nedenle, enjeksiyon miktarının artırılması ile birlikte azaltılacak olan kok miktarının da bir alt limiti vardır.

Kömür enjeksiyon miktarı artırılırken proses parametreleri de uygun bir şekilde değiştirilir. Enjeksiyon miktarı artışının fırın ısı potansiyelini arttırdığı görüldüğünde, şarjdaki kok oranı proses şartlarını bozmayacak oranda azaltılır. Böylece pülverize kömür miktarı artırılarak, kontrollü olarak kok miktarı azaltılır. Kok miktarının azaltılması ve enjeksiyon miktarının artırılmasını fırın geçirgenliği, proses şartları ve toplam yakıt oranı açısından bir limit değeri vardır. Bu limitler aşıldığında enjeksiyon amacından uzaklaşır. Toplam yakıt oranı artar, fırın verimliliği düşer, fırın çalışması bozulur [4].

Kimitsu (Japonya) yüksek fırınlarında 220 kg/TSM kömür enjeksiyonu verimli bir şekilde raceway koşullarında yakılabilmesine rağmen kok oranı belirli bir limit değeri altına düşürülemediği için enjeksiyon oranı 130 kg/TSM seviyesinde tutulmasına karar verilmiştir [30].

Thyssen Schwelgern (Almanya) yüksek fırınlarında 1986-1990 yılları arasında 200 kg/TSM kömür enjeksiyonu hedeflenerek çalışmalar yapıldı. Yapılan çalışmalar sonucunda 200 kg/TSM enjeksiyon seviyesine ulaşıldı. Fakat fırının gaz geçirgenliği kohesive bölge ve fırın çalışma limitlerinin zorlandığı ve toplam yakıt oranında artışa neden olduğu gerekçesiyle 173 kg/TSM enjeksiyon seviyesi, optimum enjeksiyon seviyesi olarak tespit edildi [4].

Sonuç olarak, kömür enjeksiyon miktarını arttırmak hedef değildir. Hedef, kömür enjeksiyon miktarını arttırırken proses şartlarını bozmayacak limitlere kadar kok oranını ve toplam yakıt oranını azaltmaktır.

3.5.12. Maliyetler Üzerine Etkisi

Kömür enjeksiyon artırılması ile;

- 1- İlave enerji sağlandığından yakıt olarak kullanılan kok miktarı azaltılır.
- 2- Fırın kullanılabilir hacmi, oksijen zenginleştirme miktarı ve sıcak hava sıcaklığı artar, bunlara bağlı olarak da üretim ve fırın verimliliği artar.
- 3- Enerji maliyeti azalır.
- 4- Aynı yakıt oranında yüksek fırın şarj kapasitesi artırılarak üretim artışı elde edilir.
- 5- Kok üretiminin azaltılmasının dolayısıyla kok bataryalarının ömrünün artışı sağlanır.

Pülverize kömür enjeksiyonu, kararlı bir fırın prosesi elde edilmesinde sıcak maden kalitesini artırılmasında ve özellikle yakıt tasarrufu sağlanmasında çok önemli bir rol oynamaktadır.

Kömür enjeksiyonundan sağlanan maliyet tasarrufunun en önemli nedeni, kok oranının azaltılıp yerine maliyeti kok maliyetinin yaklaşık % 50-60'ı kadar olan pülverize kömür kullanılmasıdır.

Kömür enjeksiyonu yapılırken sağlanan yakıt maliyeti tasarrufu şu şekilde hesaplanır;

Kok Maliyeti Tasarrufu:

$\text{Kok tasarrufu (kg/TSM)} * \text{Sıcak Metal Üretimi (ton)} * \text{Kok Maliyeti (TL/kg)}$

Enjeksiyon Maliyeti:

$\text{Enjeksiyon oranı (kg/TSM)} * \text{Sıcak Metal Üretimi (ton)} * \text{Kömür Maliyeti(TL/kg)}$

Toplam Yakıt Maliyeti Tasarrufu:

$\text{Kok Maliyeti Tasarrufu (TL)} - \text{Enjeksiyon Maliyeti(TL)}$

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kömür enjeksiyonunun maliyetlerde sağladığı avantajlarla, demir-çelik sektöründe rekabetin bir ölçüsü olarak özellikle son 20 yılda kömür enjeksiyonunun yüksek fırınlarda verimli kullanımının geliştirilmesine yönelik olarak çok yoğun araştırmalar yapılmıştır. Laboratuvar, simülasyon fırın ve gerçek yüksek fırın şartlarında elde edilen sonuçlarla kömür enjeksiyon teknolojisi oldukça gelişmiş ve gelişmeye devam etmektedir. Yüksek fırın prosesi oldukça kompleks ve çok etkileşimli proses olduğundan gerçek yüksek fırın sonuçları laboratuvar çalışmaları ve simülasyon deneyleri ile desteklenmiş, ortaya oldukça başarılı sonuçlar çıkmıştır.

Bu bölümde kömür enjeksiyonunun geliştirilmesine zemin hazırlamak ve bir ışık tutmak amacıyla 2011 ve 2012 yıllarında Kardemir 4 No'lu Yüksek Fırınında kömür enjeksiyonunun yüksek fırın prosesine etkilerine ilişkin olarak yapılan deneysel çalışmalar yer almaktadır.

4.1. KARDEMİR YÜKSEK FIRINLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Yüksek Fırın prosesi içerisinde Cevher Hazırlama ve Harmanlama Tesisi, Sinter Tesisleri, Şarj Tesisleri, Fırınlara ve Gaz Temizleme Tesisleri yer almaktadır.

Kardemir A.Ş.'de 4 adet Yüksek Fırın mevcuttur. Ayrıca 5. Yüksek Fırın yatırım çalışmaları devam etmektedir.

4.1.1. 1 No'lu Yüksek Fırın

Temelleri fabrika ile eş zamanlı atılan yüksek fırınlar başlangıçta 2 adet yapılması planlanarak inşaatına başlanmış olup, 2 Yüksek Fırının montajına aynı zamanda

başlanmıştır. Yüksek fırın üretimi için ihtiyaç olan tesislerin, Kuvvet Santrali; 6 Haziran 1939, Kok fabrikası; 27 Temmuz 1939 tarihlerinde devreye alınmıştır. Günün cevher temin potansiyeli göz önüne alınarak sadece 1 adet yüksek fırının işletmeye alınmasına karar verilmiş olup, 9 Eylül 1939 tarihinde Kardemir'in ve Türkiye'nin ilk yüksek fırını olan 1 No'lu Yüksek Fırın devreye alınmıştır. Kuruluş kapasitesi 137 500 ton/yıl ve kuruluş hacmi 351 m³ olan 1 No'lu YF İngiliz H.A. Brassert firması tarafından yapılmıştır. Sonraki yıllarda yapılan yenileme ve modernizasyon çalışmaları sonucu kapasite 250 000 ton/yıl'a çıkarılmıştır. 10 Temmuz 2008 tarihinde 4 No'lu Yüksek Fırının başarı ile devreye alınmasının ardından Kardemir 4 Yüksek Fırını aynı anda çalışmıştır. Ancak kampanya ömrünü tamamlayan Türkiye'nin ilk Yüksek Fırını olan 1 No'lu Yüksek Fırından 20 Ekim 2008 akşamı son döküm alınmıştır. 21 Ekim 2008 gecesi ise salamander alınarak durdurulmuş ve modernizasyonu için sökümüne başlanmıştır. Ateşlendiği 09 Eylül 1939'dan durdurulduğu 20 Ekim 2008 tarihine kadar geçen sürede 1 No'lu Yüksek Fırın toplam 8 542 740 ton sıvı ham demir üretmiştir [33].

4.1.2. 2 No'lu Yüksek Fırın

1 No'lu YF ile aynı zaman da montajına başlanılan 351 m³'lük ikiz fırınlardan 2 No'lu Yüksek Fırın 7 Ocak 1950 tarihinde devreye alınmıştır. İngiliz H.A. Brassert firması tarafından yapılmışlardır. Kuruluş kapasiteleri 137 500 ton/yıl olan fırın yapılan yenileme ve modernizasyon çalışmaları sonucu kapasitesi 250 000 ton/yıl çıkarılmıştır [34].

4.1.3. 3 No'lu Yüksek Fırın

3 No'lu Yüksek Fırın Salzgitter (Almanya) firması tarafından yapılmış ve 10 Aralık 1962 tarihinde işletmeye alınmıştır. Kuruluş kapasitesi 325 000 ton/yıl olan fırın (818 m³) yenileme ve modernizasyon çalışmalarından sonra 550 000 ton/yıl kapasiteye çıkarılmıştır. Yüksek Fırın zırhı kendini taşır, külâh ve şarj sistemlerinden gelen yükler ayrı bir çelik konstrüksiyon tarafından taşınır. Zırh ve çelik konstrüksiyon arasında genleşme farkları ise bir irtibat ile dengelenir [35].

4.1.4. 4 No'lu Yüksek Fırın

Qinye (Çin) firması ile ortaklaşa yapılan fırın 11 Temmuz 2008 tarihinde devreye alınmıştır. Yeni 1 No'lu yüksek fırınla ikiz fırınlardır.



Şekil 4.1. Kardemir A.Ş. 4 no'lu yüksek fırını ve yardımcı tesisleri.

Çizelge 4.1. Kardemir yüksek fırınlarının teknik özellikleri.

PARAMATRE	KARDEMİR 1-4	KARDEMİR 2	KARDEMİR 3
HAZNE ÇAPI (mm)	5.400	4.572	7.404
BEL ÇAPI (mm)	6.300	5.791	8.357
BOĞAZ ÇAPI (mm)	4.400	4.521	6.540
HAZNE YÜKSEKLİĞİ (mm)	3.790	2.210	3.530
BOSH YÜKSEKLİĞİ (mm)	2.800	3.048	2.972
BEL YÜKSEKLİĞİ (mm)	1.400	1.263	1.702
GÖVDE YÜKSEKLİĞİ (mm)	10.300	12.224	12.626
BOĞAZ YÜKSEKLİĞİ (mm)	1.670	1.835	3.135
FAYDALI YÜKSEKLİK (mm)	19.270	20.580	23.985
TÜYER YÜKSEKLİĞİ (mm)	2.700		2.680
SALAMANDER YÜKSEKLİĞİ (mm)	1.035		1.170
BOSH AÇISI (Derece)	80 ⁰ 52'		81
GÖVDE AÇISI (Derece)	84 ⁰ 43'	87°	85°30'
DÖKÜM DELİĞİ SAYISI	1	1	1
TÜYER SAYISI	14	8	16
TÜYERLER ARASI MESAFE (m)	1,21		1,45
HAZNE ALANI (m ²)	22,9		43
DÖKÜM DELİĞİ AÇISI (Derece)	8		8,5
ÇALIŞMA HACMİ (m ³)	450	351	818

4.1.5. Yüksek Fırınlar Yardımcı Birimleri

- 1- Hammadde besleme sistemi
- 2- Fırın üstü şarj sistemi
- 3- Kömür enjeksiyon sistemi
- 4- Sobalar
- 5- Dökümhane
- 6- Kontrol odası
- 7- Soğutma sistemi ve refrakterler

4.1.5.1. Sobalar

Yüksek fırın içerisindeki kokun yanmasını sağlayan ve fırın içerisinde malzemelerin havada asılı kalmasına yardımcı olan havanın ısıtıldığı en önemli yardımcı donanım sobalardır. Yakma havasının ön ısıtılması işleminden geçirilerek fırınlara üflenmesi hem proses açısından hem de enerji tasarrufu açısından önemlidir. Sobalar silindirik

şekilli olup iç kısımları özel tuğla ile örülüdür. Sobaların fırın devresi (üfleme), gaz devresi (ısınma) ve bekleme devresi olmak üzere üç devresi vardır [34].

4.1.5.2. Şarj Tesisleri

Yüksek fırınların ihtiyacı olan ve sahada stoklanan hammadde ve yardımcı hammaddeler ile kokun istenen miktarda ve çeşitte fırınlara tam otomatik olarak şarj edildiği tesislerdir. Şarjlar, malzeme özelliklerine göre, fırının en iyi şekilde çalışmasını sağlayacak ve gaz geçirgenliğini verecek şekilde belirlenir. Kardemir yüksek fırınlara şarj edilecek malzemelerin ayrı ayrı stoklandığı 48 (6 kok, 42 cevher) adet bunker, 1 adet 35 tonluk aktarma arabası, primer saha üzerinde 20 tonluk iki adet köprülü vinçten oluşur. Şarj tesislerinde tartım ve şarjlar otomatik olarak yapılır. Katkı bunkerleri hariç diğer bunkerlerde malzemeler elenerek yüksek fırınlara şarj edilir. Elek altı malzeme tekrar harmanlama tesisine bant konveyörler aracılığı ile gönderilir [34].

4.1.5.3. Gaz Temizleme Tesisi

Yüksek Fırın gazı esas itibarı ile azot, karbondioksit, karbonmonoksit ve su buharından meydana gelmiştir. Yüksek fırın gazı önemli miktarda azot ihtiva ettiği ve uçucu hidrokarbonlardan yoksun olduğu için kalori değeri (750-800 kcal/Nm³) düşüktür. 2 ve 3 No'lu Yüksek Fırınlarda gaz temizleme üniteleri ortak olup; her fırına bir adet toz tutucu, 5 adet yıkama kulesi ve 5 adet Elektrofiltre olmak üzere 3 aşamada tamamlanmaktadır. 1 ve 4 No'lu Yüksek Fırınlarda ise toz tutucudan sonra her fırına ait 8 adet silodan oluşan kuru tip (torbalı sistem) gaz temizleme sistemi mevcuttur.

4.1.5.4. Pülverize Kömür Enjeksiyon Tesisi



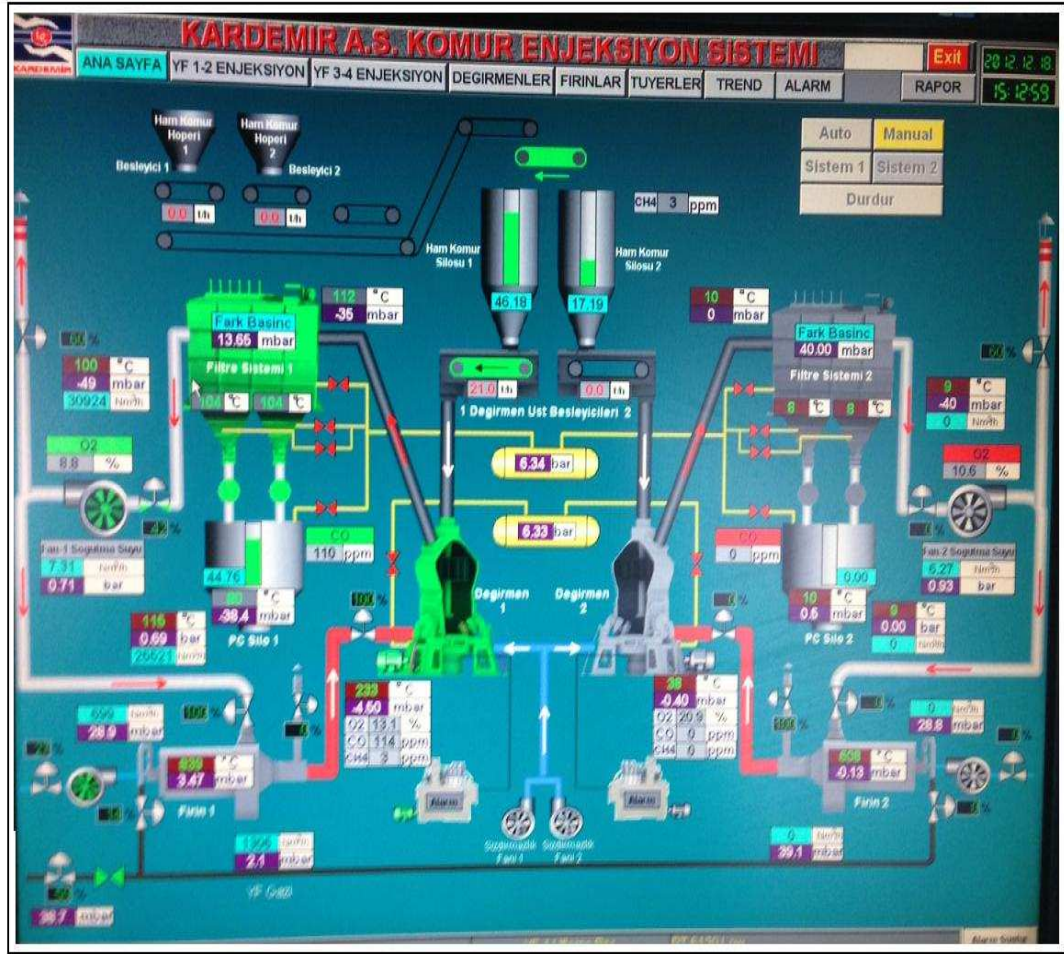
Şekil 4.2. Kardemir A.Ş. kömür enjeksiyon tesisi.

Çin’li Qinye firması ile proje ve ekipman ortaklığı yapılarak devreye alınmıştır. Tesisin 4 fırına pülverize kömür enjeksiyonu yapılabilecek şekilde dizayn edilmiş olup, hali hazırda 3 yüksek fırına birden hizmet etmektedir. Bu kapsamda, 2 paralel sisteme sahip olan tesiste 40 ton/s ham kömür öğütme, 32 ton/s pülverize kömür enjeksiyon kapasitesi bulunmaktadır.

Pülverize kömür enjeksiyon tesisi Şekil 4.3’de de görüleceği üzere;

- 1- Ham Kömür Kurutma ve Öğütme
- 2- Pülverize Kömür Depolama ve Enjeksiyon

olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır.



Şekil 4.3. Kardemir A.Ş. kömür enjeksiyon tesisi akış şeması.

Ham kömür kurutma ve öğütme sisteminde; öğütülecek olan kömür değirmene beslenir. Değirmen tarafından pülverize edilen kömür aynı zamanda kurutulur. Değirmen içinde bulunan emiş sayesinde pülverize hale gelen kömür filtrelere toplanır.

Pülverize kömür depolama ve enjeksiyon sisteminde ise; filtrelere emilen kömür, filtre altında bulunan pülverize kömür silosunda biriktirilerek depolanır. Yüksek fırına yapılacak pülverize kömür enjeksiyonu ise pülverize kömür siloları altında bulunan enjeksiyon tanklarından gerçekleştirilir. Enjeksiyon tankları basınçlandırılarak yüksek fırına, yüksek basınç altında kömür enjeksiyonu gerçekleştirilir.

4.2. KULLANILAN HAMMADDELER

4.2.1. Enjeksiyon Kömürleri

Çizelge 4.2. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan kömürlerin analiz değerleri.

	KÜL %	UÇUCU %	SABİT KARBON %	KÜKÜRT %	HGI	ISI DEĞERİ (kcal/kg)
A	9,97	6,54	74,60	0,46	52,0	7 296
B	8,50	7,26	77,49	0,50	56,7	7 455
C	11,90	4,80	73,60	0,87	42,0	6 974
Ortalama	10,12	6,20	75,23	0,47	50,23	7 242

4.2.2. Metalurjik Kok

Çizelge 4.3. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan kokun analiz değerleri.

%	%	%	Sabit	%		+ 75	+ 25	-25
Nem	Kül	Uçucu	Karbon	S	Stabilite	mm	mm	mm
7,57	13,94	0,63	85,43	0,61	55	8	87	5

Çizelge 4.4. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan kok külünün analiz değerleri.

%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	Fe₂O₃	SO₃	P₂O₅	K₂O	Na₂O	TiO₂
47,59	27,94	4,49	2,03	10,35	2,73	0,89	2,08	0,41	1,23

4.2.3. Sinter

Çizelge 4.5. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan sinterin ortalama analiz değerleri.

%	%	%	%	%	%	%	%	%	CaO /
Fe	FeO	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	Mn	K₂O	Na₂O	SiO₂
54,09	9,07	7,32	2,20	9,35	2,37	1,02	0,249	0,074	1,28

4.2.4. Pelet

Çizelge 4.6. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan peletlerin ortalama analiz değerleri.

	% Fe	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% CaO	% MgO	% Mn	% K ₂ O	% Na ₂ O	% TiO ₂	CaO / SiO ₂
Pelet A	60,68	4,05	2,38	1,34	2,56	0,05	0,019	0,218	2,58	0,330
Pelet B	66,02	2,15	0,75	0,56	1,24	0,06	0,114	0,093	0,004	0,261

4.2.5. Parça Cevher

Çizelge 4.7. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan cevherlerin ortalama analiz değerleri.

	% Fe	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% CaO	% MgO	% Mn	% K ₂ O	% Na ₂ O	% TiO ₂	CaO / SiO ₂
A	57,14	4,87	0,49	1,73	0,67	0,95	0,067	0,071	0,023	0,354
B	61,90	4,20	0,93	2,12	0,62	0,20	0,116	0,086	0,060	0,505
C	56,90	8,60	1,54	1,97	0,28	0,29	0,436	0,078	0,225	0,229
D	66,83	1,80	0,73	0,26	0,56	0,06	0,036	0,067	0,052	0,145
E	65,16	3,44	1,05	0,40	0,42	0,05	0,152	0,100	0,056	0,115

4.3. KULLANILAN CİHAZ, ALET ve MALZEMELER

Deneysel çalışmalar, daha ziyade kömür enjeksiyon oranlarının değiştirilmesine proste oluşan etkilerin gözlenmesi şeklinde yapılmıştır. Sonuçların gözlem ve takibi ise yüksek fırın elektronik otomasyon sisteminde monitörlenilen verilerin, düzenli bir şekilde bilgisayar ortamına kaydedilmesi ve değerlendirilmelerinin yapılması şeklinde olmuştur.

Yüksek fırının hemen her bölgesinde tespit edilen kritik noktalarda sensörler mevcuttur. Bu sensörlerde çevrilen bilgiler kontrol odasında bulunan DCS sistemine aktarılır.

Çizelge 4.8. Sistemde bulunan ve deneysel çalışmalarda kullanılan dataların alındığı başlıca sensörler ve bulunduğu bölgeler.

	Kullanılan Alet/ Ekipmanlar	Alet / Ekiman Tipi	Amaç	Bulunduğu Yer
1	Sıcaklık Sensörleri	Termokupollar	-Fırına giren sıcak hava sıcaklığını ölçmek. -Fırın gövde refrakterinde oluşan sıcaklık değerlerini takip etmek -Sıcak metal sıcaklığını ölçmek - Fırını terk eden gazların sıcaklık dağılımını ölçmek	-Sıcak havanın tüyerlere girişi öncesi - Fırın gövde refrakterinin tüm kritik noktalarında - Portatif -Fırın gövde refrakterinin bittiği tepe noktada
2	Basınç Sensörleri	Transmitterler	-Fırına giren havanın basıncını ölçmek - Yüksek fırın tepe basıncını ölçmek	- Sıcak havanın tüyerlere girişi öncesi -Fırını terk eden sıcak gazların, fırını terk ettiği nokta olan baca borularının girişinde
3	Gaz Sensörleri	Analizörler	-Fırını terk eden gazların % olarak bileşimlerini ölçmek	-Fırını terk eden gazları taşıyan gaz borusu üzerinde
4	Ağırlık Ölçüm Sensörleri	Loadceller	-Fırına enjekte edilen kömür miktarının belirlenmesi -Fırına şarj edilecek malzemelerin tartılması -Üretilen sıcak metalin tartılması	- Kömür enjeksiyon tesisi, enjeksiyon tankı -Fırın hammadde besleme sistemi şarj siloları -Çelikhane girişi sıcak metal kantarı
5	Şarj Dağıtım Oluğu	Döner Oluk	-Fırına hammadde şarjı yapılması	-Fırın tepesi, boğaz bölgesi

4.4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.4.1. Kömür Enjeksiyonunun Alev Sıcaklığı Üzerine Etkisi

Alev sıcaklığından kasıt yanma reaksiyonları sonucunda tüyer önünde oluşan maksimum teorik sıcaklıktır. Alev sıcaklığı, hava sıcaklığı, ortama giren hava ve oksijen miktarı, sıcak hava rutubetinin bir fonksiyonu olarak formülize edilip (4.1), yüksek fırın DCS ekranına aktarılan değerdir. Alev sıcaklığı formülü [36];

$$\begin{aligned} \text{ALEV SICAKLIĞI (}^{\circ}\text{C)} = & [1489 + [0,82 \times \text{Hava Sıcaklığı (}^{\circ}\text{C)}] - \\ & [52,788 \times \text{Oksijen Zenginleştirme Yüzdesi (\%)}] - [18,1 \times \text{PC (kg/TSM)} / \\ & \text{Hava Tüketimi (m}^3\text{/TSM)} \times 100] - [50,66 \times \text{Doğalgaz (kg/TSM)} / \\ & \text{Hava Tüketimi (m}^3\text{/TSM)} \times 100] - [27,9 \times \text{Katran (kg/TSM)} / \\ & \text{Tüketimi (m}^3\text{/TSM)} \times 100] \end{aligned} \quad (4.1)$$

Kömür enjeksiyon miktarının alev sıcaklığı üzerine etkisinin incelenmesi için tüm proses parametreleri sabit tutularak, enjeksiyon miktarı artırılmış ve alev sıcaklığı (4.1) değişimi takip edilerek datalara kaydedilmiş ve prosesteki değişim gözlenmiştir.

Kömür enjeksiyonunun teorik tüyer alev sıcaklığı üzerine etkisinin incelenmesi için;

- 1- Kömür enjeksiyon miktarı lineer olarak artırılmış,
- 2- Şarjdaki kok, demirli hammadde, flux, miktar ve özellikleri sabit tutulmaya çalışılmış,
- 3- Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktarı, hava rutubeti) sabit tutulmaya çalışılmış,
- 4- Fırın içi şarj malzeme döküş pozisyonları sabit tutulmuştur.

4.4.2. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Gaz Geçirgenliği Üzerine Etkisi

Fırın gaz geçirgenliği izlenmesi için fırın iç basıncının yükselmesinin bir ölçütü olarak, gaz geçirgenlik direncindeki değişim izlenerek değerlendirilmiştir.

Kömür enjeksiyonunun fırın geçirgenliği üzerine etkisinin incelenmesi için;

- 1- Kömür enjeksiyon oranı artırılırken, kok oranı azaltılmış,
- 2- Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktarı, hava rutubeti, alev sıcaklığı) sabit tutulmuş,
- 3- Girdi hammaddelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri sabit tutulmuş,
- 4- Fırın içi şarj malzeme döküş pozisyonları sabit tutulmuş,

Yapılan bu çalışmada, kömür enjeksiyon miktarı ile fırın gaz geçirgenlik direnci indeksi ve fırın içi basıncı arasındaki ilişki incelenmiştir.

4.4.3. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Verimliliği Üzerine Etkisi

Fırına enjekte edilen kömür miktarının artırılması ile birlikte alev sıcaklığında düşüş gözlenmiştir.

- 1- Sıcak hava sıcaklığı artırılmış,
- 2- Oksijen zenginleştirme miktarı artırılmış,
- 3- Sıcak hava rutubeti azaltılmış,
- 4- Alev sıcaklığı 2150 °C - 2200 °C aralığında tutulmuştur.

Proses parametrelerindeki bu değişimler neticesinde ise enjeksiyon yapılmayan duruma göre oksijen girdisi ve hava sıcaklığının artırılması ile kömürün yanma verimi ve yanma reaksiyonu hızı artırılmış, daha fazla redükleyici gaz (CO) üretimi sağlanmış ve demirli malzeme redüklenme kapasitesi artırılmış, fırına şarj edilen demirli malzeme miktarı artırılmıştır ve sıcak metal üretiminde artış kaydedilmiştir.

Fırın Verimliliği (t/günxm³) = Sıcak Metal Üretimi (t/gün)/Faydalı Hacim (m³) (4.2)

Kömür enjeksiyonunun fırın verimliliği üzerine etkisinin incelenmesi için;

- 1- Kömür enjeksiyon oranı arttırılırken, kok oranı azaltılmış,
- 2- Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktarı, hava rutubeti, alev sıcaklığı), girdi hammadde miktarları, girdi hammadde fiziksel ve kimyasal özellikleri, fırın içi ısı potansiyeli dikkate alınarak değiştirilmiştir.

Sonuç olarak ise; enjekte edilen kömür miktarının değişimi ile fırın verimliliği arasındaki ilişki incelenmiş ve eğilim fonksiyonu çizilmiştir.

4.4.4. Kömür Enjeksiyonunun Baca Tozu Üzerine Etkisi

Baca tozundaki karbon miktarı, kömür yanma verimini gösteren kriterlerden biri olarak kabul edilir. Bu noktadan hareketle, değişik enjeksiyon oranlarında günlük olarak kömür enjeksiyon miktarının artması ile birlikte, baca tozuna numuneler alınmış ve bileşimindeki karbon miktarının değişimi incelenmiştir.

Kömür enjeksiyonunun baca tozunu üzerine etkisinin incelenmesi için;

- 1- Kömür enjeksiyon oranı arttırılırken kok oranı azaltılmış,
- 2- Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktarı, hava rutubeti, alev sıcaklığı) fırın içi ısı potansiyeli dikkate alınarak değiştirilmiştir.

Numuneler, üretilen baca tozu yığınının farklı noktalarından baca tozunun temsil edecek şekilde alınmış ve laboratuvar şartlarında % C içeriği belirlenmiştir.

Ortaya çıkan sonuçlardan sonra, kömür enjeksiyon miktarı – baca tozundan karbon miktarı ilişkisi ve kömür enjeksiyon sisteminde yapılan iyileştirmelerin kömür yanma verimi üzerine olan etkileri incelenmiştir.

4.4.5. Kömür Enjeksiyonunun Kok Oranının Azaltılması Üzerine Etkisi

Fırına enjekte edilen kömür miktarının değişimine paralel olarak, kok oranının değişimi incelenmiştir.

Kömür enjeksiyonun kok oranının azaltılması üzerine etkisinin incelenmesi için;

- 1- Demirli hammadde şarj miktarları, kimyasal ve fiziksel özellikleri sabit; Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktar, hava rutubeti, alev sıcaklığı) fırın ısı potansiyeli dikkate alınarak değiştirilmiş ve kok şarjı miktarı azaltılmıştır.
- 2- Kok miktarı, kimyasal ve fiziksel özellikleri sabit; Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktarı, hava rutubeti, alev sıcaklığı) fırın ısı potansiyeli dikkate alınarak değiştirilmiş ve demirli hammadde (sinter, pelet) şarj miktarları arttırılmıştır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR ve İRDELEME

Bu bölümde, pülverize kömürün yüksek fırın prosesine etkilerinin incelenmesi amacıyla, Kardemir 4. yüksek fırınındaki kullanımı esasında yüksek fırın proses şartlarına olan etkileri incelenmiş, yapılan deney ve gözlem sonuçları ortaya konulmuştur. Daha önce de bahsedildiği gibi, yüksek fırın prosesinin çok etkileşimli, karmaşık bir proses olması ve onun yanında prosesin her noktası somut olarak ölçülmemesinden dolayı elde edilen sonuçları tamamen formulüze etmekten ziyade, prosese olan etkiler ve eğilimler ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar yüksek fırın fiziksel özellikleri, hammadde kalitesi, kullanılan kontrol ve teknolojik sistemlere göre de değişiklik gösterebilir. Fakat genel eğilim ve etkilerin ortaya konulması açısından yapılan deney ve çalışmalar dünya yüksek fırınlarında elde edilen sonuçlarla benzer olmuştur.

5.1. KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN ALEV SICAKLIĞI ÜZERİNE ETKİSİ

Bölüm 4.4.1’de anlatıldığı üzere kömür enjeksiyonunun alev sıcaklığı üzerine etkisi incelenirken, kömür enjeksiyonu lineer olarak arttırılmış, şarj girdi malzemeleri ve fırın proses parametreleri sabit tutulmaya çalışılmıştır. Çizelge 5.1’de, inceleme başladığında fırına giren harman, Çizelge 5.2’de ise fırın proses parametreleri bulunmaktadır.

Çizelge 5.1. Kömür enjeksiyonunun alev sıcaklığı üzerine etkisi incelenmeye başlandığında yüksek fırına verilen harman.

Şarj Malzemesinin		
Cinsi	Miktar (kg)	%
Sinter	15.000	83,3
Cevher A	750	4,2
Cevher C	750	4,2
Pelet B	1.500	8,3
Metalurjik Kok	5.100	

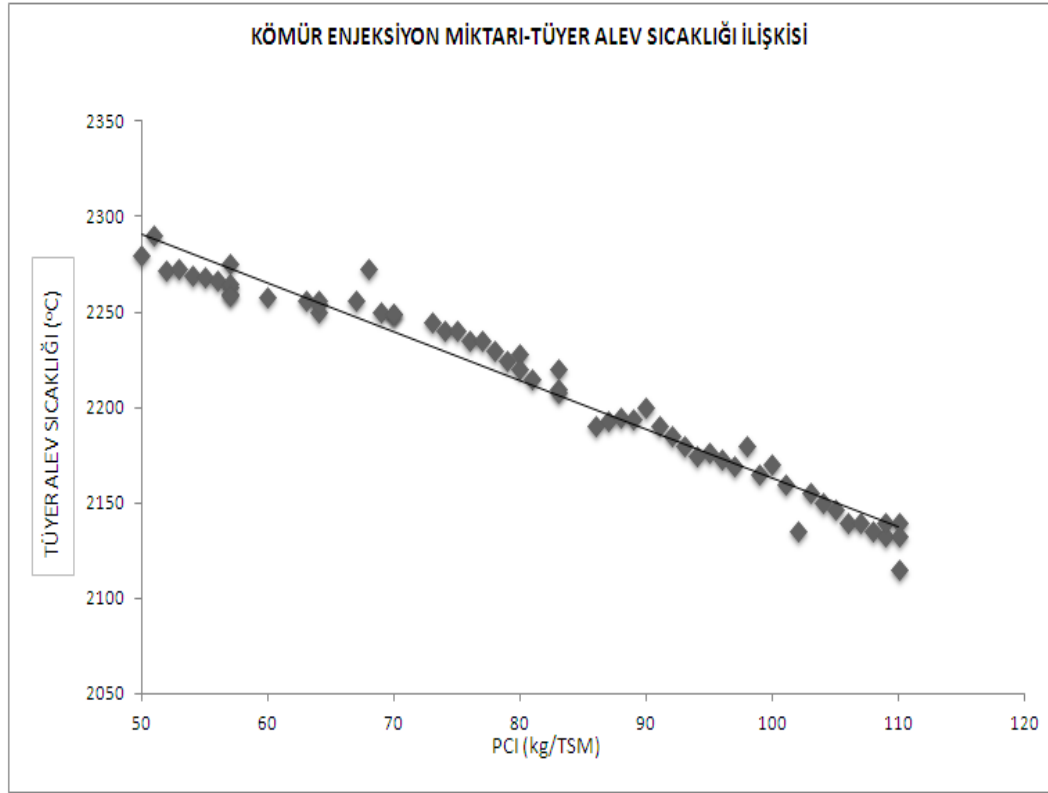
Çizelge 5.2. Kömür enjeksiyonunun alev sıcaklığı üzerine etkisi incelenmeye başlandığında yüksek fırın proses parametreleri.

FIRIN PROSES PARAMETRELER	
Hava Miktarı (Nm³/dk)	1.000
Hava Basıncı (kg/cm²)	2,20
Tepe Basıncı (kg/cm²)	1,05
Hava Sıcaklığı (°C)	1.075
Oksijen Zenginleştirme (%)	2,50

Çalışma esnasında toplanan veriler Çizelge 5.3'deki gibi olmuş ve Şekil 5.1'i oluşturmuştur.

Şekil 5.1'de Kardemir 4. yüksek fırınında yapılan deneme sırasında kömür enjeksiyon miktarı ile alev sıcaklığı arasındaki ilişki görülmektedir. Deneyi yaparken tek başına kömür enjeksiyonu alev sıcaklığı üzerine etkisinin incelenmesi hedeflendiğinden, diğer proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam girdi oksijen miktar, girdi hammadde miktarları) sabit tutulmuş ve kömür enjeksiyon miktarı kademeli olarak arttırılmıştır.

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi kömür enjeksiyon miktarı 50 kg/TSM seviyesinden 110 kg/TSM seviyesine doğru arttırılırken alev sıcaklığı da 2280 °C'den 2115 °C'ye düşmüştür.



Şekil 5.1. Kömür enjeksiyon miktarının alev sıcaklığı üzerine etkisi.

Çizelge 5.3. Kömür enjeksiyonunun alev sıcaklığı üzerine etkisi incelenirken kömür miktarı – alev sıcaklığı ilişkisi.

Kömür Enjeksiyon Oranı (kg/TSM)	Alev Sıcaklığı (°C)
50	2.280
51	2.290
52	2.272
53	2.273
54	2.269
55	2.268
56	2.267
57	2.275
57	2.263
57	2.260
57	2.265
57	2.259
60	2.258
63	2.256
64	2.256
64	2.250
67	2.254
68	2.256

Çizelge 5.3. (devam ediyor).

Kömür Enjeksiyon Oranı (kg/TSM)	Alev Sıcaklığı (°C)
69	2.273
70	2.250
70	2.249
70	2.249
73	2.249
74	2.245
75	2.240
76	2.240
77	2.235
78	2.235
79	2.230
80	2.225
80	2.228
81	2.220
83	2.215
83	2.210
83	2.208
86	2.220
87	2.190
88	2.193
89	2.195
90	2.194
91	2.200
92	2.190
93	2.185
94	2.180
95	2.175
96	2.176
97	2.173
98	2.169
99	2.180
100	2.165
101	2.170
102	2.160
103	2.135
104	2.155
105	2.150
106	2.147
107	2.140
108	2.140
109	2.135
110	2.133
110	2.140
110	2.115

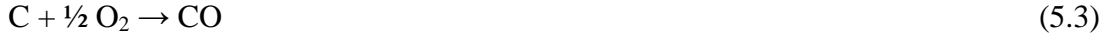
Alev sıcaklığının düşmesi tüyer önü ergitme kapasitesinin düşmesi anlamına gelir. Bu durum ilk bakışta ‘‘yakıt oranını düşürmek’’ temel felsefesi olan kömür enjeksiyonu ile ters düşmektedir. Yüksek fırın proses şartlarında alev sıcaklığının mümkün olduğu kadar stabil ve optimum seviyede olması gerekir. Alev sıcaklığının sürekli dalgalanması yumuşama-ergime bölgesinin (kohesive bölge) şeklinin bozulmasına ve kararsız bir fırın prosesine neden olur. Alev sıcaklığının çok yüksek olması fırında sıcak askılanmaya ve fırın gövdesinde ısı yükünün artmasına, çok düşük olması için ise fırın içi ısı dengesinin bozulmasına, redüksiyonun zayıflamasına ve proseste sıkıntılar yaşanmasına neden olur.

Yukarıdaki ifadelerden de anlaşılacağı üzere ilave yakıt olarak kullanılan pülverize kömür arttırılırken alev sıcaklığının da kontrol altına alınması gerekir. Kömür enjeksiyonu yapan yüksek fırınlarda ideal alev sıcaklığı 2100 °C - 2200 °C aralığındadır. Bu değer fırının proses şartlarına ve fırın karakteristiklerine göre değişim gösterebilir.

Yapılan inceleme, takip ve değerlendirme neticesinde ise Kardemir 4. yüksek fırını için ideal alev sıcaklığı ise 2.200 °C olarak bulunmuştur. Bu değer belirlenirken, kömür yanma verimi ve fırın geçirgenliği dikkate alınmıştır.

Pülverize kömürün alev sıcaklığının düşürme etkisi bir avantaja dönüştürülürse kullanılan kok miktarı azaltılır, fırın üretimi arttırılır, sıcak metal kalitesi arttırılır, proses kolaylığı sağlanır ve sonuçta maliyetlerde önemli oranda bir düşüş elde edilir.

Pülverize kömürün alev sıcaklığını düşürme etkisi şu şekilde avantaja dönüştürülür. Kömür enjeksiyon miktarı arttırılırken alev sıcaklığı düşer. Alev sıcaklığının düşmesini engellemek için, üflenen toplam oksijen miktarı, üflenen havanın sıcaklığı arttırılır ve sıcak hava rutubeti düşürülür. Bu durumda, raceway’deki oksijen konsantrasyon ve kömürün yanma reaksiyonu hızı artar. Kömürün raceway’deki reaksiyonları gereğince oksijen miktarını artması daha fazla CO üretilmesi (5.3) anlamına gelir. CO’in artması ise demir cevheri olarak kullanılan hematitin (Fe_2O_3) redüksiyonunun artması anlamına gelir (5.4).



Kömür enjeksiyonu yapılmayan durumda, redükleyici gaz (CO) sadece kokun yanması ile karşılanır. Raceway’de gerekli yanma şartları oluşturulursa demir cevherinin redüklenmesi için kullanılan CO’in bir kısmı pülverize kömürün yanması ile karşılanacak ve yakıt olarak fırına şarj edilen kok miktarı azaltılacaktır.

Sonuç olarak, kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile birlikte tüyer alev sıcaklığı düşer. Alev sıcaklığındaki bu düşüş üflenen havanın oksijeninin ve sıcaklığının artırılmasına hava rutubetinin azalmasına dolaylı olarak kok oranının düşürülmesine ve fırın verimliliğinin artırılmasına zemin hazırlar. Alev sıcaklığı normal proses şartlarında mümkün olduğu kadar sabit tutulmalı, dalgalanmasına müsaade edilmemelidir.

5.2. KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN GEÇİRGENLİK ÜZERİNE ETKİSİ

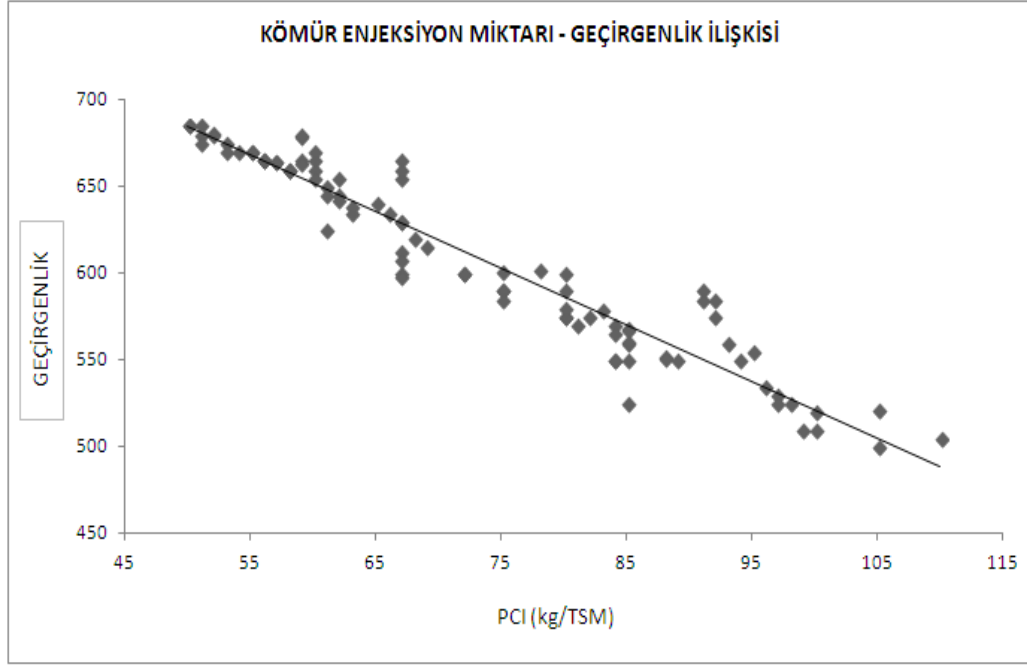
Kardemir 4. yüksek fırınında geçirgenlik aşağıdaki formül ile takip edilmektedir.

$$\text{Geçirgenlik} = V / (\Delta P \times 100) \quad (5.5)$$

Formülden de anlaşılacağı üzere, birim fark basınçta fırına girebilen hava miktarının artması durumunda geçirgenlik artmaktadır.

Bu çalışmada, tüm proses parametreleri sabit tutularak kömür enjeksiyon miktarı 50 kg/TSM seviyesinden kademeli olarak 110 kg/TSM seviyesine kadar artırılmış ve proses üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Enjeksiyon miktarı tek başına artırılırken fırın iç basıncında yükselme görülmüştür. Fırına giren hava ve oksijen miktarı artırılmadan, proste hiçbir sorunun olmadığı durumda, kömür enjeksiyonu artışı ile fırın iç basıncının yükselmesi, fırın gaz geçirgenliğinin bozulduğu anlamına gelir. Fırın gaz geçirgenliğini arttırmak bir başka ifade ile gaz geçirgenlik direncini

azaltmak için, geçici olarak, fırın gaz geçirgenliği düzenlenene kadar, kömür enjeksiyon miktarının, üflenen hava ve oksijen miktarının azalması gerekir. Bu ise; yakıt oranının artması ve fırın verimliliğinin düşmesi anlamına gelir.



Şekil 5.2. Kömür enjeksiyonunun fırın gaz geçirgenliği üzerine etkisi.

Şekil 5.2’de kömür enjeksiyon miktarı ile fırın geçirgenliği arasındaki ilişki görülmektedir.

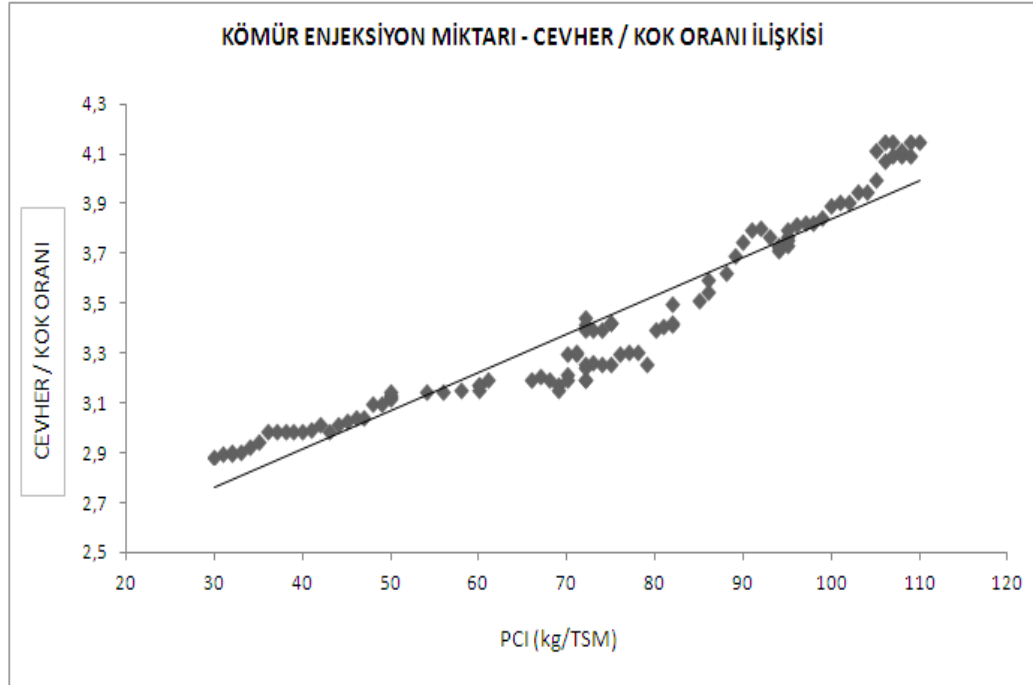
Enjeksiyon miktarı artırılırken enjeksiyonun yan etkileri ortadan kaldırılmalı ya da minimize edilmelidir. Kömür enjeksiyonu ile çalışırken hammadde kalitesinin değişmeden fırın geçirgenliğinin bozulmasının iki nedeni vardır.

Bunlardan birincisi, kömürün yanma şartlarının tam olarak sağlanamamasıdır. Raceway’de yanma fırsatı bulamayan kömür partikülleri, deadman kokuna ve fırın içine doğru yönelir. Deadman kok yapısına geçen kömür tozları, deadman geçirgenliğinin ve aktivitesinin bozulmasına neden olur. Fırın içine yönelen kömür tozları ise fırın gaz geçirgenliğinin zayıflamasına neden olur ve yanmamış kömür tozlarının bir kısmı yüksek fırın gazı ya da curuf ile fırını terk eder, bir kısmı fırın içerisinde direkt redüksiyonlarla harcanır. Fırını terk eden ve direkt redüksiyonlarla

harcanan kömür tozları yakıt oranının artmasına, enjekte edilen kömürden faydalanılamamasına neden olur. Bu durumda yapılması gereken, daha önceki bölümde de anlatıldığı gibi kömürün yanma veriminin arttırılmasıdır.

Kömür enjeksiyonu ile çalışılırken fırın geçirgenliğini bozulmasının ikinci nedeni ise fırın içerisinde kok oranının azaltılmış olmasıdır. Şekil 5.3'te de görüldüğü gibi kömür enjeksiyon kullanımı esnasında cevher/kok oranı artar. Fırında gaz geçirgenliğini sağlayan en önemli faktörün kok miktarı olduğu düşünülecek olursa, kok oranının azaltılması, cevher/kok oranının artmasına neden olur ve fırın gaz geçirgenlik direncini arttırır.

Kömür enjeksiyonu kullanırken kok oranının azaltılması fırın geçirgenliği açısından bir handikaptır. Fakat bu handikap, merkezi kok şarjı yapılması, fırın içi şarj dağılımının kontrol altına alınması, hammadde özelliklerinin iyileştirmesi ve hepsinden önemlisi kömür yanma veriminin arttırılması ile aşılabılır.



Şekil 5.3. Kömür enjeksiyon miktarının cevher/kok oranına etkisi.

Çalışma süresince pülverize kömür oranı arttırılırken metalurjik kok oranı azaltılmış olduğundan yukarıda bahsedilmiştir. Çizelge 5.4’de çalışma süresince gerçekleşen pülverize kömür ve cevher-kok oranı verileri bulunmaktadır.

Çizelge 5.4. Kömür enjeksiyonu cevher-kok oranı ilişkisi.

Kömür Enjeksiyon Oranı (kg/TSM)	Cevher / Kok Oranı
30	2,89
31	2,90
32	2,90
32	2,91
33	2,91
34	2,93
35	2,95
36	2,99
37	2,99
38	2,99
39	2,99
40	2,99
41	3,00
42	3,02
43	2,99
44	3,02
45	3,03
46	3,05
47	3,05
48	31,0
49	3,10
50	3,12
50	3,14
50	3,13
50	3,15
54	3,15
56	3,15
58	3,16
60	3,16
60	3,18
60	3,18
61	3,20
66	3,20
67	3,21
68	3,20
69	3,18
69	3,16
70	3,20
70	3,22

Çizelge 5.4. (devam ediyor).

Kömür Enjeksiyon Oranı (kg/TSM)	Cevher / Kok Oranı
72	3,45
72	3,40
72	3,42
73	3,40
74	3,40
75	3,43
75	3,43
70	3,30
71	3,30
71	3,31
72	3,20
72	3,20
72	3,25
72	3,26
73	3,27
74	3,26
75	3,26
76	3,30
77	3,31
78	3,31
79	3,26
80	3,40
81	3,41
82	3,42
82	3,43
82	3,50
85	3,52
86	3,55
86	3,60
88	3,63
89	3,70
90	3,75
91	3,80
92	3,81
93	3,77
94	3,72
94	3,73
94	3,74
95	3,74
95	3,76
95	3,77
95	3,80
96	3,82
97	3,83

Çizelge 5.4. (devam ediyor).

Kömür Enjeksiyon Oranı (kg/TSM)	Cevher / Kok Oranı
98	3,83
99	3,85
100	3,90
101	3,91
102	3,91
103	3,95
104	3,95
105	4,00
106	4,08
107	4,10
108	4,10
109	4,10
105	4,12
106	4,15
107	4,15
108	4,12
109	4,15
110	4,15

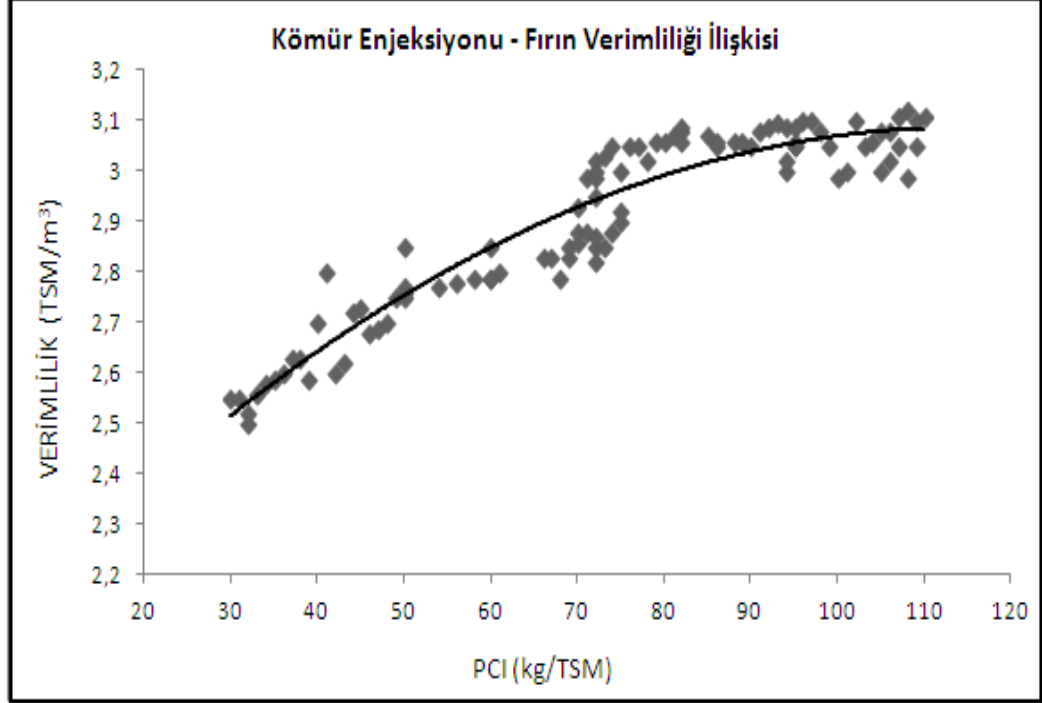
Sonuç olarak, kömür enjeksiyonu hiçbir önlem ve iyileştirme yapılmadan kullanıldığında yüksek fırın gaz geçirgenliğini bozar. Fakat kömür yanma şartları sağlanır, fırına giren hammaddelerin kalitesi kontrol altına alınır, fırın içi şarj dağılımı gaz geçirgenliğini düzeltici yönde ayarlanırsa, geçirgenlik üzerindeki olumsuz etki minimize edilebilir.

5.3. KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN FIRIN VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ

Kömür enjeksiyonunun tek başına arttırmak bir anlam ifade etmektedir. Çünkü kömür enjeksiyonunun diğer tüm enjeksiyon türlerinde olduğu gibi yüksek fırın prosesine olumlu ve olumsuz etkileri vardır. Kullanım esnasında kömür enjeksiyonundan, fırındaki olumsuz etkilerinin giderilmesi ölçüsünde yararlanılabilir.

Şekil 5.4'te kömür enjeksiyon miktarının fırın verimliliği üzerine etkisi görülmektedir. Bu gözlem yapılırken sağlıklı değerlendirme yapabilmek ve kömür enjeksiyonunun fırın verimliliğine etkisini net olarak görebilmek açısından fırın

duruş şartları-öncesi ve sonrası, hammadde kalitesinin üretimi kötü yönde etkilediği durumlar göz ardı edilmiş normal proses şartları baz alınmıştır.



Şekil 5.4. Kömür enjeksiyon miktarının fırın verimliliği üzerine etkisi.

Fırın verimliliği, fırının birim faydalı hacmi başına düşen sıcak metal üretim miktarına denir ve fırınları karakterize eden önemli kriterlerden biridir.

Deney sırasında, normal proses şartlarında, enjeksiyon miktarı kademeli olarak artırıldı ve yüksek fırın üretimindeki değişimler izlendi. Sonuçta, enjeksiyon miktarı artışı ile yüksek fırın üretimine dolayısıyla fırın verimliliğinin belirli bir değere kadar arttığı gözlenmiştir.

Kömürün yanması sonucu oluşan redükleyici gaz miktarındaki artış, kokun yerine daha az hacim kaplayan pülverize kömürün kullanılması ve fırın faydalı hacminin artırılması sonucunda yüksek fırın üretiminde artış sağlanmıştır.

Kömür enjeksiyonu, fırın verimliliğinin belirli bir değerden sonra arttırmaz, proseste oluşacağı negatif etkilerle azaltıcı yönde eğilim gösterir. Şekil 5.4 dikkatli

incelenecek olursa, kömür enjeksiyonunun verimlilik üzerine 90 kg/TSM'ye kadar göstermiş olduğu olumlu etki 90 kg/TSM'den sonra giderek azalmaya başlamıştır.

Çizelge 5.5. Kömür enjeksiyonu – sıcak maden üretimi – fırın verimliliği ilişkisi.

Kömür Enjeksiyon Oranı (kg/TSM)	Sıcak Maden Üretimi (ton/gün)	Verimlilik (ton/m ³ xgün)
30	1.148	2,55
31	1.148	2,55
32	1.134	2,52
32	1.125	2,50
33	1.152	2,56
34	1.161	2,58
35	1.166	2,59
36	1.170	2,60
37	1.184	2,63
38	1.184	2,63
39	1.166	2,59
40	1.215	2,70
41	1.260	2,80
42	1.170	2,60
43	1.179	2,62
44	1.224	2,72
45	1.229	2,73
46	1.206	2,68
47	1.211	2,69
48	1.215	2,70
49	1.238	2,75
50	1.238	2,75
50	1.283	2,85
50	1.242	2,76
50	1.247	2,77
54	1.247	2,77
56	1.251	2,78
58	1.256	2,79
60	1.256	2,79
60	1.256	2,79
60	1.283	2,85
61	1.260	2,80
66	1.274	2,83
67	1.274	2,83
68	1.256	2,79
69	1.274	2,83
69	1.283	2,85
70	1.287	2,86
70	1.296	2,88

Çizelge 5.5. (devam ediyor).

Kömür Enjeksiyon Oranı (kg/TSM)	Sıcak Maden Üretimi (ton/gün)	Verimlilik (ton/m³xgün)
72	1.283	2,85
72	1.292	2,87
72	1.269	2,82
73	1.283	2,85
74	1.296	2,88
75	1.305	2,90
75	1.314	2,92
70	1.319	2,93
71	1.296	2,88
71	1.346	2,99
72	1.328	2,95
72	1.346	2,99
72	1.350	3,00
72	1.359	3,02
73	1.364	3,03
74	1.373	3,05
75	1.350	3,00
76	1.373	3,05
77	1.373	3,05
78	1.359	3,02
79	1.377	3,06
80	1.377	3,06
81	1.382	3,07
82	1.386	3,08
82	1.391	3,09
82	1.377	3,06
85	1.382	3,07
86	1.373	3,05
86	1.377	3,06
88	1.377	3,06
89	1.377	3,06
90	1.373	3,05
91	1.386	3,08
92	1.391	3,09
93	1.393	3,10
94	1.391	3,09
94	1.350	3,00
94	1.359	3,02
95	1.373	3,05
95	1.373	3,05
95	1.377	3,09
95	1.391	3,09
96	1.395	3,10

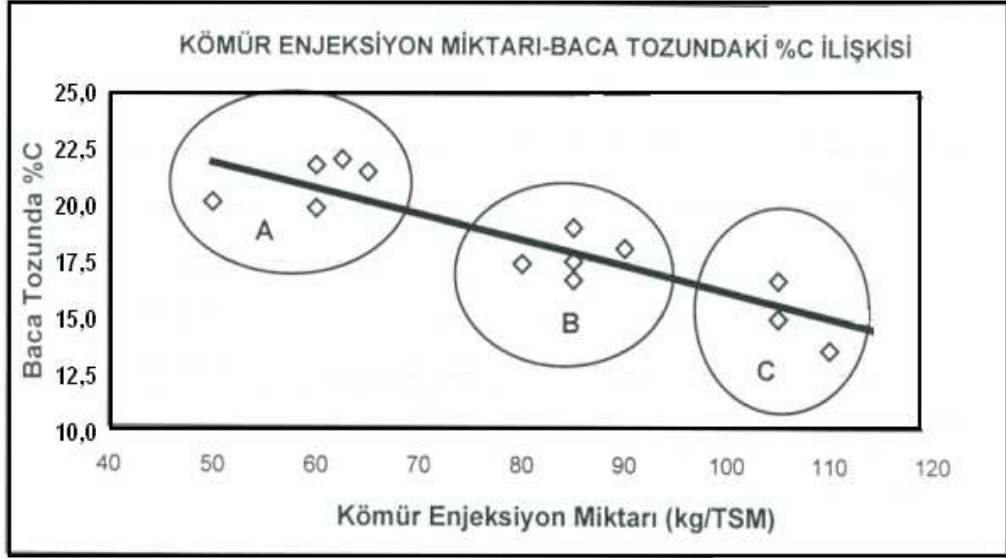
Çizelge 5.5. (devam ediyor).

Kömür Enjeksiyon Oranı (kg/TSM)	Sıcak Maden Üretimi (ton/gün)	Verimlilik (ton/m³xgün)
97	1.395	3,10
98	1.386	3,08
99	1.373	3,05
100	1.346	2,99
101	1.350	3,00
102	1.395	3,10
103	1.373	3,05
104	1.377	3,06
105	1.386	3,08
106	1.386	3,08
107	1.400	3,11
108	1.404	3,12
109	1.373	3,05
105	1.350	3,00
106	1.359	3,02
107	1.373	3,05
108	1.346	2,99
109	1.395	3,10
110	1.400	3,11

Sonuç olarak; uygun proses şartları sağlandığında kömür enjeksiyon miktarının arttırılması ile yüksek fırın verimliliği belirli bir değere kadar artar.

Bölüm 2.4.2.4'de anlatıldığı üzere, geçirgenliğin düzenlenmesi için Kardemir 4. yüksek fırınında, duvar kenarına fındık kok şarjı yapılarak, kömür enjeksiyonunun neden olduğu geçirgenlik bozulmasının önüne geçilerek, fırın verimliliği arttırılmıştır.

5.4. KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN BACA TOZU ÜZERİNE ETKİSİ



Şekil 5.5. Kömür enjeksiyon miktarının baca tozundaki % C içeriğine etkisi.

Yüksek fırın, sıcak metal üretiminin yanında aynı zamanda bir gaz jeneratörü gibi çalışır. Yüksek fırın prosesini terk eden artık gazlar başka proseslerde yakıt amaçlı olarak kullanılır. Sonraki proseslerde verimli bir şekilde kullanılabilmesi ve kalorisinin artırılması amacıyla gaz temizleme prosesinden geçer. Gaz temizleme prosesinin ilk adımında, yüksek hıza sahip artık gazlarla birlikte taşınan tozlar, yoğunluk farkının ve yer çekiminin de etkisiyle ayrıştırılır. Yüksek fırını terk eden atık gazların taşıdığı bu toza “baca tozu” denir. Yüksek fırın şartlarında yanmayan kömürün baca tozu ile fırını terk edeceği fikrinden hareketle baca tozu içerisinde bulunan karbon miktarı yanma veriminin bir ölçütü olarak kabul edilmektedir.

Kömür enjeksiyonun yüksek fırın baca tozu etkisini incelemek ve yanma verimini artırıcı çalışmaların etkilerini gözlemlemek için mevcut optimum kömür oranının elde edildiği şartlarda baca tozundan numuneler alınarak karbon içeriği takip edilmiştir.

Şekil 5.5’de, A, B, C olarak 3 farklı durumda alınan numuneler için kömür enjeksiyon oranı ile baca tozundan karbon miktarı ilişkisi görülmektedir.

A numuneleri; kömür enjeksiyon sisteminde hiçbir iyileştirmenin yapılmadığı şartlarda (Kömür enjeksiyon sisteminin orjinal projede olduğu gibi –tek statik distribütör- devreye alınması sonrası) alınmıştır.

B numuneleri; çift statik distribütör montajı yapılarak kömür enjeksiyonu yapıldığı şartlarda alınmıştır.

C numuneleri; tüm tüyerlerden çift lans enjeksiyon sistemine geçildikten sonra alınmıştır.

Şekil 5.5’de görüldüğü gibi, Kardemir 4. yüksek fırında yapılan enjeksiyon sisteminde (tüyerler arası dengeli ve eşit dağıtım) yapılan iyileştirmeler, yanma verimini artırıcı etki göstermiştir.

Kardemir 4. yüksek fırınında kömür enjeksiyonunun devreye girmesinden sonra % 22,5 olan baca tozu karbon içeriği, yapılan iyileştirmeler ile yanma veriminin artırılmasına paralel olarak % 14’e kadar düşmüştür.

Sonuç olarak; pülverize kömürün yanması için gerekli şartlar sağlanırsa kömür enjeksiyon miktarının artışı ile birlikte baca tozundaki karbon miktarı düşer.

5.5. KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN KOK ORANI ÜZERİNE ETKİSİ

Yüksek fırında temel yakıt olarak kok kullanılmaktadır. Kok maliyetinin yüksek oluşu ve sıcak metal üretiminin yaklaşık yarısı kadar kok kullanılması, kok kullanım oranını azaltıcı tedbirlerin arayışını zorunlu kılmaktadır. Bu arayışlardan bir tanesi ve en önemlisi kömür enjeksiyonudur. Kömür enjeksiyonu yaparak kokun sağlayacağı enerji, maliyeti koka göre daha düşük olan enjeksiyon kömüründen sağlanmaktadır.

Kömür enjeksiyon miktarını artırırken kok miktarını azaltmak için öncelikle, enjekte edilen kömürün prosese etkisi gözlenir. Enjeksiyon, fırın proses şartlarını bozmuyor ve fırın ısı potansiyelini artırıcı yönde etki gösteriyor ise enjeksiyon miktarı artırılarak, kok oranı azaltılır.

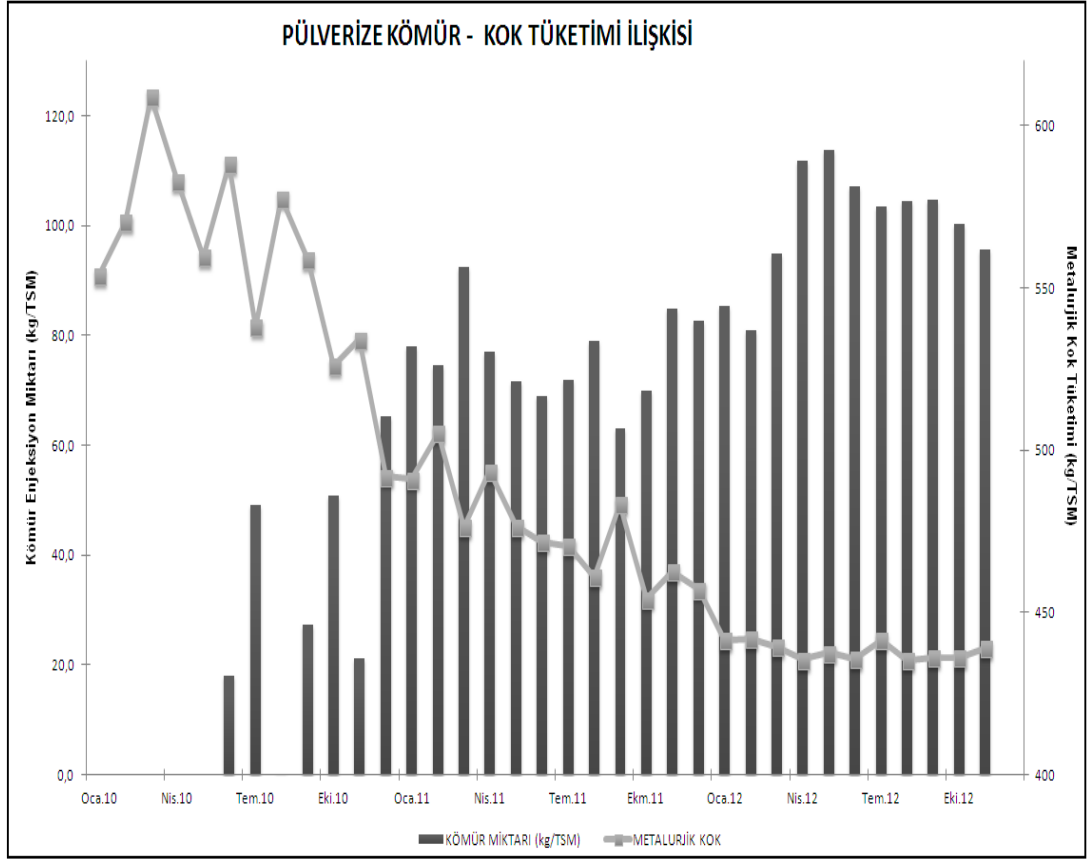
Fırının ısı potansiyelinin yükseldiğini gösteren bazı önemli kriterleri şöyle sıralayabiliriz;

- 1- Sıcak metal sıcaklığın artması,
- 2- Sıcak metalde % Si miktarının artması,
- 3- Sıcak metalde % S miktarının düşmesi,
- 4- Curuf akışkanlığının artması,
- 5- Curufta % FeO yüksek ise azalması,
- 6- Curufta % MnO'in azalması,
- 7- Gaz kullanım veriminin artması (gaz kullanım verimi; fırını terk eden artık gazlar içerisindeki $CO_2/(CO_2+CO)$ oranı).

Kömür enjeksiyonu arttırıldıktan sonra ya da arttırılırken, kok oranının azaltılabilmesi için yukarıdaki kriterlerin bir ya da birkaçının gözlenmesi gerekir. Aksi takdirde, enjekte edilen kömür, fırın ısı potansiyelini artırıcı etki göstermemiş ve kömür yanması için elverişli şartlar oluşmamış demektir. Bu durumda ısrar edilerek kömür enjeksiyonunun daha da arttırılması, fırın geçirgenliğinin bozulmasına ve fırın içi ısı potansiyelinin kaybedilerek proses şartlarının kötüleşmesine yol açar. Bu nedenle, enjekte edilen kömürün yanma veriminin düşük olduğu anlaşıldığında, kömür enjeksiyonunun arttırılmasında ısrar edilmemeli, hatta proses şartları değerlendirilerek enjeksiyon miktarı azaltılmalıdır.

Şekil 5.6'da Kardemir 4. yüksek fırınında yapılan araştırmalarda, kömür enjeksiyon miktarı kok oranı ilişkisi görülmektedir. Kömür enjeksiyon miktarı arttırılırken, fırın ısı potansiyelindeki değişimler gözlenmiş ve bu değişimler dikkate alınarak proses parametreleri ayarlanmıştır.

Yapılan çalışmalar süresince proses sürekli takip edilmiş, fırın ısı potansiyeline göre harmana müdahaleler yapılmıştır. Sonuç olarak; Çizelge 5.6 oluşturulmuş olup bu veriler Şekil 5.6 ve 5.7'ye kaynak sağlamıştır.



Şekil 5.6. Kömür enjeksiyon miktarının kok oranının azaltılması üzerine etkisi.

Çizelge 5.6. Pülverize kömür – kok - toplam yakıt ilişkisi.

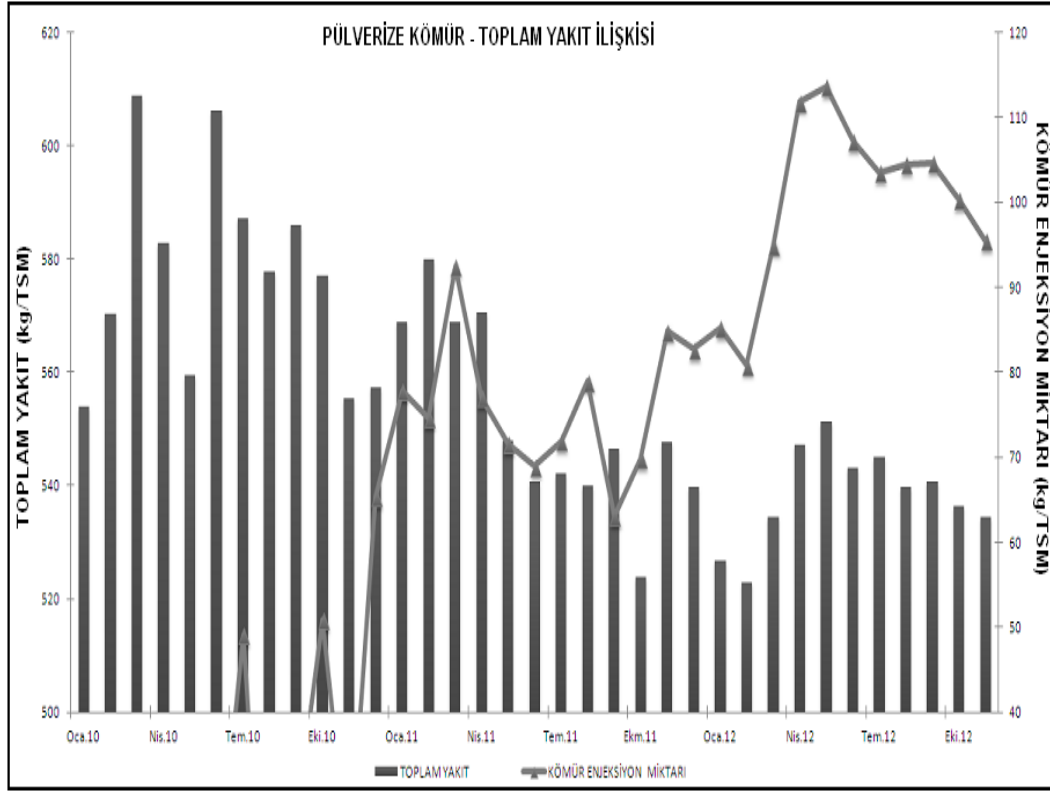
AYLAR	Pülverize Kömür (kg/TSM)	Metalurjik Kok (kg/TSM)	Toplam Yakıt (kg/TSM)
Ocak.2010	0	554	554
Şubat.2010	0	570	570
Mart.2010	0	609	609
Nisan.2010	0	583	583
Mayıs.2010	0	560	560
Haziran.2010	18	588	606
Temmuz.2010	49	538	587
Ağustos.2010	0	578	578
Eylül.2010	27	559	586
Ekim.2010	51	526	577
Kasım.2010	21	534	555
Aralık.2010	65	492	557
Ocak.2011	78	491	569
Şubat.2011	75	505	580
Mart.2011	92	476	569
Nisan.2011	77	493	571
Mayıs.2011	72	476	548

Çizelge 5.6. (devam ediyor).

AYLAR	Pülverize Kömür (kg/TSM)	Metallurjik Kok (kg/TSM)	Toplam Yakıt (kg/TSM)
Haziran.2011	69	472	541
Temmuz.2011	72	470	542
Ağustos.2011	79	461	540
Eylül.2011	63	483	547
Ekim.2011	70	454	524
Kasım.2011	85	463	548
Aralık.2011	83	457	540
Ocak.2012	85	441	527
Şubat.2012	81	442	523
Mart.2012	95	440	535
Nisan.2012	112	435	547
Mayıs.2012	114	438	551
Haziran.2012	107	436	543
Temmuz.2012	104	442	545
Ağustos.2012	105	435	510
Eylül.2012	105	436	541
Ekim.2012	100	436	536
Kasım.2012	96	439	534

Kömür enjeksiyonunun amacı; daha önce enjeksiyon oranının artırılarak, kok oranının azaltılması şeklinde ifade edilmiştir. Buna ilave olarak, fırın işletme şartlarından dolayı, hammadde kaynaklı olarak vb. sebeplerle fırın iç ısı potansiyelinin düşmesi durumunda müdahale kolaylığı sağlayarak proses şartlarının bozulmasının önlenmesi ve daha çabuk müdahale edilmesinin sağlanması ile yakıt oranının artmasının önüne geçilmiş olur.

Kömür enjeksiyon miktarı artırılırken kok oranının azaltılmasının doğal sonucu olarak toplam yakıt oranı da azalır. Toplam yakıt oranı, kok oranı ile enjekte edilen kömürün oranının toplamıdır.



Şekil 5.7. Kömür enjeksiyon miktarının toplam yakıt oranı üzerine etkisi.

Şekil 5.7’de Kardemir 4. yüksek fırınında kömür enjeksiyon miktarına bağlı olarak toplam yakıt oranı değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, kömür enjeksiyon oranı 90 kg/TSM’ye kadar artırılırken kok oranının azaltılmasının etkisiyle toplam yakıt oranında da düşüş gözlenmiştir. Bu aynı zamanda kömürün yanma şartlarının iyi olduğunun ve verimli yakılabildiğinin bir göstergesidir. Fakat 90 kg/TSM enjeksiyon seviyesinden sonra kömür oranının artışı ile birlikte toplam yakıt oranı da artmaya başlamıştır. Bu durum ise kömür yanma veriminin düştüğünün ve ilave bir iyileştirme yapılmadığı sürece kömür enjeksiyonunu artırmanın toplam yakıt oranını artıracığının bir göstergesidir.

Sonuç olarak; gerekli yanma şartları sağlanan, proses şartları iyi analiz edilerek kömür enjeksiyon miktarı artırıldığında fırında şarj edilen kok oranı ve toplam yakıt oranı düşer. Kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile belirli bir limit değerden sonra toplam yakıt oranı artmaya başlar. Toplam yakıt oranının artmaya başladığı limit değer optimum kömür enjeksiyon oranıdır ve yanma verimini artırıcı ilave bir iyileştirme çalışması yapılmadığı sürece optimum kömür enjeksiyon seviyesinin

üzerine çıkmamalıdır. Yapılan araştırmalar ve gözlemler sırasında Kardemir 4. yüksek fırınında mevcut şartlarda verimli bir şekilde yakılabilecek maksimum kömür oranının 90 kg/TSM olduğu sonucuna varılmıştır. Kömür enjeksiyon sistemi veya yüksek fırın proses şartlarında ilave bir iyileştirme yapılmadan 90 kg/TSM enjeksiyon miktarının üzerine çıkılması toplam yakıt oranını artırır, fırın proses şartlarını olumsuz etkiler.

BÖLÜM 6

GENEL SONUÇ ve ÖNERİLER

Pülverize kömürün yüksek fırına enjeksiyonundaki temel amaç, kullanılmakta olan kok miktarını azaltarak azaltılan kokun yerine maliyeti daha düşük olan pülverize kömür kullanılmaktadır. Amaç, kömür enjeksiyon miktarını artırırken proses şartlarını bozmayacak limitlere kadar kok oranını azaltmaktır.

Enjeksiyon miktarı artırılırken enjeksiyonun yan etkileri ortadan kaldırılmalı yada minimize edilmelidir. Tüm proses parametrelerinin etkin olarak kullanılması, kömür yanma veriminin sağlanması, hammadde kalitesinin artırılması durumunda kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile kok oranı düşer.

Kömür enjeksiyonu artırılarak kok oranını düşürülebileceği bir minimum değer vardır. Kokun normal proses şartlarında düşürülebilecek minimum değeri yakalandığında hiçbir ilave iyileştirme yapılmadan kömür enjeksiyon miktarı artırılırsa toplam yakıt oranında artar, fırın geçirgenliği bozulur.

Kömür enjeksiyonu kullanırken, kok oranının azaltılması fırın geçirgenliği açısından handikaptır. Fakat bu handikap, merkezi kok şarjı yapılması, fırın içi şarj dağılımının kontrol altına alınması, hammadde özelliklerinin iyileştirilmesi ve en önemlisi kömür yanma veriminin artırılması ile aşılabılır.

Yüksek oranlarda kömür enjeksiyonu yapılırken, fırın merkezi gaz geçirgenliğini artırılması, deadman kokunun korunması ve yenilenmesi için belirli periyotlarda fırın merkezine ilave kok şarjı yapılmalı yada merkezdeki kok oranı artırılmalıdır. Merkezi gaz geçirgenliğinin artırılmasına yönelik diğer bir metot ise fırın duvar kenarına ince ebatlı sinter ve küçük ebatlı kok şarjı (fındık kok) yapılmasıdır.

Kömür enjeksiyonu yapılan şartlarda hammadde kalitesinin iyi olması gerekir. Kok stabilitesinin 60'tan büyük, kok reaktivite indeksinin (CRI) 35'ten küçük olması ve ortalama tane boyutunun ise 50 mm'nin üzerinde olması gerekir. Aynı zamanda sinter kırılgenlik indeksinin (RDI) % 40'ın altında olması, sinter indirgenebilirlik indeksinin (RI) % 65'in üzerinde olması gerekir.

Kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile sıcak metal üretimi, dolayısıyla fırın verimliliği artar. Kömür enjeksiyon oranının artışı ile beraber oksijen zenginleştirme de artırılırsa raceway derinliği artar. Raceway'de kömür tanecikleri ile oksijen reaksiyonunun mümkün olduğu kadar hızlı gerçekleşmesi ve üflenen hava oksijen oranının yüksek olması gerekir. Kararlı bir yüksek fırın prosesinin ve sıcak metal kalitesinin sağlanabilmesi için alev sıcaklığının mümkün olduğu kadar sabit olması, dalgalanmaması ve belirli bir optimum seviyede olması gerekir. Pülverize kömürün raceway'de kalma süresi yaklaşık 20 msn'dir. Enjekte edilen kömürün raceway'i terk etmeden önce yanması gerekir. Kömür enjeksiyonu yapılan şartlarda tüyer önu teorik alev sıcaklığı 2150 °C – 2200 °C civarında olmalıdır. Sıcak hava sıcaklığının artırılması kömür yanma verimini artırır.

Kömürün kül ve rutubetinin düşük olması kömür yanma verimini artırır. Yüksek uçuculu kömürlerin yanma reaksiyon hızı, düşük uçuculu kömürlere göre daha yüksektir. Bu durum kömürün verimli bir şekilde yakılarak yüksek oranda enjeksiyon yapılmasını imkan sağlar. Yüksek kömür yanma veriminin sağlanabilmesi için, enjekte edilen kömürün en az % 80'inin 200 mesh'in (80 µm) altında olması gerekir.

Kömür enjeksiyon lansından çıktıktan sonra saçılma yüzey alanı ne kadar geniş olursa, kömürün yanabilirliği de o kadar yüksek olur. Enjeksiyon lans et kalınlığının belirli bir değere kadar artırılması partiküllerin tutuşma oranını, dolayısıyla yanma verimini artırır. En yüksek yanma verim, yüksek türbülanslı, et kalınlığı yüksek, eksantirik çift lanslar kullanılarak elde edilir. Enjeksiyon lans ucu

ile tüyer burnu arasındaki mesafe artırıldıkça kömür yanma verimi artar. Oxy-coal enjeksiyon lansı kullanımı, kömürün raceway'de yanma oranının azaltılması ve raceway dışına çıkabilecek yanmamış kömür tozlarının azaltılması üzerinde oldukça etkili bir metottur. Oxy-coal enjeksiyon lans kullanılarak, yüksek kömür enjeksiyon oranlarında kuş boynunun genişleyerek, deadman ve fırın içi gaz geçirgenliğinin bozulmasının önüne geçilebilir.

Kömürün yanması için elverişli şartlar oluşturulduğunda, kömür enjeksiyon miktarı artışı ile baca tozu içerisindeki karbon miktarı düşer.

Kömür enjeksiyonunun artırılması ile raceway'deki oksijen tüketimi artar, tüyer önünde oluşan raceway balonu, fırın gövde refrakteri yönünde kayar ve fırın duvarındaki ısı yükü enjeksiyonsuz duruma göre artar. Kömür yanma şartlarının sağlanması, fırın geçirgenliğini artırılması ve fırın içi şarj dağılımının kontrol altına alınması ile bu olumsuz etki giderilir.

KAYNAKLAR

1. Poos, A. and Pongis, N., “Potentials and Problems of High Coal Injection Rates”, *Centre de Recherches Metallurgiques*, Liege, Belgium, 1-50 (1990).
2. Bortz, S. and Flament, G., “Experiments of pulverized coal combustion under conditions simulating blast furnace environments”, *Ironmaking and Steelmaking*, **10th**, Germany, 85-96 (1983).
3. Tamura, K. and Sugata, M., Yamaguchi, K., “Analysis of combustion behavior of pulverized coal inside tuyeres and raceway trough off-line model experiments”, *JSPS and ISIJ*, Japan, 35-45 (1989).
4. Delassat, Y., Picard, M., Prado, G., Aleboyer, H. and Simon, O., “Blast furnace injection”, *The 9th PTD Conference AIME*, USA, 55-56 (1990).
5. Kobe Steel Ltd., “Blast furnace operation with high coal injection rate”, *Kobe Steel*, Japan, 1-110 (1991).
6. Maldonado, R. R. and Hartley, B. K., “Operation With High Levels of Coal Injection at Scunthorpe Works”, *Scunthorpe Works*, England, 75 (1994).
7. Bouman, W., Hill, G. and Walter, L.L., “Blast furnace granular coal injection”, *IV. Annual Coal Technology Conference*, USA, 152-160 (1995).
8. Yamagata, Y., Ito, R., Shibata, K., Goto, T., Yabata, T. and Mizuguchi, I., “Development of high rate pulverized coal injection technology at Kimitsu Works”, *JSPS and ISIJ*, Japan, 75-80 (1996).
9. Hutny, W. P., Giroux, L., Anthony, J. and Price, J. T., “Quality of coal for blast furnace injection”, *Blast Furnace Injection Symposium*, USA, 196-200 (1996).
10. Ishii, K., “Advanced Pulverized Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation”, *Research Group of Pulverized Coal Combustion in Blast Furnace, Ironmaking 54th Committee, Japan Society for the Promotion of Science and Technical Division of High-Temperature Processes*, Japan, 1-246 (2000).
11. Steeghs, A. G. S., Schoone, E. E. and Toxopeus, H. L., “High coal injection rates into the blast furnaces of Ijmuiden”, *Hoogovens Steel*, Netherlands, 1-125 (1998).
12. USA Energy Department, “Pulverized coal injection coal combustion behavior and residual coal char carry over in the blast furnace during PCI at high rates”, *USA Energy Department*, USA, 35-37 (2002).

13. Chen, C. W., “Numerical analysis for the multi-phase flow of pulverized coal injection inside blast furnace tuyere”, *Applied Mathematical Modelling*, Taiwan, 871-884 (2005).
14. Yansong, S., Aibing, Y., Peter A. and Paul Z., “In-Furnace Modelling Of Pulverized Coal Injection In An Ironmaking Blast Furnace: Effect of Key Variables on Gas Distribution”, *BlueScope Steel Research*, Australia, 35-36 (2011).
15. Shinichiro, N. and Thomas, G. C.,” Maximum Rates of Pulverized Coal Injection in Ironmaking Blast Furnaces”, *ISIJ International*, Japan, 51: 1033-1043 (2011).
16. Tao J., Jiann, Y., Patrick, M., Onuralp, Y., Rafael, P. and Guifeng, Z., “Effect of iron containing metallurgical byproducts on pulverized coal combustion efficiency”, *3rd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*, USA, 99-102 (2012).
17. Chun, Y., S., “Conveying property of injection pulverized coal into blast furnace”, *Applied Mechanics and Materials*, 303-306 (2012).
18. Kanji, T. and Lockwood, F. C., “Integrated mathematical model of pulverized coal in a blast furnace”, *ISIJ International*, Japan, 37: 75-110 (1997).
19. Hatano, M., Kurita, K. and Tanaka, T., “Blast furnace hearth and raceway”, *Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, Japan, 15-25 (1981).
20. Charon, O. and Parado, G., “Study of coal combustion under blast furnace tuyere conditions”, *Proceedings European Ironmaking Congress*, Germany, 3: 55-62 (1986).
21. Tateoka, M., “Development of pulverized coal injection into blast furnaces in Japan.”, *Nippon Steel*, Japan, 35-38 (1993).
22. Kaçar, Y., “Pülverize kömür enjeksiyonunun yüksek fırın prosesine etkisi”, *I. Ulusal Demir Çelik Sempozyumu*, Zonguldak, 89-91 (2001).
23. Gaterhood, S., “Coal Injection into the Blast Furnace”, *British Steel Technical Update*, England, 15-35 (1989).
24. Erdemir Demir Çelik A.Ş., “2000-2002 yılı 1.Yüksek Fırın Çalışma Raporları”, *Erdemir*, Türkiye, (2002)
25. Hegui, D. and Wanren, X., “Influence of macerals on combustibility of pulverized coal into Blast Furnaces”, *ISIJ International*, Japan, 25-27 (1998).
26. Stahl Akademie, “Iron making in blast furnace plants”, *I. International Ironmaking in Integrated Steel Plants Seminar*, Germany (2012).

27. Akbulut, H., “Yüksek sıcaklık özellikleri bakımından yüksek fırında sinter kalitesinin kontrolü”, *Erdemir Eğitim Müdürlüğü Yayınları*, Türkiye, 1-70 (1997).
28. Hur, N. S., Cho, B. R. and Kim, H. H., “High coal injection rates into high productivity blast furnaces ”, *POSCO Steel*, Korea, 1-98 (1996).
29. Yamaguchi, K., Ueno, H. and Yamura, Y., “Maximum injection rate of pulverized coal into blast furnace through tuyeres with consideratil influence of macerals on combustibility of pulverized coal into blast furnaces”, *Nippon Steel Corporation*, Japan, 31-35 (1992).
30. Kimitsu Works Blast Furnace Report, “High injection rates of pulverized coal into blast furnaces”, *Nippon Steel Corporation*, Japan, 1-100 (1989).
31. Calcagni, M., Salvatore, E., Eichinger, F. and Rafi, M., “Blast furnace operation at very high coal injection rate at Ilva Taranto”, *Coal Injection Symposium*, USA, 62-63 (1994).
32. Willmers, R. R. and Poultney, R. M., “Coke in the blast furnace”, *IV. Cokemaking International Symposium*, Canada, 75-90 (1992).
33. Aycan, A. ve Furtun, F., “Kardemir 1 nolu Yüksek Fırın modernizasyonu ve 4. yüksek fırın yatırımı”, *V. Demir-Çelik Kongresi ve Sergisi*, Karabük, 165-168 (2011).
34. Çelebi, V., “Kardemir A.Ş. Yüksek Fırınlar Eğitim Notları”, *Kardemir A.Ş. Arşivi*, 5-15 (2007).
35. Çelebi, A., Aycan, A. ve Furtun, F., “3 nolu yüksek fırın revartmanı”, *III. Demir-Çelik Kongresi ve Sergisi*, Ereğli, 241-254 (2005).
36. Geerds, M., Toxopeus, H. and Vliet, C., “Modern Blast Furnace Ironmaking an introduction”, *Hoogovens Steel*, Netherlands, 95 (2009).
37. Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate, “The State of the Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook (2nd Edition)”, *Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate*, USA, 1-138 (2010).

ÖZGEÇMİŞ

Fikret FURTUN 1980 yılında Karabük'te doğdu; ilköğretim ve Lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 1998 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde öğrenime başlayıp 2003 yılı Ocak ayında mezun oldu. 2003-2004 yılları arası askerlik görevini tamamladıktan sonra 2004 yılı Ağustos ayında Kardemir A.Ş'de Yüksek Fırınlar İşletme Mühendisi olarak göreve başladı. 2010 yılından bu yana Kardemir A.Ş Yüksek Fırınlar İşletme Başmühendisi olarak görev yapmaktadır. 2010 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalında tamamladı.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Kardemir Demir Çelik A.Ş
Öğlebeli Mahallesi Ankara – Karabük Caddesi No:3
Yüksek Fırınlar ve Sinter Müdürlüğü
KARABÜK

E-posta : ffurtun@kardemir.com