

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer Serhat DİKE

**PULVARİZE KÖMÜR ENJEKSİYONU KULLANIMININ YÜKSEK FIRIN
ÇALIŞMASINA ETKİLERİ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA - 2008

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PULVARİZE KÖMÜR ENJEKSİYONU KULLANIMININ YÜKSEK FIRIN
ÇALIŞMASINA ETKİLERİ**

Ömer Serhat DİKE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**Bu tez 05/05/2008 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.**

İmza
Prof. Dr. Oktay BAYAT
DANIŞMAN

İmza
Prof. Dr. Birgül YAZICI
ÜYE

İmza
Doç.Dr. Suphi URAL
ÜYE

İmza
Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM
ÜYE

İmza
Yrd. Doç.Dr. Hüseyin VAPUR
ÜYE

Bu tez Enstitümüz Maden Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No:

Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ
Enstitü Müdürü

**Bu Çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
Tarafından Desteklenmiştir.**

Proje No: MMF.2006.YL.27

- **Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PULVARİZE KÖMÜR ENJEKSİYONU KULLANIMININ YÜKSEK FIRIN
ÇALIŞMASINA ETKİLERİ**

Ömer Serhat DİKE

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Oktay BAYAT

Yıl : 2008, Sayfa: 63

Jüri : Prof. Dr. Oktay BAYAT

Prof. Dr. Birgül YAZICI

Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM

Doç. Dr. Suphi URAL

Yrd. Doç. Hüseyin VAPUR

Bu çalışmanın amacı pulvarize kömür enjeksiyonu kullanımının yüksek fırın çalışmasına etkilerini incelemektir. İncelemeler yapılırken İSDEMİR A.Ş. Yüksek Fırın No:1’de PCI kullanılmadan önceki proses şartları ile PCI kullanılmaya başlandıktan sonraki proses şartları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda İSDEMİR A.Ş. Yüksek Fırın No:1’ de pulvarize kömür enjeksiyonu ile beraber fırın veriminde 1,75 m³/TSM’den 2,00 m³/TSM’e artış, sıvı ham demir içeriğindeki kükürt oranında % 0,085’ten % 0,065’e azalma, günlük sıvı ham demir üretiminde ise 2500 Ton/gün’ den 2750 Ton/Gün’e artma görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Pulvarize Kömür Enjeksiyonu, Yüksek Fırın, Pik

ABSTRACT

Master THESIS

IMPACT OF PULVARIZED COAL INJECTION ON BLAST FURNACE OPERATIONS

Ömer Serhat DİKE

DEPARTMENT OF MINING ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF CUKUROVA

Supervisor : Prof. Dr. Oktay BAYAT
Year : 2008, Pages: 63
Jury : Prof. Dr. Oktay BAYAT
Prof. Dr. Birgül YAZICI
Assoc. Prof.Dr.Suphi URAL
Assoc. Prof.Dr.Mehmet YILDIRIM
Assist.Prof.Dr. Hüseyin VAPUR

In this study investigations of the impact of pulverized coal injection on blast furnace operations are made. Researches are made by comparing the conditions of İSDEMİR blast furnace no: 1 with PCI and without PCI. After experimental results in İSDEMİR Blast Furnace No: 1, it was seen that the furnace yield increased from 1,75 m³/ton-metal to 2,00 m³/ton-metal, sulphur in pig iron was decreased from 0.085% to 0,065% and the pig iron production increased from 2500 tons/day to 2750 tons/day.

Key Words: Pulvarized Coal Injection, Blast Furnace, Pig Iron

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 2005–2008 yılları arasında Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Prof. Dr. Oktay BAYAT yönetiminde YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Çalışmalarımın her aşamasında beni yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Oktay BAYAT'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans tez çalışmamı yürütebilmem için her türlü kolaylığı ve uygun çalışma ortamlarını sunan, Bölüm Başkanı Prof. Dr. Adem ERSOY'a teşekkür ederim.

Yüksek Lisans tez çalışmam sırasında tavsiyeleri ile yönlendiren Doç.Dr. Mehmet YILDIRIM'a, Yrd.Doç.Dr. Hüseyin VAPUR'a ve Dr.İ.Volkan ARSLAN'a teşekkür ederim.

Laboratuvar ve test çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan İSDEMİR Yüksek Fırın Müdürlüğü Mühendislerinden Sn. Ahmet YAZICI'ya, Sn. Evren ŞAHİN'e ve Sn. İlker ERCİŞLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans yapmaya başladığım günden itibaren her türlü manevi desteklerini esirgemeyen can dostlarım Hanifi TUĞRUL, Mehmet ERKUL ve Yakup AKÇİN'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında zaman zaman ihmal ettiğim, yaşamımın her döneminde benden desteğini esirgemeyen eşime teşekkür ederim. Ayrıca manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen Annem, Babam ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ.....	I
ABSTRACT.	II
TEŞEKKÜR.	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	IX
1. GİRİŞ ve AMAÇ.....	1
1.1. İsdemir Hakkında Genel Bilgiler.....	1
1.2. Kok Özelliklerinin Yüksek Fırın Prosesine Etkileri.....	3
1.3. Yüksek Fırında Kokun Rolü.....	4
1.3.1. Fiziksel Özellikler.....	4
1.3.1.1. Kok Boyutu.....	5
1.3.1.2. Kok Mukavemeti.....	6
1.3.1.3. Reaksiyon Sonrası Kok mukavemeti.....	6
1.3.1.4. Kok Rutubeti.....	7
1.3.2. Kimyasal Özellikler.....	8
1.3.2.1.(1). Kok Külü.....	8
1.3.2.1.(2). Kok Kükürdü.....	8
1.3.2.1.(3). Kok Alkalileri.....	9
1.3.3. Yüksek Fırında Kok Hareketi.....	10
1.3.3.1. Yüksek fırında kok kırılması.....	11
1.3.3.2. Aşınma.....	11
1.3.3.3. Kok Bozunum Reaksiyonu.....	11
1.3.3.4. Alkali Etkisi.....	12
1.3.3.5. Isıl Şok ve Yüksek Hızlı Sıcak Hava.....	12
1.3.4. Yüksek Fırında Kok Kullanımıyla ilgili Sonuçlar.....	12
1.4. Pulvarize Kömür Enjeksiyonu (PCI) Hakkında Genel Bilgiler.....	13
1.4.1. Yüksek Fırın Kömür Enjeksiyon Teknolojisinin Gelişmesi.....	16

1.4.2. Yüksek Fırına Enjeksiyonda Kullanılan Kömürler.....	17
1.4.3. Kömürün Bileşimi ve Analizi.....	19
1.4.4. Kömürün Fiziksel Özellikleri.....	22
1.4.4.1. Kömürün Öğütülebilirliği.....	22
1.4.5. Kömürün İşletme Performansı.....	22
1.4.5.1. Kömürün Tutuşma Sıcaklığı.....	23
1.4.5.2. Pulvarize Kömürün Akıcılığı.....	25
1.4.5.3. Pulvarize Kömürün İnceliği (Granülarite).....	25
1.4.5.4. Pulvarize Kömürün Patlayıcılığı.....	26
1.4.5.5. Kömürün CO ₂ ’e Reaktivitesi.....	27
1.4.5.6. Kömürün Yanma Verimi.....	28
1.4.5.7. Kömürün Enjeksiyon Oranı Etkisi.....	29
1.4.6.Yüksek Fırın Kömür Enjeksiyonu İçin Kömür Gereksinimleri.....	30
1.4.6.1. Ham Kömür Performans Şartları.....	30
1.4.6.2. Pulvarize Kömürün Kalite Şartları.....	31
1.4.7. Kömür Enjeksiyonunun Yüksek Fırın Prosesine Olumsuz Etkileri.....	32
1.5. İsdemir Y.F. Pulvarize Kömür Enjeksiyonu Operasyonu ve Teknikleri	32
1.5.1 Ham Kömür Taşıma Sistemi.....	34
1.5.2 Pulvarize Kömür Hazırlama (PCI) Sistemi.....	35
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	37
3. MATERYAL VE METOT.....	39
3.1. Materyal.....	39
3.1.1. Enjeksiyon Sistemi Verileri.....	39
3.1.1.1 Enjeksiyon Kapasitesi.....	39
3.1.1.2 Yüksek Fırın No:1 için Enjeksiyon Miktarı.....	39
3.1.2. Pulvarize Sistemi Verileri.....	39
3.1.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan kömürlerin Fiziksel Özellikleri....	40
3.2. Metot.....	42
3.3. Deneysel Çalışmalar.....	46
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	50
4.1. Tüyer Önü Alev Sıcaklığı Değişimi.....	50

4.2. Fırın Verimliliği Değişimi.....	52
4.3. Sıcak Metalde % S Miktarı Değişimi.....	53
4.4. Sıcak Metalde % Si Miktarı Değişimi.....	54
4.5. Üflenen Havanın Sıcaklık Değişimi.....	55
4.6. Günlük Üretim Değişimi.....	56
4.7. Baca Tozu Değişimi.....	56
5. SONUÇLAR	58
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 1.1. İSDEMİR Üretim Kokunun Yıllara Göre CSR ve CRI Değerleri.....	7
Çizelge 1.2. Kömür Çeşitleri ve Özellikleri.....	20
Çizelge 1.3. Kömür Çeşitleri ve Yanma Noktaları.....	24
Çizelge 3.1. 2007 yılında İSDEMİR’e Alınan Kömürlerin Fiziksel Özellikleri.....	40
Çizelge 3.2. 2007 Yılında İSDEMİR’e Alınan Kömürlerin Kimyasal Özellikleri.....	41
Çizelge 3.3. İSDEMİR A.Ş’de Kullanılan Pulvarize Kömürün Şartları.....	42
Çizelge 3.4. PCI Kullanımından Önce Oluşan YF1 Üretim Parametreleri.....	47
Çizelge 3.5. PCI Kullanımından Sonra Oluşan YF1 Üretim Parametreleri.....	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 1.1. Yüksek Fırına Pulvarize Kömür Enjeksiyonu Yapılması	17
Şekil 1.2. İSDEMİR Kömür Enjeksiyon Sistemi Akım Şeması.....	33
Şekil 1.3. İSDEMİR Ham Kömür Taşıma Ünitesi	34
Şekil 1.4. İSDEMİR Ham Kömür Hazırlama Ünitesi	35
Şekil 1.5. İSDEMİR Kömür Enjeksiyon Sistemi	36
Şekil 3.1. Numune Hazırlamada Kullanılan Elekler	43
Şekil 3.2. Analiz İçin Numune Hazırlama Cihazı.....	43
Şekil 3.3. Toplam Kükürt Analiz Yapılan Cihaz	44
Şekil 3.4. Toplam Nem Tayini Cihazı	45
Şekil 3.5. Kimyasal Analizlerin Yapıldığı X-Ray Cihazı	45
Şekil 3.6. Sıvı Pik Analizlerinin Yapıldığı Optik Emisyon Cihazı.....	46
Şekil 4.1. PCI Öncesi ve Sonrası Tüyer Önü Alev Sıcaklığı Değişimi.....	51
Şekil 4.2. PCI Öncesi ve Sonrası Fırın Verimliliği Değişimi.....	52
Şekil 4.3. PCI Öncesi ve Sonrası % S Değişimi.....	53
Şekil 4.4. PCI Öncesi ve Sonrası % Si Değişimi.....	54
Şekil 4.5. PCI Öncesi ve Sonrası Üflen Hava Sıcaklık Değişimi	55
Şekil 4.6. PCI Öncesi ve Sonrası Günlük Üretim Miktarı Değişimi	56
Şekil 4.7. PCI Öncesi ve Sonrası Baca Tozu Değişimi.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

m ³ /TSM	: Fırın faydalı hacmi başına düşen ton sıvı maden
YF1	: Yüksek Fırın No: 1
PCI	: Pulvarize Kömür Enjeksiyonu
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
CSR	: Reaksiyon Sonrası Kok Mukavemeti.....%
CRI	: Kok Reaktivite İndeksi.....%
Kg/TSM	: 1 ton sıvı madende kullanılan PCI ağırlığı
W	: Kömürdeki % Su İçeriği.....%

1. GİRİŞ

Dünya çelik üretimi her yıl yaklaşık 700 milyon ton civarında gerçekleşmektedir. Bu üretimin yaklaşık %60'ı yüksek fırınlar ve çelikhane vasıtası ile geriye kalan %40'ı hurdaların eritilmesi ile elde edilmektedir. Hurda kaynağının da yüksek fırın olduğu göz önüne alınırsa çelik üretiminin %99'u yüksek fırınlardan elde edilmektedir. Yüksek fırınlarda ısı elde etmek amacı ile kok ve sıvı yakıt (katran, fueloil) kullanılır. Bunlardan kok, maliyet açısından ve proses şartlarında meydana gelen bazı dezavantajlar yüzünden azaltılmaya çalışılmaktadır. Kok girdisini azaltma amacıyla uygulanan metotlardan biri de; ham kömürün kömür enjeksiyon tesisinde, öğütme ve kurutma işleminden geçirildikten sonra boyutu 80 mikron rutubeti %1'in altına indirilerek yüksek fırın tüyerlerinden enjekte edilmesi yani "pulvarize kömür enjeksiyonu"dur. Kok girdisinin azaltılmasıyla üretimi arttırmak, fırın şartlarını iyileştirmek, en ekonomik yoldan fırın sıcaklığını kontrol etmek, çevre etkileri ve maliyetten kazanç elde etmek başlıca hedeflerdir (Erdemir, 2002).

Bu çalışmada, pulvarize kömür enjeksiyonunun, geliştirilmesi ve verimli bir şekilde yüksek fırınlarda kullanılması amacına yönelik olarak, yüksek fırın prosesine olan etkileri incelenmiştir. Çalışma esnasında bizzat İSDEMİR A.Ş yüksek fırın işletme şartlarında yapılan gözlem, araştırma ve denemelerden yararlanılmıştır.

1.1. İsdemir Hakkında Genel Bilgiler

İskenderun Demir ve Çelik Fabrikaları Türkiye Demir ve Çelik İşletmeleri Genel Müdürlüğü bünyesinde kurulan ikinci, Türkiye'de ise üçüncü sırayı alan, gerek kuruluş kapasitesi gerekse nihai kapasite olarak ülkemizin en büyük demir çelik fabrikasıdır. Tesisler Güney Anadolu Sanayi Bölgesinin merkezi yerinde, karayolu, demiryolu ve denizyolu ulaşım imkânlarının hepsine aynı anda sahip bir yer olan İskenderun'a 15 km mesafede Payas civarında kurulmuştur. Sosyal Tesisler ile birlikte Fabrika 1750 hektar alanı kapsamaktadır. Fabrika Tesisleri ise 400 hektarlık bir alanda kurulmuştur. 25 Mart 1967 Tarihinde Sovyetler Birliği ile yapılan Kredi ve

Teknik İşbirliği anlaşması kapsamında Tiajpromexprot firmasına projeler yaptırılmış, aynı firma ile 10 Ekim 1969 tarihinde fabrika kuruluş anlaşması gerçekleştirilmiştir. 1.1 milyon/ton kapasiteli olarak kurulması planlanan tesisin temeli 3 Ekim 1970 tarihinde atılmıştır. İlk Tesis üniteleri planlandığı şekilde tamamlanmış ve 24 Aralık 1972 yılında Sovyetler Birliğiyle imzalanan anlaşma gereğince I. Tevziat inşaatlarına krediler alındıktan sonra başlanmış, I. Tevziat Projesiyle ilgili her türlü çalışmalar tamamlanmış ve Proje Hizmetleri ve Teknolojik ekipmanla malzemelerin alımı için 22 Mayıs 1975 tarihinde ikinci anlaşma yapılmıştır. Sonrasında 12 Aralık 1976 tarihinde imzalanan Ekonomik İş birliği anlaşması sonucunda 2,2 milyon ton/yıl kapasiteye ulaştıracak II. Tevziat proje çalışmalarına başlanılmıştır. İlk Tevziat projesi kapsamında I. II. ve III. Turbo Jeneratörlerinin devreye girişi, I.Turbo Köruk Sistemlerini devreye alınması, I.Pik Makinesinin devreye alınması, Buhar Üretim Tesisleri I.Kazanın devreye alınması ve sonrasında 21 Aralık 1975 tarihinde I.Yüksek Fırının kurulmasıyla İşletmeye geçiş gerçekleşmiştir. I. Kademe Tevziat yatırımının ve entegrasyonunun en önemli üniteleri olan Çelikhane Aralık 1984’de ve 3.Yüksek Fırın 5 Eylül 1985 tarihinde işletmeye alınmıştır. 1988 Yılında DPT’ce son kez fizibilite çalışmaları yapılmış ve Japon Nippon Steel ve Türk Prokon firmasının ortak çalışmalarıyla hazırlanan plan çerçevesinde kapasitenin 3.25 milyon ton olarak gerçekleştirilmesi belirlenmiş ve sonucunda Haddehane modernizasyonu, Çelikhane Kazanları modernizasyonu ve 3 no’lu Yüksek Fırın modernizasyonu gerçekleşmiştir. İskenderun Demir ve Çelik Müessese Müdürlüğü unvanı ile TDÇİ Genel Müdürlüğü’ne bağlı olarak faaliyetini sürdürmekte iken Yüksek Planlama Kurulu kararı ile 14 Ekim 1994 tarihinden itibaren İskenderun Demir ve Çelik A.Ş. (İSDEMİR) adı altında Türkiye Demir ve Çelik İşletmeleri Genel Müdürlüğü’nün bağlı ortaklığı haline dönüştürülmüştür. 2 Mart 1998 Yılında İsdemir özelleştirme kapsam ve programına alınmıştır. İSDEMİR hisselerinin tamamı, 31.01.2002 tarihli hisse devir sözleşmesi ile Özelleştirme İdaresi Başkanlığı tarafından İSDEMİR’de yassı üretimine geçilmesine yönelik yatırımların yapılması şartı ve 50 milyon USD karşılığında ERDEMİR’e devredilmiştir. ERDEMİR hisse senetleri de Özelleştirme Yüksek Kurulu’nun 01.12.2005 tarih ve 2005/140 sayılı kararına istinaden hisselerinin tamamı OYAK’a ait olan ATAER

Holding A.Ş.'ye 27.02.2006 tarihli hisse satış sözleşmesi ile devredilmiştir (www.isdemir.com.tr).

1.2. Kok Özelliklerinin Yüksek Fırın Prosesine Etkileri

Kok, yüksek fırın şarj malzemeleri içinde en önemli ve pahalı hammadde girdilerinden biridir. Aynı zamanda kok, fırın çalışması ve üretime etkisi bakımından en önemli malzemedir. Kokun kimyasal ve fiziksel özellikleri yüksek fırın çalışma şartlarını, sıcak maden kalitesini ve yakıt oranını etkiler. Genel olarak yüksek fırın problemlerinin %75'inin koktan kaynaklandığına inanılmaktadır. Kok, yüksek fırın toplam hacminin %55'ini, reaksiyon bölgesinin %75'ini oluşturmaktadır (Erdemir, 2000).

Yüksek fırınlar, refrakter ile kaplanmış silindirik yapılardır ve bu silindirik yapı içinde değişik sıcaklıklarda değişik mekanik, ısı ve kimyasal reaksiyonlar sırasıyla meydana gelmektedir. Reaksiyon boşluğunda demirli malzemelerin ızgara veya benzer şekilde desteklenmesini sağlayan hiç bir mekanizma yoktur. Yüksek Fırın karşılıklı etkileşimli bir prosestir. Demirli malzemeler (pelet, cevher, sinter, vs.) kok tarafından desteklenir, fırın tepesinden tabanına gelinceye kadar ısıtılır ve pik demir olarak ergitilir (Şekil 1.1. ve 1.2.) (Beppler ve ark., 1999).

Yüksek fırın tasarımı ne kadar basit olursa olsun çalışması birçok faktöre bağlı karmaşık bir sistemdir. Çalışma parametrelerinde hiç bir değişiklik olmamasına rağmen fırın performansı değişebilir. Bu nedenle fırın operatörlerinin sürekli olarak prosesi kontrol etmeleri gerekmektedir (Erdemir, 2000).

Japonya ve Avrupa'da söndürülen Yüksek Fırınların inceleme amaçlı kesilmesi sonucunda nitelik ve nicelik olarak, fırının belirli bölgelerinde kok davranışı açıklanabilmiştir. Verimli bir yüksek fırın prosesi açısından mekanik dayanımın kok kalite parametrelerinden en önemlisi olduğu kabul edilmiştir. Kok, fırında tüyer bölgesinde oksit bir atmosfere tabi tutulmadan önce değişik sıcaklıklarda ağır mekanik yükleri kaldırmak zorundadır (Bennett ve Stainlay, 2001).

Yüksek Fırın prosesi iki temel fonksiyona sahiptir. Bunlardan ilki, demirli hammadde girdisinde demirle birleşik halde bulunan oksijeni ayırmaktır. İlk amaç,

demir oksitlerinin karbon monoksit, karbon dioksit ve metalik demir oluşturacak şekilde, kok içerisinde bulunan karbon ile kimyasal reaksiyonları sonucu gerçekleşir (Şekil 1.3.).

İkinci olarak proses, kimyasal reaksiyonların ürünü olan metali, cevher gang'ı ve kok külü artıklarının oluşturduğu cüruftan ayırmalıdır. Bu amaca hem metali hem cürufu ergiterek, yoğunluklarında farklılıklar meydana getirerek; istenmeyen cürufun sıvı metal tabakası üzerinde yüzmesinin sağlanmasıyla ulaşılır (Bennett ve Stainlay, 2001).

1.3.Yüksek Fırında Kokun Rolü

Temel olarak kok, Yüksek Fırınlarda üç önemli rol oynar. Bunlar; kimyasal reaksiyonların endotermik ısı gereksinimlerini, cüruf ve metalin erime ve kızdırma sıcaklığını sağlayan yakıttır. Demir oksitlerin indirgenmesi için indirgeyici gazların çoğunu sağlar. Geçirgen bir yatak sağlayarak maden ve cürufun hazneye ve sıcak gazların fırın tepesine geçişini sağlar. Başka hiç bir malzeme, yüksek fırın sürecinde bu görevleri yerine getiremez. Önceki iki rol için kokun karbon miktarının maksimum olması yani kül, kükürt ve uçucu madde miktarının minimum olması gerekmektedir. Sondaki rol için kok, dar boyut dağılımıyla yeterli boyutta olmalı ve fırın kesiti boyunca geçişi süresince kırılmasını minimuma indirmek için yeterli mekanik mukavemete sahip olmalıdır (Mathiesona ve ark., 2004).

1.3.1.Fiziksel Özellikler

Kok, yumuşama ergime, tüyer önü ve hazne bölgelerinde katı halde kalabilen tek malzemedir. Bu nedenle kokun fiziksel özellikleri (boyut, mukavemet, boşluk oranı, yüzey alanı) yumuşama ergime ve hazne bölgesinde gaz / sıvı dağılımını ve geçirgenliğini belirleyen en önemli etkidir (Hashimoto ve Sasaki, 1989).

1.3.1.1. Kok Boyutu

Kok fabrikasında proses yeterliliği varsa büyük boyutlu ve yüksek mukavemetli kok üretimi istenmektedir. Büyük kok parçacıkları arasındaki boşlukları dolduran küçük boyutlu kok ve demirli malzeme tozlarının geçirgenlik üzerine ters etkisi vardır. Bunu önlemek için dar bir boyut aralığının sağlanması önemlidir. Fırın kok boyutu, operatörlerin anlayış ve tecrübelerine göre üç yolla belirlenir.

Ortalama Kok Boyutu : tipik olarak $55 \text{ mm} \pm 2$

Kok Boyut Aralığı : tipik olarak $-75 + 19 \text{ mm}$

Büyük Boyutta Olanlar : tipik olarak $+50 \text{ mm}$ boyut %35–40

Fırın geçirgenliği önemli bir proses parametresi olduğu için, kok boyutunun en önemli etkisi fırına üflenmiş hava miktarı üzerine, başka bir deyişle üretim üzerine olmaktadır. Eğer kok boyutu çok ufaksa kok oranı da ters yönde etkilenmektedir.

Küçük boyutlu kokun doğuracağı sonuçlar ise doğrudan sıvı ve gaz geçirgenliğini ve alt bölgelerdeki dağılımlarını etkiler. Haznedeki ısı transferini azaltır ve duvar ısı yükünü artırır. Sıvı seviyesinin etkilenmesi ve sıvı akışının zorlaşması düzgün olmayan gaz akışına ve gaz dağılımının bozulmasına neden olur. Dolaylı olarak gaz geçirgenliğini öyle bir noktaya düşürebilir ki, işletmecinin cevher/kok oranını azaltmaktan (kok oranını artırmak) veya hava sıcaklığını düşürmekten veya hava rutubet oranını artırmaktan başka bir seçeneği kalmayabilir. Bunlar da yine cevher / kok oranının azaltılmasına, yakıt oranının ve maliyetin artmasına neden olacaktır (Hashimoto ve Sasaki, 1989).

Kok üretildikten sonraki başlangıç boyutları yüksek fırına ulaşacak kokun durumunu belirleyen en önemli faktördür. Bu aynı zamanda tüyer seviyesindeki kokun boyutuna da doğrudan etki etmektedir. Verimli bir fırın çalışması için büyük boyutlu (ortalama 55 mm) ve dar boyut dağılımına ($\pm 10 \text{ mm}$) sahip koklar tercih edilmektedir. Normal şartlarda kok boyutları $19\text{--}75 \text{ mm}$ arasında ve ortalama boyut 55 mm civarında tutulmaya çalışılmaktadır. ERDEMİR üretim kokunun $+50,8 \text{ mm}$ üzerindeki miktarı ortalama %64 civarındadır. Koklar yüksek fırına şarj edilmeden önce şarj besleme sisteminde 1 inç eleklerde elenmektedir. Genel olarak $+37 \text{ mm}$ (1

½ inç) kok boyutundaki %10 artışın kok oranını 5 kg/TSM düşürdüğü ve üretimi %1 artırdığı kabul edilmiştir (Özgen, 1986)

1.3.1.2. Kok Mukavemeti

Yüksek fırın kokunun mekanik mukavemetini tespit etmek için değişik metotlar kullanılmaktadır. ASTM Stabilité İndeksi Kuzey Amerika’da, Micum/Irsid Avrupa’da ve JIS Tambur İndeksi Japonya’da yaygındır.

Bu testlerin hepsi kırılma ve aşınmayı, manipülasyon mukavemetinin simülasyonunu ve fırın içinde kok üzerine gelen fiziksel yükleri tespiti yöneliktir. Fırın performansı üzerine kok mukavemetinin etkisi kok boyutuyla aynıdır. Çünkü kok mukavemetinin düşmesi kokun daha küçük boyutlara kırılması anlamına gelmektedir. Belli bir fırın boyutu ve kullanılan malzeme kompozisyonu için kok mukavemetinin optimum bir değeri vardır. Kok mukavemeti bu optimum değerden daha düşük olursa doğrudan kok oranını ve dolaylı olarak da üretimi ve fırının verimliliğini etkiler. Kok mukavemetinin kok oranı ve üretim üzerine etkisinin dışında fırından sıcak maden ve cürufun alınması üzerine de çok önemli etkileri vardır. Yakın yıllarda yapılan çok önemli çalışmalar sonucu dökümün rahat alınmasının kok boyutu ve boşluk oranı ile doğru orantılı fırın çapı ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle kokun fiziksel özellikleri fırın çapı büyüdükçe daha kritik hale gelmektedir. Kuzey Amerika’daki fırın işletmecilerinin tecrübesine göre kok ASTM stabilitesindeki %1 artış stabilite %55–59 arasında ise kok oranını 7.5 kg/TSM azaltmaktadır. Eğer stabilite %59-62 arasında ise stabilitenin kok oranına etkisi 2.3 kg/TSM seviyesine düşmektedir (Beppler ve ark.,1999).

1.3.1.3. Reaksiyon Sonrası Kok Mukavemeti (CSR)

Yakın yıllarda soğuk tambur indeksleri, boyut ve kimyasal özelliklerin yanında reaksiyon sonrası kok mukavemeti de yüksek fırın işletmecileri tarafından kritik bir parametre olarak kabul edilmiştir. Bu test 1970’li yıllarda fırın prosesini daha iyi simüle etmek için Nippon Steel tarafından geliştirilmiştir.

Reaksiyon sonrası mukavemetin temeli kok bozunum reaksiyonu (solution loss reaction) sonrasında oluşan mekanik yüklere karşı kokun mukavemetini ölçmektir. CSR/CRI testi fırının tüyer (raceway) bölgesine girmeden önce kok bozunum reaksiyonu sebebiyle kokun kısmi gazlaşmasının simulasyonuna dayanmaktadır. Bu test, bütün dünyada yaygın olarak kullanılmasına rağmen bu değerlerin kok oranı ve yüksek fırın performansı üzerine etkilerinin ölçülmesi konusunda uluslararası ortak karara varılamamıştır. Japon yüksek fırın işletmecileri CSR/CRI değerlerinin fırınlardaki etkilerini belirlemişlerdir. Nippon Steel tarafından bildirilen eşik CSR değeri %57,5'dur Bu değer altındaki her birim için kok oranı 1.45 kg/TSM artmakta ve eşik değeri üzerindeki her birim için kok oranı 0.3 kg/TSM azalmaktadır. CSR değerinin yakıt oranı, fırın geçirgenliği, raceway boyutu, üretim üzerine etkisi vardır. İSDEMİR üretim kokunun CSR ve CRI değerleri yıllar itibarıyla şu şekildedir (Çizelge 1.1.) (İsdemir Kömür Bildirisi, 2007)

Çizelge 1.1. İsdemir Üretim Kokunun Yıllara Göre CSR ve CRI değerleri

Yıllar	CSR	CRI
2004	63,42	27,60
2005	64,20	24,70
2006	62,68	24,46
2007	63,70	24,09

1.3.1.4. Kok Rutubeti

Kokun rutubet miktarı da verimli yüksek fırın çalışmasını belirleyen önemli bir kalite parametresidir. Kok rutubetindeki %1 artış eşdeğerinin 10 kg/ton kok veya 5 kg/TSM kok olduğu söylenebilir. Bu ise tepe sıcaklığının yaklaşık 7 °C (500 kg/TSM kok oranında) azalması anlamına gelmektedir. Kok rutubetinin sabit bir değerde olması yakıt girdisi dengesi ve fırının ısı dengesi bakımından çok önemlidir. Kok rutubetinin çok fazla değişkenlik göstermesi ve bunun zamanında tespit edilerek tedbir alınmaması durumunda fırın çalışması ve sıcak maden kalitesi üzerine etkisi

büyük olmaktadır. Yüksek değerlerdeki rutubet fırında aşırı soğumalara neden olmaktadır (Özgen, 1986).

1.3.2.Kimyasal Özellikler

Kaliteli bir kokta kül, alkaliler, fosfor ve çinko gibi problemli maddeler az miktarda olmalı ve kükürt gideriminin bir maliyeti olması nedeniyle kok içinde kükürt oranı düşük olmalıdır. Kokun kimyasal özellikleri bu nedenle önemlidir (Bennett ve Stainlay, 2001).

1.3.2.1.(1). Kok Külü

Yüksek fırında düşük cüruf oranı istendiğinden kok külü oranının düşük olması çok önemlidir. Kok külünün yüksek fırın ısı balansı üzerine önemli iki negatif etkisi vardır. Yüksek kül miktarı daha düşük karbon miktarı yani daha düşük kalorifik değer demektir. Külün %1 artışıyla tüyer önünde 25 Kcal/ kg-kok enerji girdisinde azalma meydana gelmektedir. Kül miktarının artmasıyla bu külü eritmek için ilave enerji gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

Kok külü genelde %50 SiO₂ ve %30 Al₂O₃'dan (asit bileşenler) oluşmaktadır. Bu nedenle gerekli flaks malzemeleri (CaO veya CaCO₃) eklenmesi gerekebilir. Bu ise sonuçta cüruf hacminin ve kok oranının artmasına neden olmaktadır. Kül miktarının her %1 kg/ton artışı yaklaşık 6 kg CaO veya 10 kg CaCO₃ gerektirmektedir. Bunun sonucunda ton kok başına cüruf hacmi 16 kg artmaktadır. Bu ise her %1 kok külü artışı için 10 kg/TSM kok oranının artması demektir. Kok külünün artması aynı zamanda sıcak madendeki silisyum ve kükürdünde yükselmesine neden olmaktadır (Özgen, 1986).

1.3.2.1.(2). Kok Kükürdü

Kok kükürdünün her %0,1 artışı sonucu kok oranı 2,5–4,0 kg/TSM artmaktadır. Kokta kükürdün yüksek olması cüruf bazitesinin artmasına veya başka bir deyişle

daha fazla kireçtaşı kullanılması anlamına gelmektedir. Bu ise kok oranının artmasına neden olmaktadır. Kükürt çelikte zararlı bir element olduğundan sıcak madende kükürdü %0.02–0.06 oranlarına düşürmek için mutlaka kükürt giderme işlemi yapılmak zorundadır. Kaliteli ve ekonomik sıcak maden üretmek için düşük kül ve kükürt miktarına sahip kok kullanımı gerekmektedir. (Özgen, 1986).

1.3.2.1.(3). Kok Alkalileri

Fırın çalışması üzerine negatif etkileri nedeniyle kok alkalileri (K_2O , Na_2O) düzgün bir fırın çalışması için çok önemlidir. Genel politika demirli malzeme ve kömürlerin dikkatli seçimi yoluyla düşük toplam alkali girdisini (2 kg/TSM) sağlamaktır. Yüksek fırın kokları içinde toplam alkali %0.2 olmalıdır.

Alkaliler yüksek fırına cevher gangının veya kok külünün bir kısmını oluşturan karmaşık silikatlar şeklinde girerler. Yüksek fırını terk edişleri ise refraktere yapışanları (skafold) dışında cüruf ve tepe gazı yoluyla olur. Yüksek sıcaklık nedeniyle yüksek fırının alt bölgelerinde alkali oksitleri (K_2O , Na_2O) indirgenerek buharlaşır ve diğer gazlarla birlikte yukarıya doğru çıkar. Fırının üst bölgelerinde sıcaklığın düşmesiyle tekrar yoğunlaşır. Fırın içindeki bu dolaşım tüyer-raceway alanına yakın kısımlarda ağır alkali birikmesine neden olur. Tüyer seviyesinden alınan kok numunelerinde alkali miktarı normalin 10 katı fazla çıkmıştır. Genelde alkaliler fırın çalışmasını üç yolla etkiler: Kok içindeki izotropik karbonun tercihli olarak bozunumunun hızlanması. Bu kokun fırının alt bölgelerindeki mekanik mukavemetinin azalmasına neden olur. Alkalilerin bir kısmı fırının üst bölgelerinde fırın astarına skafolt veya skab olarak yapışır. Sonuç olarak malzeme hareketini engeller, kayma ve askılanmaya neden olur. Alkaliler siliko-aluminyum bazlı refrakterlere nüfuz ederler ve fırın astarının zarar görmesine neden olurlar. Belli durumlarda eğer alkali girdisi çok yüksekse haznedeki karbon tuğlalara ve kenar duvarlarına da zarar verebilir (Bennett ve Stainlay, 2001).

1.3.3. Yüksek Fırında Kok Hareketi

Yüksek fırına kok şarjı yapıldığında şarj kolonunun yüzeyinde belirli bir boyut segregasyonu meydana gelmektedir. Daha büyük parçalar fırın merkezine doğru küçük parçalar ise fırın kenarlarına doğru hareket etmektedir. Başlangıç aşamasında, şarj kolonunun tepesindeki kok yükselen gazlarla ısıtılıp kurutulmaktadır. Bu alan içindeki kok hareketi 60 mm/dakika mertebesindedir. Isıl korunum bölgesinde (thermal reserve zone) kokun çok az bir bölümü yükselen indirgeyici gazların içindeki CO gazıyla gazlaşır.

Daha sonrasında kok, 60 mm/dakika hızla yumuşama ergime bölgesi içinde kok katmanları oluşturacak şekilde aşağıya doğru iner. Temel olarak yumuşama ergime bölge katmanları gaz akışı için geçirgen değildir. Bu nedenle 1.000 °C üzerindeki sıcaklıklarda gazların tümü kok katmanları içinden yukarılara çıkar. Daha sonra 1.200 °C üzerindeki sıcaklıklarda kok “aktif kok bölgesinin” üst bölümüne iner ve burada damlayan ergimiş malzemelerle (sıcak maden ve cüruf) temasa geçer. Kokun aktif kok bölgesi içindeki aşağıya yatay hareketinin hızı yaklaşık 100 mm/dakikadır. Kokun önemli bölümü tüyer önündeki hava boşluğuna doğru hareket eder. Burada kok tüyerlerden üflenen havanın kinetik enerjisi tarafından oluşturulan türbülans nedeniyle (yaklaşık 50 m/saniye) yanar. Sadece kokun çok az bir bölümü fırın haznesine ulaşabilir. Fırın haznesine ulaşan kok ergimiş sıcak maden banyosu içinde yavaşça erir. Ölü (Deadman) bölgesinden hazneye kokun hareketi çok yavaştır ve 0.1 mm/dakika hızla hareket etmektedir.

Kok, ergimiş cüruf ve sıcak maden aşağıya doğru hareket ederken indirgeyici gazlar yukarıya doğru hareket etmektedir. Normalde demirli malzemelerin fırın içindeki hareketi 5 saat kadar sürerken kokun tüyer bölgesine ulaşması daha uzun zaman alır. Genel olarak haznedeki kokun 2–3 hafta kalabildiğine inanılmaktadır. Bunun yanında tüyer önünden ayrılan indirgeyici gazlar fırını yaklaşık 10 saniye içinde terk etmektedir (Beppler ve ark, 1999).

1.3.3.1. Yüksek Fırında Kok Kırılması

Manipülasyon sisteminden başlayarak tüyer bölgesine kadar yüksek fırında kok boyutundaki azalma iki ayrı kırılma aşaması sonucudur. Bunlar;

a) Kok fabrikası ile yüksek fırında malzeme seviyesi arasındaki kokun mekanik etkileşimler nedeniyle kırılması. (Malzeme seviyesine kadar olan mekanik kırılmanın simülasyon neticesinde 1.2–12.5 mm arasında değiştiği ve bunun toplam kırılmanın %30'unu oluşturduğu tespit edilmiştir).

b) Fırın malzeme seviyesi ile tüyerler arasında meydana gelen kimyasal, ısı ve mekanik değişimler sonucunda kokun kırılması. Malzeme seviyesi ile tüyerler arasındaki kırılma malzeme seviyesine kadar olan kırılmadan çok daha değişkendir ve önemli seviyededir. Bu kırılma 3,3–24,0 mm arasında değişmektedir ve toplam boyut değişiminin ortalama %70'ini oluşturmaktadır. Yüksek fırındaki kok kırılma bölgeleri ve kırılma nedenleri şu şekildedir: Malzeme seviyesine ulaşıncaya kadar mekanik etkiler nedeniyle toplam boyut küçülmesi yaklaşık 5 mm'dir. Bu toplam kırılmanın %9'unu oluşturmaktadır (Mathiesona ve ark., 2004).

1.3.3.2.Aşınma

Aşınma demir içeren malzemelerin kok üzerine yüklenmesi, daha ağır ve yoğun malzemeler arasında sandviç katmanlar şeklindeki kokun aşağıya hareketi sebebiyle oluşmaktadır. Bu kırılma malzeme seviyesinde (~200 °C) başlamakta ve sıcaklıkların 1300 °C'lere ulaştığı gövde, yumuşama ergime bölge ve aktif kok bölgeleri boyunca devam etmektedir. Aşınma nedeniyle kok boyutu yaklaşık 2 mm düşmektedir (Özgen, 1986).

1.3.3.3. Kok Bozunum Reaksiyonu

800–850 °C civarında alkali karbonatlar kok yüzeyine birikirler. Alkali karbonatlar kok reaktivitesini artırır fakat boyut ve mukavemete etki etmezler. Karbon çözünümü 900–950 °C sıcaklıklarda başlar. Alkalilerin zararlı etkilerinin

başlaması kok reaktivitesi ve yüksek fırın çalışma şartları tarafından kontrol edilir. Bu reaksiyon sonucu 900–1300 °C arasındaki sıcaklıklarda kok boyutu 2-3 mm (toplam kırılmanın %3.6'sı) azalmaktadır. (Özgen, 1986).

1.3.3.4. Alkali Etkisi

1100–1450 °C arasındaki sıcaklıklarda aktif kok bölgesinde alkali buharları kok karbonu ile reaksiyona girerler. Kokun aşınma mukavemetini (ASTM Sertlik/Micum 10 vs.) düşürür ve mekanik etki nedeniyle boyut küçülmesine karşı hassas hale getirirler. Alkali etkisi nedeniyle kok boyutu 15–20 mm azalır ve bu toplam boyut küçülmesinin %36'sına karşılık gelmektedir (Özgen, 1986).

1.3.3.5. Isıl Şok ve Yüksek Hızlı Sıcak Hava

1100–1500 °C arasında oluşan yüksek sıcaklık etkisi direkt olarak kok boyutunu 1–3 mm düşürmektedir. Bu ısı şok nedeniyle kok aşınma mukavemetini kaybetmekte, mekanik etki nedeniyle boyut azalmasından çabuk etkilenir hale gelmektedir. Kok boyutu, bu etki nedeniyle 5–7 mm azalmaktadır. Isıl şok ve yüksek hızda sıcak hava toplam olarak 7–10 mm.lik kok boyutu azalmasına sebep olmaktadır bu ise toplam kok kırılmasının %18'i demektir (Özgen, 1986).

1.3.4.Yüksek Fırında Kok Kullanımıyla İlgili Sonuçlar

Kok yüksek fırında üç temel rol oynamaktadır:

- i) Fiziksel rol (gaz ve sıvı geçirgenliği),
- ii) Kimyasal rol (indirgeyici gaz),
- iii) Termal rol (ısı girdisi).

Bu fonksiyonların yerine getirebilmesi için kok özelliklerinin belirli standartlar içinde olması zorunludur:

1. Yüksek Fırında indirgenme ve ergime proseslerinde demirli malzemeler kok tarafından desteklenmektedir. Şarj malzemelerini desteklemek için kokun yerini alabilecek malzeme yoktur.

2. Tüyer önünde (raceway'de) kok indirgeyici gazları ve yüksek ısıyı sağlamaktadır.

3. Fırının alt bölgelerinde parçalar arasında boşluk bulunması yüksek fırının istikrarlı çalışması açısından çok önemlidir. Kokun en önemli özelliği fırın içindeki değişen atmosfer ve sıcaklığa karşı mekanik dayanımıdır. Boyut, oda sıcaklığındaki mukavemet ve yüksek sıcaklık mukavemeti, kokun en önemli üç kalite özelliğidir.

4. Kimyasal analizin istikrarlı olması ve düşük rutubet miktarları da önemli kalite parametrelerindendir.

5. Kokun kimyasal ve fiziksel özellikleri fırın gövdesindeki geçirgenliği, ısı kayıplarını, haznenin boşalması ve döküm şartlarını, sıcak maden silisyum miktarını (%Si), ısı tüketimini ve indirgenme verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

6. Kokun tüyer bölgesindeki davranışı, şarj malzemeleri ile gazların etkileşimini ve fırının normal boşalmasını etkiler. Sonuç olarak kok özellikleri yüksek fırın prosesinin teknik sınırlarını belirler. Özellikle kömür enjeksiyon miktarının yüksek olduğu durumlarda, kok çok daha uzun süre haznede kalmak zorundadır. Bu ise, kok mukavemetinin yüksek olması zorunluluğunu doğurmaktadır (Hashimoto ve Sasaki, 1989).

1.4. Pulvarize Kömür Enjeksiyonu (PCI) Hakkında Genel Bilgiler

1979 yılında yaşanan 2. petrol krizinden bu yana dünya demir çelik endüstrisinde önemli yer tutan ülkelerdeki şirketler, yüksek fırınlarda uygulandıktan sonra sıvı maden yakıt enjeksiyonuna alternatif bir sistem geliştirmek için çaba sarf etmişlerdir. Çünkü sıvı yakıt enjeksiyonu, yüksek maliyeti nedeni ile terk edildikten sonra yüksek fırın prosesinde aşağıdaki olumsuzluklar meydana gelmiştir:

- i) Alev sıcaklığında artış
- ii) Kenar bölgelerdeki ısı akısında artış
- iii) Kok oranında artış

- iv) Askı ve kayma sayısında artış ve fırın çalışmasını bozulması
- v) Gaz geçirgenliğindeki azalmalar sonucu fırın çalışmasının bozulması

Fırın çalışmasında meydana gelen bu düzensizlikler bir takım önlemler alınarak düzeltilmeye çalışılmışsa da (örneğin, hava sıcaklığı azaltılıp rutubet miktarı artırılarak alev sıcaklığının kontrolü, cevher/kok oranının azaltılarak gaz geçirgenliğinin artırılması gibi) bu önlemler kok tüketiminin artması, yüksek fırın veriminin düşmesi ile sonuçlanmıştır. Bunun üzerine 1860 yıllarında Avrupa'da uygulanan fakat bu tarihi takip eden yıllarda petrol fiyatlarındaki düşüş nedeni ile üzerinde fazla araştırma yapılmayan kömür enjeksiyon sistemi yeniden gündeme gelmiştir. Böylece uzun yıllar sonra kısa aralıklarla yaşanan petrol bunalımları sonucu kömür enjeksiyon sistemi üzerinde çalışmalar yoğunlaşarak bu sistemi kullanan fırınların sayısı artmıştır (ISHII, 2000).

Yüksek fırın teknolojisi ham çelik sektörünün merkezi olup, üretim ve maliyet incelikleri hakkında çalışmalar halen devam etmektedir. Son yirmi yıla baktığımız zaman dünya çelik ihtiyacının %50–60 civarının yüksek fırın teknolojisi ile karşılandığı görülmektedir. Özellikle kömür ve cevher miktarının yeterli olduğu, hurdanın yetersiz kaldığı durumlarda yüksek enerji tüketimine rağmen yüksek fırın ile üretim kaçınılmaz olmaktadır. Üretimi arttırırken enerji maliyetlerini düşürmek için 1980'lerin başında fuel-oil yerine alternatif enerji kaynakları kullanımına gidilmeye başlandı (Waguri, 2003).

Çelik üretim sürecinin en fazla enerji tüketen kısmı yüksek fırınlar olduğu için bu noktadaki maliyet ve çevre etkilerine odaklanılmıştır. Bu bağlamda kullanılan teknolojilerden olan PCI, kullanılmakta olan kokun optimum seviyeye kadar azaltılmasıyla beraber yerine daha düşük maliyetli olan pulvarize kömürün geçmesi ve sonuç olarak yakıt ve cevher ihtiyacını azaltmak için kullanılmıştır. Pulvarize kömür enjeksiyonunun;

- i) Yüksek fırın üretiminde artış
- ii) Kok üretiminde kullanılması gereken yüksek kalite kömürlere nispeten düşük -kaliteli kömürlerin kullanılabilmesi
- iii) Fırın istikrarının yakalanması

iv) Sıcak maden kalitesinin yükselmesi, sıcak metalde “%Si” oranının artması, % S miktarının azalması gibi etkilerinden söz edilebilir (Horrocks ve ark.,1996).

Yüksek Fırına 3 ana kategoride yakıt enjekte edilebilir. Bu yakıt türleri; sıvı yakıt (örneğin yağ ve katran gibi), katı yakıt (Antrasit, bitümlü kömür ve kahverengi esmer kömür gibi) ve gaz yakıttır.

Jet teknolojisinin başarıyla uygulandığı Fransa, ABD ve Rusya gibi ülkelerde ana yakıt olarak doğal gaz enjeksiyonu yapılırken, 1980’li yılların hemen başlarında Batı Avrupa ülkeleri ve Japonya ağır yağ enjeksiyonu yerine, pulvarize kömür enjeksiyonunu kullanmaya başladılar. Çin, 1960’lı yılların başlarında kömür enjeksiyon teknolojisine başlamıştır ki bu 40 yıldan uzun bir tarihtir.

Yüksek Fırına Kömür enjeksiyonu aşağıdaki hususlarda yararlıdır;

- i) Metalürjik kok ile yer değiştirerek, kok oranını azaltmak ve Yüksek Fırın sıvı ham demir üretiminin maliyetini büyük oranda azaltmak
- ii) Yüksek Fırın Kömür Enjeksiyonu, yüksek fırın koşullarını ayarlayabilir
- iii) Yüksek Fırın Kömür Enjeksiyonu, hazne operasyon koşullarını iyileştirebilir ve düzgün, kararlı bir yüksek fırın operasyonuna olanak tanır.
- iv) Yüksek Fırının hava sıcaklığının arttırılmasına ve oksijen zenginleştirmesine yararlı koşullar yaratır. Bu, pulvarize kömür enjeksiyonunun, tüylerden önceki teorik yanma sıcaklığını düşürebilmesi nedeniyledir. Düşük teorik yanma sıcaklığının ana sebepleri şunlardır.
 - a. Pulvarize kömür enjeksiyonu, kömür gazı miktarını arttıracak ve kömür gazının ısınması ısı harcayacaktır.
 - b. Enjekte edilen pulvarize kömür daha az ısı taşır. Bir karşılaştırma yapacak olursak; Tüye giren kok tam olarak 1450–1500 °C’ ye ısıtılır. Enjekte edilen pulvarize kömürün ısısı ise 1000 °C’ yi geçmez.
 - c. Pulvarize kömürdeki hidrokarbonların çözünmesi ısı emer.
- i) Enjekte edilen pulvarize kömür kok’tan daha fazla hidrojen taşır. Hidrojen, kömür gazının indirgeme gücünü yükseltir. Ve nüfuz edilebilirliğini /geçirgenliğini arttırır. Ayrıca cevherin indirgenmesinde ve yüksek fırınların işletme koşullarının iyileştirilmesinde yararlıdır.

- ii) Enjekte edilen pulvarize kömür, kısmen kok ile yer değiştirir. Bundan dolayı, sadece kok arzını azaltmakla kalmaz, kok tesisi için gerekli yatırım ve inşaat giderlerini de azaltır. Böylece kok tesisinden kaynaklanan çevresel kirliliğin de önüne geçilmiş olur (Gathergood, 1988).

1.4.1.Yüksek Fırın Kömür Enjeksiyon Teknolojisinin Gelişmesi

Kömür enjeksiyonu için makro ölçekte ekipmanların gelişimi ve gelişen ekipman seviyesi Makro ölçekte kömür enjeksiyon ekipmanları, enjekte edilen kömürün miktarının artmasına bağlı olarak dönemsel olarak gelişmiştir. Kömür enjeksiyonu ekipmanlarının gelişmesi göz önüne alınırsa, yüksek fırının gereksinimleri uyarınca enjekte edilecek kömür miktarı otomatik olarak ayarlanabilir. Kömür enjeksiyonunun ölçme kesinliği %1 hata payı ile kontrol edilebilir. Her tüylerden eşit pulvarize kömür enjeksiyonu ise %3 sapma ile kontrol edilebilir.

Yüksek Fırın Kömür enjeksiyonu oksijen zenginleştirmesi 1000 °C' ulaşan hava ile;

Oksijen zenginleştirmesi olmadığında: $PCI < 100 \text{ kg/TSM}$

Oksijen zenginleştirmesi olduğunda: $PCI > 100 \text{ kg/TSM}$

Oksijen zenginleştirmesinin %1 artması halinde, PCI oranı 13 kg/TSM oranında artar (Cooper ve Gathergood, 1988).

Bitümlü kömür (maden kömürü) ve antrasitin, veya bunların karışık enjekte edilmesi şeklinde enjeksiyon yapılabilir. Enjeksiyon için kullanılan kömürlerden Antrasitin avantajları; Yüksek karbon içeriği, düşük uçucu madde miktarı ve emniyetli enjeksiyondur. Ancak; Yüksek Tutuşma noktası, sert kömür kalitesi, zor öğütülebilirlik, pulvarizasyon sırasında yüksek enerji tüketimi vardır.(olumsuz özellikleri) Bitümlü kömürün avantajları; Yüksek uçucu madde, iyi bir yanma performansı ve yüksek hidrojen içeriğine sahip olması yüksek fırının düzgün şekilde işletilmesine yardımcı olur. Buna ilave olarak, kömür kalitesi yumuşaktır. Ve öğütülmesi kolaydır. Öğütme için enerji tüketimi düşüktür. Ancak; Bitümlü kömürün enjeksiyonu kolay yangına ve patlamaya neden olabileceğinden gerekli korunma tedbirleri alınmalıdır.

Yoğun faz taşınımı: Yüksek Fırına kömür enjeksiyonu pnömatik iletim ile olur. Seyreltik faz transferi: Hız >20 m/sn, pulvarize kömür enjeksiyonu $5-30$ kg/m³ Yoğun faz transferi: Hız < 10 m/sn, pulvarize kömür enjeksiyonu > 40 kg/m³

Yoğun faz transferinin avantajları: Yüksek enjeksiyon yoğunluğu, taşıyıcı ortamın daha az tüketimi, boru hattı içinde pulvarize kömürün daha yavaş hızda akışı, boru hattı ve ekipmanının daha az aşınımı, enerji tasarrufu, pulvarize kömür enjeksiyon miktarının artışı. Yoğun faz transferinin dezavantajları; Komplike donanım, yüksek maliyet, pulvarize kömür kalitesinde titizlik ihtiyacı, yüksek iletişim ortam basıncı. Yüksek Fırın Kömür Enjeksiyonu Prosesi ana olarak; Ham kömürün depolanması ve taşınması, pulvarize kömürün hazırlanması, pulvarize kömürün nakledilmesi, pulvarize kömürün enjeksiyonu, kurutucu gazın hazırlanması ve sürücü güç sisteminden oluşur (Erdemir, 2001).

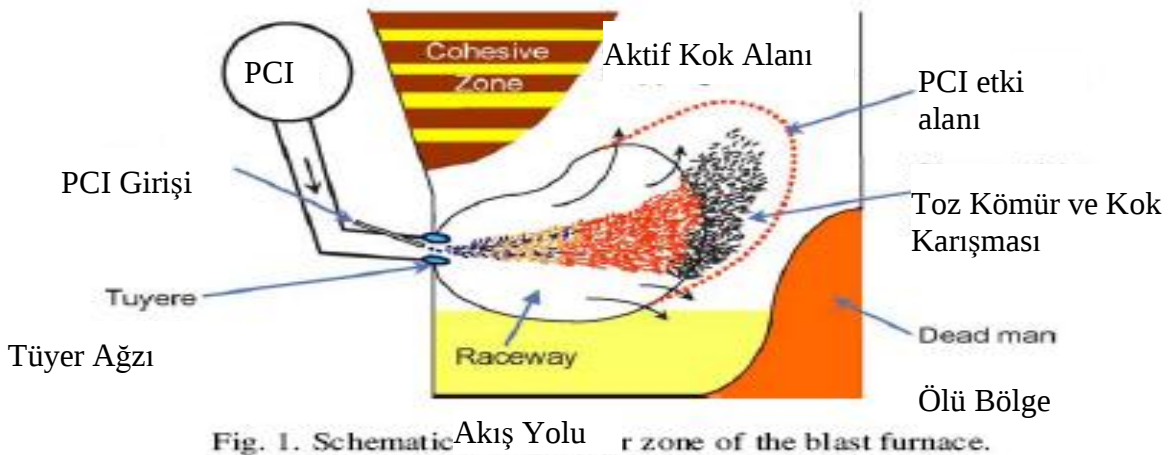


Fig. 1. Schematic of the pulverized coal injection process in the race zone of the blast furnace.

Şekil 1.1. Yüksek Fırına Pulvarize Kömür Enjeksiyonu Yapılması (Erdemir, 2000)

1.4.2. Yüksek Fırına Enjeksiyonda Kullanılan Kömürler

Peat (Turba, genç kömür): Turba, bitkilerden yeni dönüşmüş en genç kömürdür. Yapısında bitki artıklarının izini taşır. Ve çikolata kahverengi veya siyahımsı kahverengi, pürüzlü bir maddedir. Turba'nın düşük kalitesi ve güçlü su emilimi vardır. Tabii nem içeriği normalde %40'ın üzerinde, hatta bazen %85-95'e kadar yükselebilir. Açık sahada kurutulması gerekir. Açık havada kurutulduktan

sonra hacimsel yoğunluğu 300-450 kg/m³ ve gerçek yoğunluğu 1.29-1.64 g/m³'dür. Kimyasal bileşimine bakacak olursak, diğer kömür çeşitleriyle karşılaştırıldığında; oksijen ihtivası en yüksek olan (%28-38'e kadar yükselir.), karbon içeriği ise göreceli olarak düşük olan bir kömür cinsidir. İşletme koşullarında, Turba'nın yüksek uçucu madde, iyi yanabilirlik, güçlü reaktivite, düşük kükürt içeriği, düşük kül erime noktası, düşük mekanik direnç ve uzun mesafelerde taşınmaya uygunsuzluk gibi özellikleri vardır. Bu sebeple, endüstriyel değeri çok yüksek olmayıp sadece yerel yakıt olarak kullanmaya uygundur.(Acirl Ltd. 2007)

Linyit (Kahverengi) kömür: Kahverengi kömür, Turba'nın daha ileri karbonizasyonundan oluşur. Adı, ısıtıldığı zaman kahverengi renge dönme özelliğinden gelir. Turba ile karşılaştırıldığında, kahverengi kömürde yüksek yoğunluk, yüksek karbon içeriği, düşük hidrojen ve oksijen içeriği, düşük uçucu madde miktarı var olup, hacim yoğunluğu 750–800 kg/m³'tür.Kahverengi kömürün servis performansına bakarsak; zayıf yapışkanlık, çok güçlü su emilimi, oksidasyon ve kendi kendine yanma özelliği vardır. Madenden yeni çıkarılmış kahverengi kömürün nispeten yüksek mekanik dayanımı vardır. Ancak, kolayca hava alır ve havada kırılır. Bu sebeple, kahverengi kömür uzun mesafelerde taşınım veya uzun dönem depolamaya uygun değildir. Sadece yerel yakıt olarak kullanılabilir (Acirl Ltd. 2007).

Bitümlü kömür: Bu kömürün yüksek karbonizasyon derecesi vardır. Kahverengi kömür ile karşılaştırıldığında daha az uçucu maddesi, daha yüksek yoğunluğu (gerçek yoğunluğu 1,2–1,45 kg/m³), düşük su emilimi, daha yüksek karbon içeriği, daha az hidrojen ve oksijen içeriği vardır. Bitümlü kömürün en büyük özelliği; onun diğer yakıtlarda görülmeyen yapışkanlığıdır. Bu yüzden bitümlü kömür koklaştırmada ana hammaddedir. Ancak, tüm bitümlü kömürlerin yapışkanlığı olmayabilir veya koklaştırma için uygun olmayabilirler. Bu yüzden, yapışkanlık ve uçucu madde verme şiddetlerine göre bitümlü kömür; Uzun alevli kömür, gaz kömürü, yağlı kömür (fat), yağsız (lean) kömür, zayıf(meagre) kömür v.s. şeklinde sınıflandırılabilir. Bunların arasında; uzun alevli kömür ve gaz kömürü en yüksek uçucu madde içeriğine sahip, yanmaları kolay ve bundan dolayı kömür gazı üretimine uygundurlar. Koklaşan kömürün iyi koklaşma özelliği vardır ve

metalürjik kok üretimi için uygundur. Ancak, koklaşan kömürün doğal rezervi fazla değildir. Koklaşan kömürden tasarruf etmek için elde edilen kok kalitesi etkilenmeden, koklaşan kömür kullanımda diğer tip kömürlerle karıştırılacaktır. Düşük koklaşma özelliğine sahip tüm bitümlü kömürler, yüksek fırına kömür enjeksiyonu için kullanılacaktır. Özellikle, çok düşük koklaşma özelliğine sahip uzun alevli kömür, yağsız kömür gaz kömürü bunun için kullanılacaktır. (Acirl Ltd. 2007)

Antrasit: En yüksek mineralizasyon derecesine sahip, en eski kömür cinsidir. Antrasitin düşük yoğunluğu, yüksek karbon içeriği, çok düşük uçucu maddesi, sıkı ve sert yapısı, zayıf su emilimi, bundan dolayı da uzun mesafelerde nakliye ve uzun dönemlerde depolanmaya uygun özelliği vardır. Dezavantajları ise; ısıtıldığında kolayca kırılma, düşük yanabilirlik, tutuşturma güçlüğü v.s. özelliklerdir. Günümüzde, yüksek fırın kömür enjeksiyonunda kullanılan ana kömür kaynağıdır (Acirl Ltd. 2007).

1.4.3. Kömürün Bileşimi ve Analizi

Kömür 2 parça içerir. Bunlar; organik madde ve inorganik madde. Diğer bir ifade ile kömürün yanabilir bileşikler, kül ve su içerdiğini söyleyebiliriz. Yanabilir bileşimdeki ana kimyasal elementler karbon, hidrojen, oksijen, azot ve kükürt'tür:

- i) Karbon: Karbon içeriği %65-95'dir. (Hidro karbon ve oksid karbit). Karbon kömürdeki ana yanabilir bileşik olup, yanma sırasında çok miktarda ısı açığa çıkaracaktır. Normal olarak, kömürün kalorifik gücü karbon muhtevasıyla ilişkilidir. Ne kadar çok karbon içerirse, kalorifik gücü o kadar yüksek olur. Çizelge 1.2.'de kömür çeşitlerinin karbon içerikleri görülmektedir.

Çizelge 1.2. Kömür Çeşitleri ve Karbon İçerikleri

Kömür cinsi	Karbon içeriği (%)	Kömür cinsi	Karbon içeriği (%)
Turba	70	Yapışkan kömür	83–85
Kahverengi kömür	70–80	Güçlü yapışkan kömür	85–90
Zayıf yapışkan kömür	78–80	Antrasit	>90
Yapışkan olmayan kömür	80–83		

- ii) Hidrojen: Hidrojen içeriği %2-7'dir. (Çoğunluğu hidro karbon formundadır.) (Sudaki hidrojen dışında) Hidrojen de kömürdeki yanabilen ana elementlerdendir. Hidrojenin yanması çok miktarda ısı açığa çıkaracaktır. (Karbonun 3 katından fazla) Ancak, hidrojen içeriği, karbon içeriğinden daha düşük olup, yangın ve patlamalara sebep olur. Hidrojen, uçucu maddede var olur ve yüksek derecede karbonizasyona sahip olan kömürün daha az hidrojen içeriği vardır.
- iii) Oksijen: Oksijen içeriği %3-5'dir. (Çoğunluğu oksit formundadır) Oksijenin, yanabilir elementler olan karbon ve hidrojenle yaptığı oksit formlarında yanma mümkün olmadığı için, oksijen kömürde yanmayan bir elementtir. Karbon ve hidrojenle oksit formları oluşturduktan sonra yanabilir karbon ve hidrojen içeriği azalacak, buna ilave olarak kömürün kalorifik gücü azalacaktır. Bir miktar serbest oksijen yanmayı destekleyebilir, ama bileşiklerde bağlı oksijen yanmayı destekleyemez.
- iv) Azot: Azot içeriği %1-2'dir. Azot kömürde tutuşmayan (yanmayan) bir elementtir. Normalde, azot kimyasal reaksiyonlara katılmayacaktır. Bundan dolayı kömürde inert (reaksiyona girmeyen) bir elementtir. Azot, buharlaşma sıcaklığında NO şeklinde olacaktır. Bu ise çevresel kirliliğe yol açar. Bu yüzden zararlı bir elementtir.

- v) Kükürt: Kükürt içeriği %10'dur. (Kömürde 3 şekilde bulunur: Organik kükürt, piritik kükürt ve sülfat). Organik kükürt, kömür ile karışım halinde ve düzgünce dağılmıştır. Kükürt yanmaya katılmaz. Bu sebeple kükürt zararlı bir elementtir.
- vi) Kül: Kömürdeki yanmayan minerallerden oluşur. Külün esas içeriği oksitlerdir. Kömürdeki kül içeriği yüksek olursa, kömürdeki yanabilir bileşiklerin içeriği az olacak ve kömürün kalorifik gücü azalacaktır. Aynı zamanda, bir miktar kül, yanma sırasında yanabilir bileşikleri saracağından (kuşatacağı için) yanma tersi yönde etkilenir. Enjekte edilen pulvarize kömürdeki kül muhtevası fırın cürufuna gireceğinden, kireç taşı tüketimi ve TSM başına cüruf miktarı artacaktır. Böylece büyük oranda kok oranı artacaktır. Pulvarize kömürdeki külün ana bileşiminde: %40–60 SiO₂, %15–35 Al₂O₃, %5–25 Fe₂O₃, %1-15 CaO, %0,5-8 MgO, %1-4 Na₂O+K₂O vardır. Bu sebeple, yüksek kül içeren kömür düşük kaliteli kömürdür
- vii) Su İçeriği: Kömürün dış yüzeylerinde var olan su dış su olarak adlandırılır ve çevre havasının değişmesiyle çeşitlenir. Kömürün boşluklarında var olan su, iç su olarak adlandırılır. Bağlanma durumuna göre kömürdeki su, serbest su ve kimyasal bağlı su olarak sınıflandırılabilir. Serbest su, kömürün boşluklarında vardır ve kömürle fiziksel adsorpsiyon yoluyla bağlanır. Kimyasal bağlı su, kömürdeki minerallerle kimyasal bağ yaparak bağlanan kristal sudur. Ve mineralin kafes yapısına şekil verir. Kömürdeki serbest su, kömürün nakliyesi sırasında parçalanmasına sebep olarak, nakliye masrafını yükselttiği ve kömürün kalorifik gücünü düşürdüğü için zararlı bir elementtir. Bunlara ek olarak, kömürdeki serbest su pulvarizasyon sırasında ısı harcayacak ve pulvarizörden çıkan saatlik miktarı düşürecektir. Kömürün endüstriyel analizinde, sadece serbest su ölçülecektir. Bu gerçek nedeniyle, yüksek fırın kömür enjeksiyonu için pulvarizasyon sırasında kristal suyu kaldırmak normalde olası değildir. 200 °C ve hatta 500 °C'nin üzerinde sıcaklık bunun için gerekir. Bu sebeple, yüksek kristal içerikli bu tip kömürlerin enjeksiyonu kısmi wet blasting (yaş püskürtme)'e eş değerdir. Bu sebeple, kömürdeki su normalde safsızlık olarak kabul edilir. Kömürdeki su içeriği (W) kömürün kalitesini değerlendirir. W>15 ise yüksek sulu kömür, W< 5 ise düşük su ihtiva eden kömür ve W 5–15 arasında ise orta derece su ihtiva eden kömür olarak değerlendirilir (Bortz ve Flament, 1983).

1.4.4. Kömürün Fiziksel Özellikleri

Yüksek Fırına kömür enjeksiyonu sırasında daha iyi ekonomik ve teknik veriler elde etmek ve güvenli düzgün bir üretim sağlamak için kömürün fiziksel özelliklerinin tespiti yapılacaktır. Bu özellikler; Gözeneklilik, öğütülebilirlik, spesifik yüzey, yapışkanlık, koklaşma özelliği v.b. (Tateoka, 1993).

1.4.4.1 Kömürün Öğütülebilirliği

Kömürün öğütülebilirliği, kolayca pulvarize kömür olma derecesiyle ilgilidir. Normalde, kok kömürünü öğütmek kolaydır. Antrasit ve kahverengi kömürü öğütmek ise zordur. (toz haline öğütülemezler). Bunun yanı sıra kömürdeki su içeriğinin ve kül içeriğinin artışıyla, kömürün Öğütülebilirliği azalır. Aynı tip kömürlerde, su içeriği ve kül içeriği ne kadar yüksekse, Öğütülebilirliği o kadar düşüktür (Tateoka, 1993).

Endüstri’de öğütücüler (pulvarizörler) kömürün öğütülebilirliğine göre tasarlanırlar ve pulvarizör çıktısı ile enerji tüketimi buna göre tahmin edilir veya kömürün öğütülebilirliğine göre, belirli bir pulvarizör modeli için, kullanılacak kömürün tipi ve kaynağını seçebilirsiniz. Bir kömür tipinin Öğütülebilirliği için, harcanan elektrik enerjisi oranı bu Öğütülebilirliği saptamada kullanılır. Ve bu kömürün öğütülebilirlik endeksi olan K; $K = \frac{\text{Standart kömürün belirli ufaklığa getirilmesi için harcanan enerji}}{\text{bir kömürün aynı ufaklığa getirilmesi için harcanan enerji}}$ Standart kömür, alınan kömürün tamamen yanıp, 20 °C ‘ye soğuyuncaya kadar yanma ürünü ile salınan ısı miktarı ile alakalıdır (Sugata ve ark., 1990)

1.4.5. Kömürün İşletme Performansı

Pulvarize kömür farklı ölçülerde (1–300 µm) parçacık gruplarından oluşur. Bunların belli dağılım düzenleri vardır. Pulvarize kömürün işletme performansı, doğrudan yüksek fırına kömür enjeksiyonunu etkiler. Y.F. Kömür enjeksiyonu için kullanılan kömürün işletme performansı şunları içerir; Tutuşma sıcaklığı, kömürün

külünün erimesi, sıvılaşma derecesi, granularite (tanecik haline gelme özelliği) ve kömürün CO reaktivitesidir (Bouman ve ark., 1995).

1.4.5.1. Kömürün Tutuşma Sıcaklığı

Kömürün Tutuşma sıcaklığı, onun oksidan (hava, oksijen) ile beraber var olduğunda, ısıtıldığı zaman yanmaya başladığı sıcaklık ile ilgilidir. Diğer bir ifade ile, kömürün hava ile karışmasıyla salınan uçucu madde miktarını veren, kolayca yanan karışımın minimum Tutuşma sıcaklığıdır. Bundan dolayı, kömürün yanma noktası olarak ta adlandırılır. Kömürün kendi kendisine yanmasının tek sebebi, kömürün havadaki oksijen ile oksidasyonudur. Kendi kendine Tutuşma, kömürdeki karbon, oksijen v.s.'nin normal sıcaklık altında kolayca tutuşabilen CO, CH₄ ve ısıyı açığa çıkardığı proseslerle ilgilidir. Bu ısı zamanında dağıtılamazsa, kömür yığnında veya tabakalarında birikecek ve kömürün sıcaklığının yükselmesine sebep olacaktır. Sıcaklıktaki bu yükselme, kömürün oksidasyonunu hızlandıracak, daha fazla ısı açığa çıkaracaktır. Bu sıcaklık belirli bir kesin değere ulaştığında, kolayca tutuşabilen malzemeler yanarak kendi kendine tutuşmaya neden olacaktır. Kömürün kendi kendine tutuşması, kömürün yanma noktası düşükse kolaydır. Kömürün kendiliğinden tutuşması; pulvarizasyon sırasındaki, pulvarize kömürün taşınması ve enjeksiyonu sırasındaki patlama vakalarının ana sebebidir. Bu yüzden, kömürün kendiliğinden tutuşmasının önlenmesi çok önemlidir (Bouman ve ark., 1995).

Kömürün yanma noktasının ölçülmesinin ana amaçları şunlardır:

- i) Kömürün çürüme (bozulma) miktarını (ölçüsünü) belirlemek: Kömürün yanma noktası, kömürün bozulma derecesi ile ilgilidir. Normalde, yüksek bozulma derecesine sahip kömürün daha yüksek yanma noktası vardır. Tabloda çeşitli kömürlerin yanma noktaları görülmektedir. Çizelge 1.3'de çeşitli kömürlerin yanma noktaları verilmektedir.
- ii) Kömürün kendiliğinden Tutuşma (alevlenme) eğilimini belirlemek: Kömürün oksidasyonu yanma noktası ile alakalıdır. Kömürün kendiliğinden Tutuşma eğilimi, oksidize olmuş kömür numunesinin ve ham kömür numunesinin yanma noktaları arasındaki farktan çıkarılabilir. Normalde, ham kömür numunesinin

yanma noktası daha düşüktür ve bu yanma noktaları arası fark geniş olduğunda kendiliğinden tutuşma daha olasıdır.

Çizelge 1.3. Kömür Çeşitleri ve Yanma Noktaları

Kömür tipi	Yanma noktası (°C)
Kahverengi kömür	267-300
Uzun alevli kömür	275-330
Gaz kömürü	305-350
Yağlı (fat) kömür	340-365
Kok kömürü	355-365
Yağsız (lean) kömür	360-390
Antrasit	365-420

iii) Kömür yanma noktasının değişimine göre, kömürün oksidasyonunu belirlemek:

Bu yanma noktası, kömür oksidize olursa açık bir biçimde düşecektir. Bu yüzden, kömürün yanma noktası, kömürün oksidasyonunda çok hassas bir indekstir. Kömürün oksidasyonu, kömürün yanma noktasının ölçümü ile ölçülebilir. Sunu söyleyebiliriz; Ham kömür numunesinin, oksitlenmiş kömür numunesinin ve deokside olmuş kömür numunesinin yanma noktalarını ölçün ve kömürün oksidasyonunu hesaplamak için aşağıdaki formülü kullanılır.

Kömür oksidasyonu % = (Deokside olmuş kömürün yanma noktası(°C)-ham kömür numunesinin yanma noktası (°C x 100) (deokside olmuş kömürün yanma noktası (°C)- oksitlenmiş ham kömür numunesinin yanma noktası (°C)

iv) Çeşitli tipteki kömürlerin yanma noktaları uyarınca, pulvarizasyon ekipmanının tipini seçmek, kurutucu ortamın sıcaklığını saptamak, çeşitli işletme parametrelerinin dizaynını kontrol etmek: Kömürün oksidasyonu ve kendiliğinden tutuşması, beraberinde kömürün kül miktarını yükseltecektir. Buna ek olarak, sabit karbon içeriği ve kalorifik güç düşecek, kömürün kalitesi azalacaktır. Kömürün oksidasyonunun ve kendiliğinden tutuşmasının önlenmesi için şu önlemler alınır:

a) Kömürün hava (oksijen) yalıtımının sağlanması, örneğin kömürü suda depolamak v.s.

- b) Buldozer yardımıyla kömürün tabaka tabaka sıkıştırılması, özellikle yığın tarafında. Bir kil tabakası sererek kömürün hava ile temasını azaltmak.
- c) Oksidasyonu azaltmak için kömürü güneş ışığından uzakta yığın yapmak.
- d) Ekipmanı durdurmadan önce, sistemdeki pulvarize kömürün detaylı bir şekilde temizlenmesi (Erdemir, 2001).

1.4.5.2. Pulvarize Kömürün Akıcılığı

Pulvarize kömürün çok iyi akıcılığı vardır. Bu, yeni pulvarize edilmiş kömür gaz emebildiği ve bu gaz kömür parçacığının yüzeyinde gaz filmi oluşturarak, kömür parçacıkları arasındaki sürtünmeyi azalttığı içindir. Belirli hızdaki taşıyıcıda, pulvarize kömür taşıyıcı ile beraber akabilir, bu nedenle pulvarize kömür pnömatik şekilde iletilebilir. Ancak, uzun süreli depolamalar sonrası, kömür parçacığının yüzeyindeki gaz filmi gittikçe inceler ve statik elektrik yükü giderek kaybolur, bu sebeple pulvarize kömürün akıcılığı giderek kötüleşir ve yüksek fırına kömür enjeksiyonu için daha fazla pnömatik güç gerekir. Bu sebeple, pulvarize kömürün iyi akıcılığını muhafaza etmek için, aşırı uzun süreli stoklamalardan kaçınılmalıdır. (Normalde 8 saatten daha az) (Erdemir, 2000).

1.4.5.3. Pulvarize Kömürün İnceliği (Granülarite)

Pulvarize edilmiş kömürün İnceliği (granülaritesi), kömür partikül gruplarının büyüklüğünü verir ve pulvarizasyon sırasında enerji tüketimi için, enjekte edilen pulvarize kömürün yanma hızı için, tamamlanmayan yanma nedeniyle ısı kaybı için kesin bir önemi vardır. Bu özellik, normalde elek analizi ile saptanır. Günümüzde 2 elek analiz yöntemi dünya çapında kullanılır. Metrik sistem, İngiliz sistemi.

Metrik sistemde kalan malzeme R ile saptanır.

$$(\%) R = a / (a+b) \times 100 \%$$

Burada,

a- elek üstünde kalan yakıt, g ;

b- elek altına geçen yakıt ağırlığı, g ;

Elek üstünde ne kadar fazla parçacık kalırsa, kömür parçacıkları o kadar kalındır. Elek numarası, elekte cm^2 basına düşen deliklerin sayısına eşdeğerdir. Pulvarize edilmiş kömür inceliğini (granülaritesini) saptamada en yaygın kullanılan elekler 90 μm ve 200 μm 'dir. Örneğin R90 ve R200 gibi. (Erdemir, 2000).

1.4.5.4. Pulvarize Kömürün Patlayıcılığı

Kömürün patlayıcılığı, kömür enjeksiyon sistemi için alınacak güvenlik önlemlerini belirler. Yanabilir tozun patlaması için gerekli koşullar şunlardır.

- i) Yanabilir tozun yoğunluğu patlama üst ve alt limitleri arasındadır.
- ii) Yeterli, destekleyici oksit mevcuttur.
- iii) Tozu tutuşturmak için, yeterli tutuşturma kaynağı enerjisi vardır.
- iv) Dağılan süspansiyon toz sınırlı bir alandadır.

Yukarıdaki 4 koşul karşılandığında etrafta patlama tehlikesi var olur. Yüksek fırına kömür enjeksiyonu için pulvarize kömür, çeşitli pulvarize kömür bunkeri, kömür depolama silosu ve enjeksiyon tankı v.s.'de hapsedilir ya da kısmen kapatılır. patlayıcılığı etkileyen faktörler şunlardır:

- i) Yanabilir tozun fiziksel ve kimyasal özellikleri. Örneğin, kimyasal bileşimleri ve tanecik yapısı.
- ii) Yanabilir tozun yoğunluğu ve gaz fazının bileşimi.
- iii) Patlama için iç ve dış koşullar

Pulvarize kömürün, hava veya diğer oksidanlar ile asılı karışımı çok kolayca patlayabilir. En açık kural, patlayıcılığın yükselen uçucu madde içeriği ile artmasıdır. Normalde kolayca yanan uçucu madde içeriği %10'dan düşük ise patlama özelliği olmadığı kabul edilir, bu içerik %10'dan yüksek olduğu zaman böyle bir pulvarize kömür patlayıcıdır. Bu içerik %25'ten fazla olduğu zaman, bu pulvarize kömürün çok şiddetli patlayacağı kabul edilir. Pulvarize kömürün patlayıcılığı, onun tanecik yapısıyla da(granülarite) ilişkilidir. Daha ince pulvarize kömürün patlayıcılığı daha kolaydır. Ancak, aynı uçucu madde içeriği ve granülarite'de (tane yapısı) farklı spesifik yüzey alanlarında patlayıcılık farklı olacaktır. Bu yüzden, her tip pulvarize kömürün patlayıcılığını aletlerle ölçmek zorunludur. Bunun yanı sıra, bir sistemdeki

uygun oksijen yoğunluğunun (konsantrasyonunun) kontrolü, pulvarize kömürün tutuşmasının ve patlamasının önlenmesinde anahtardır. Sistemin oksijen içeriği, belli bir konsantrasyondan daha düşükse ($O_2 < \%14$) Tutuşma ve patlamadan kaçınılabılır. Patlayıcı bir ortamda, bir kömür için ölçülen O_2 konsantrasyonu, pulvarizasyon sistemindeki, taşıma sistemindeki, enjeksiyon sistemindeki ve basınçlandırma cihazlarındaki oksijen konsantrasyonunun saptanmasında bir temel olarak kullanılabilir(Erdemir, 2002).

1.4.5.5. Kömürün CO_2 'e Reaktivitesi

Kömürün CO_2 'e Reaktivitesi kömürdeki karbonun belirli sıcaklıkta CO_2 ile indirgenme reaksiyonunun yeterliliği ile ilgilidir.

Reaksiyon eşitliği; $C + CO_2 = 2CO$

Diğer bir deyişle, kömürün CO_2 ile CO 'a indirgenme yeterliliğidir. Reaksiyona katılan toplam CO_2 'deki, indirgenen CO_2 (CO 'e) nin yüzdesi olarak temsil edilir. Belli sıcaklık altında, reaksiyon hızı ne kadar yüksekse, kömürün yanabilirliği o kadar yüksektir.

Kömürün reaktivitesi; kömürün gazlaşması ve yanması ile yakından ilişkilidir. Doğrudan, fırındaki kömürün koşullarını yansıtır. Gazlaşma ve yanma sırasında, yüksek reaktiviteye sahip kömürün yüksek reaksiyon hızı ve etkinliği vardır. Reaktivite, fırının kömür tüketimini, oksijen tüketimini ve kömür gazındaki etkin bileşimleri doğrudan etkiler. Bu yüzden, kömür reaktivitesi gazlaşmayı veya kömür yakıtını değerlendirmede önemli bir indekstir.

Bunların yanı sıra, kömürün reaktivitesi, kömürün yanması ve gazlaşması mekanizmalarında da etkilidir. Yüksek fırına enjekte edilen kömürün güçlü reaktivitesine özel dikkat gösterin; Sadece, pulvarize kömürün yanma oranının yükselmesi ve kömür enjeksiyonunun miktarının artması değil, tüyer bölgesindeki yanmamış pulvarize kömürde yüksek fırının diğer bölgelerinde CO_2 ile Gazlaşma reaksiyonuna katılacak, böylece kokun gazlaşmasını azaltacaktır. Yapılan araştırmalar; kömürün Gazlaşma reaksiyonunun etkinliğinin kokun Gazlaşma

reaksiyonundan daha güçlü olduğunu, kokun dayanımını belli bir ölçüde koruduğunu ve fırın yükünün hava geçirgenliği için yararlı olduğunu göstermektedir.

Bunların yanı sıra, kömürün reaktivitesi kömürdeki uçucu madde içeriği ile de ilişkilidir. Yüksek uçucu madde içeren kahverengi kömür en yüksek reaktiviteye ve antrasit en zayıf reaktiviteye sahiptir (Erdemir, 2001).

1.4.5.6. Kömürün Yanma Verimi

Maksimum miktarda kömürü tüyer önünde yakabilmek ve buna bağlı olarak kok oranını azaltmak için kömürün yanma verimini sağlamak gerekmektedir. Yüksek pulvarize kömür enjeksiyonu oranına başarılı bir şekilde ulaşabilmek için fırın gaz geçirgenliğinin iyileştirilmesi ve ısı kayıplarının minimize edilmesi gerekir. Her ikisini de elde edebilmek için kömürün yanabilirliğinin iyileştirilmesi en önemli faktördür. Yüksek uçuculu kömürlerin yanma reaksiyonları düşük uçuculu kömürlere göre daha yüksektir. Bu durum kömürün verimli bir şekilde yakılarak yüksek enjeksiyon oranlarına ulaşılmasına yardımcı olur. Burada dikkat edilecek husus ise, yüksek uçuculu kömürlerin optimum oranlamasının yapılarak patlama riskini ortadan kaldırmaktır (USA Energy Department, 2002)

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 tüyer önü derinliği artar. Tüyerler önünde kömür taneciklerinin koklara çarpması, kok üzerinde termo-mekanik bir stres oluşturur. Kokun parçalanması sonucu oluşan parçacıklar ve yanmayan kömür taneleri tüyerin 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 gaz geçirgenliğinin artırılması için fırın merkezine ilave kok şarjı yapılır. Ayrıca mevcut kullanılan tüyer çapları büyütülerek gaz hızı yavaşlatılır. (Kaçar, 2001)

Pulvarize kömür enjeksiyon oranının artışı ile birlikte ortam oksijen konsantrasyonu düşer ve buna bağlı olarak kömürün yanabilirliği de düşer. Yanmayan kömür parçacıkları tüyer önünü aşarak ölü bölgeye (deadman) ve fırın içerisine yönlenir. Bunun sonucunda ise fırın içi gaz geçirgenliği düşer, sıvı geçirgenliği ve ölü bölgenin (deadman) süzme kapasitesi düşer, yanmamış kömür miktarına bağlı olarak ölü bölgenin (deadman) özellikleri bozulur. Ayrıca fırın gövde reaksiyonlarının artmasıyla yakıt oranı artar (Kaçar, 2001).

Görüldüğü gibi kömür enjeksiyonuyla beraber fırın çalışma parametrelerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Dolayısıyla kömür enjeksiyonunun verimli bir şekilde kullanılabilmesi için kömür yanma veriminin iyileştirilmesi ve prosese olan negatif etkilerinin alınacak önlemlerle bastırılması gerekmektedir.

Tüyer önünde maksimum miktarda kömürü yakabilmek için;

- i. Ortam yeterli miktarda oksijen bulunmalı,
- ii. Enjekte edilen kömür ve sıcak hava hızlı bir şekilde karışmalı, mümkün olduğu kadar geniş yanma yüzey alanına dağılarak yanma kısa bir süre içerisinde gerçekleşmeli,
- iii. Kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri uygun olmalı,
- iv. Tüyer önü (raceway) koşullarındaki kokun karbonundan önce kömürün karbonu yanmalı,
- v. Kömürün tüyer önüne (raceway) giriş hızı yavaş olmalı,
- vi. Kömür haricinde kullanılan sinter, pelet, kok gibi hammaddelerin kalitesi uygun olmalı,
- vii. Fırın gaz geçirgenliğini artırıcı tedbirler alınmalı (Kaçar, 2001).

1.4.5.7. Kömürün Enjeksiyon Oranı Etkisi

Enjeksiyon oranı artışı ile kısıtlı bir süre içerisinde kömürün oksijenle reaksiyona girip yanabilme olasılığı azalır ve yanma veriminde düşüş gözlenir. Yüksek enjeksiyon oranlarında tüyer önünde yanma fırsatı bulamayan kömürün bir kısmı diğer reaksiyonlarla bir kısmı ise yüksek fırın gazları ile birlikte taşınarak fırını terk etmektedir. Ayrıca fırın içerisinde yakılamayan kömür fırın gaz geçirgenliğini, ölü

bölge geçirgenliğini bozar, yakıt oranında artışa ve fırın prosesinin bozulmasına neden olur (Lockwood ve Takeda, 1997)

1.4.6. Yüksek Fırın Kömür Enjeksiyonu İçin Kömür Gereksinimleri

Yüksek Fırına kömür enjeksiyonunda kömür gereksinimleri 2 yönlüdür. Ham kömürde performans gereksinimleri ve pulvarize kömürde kalite gereksinimleri

1.4.6.1. Ham Kömür Performans Şartları

- i) Kül içeriği düşük olacak. Kül içeriği, kokta kullanılan ile aynı olacak. Kül içeriği ne kadar düşük olursa o kadar iyidir. Normalde, kül içeriğinin %15'den düşük olması gereklidir.
- ii) Kükürt içeriği düşük olacak. Kükürt yüksek fırın işletmeciliğinde zararlı bir elementtir ve içeriği (miktarı) ne kadar az olursa o kadar iyidir. Normalde bu muhteva < %1 olacaktır.
- iii) Kolloid (yapışkan) tabaka ince olacaktır. Bu tabaka kalın olursa, enjeksiyon koklaşmaya tabii olacak ve enjeksiyon lansı ile tüyer girişinin tıkanmasına neden olacak, böylece kömür enjeksiyonunu etkileyerek yüksek fırının normal işletilmesini etkileyecektir.
- iv) Öğütülebilirlik iyi derecede olacaktır. Yüksek fırına kömür enjeksiyonu, belirli incelikte pulvarize kömür gerektirir ve iyi öğütülebilirlik pulvarizasyon için enerji tüketimini ve pulvarizasyon maliyetini azaltabilir.
- v) Yanabilirlik iyi olacak. Yanabilirlik, kömürdeki karbonun belli sıcaklık altında oksijen ile reaksiyona girip CO₂ üretim hızı ile ilgilidir. İyi yanabilirlik, yüksek fırına enjekte edilen kömürün sınırlı alanda ve sınırlı zamanda mümkün olduğu oranda gazlaşmasına müsaade eder. Bunun yanı sıra, iyi yanabilir kömür daha kalın öğütülebilir, böylece enerji tüketimi ve pulvarizasyon maliyeti azalabilir.
- vi) Kalorifik güç yüksek olacak. Yüksek fırına enjekte edilen pulvarize kömür, ısı sağlamada ve yanma ile açığa çıkan CO ve H₂ gibi redükleyici ajanların (etmenlerin) salınımında kok ile yer değiştirir. Bu yüzden, kömürün kalorifik

gücü ne kadar yüksek olursa, yüksek fırında daha fazla ısı açığa çıkacak, böylece daha fazla kok ile yer değiştirecektir (Acirl Ltd., 2007).

1.4.6.2. Pulvarize Kömürün Kalite Şartları

i) Granülarite (tanecik yapısı):

Pulvarize Kömür Tanesi - Düşük

Spesifik Yüzey Alanı - Yüksek

Yanma Oranı - Yüksek

Pulvarizasyon İçin Enerji Tüketimi - Yüksek

Pulvarizör Çıkışı - Düşük

Pulvarizasyon Maliyeti - Yüksek

Taşıma(Transfer) - Düşük

Antrasit enjekte ederken; -200 mesh %70-%80

Bitümlü kömür enjekte ederken: -200 mesh %60-65

ii) Sıcaklık: Pulvarize edilmiş kömürün sıcaklığı 70-80 °C’de tutulacaktır. Bu, dumandaki ıslak buharın çığlenmemesini sağlar. (duman=pulvarize kömür taşıyıcısı) Çığlenme bir kere oluşursa, kondensat pulvarize edilmiş kömür ile adsorbe edilecek, taşınmayı etkileyecek ve ciddi bir “kalın barsak asılması” torbada oluşursa, boru hattını tıkayacaktır.

iii) Su içeriği: Pulvarize edilmiş kömürde su içeriğinin kontrolü, kolay taşınımına (nakliye) izin verir. Pulvarize edilmiş kömürde su içeriği yüksek olduğunda, bir taraftan kömür parçacıkları arasında yapışma artar (pulvarize edilmiş kömürün taşınmasını etkileyerek), diğer taraftan ise yanma sırasında, tüyer öncesinde pulvarize edilmiş kömürün su muhtevasının dağılması ısıyı emecek, böylece teorik yanma sıcaklığını düşürecektir. Isı hiç yükseltilemiyorsa, enjeksiyon miktarı düşürülmelidir. Bu yüzden, pulvarize edilmiş kömürde su içeriği normalde %2’nin altında tutulur (Kwasnoski ve Walter, 1994).

1.4.7. Kömür Enjeksiyonunun Yüksek Fırın Prosesine Olumsuz Etkileri

Daha önce de belirtildiği gibi, kömür enjeksiyonunda amaç, fırın şartlarında meydana gelebilecek olumsuz etkileri minimize ederek kömür enjeksiyonu yapmaktır. Kömür enjeksiyonu yapılan şartlarda;

1. Cevher/kok oranında artış,
2. Tüyer alev sıcaklığında düşüş,
3. Fırın duvarında ısı kaybı,
4. Merkezi gaz geçirgenliğinde zayıflama,
5. Ölü bölge kok aktivitesinde bozulma,
6. Tüyer seviyesi ve fırın içi basınçta artış
7. Yanma şartlarının bozulması gibi problemler ortaya çıkmaktadır (Hartley ve Maldonado, 1994).

1.5. İsdemir Yüksek Fırın Pulvarize Kömür Enjeksiyonu Operasyonu ve Teknikleri

İsdemir, Yüksek Fırın Kömür Enjeksiyonu, direkt (doğrudan) enjeksiyona göre dizayn edilmiştir. Dizayn üretim kapasitesi 150 kg/TON demir'dir. Maksimum sistem kapasitesi 200 kg/ton demirdir (Sinostell/Mecc, 2006).

Şekil 1.2 de görüldüğü gibi tüm kömür enjeksiyon sistemi 4 bölümden oluşur: Ham kömür taşınım sistemi, kurutucu gaz sistemi, pulvarizasyon sistemi, enjeksiyon sistemi.

Bitümlü kömür enjeksiyonu yapabilmek için tüm sistemin safsızlaştırılması gibi bir seri güvenlik önlemi uygulanır.

Ham kömür taşıma sistemi ham kömürü ham kömür bunkerine dağıtmak için bant taşıyıcı ve tüp taşıyıcı kullanır. Bu sistem, ham kömür by-pass sistemini ve PC1- PC7 arasındaki 7 taşıyıcı içerir. (PC2-PC6 arası tüp bant taşıyıcı) (Sinostell/Mecc, 2006).

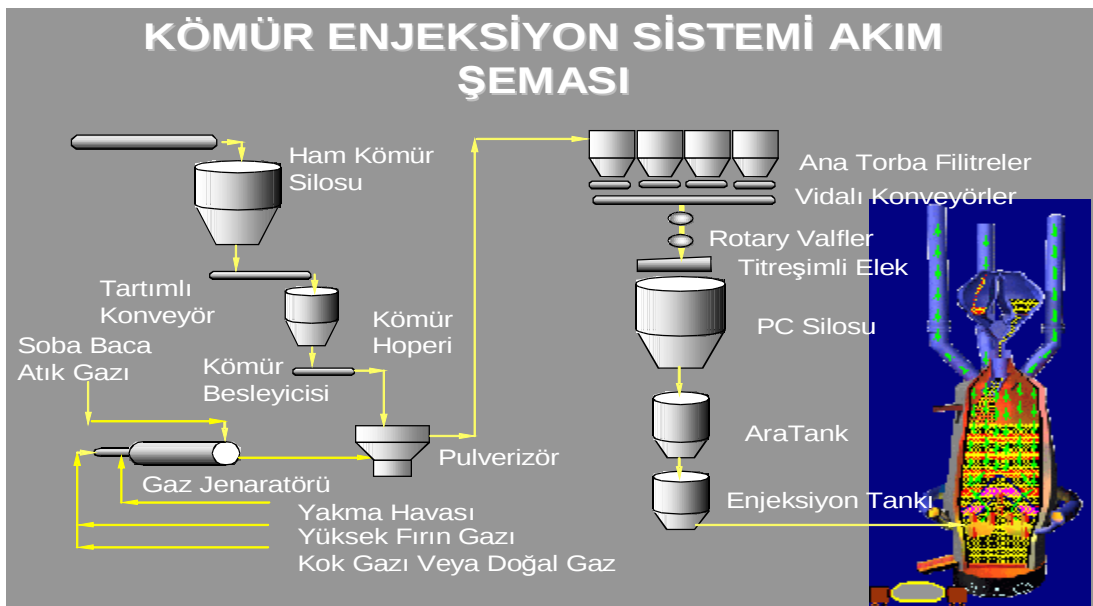
Kurutucu madde temin sistemi karışık kömür enjeksiyonu için dizayn edilmiştir. Ve sistem için patlamayı önleyecek sıkı önlemlere gereksinim duyulmaktadır.

Yüksek Fırın sıcak soba gazı (düşük sıcaklıktaki gaz), sıcak gaz fırını tarafından üretilen yüksek sıcaklıktaki gaz ile karıştırılır. Bu karışım, ham kömürü kurutmada kullanılır. Sıcak gaz fırını, silindirik yapıda 2 tabakadan oluşan yatay bir fırındır.

Pulvarizasyon sistemi; 2 adet orta hızlı pulvarizer, torbalı toplama prosesi ve tamamen negatif basınç operasyonunu benimser. Bu orta hızlı pulvarizerler, “Çin Pekin Elektrik Güç Ekipmanları Genel Fabrikası” tarafından üretilen ZGM133-N pulvarizerler olacaktır.

Torbalı toplayıcılar, “China Hafei Çimento Araştırma/Dizayn Enstitüsü” tarafından üretilen FGM3560(M) tip, gaz kutusu itmeli torbalı toplayıcı olacaktır.

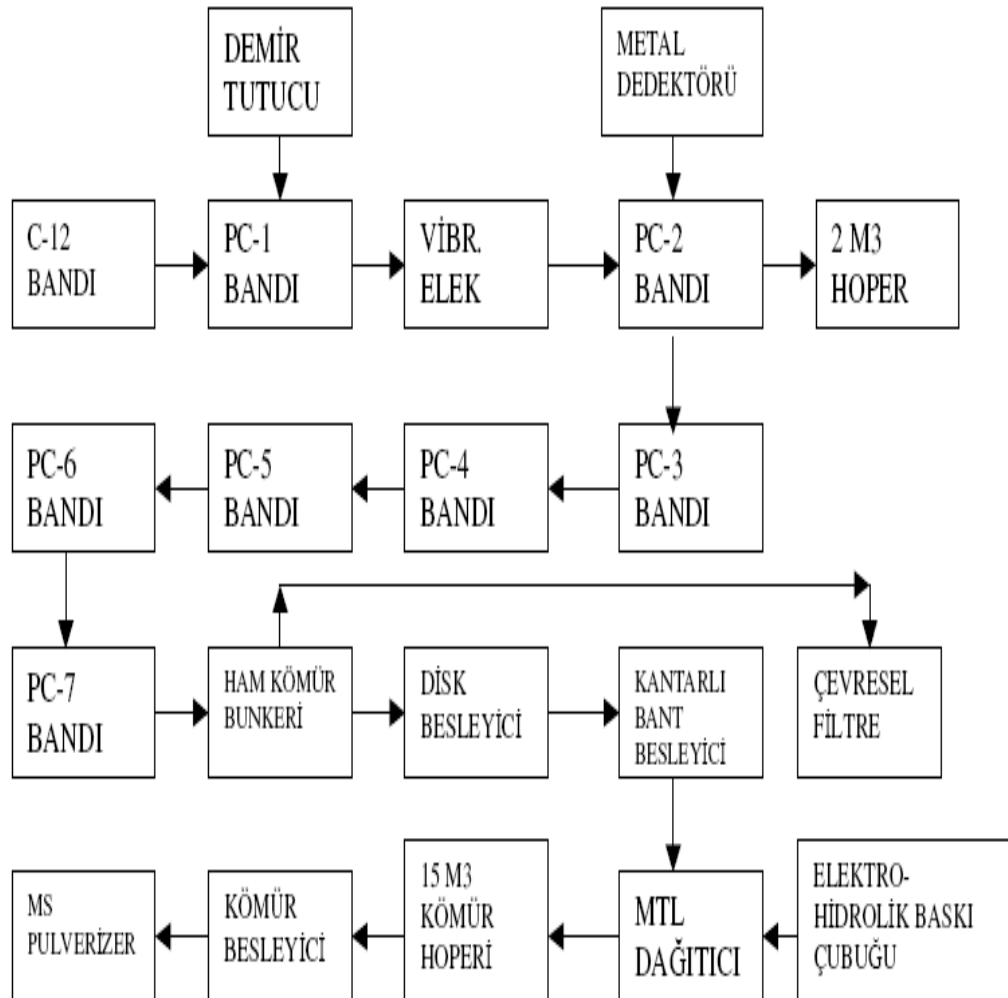
Enjeksiyon sistemi, “Çin Pekin Çelik araştırma/Yeni Metalürji Mühendisliği Teknoloji Merkezi Şirketi” tarafından üretilen ekipman olacaktır. Paralel şekilde 2 tank uyarlanacak ve tekli ana borulara bağlı tek distrübütör olacaktır. Pulvarize kömür, pulvarize kömür bunkerinden enjeksiyon tankına dağıtılacaktır. Basınçlandırma, basıncın muhafazası, enjeksiyon ve pulvarize kömürün taşıyıcı boru hattına sürekli taşınımı için azot kullanılır. Tüm enjeksiyon sistemi; enjeksiyon tankı, mikser, distrübütör ve dinamik boru ağı sisteminden oluşur. İsdemir Yüksek Fırın Kömür Enjeksiyon sistemi (Şekil 1.5.) tam bilgisayar kontrollüdür ve ikincil aletler iptal edilmiştir. Tüm operasyonlar ve kontroller bilgisayar ile gerçekleştirilecektir (Sinostell/Mecc, 2006).



Şekil 1.2. İsdemir Kömür Enjeksiyon Sistemi Akım Şeması

1.5.1 Ham Kömür Taşıma Sistemi

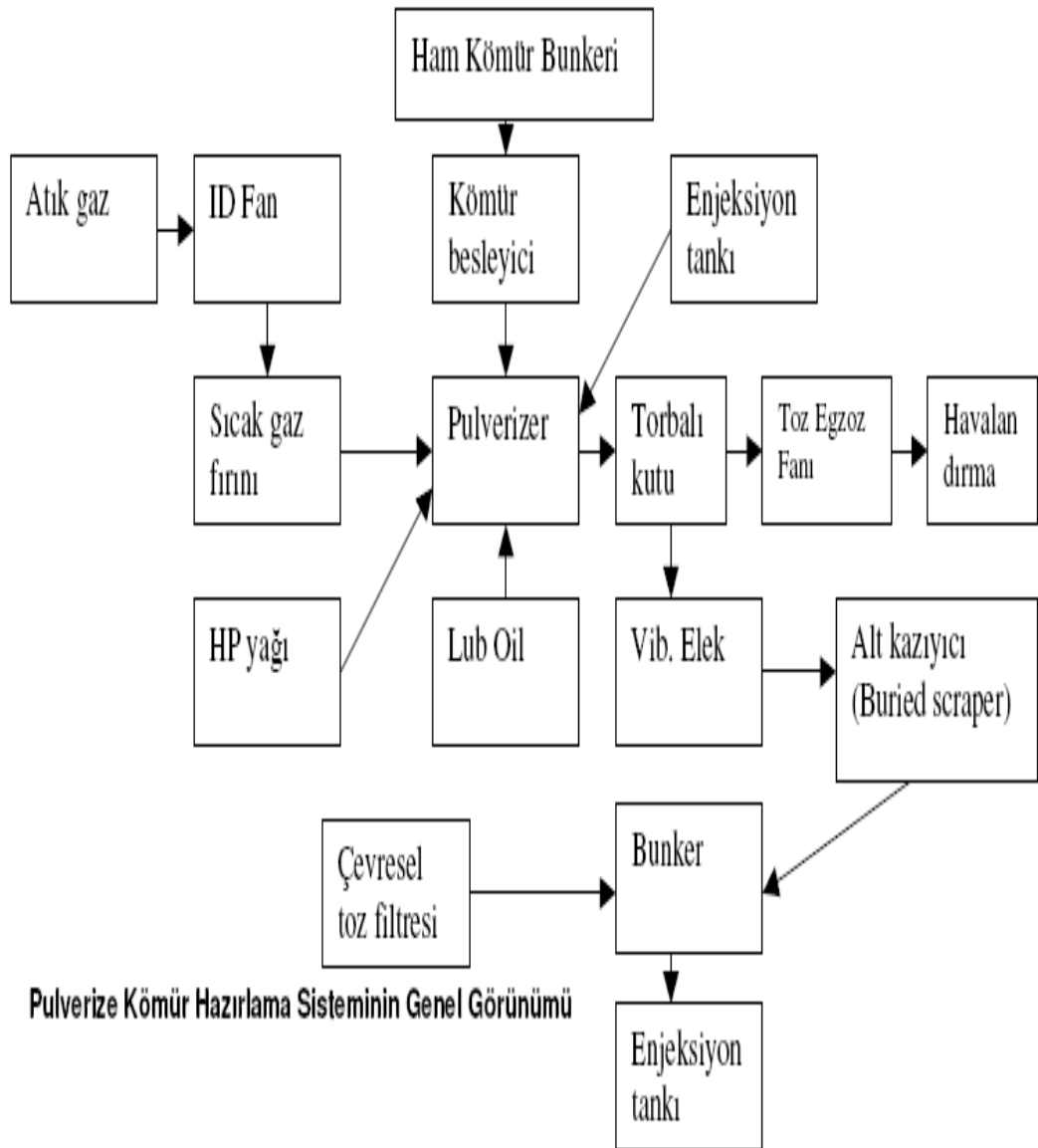
Şekil 1.3’de görüldüğü gibi PCI için ham kömür PCI tesisi ham kömür silolarına, var olan 410 no’lu transfer kulesi ve PCI tesis binası arasında kurulacak bant ve tüp taşıyıcıları kullanarak taşınacaktır. Bu; ham kömür by-pass sistemini, PC-1’den PC-7’ye kadar 7 taşıyıcı (PC-2’den PC-6 arası tüp taşıyıcı olacak), K-410 transfer kulesinin kısmi yenilenmesini ve TT-1’den TT-5’e 5 adet transfer kulesini içerecektir (Sinostell/Mecc, 2006).



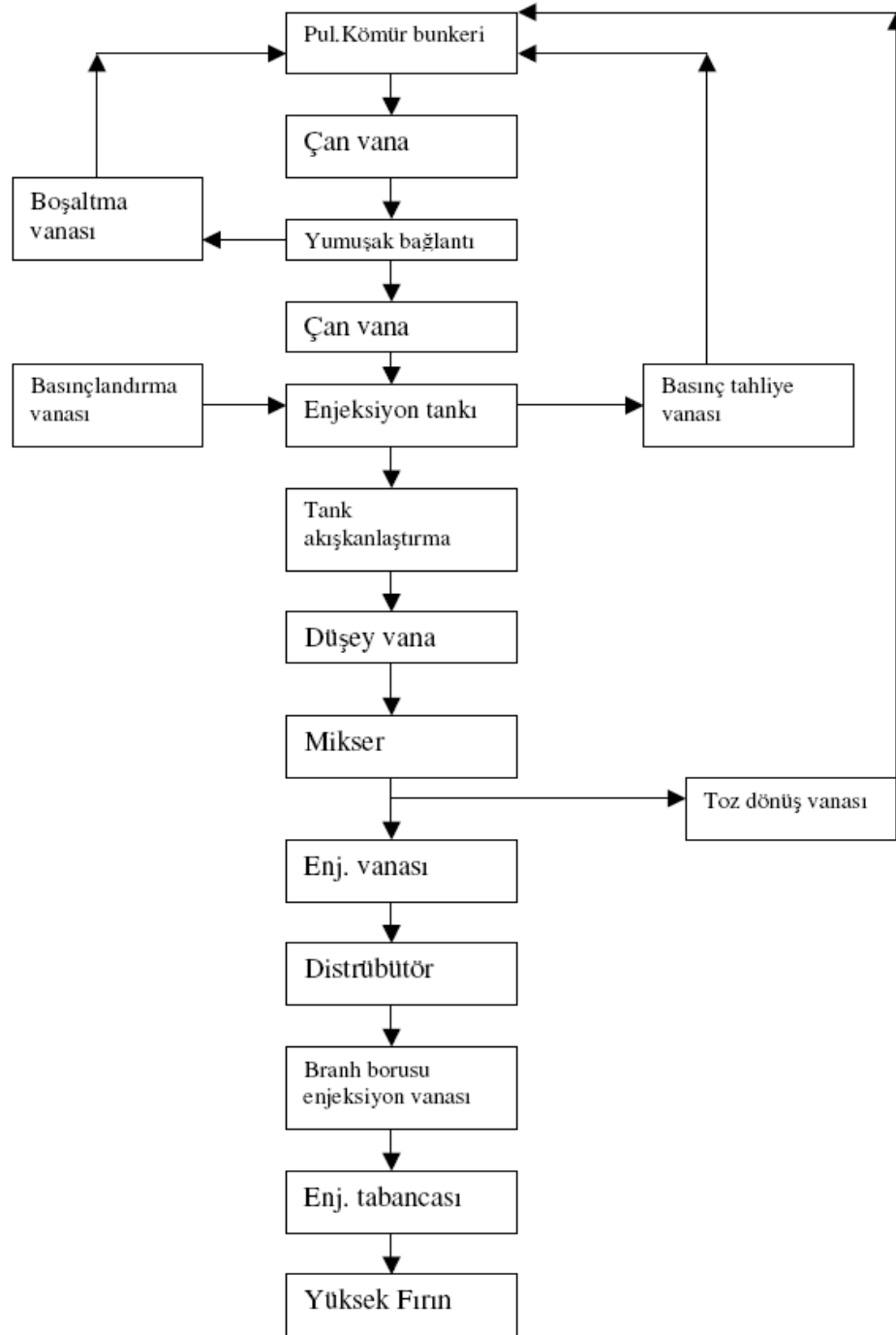
Şekil 1.3. İsdemir Ham Kömür Taşıma Ünitesi

1.5.2 Pulvarize Kömür Hazırlama (PCI) Sistemi

Sistem ana olarak şunlardan oluşur: Sıcak gaz sistemi, torbalı toz temizleyici fan, ham kömür bunker ve vibrasyonlu elek. Proses düzeni Şekil 1.4'te verilmektedir. Şekil 1.5'te ise enjeksiyon sistemi şematik görünümü vardır (Sinostell/Mecc, 2006).



Şekil 1.4. İsdemir Ham Kömür Hazırlama Ünitesi



Şekil 1.5. İsdemir Kömür Enjeksiyon Sistemi

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Shinjiro Waguri (2003) yazdığı makalesinde Japonya'nın 1981 yılından itibaren yüksek fırın prosesinde ağır yağ enjeksiyonu yerine pulvarize kömür enjeksiyonuna geçmeye başladığını ve ilerleyen yıllarda tamamen pulvarize kömür enjeksiyonuna geçtiğini belirtmiş.

ABD Enerji Bölümü 2001–2003 yılları arasında laboratuvar ve normal operasyon şartlarını paralel olarak araştırmış ve pulvarize kömür kullanımının enerji tasarrufu, maliyetin düşmesi ve çevresel etki yönünden yararlı olduğu sonucuna varmış.

Ching-Wen Chen (2005) yaptığı çalışmada pulvarize kömürün tüyer içinden çoklu akış dinamiklerini incelemiş ve en etkin operasyonun çiftli lans kullanarak elde edildiği sonucuna varmış.

Bouman ve arkadaşları (1995) yaptıkları çalışmada pulvarize kömür enjeksiyonu ile yüksek fırın üretim maliyetlerinin düştüğü, normal operasyonun çevreye verdiği zararların azaldığı sonucuna varmışlar.

Thomson ve arkadaşları (1997) yaptıkları çalışmada etkili bir pulverize kömür enjeksiyonu için gerekli şartların; enjekte edilen kömürün yanma özelliklerine, kömürün uçuculuğuna, kömürün enjeksiyon hızına, enjeksiyon basıncına, kok kalitesine, fırının yapısına bağlı olduğu sonuçlarına varmışlar.

Bortz and Flament (1983) yaptıkları çalışmada tüyer önünde meydana gelen reaksiyonlar ve fırına etkilerini incelemişlerdir. Tüyerin hazne çapı genişledikçe fırın merkezinde aktif olmayan bölgenin büyüdüğü sonucuna varmışlar.

Hutny ve arkadaşları (1996) yaptıkları çalışmada kömürün yanmasında kül miktarının etkisinin olduğu ve kok reaktivitesinin pulvarize kömürün yanma verimini etkilediğini fakat aynı zamanda kok reaktivitesi artışının gaz kompozisyonu dağılımını değiştirerek yanma bölgesinin tüyer yönünde kaymasına sebep olduğu sonucuna varmışlar.

Kobe Steel Ltd. (1991) yaptığı araştırmada pulvarize kömür oranının artışı ile birlikte ortam oksijen konsantrasyonunun düştüğü bunun da kömürün yanabilirliğini azalttığını, yanmayan kömürün de racewayi aşarak ölü bölgede toplanıp fırın çalışmasını olumsuz etkilediği sonucuna varmış.

Sugata ve arkadaşları (1990) yaptıkları çalışmada pulvarize kömür enjeksiyonu veriminin tek lans yerine çift lans kullanılarak %58'den %74'e çıkarılabileceği sonucuna varmışlar.

Steeghs ve arkadaşları (1998) yaptıkları çalışmada enjeksiyon oranının artışı ile kok tane boyutunun düştüğü bu sebeple ölü bölge geçirgenliğinin düşerek yanma verimini azalttığı sonucuna varmışlar.

Maldonado ve Hartley (1994) yaptıkları çalışmada kararlı bir 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 kömürün yanma kontrolünden ziyade fırın kararlılığını sağlayan bir regülatör olduğu sonucuna varmışlar.

Yamagata ve arkadaşları (1996) yaptıkları çalışmada fırın kararlılığını sağlamak için kömürün tüyer önü' nü terk etmeden yanması ve ölü bölge kokunu koruyacak şekilde önlemlerin alınması gerektiği sonucuna varmışlar.

Delassat ve arkadaşları (1990) yaptıkları çalışmada, enjeksiyon miktarı ile curuf oluşum prosesi arasında belirgin bir etkileşim olduğunu; tüyer önünde yanmayan kömür tozlarının curuf akışkanlığını düşürdüğü ve bunun sonucunda fırından curuf alınmasının güçleşerek fırın prosesini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varmışlar.

Maldonado ve Hartley (1994) yaptıkları çalışmada, fırın içerisinde yanmayan pulvarize kömürün fırın merkezinden yükselen sıcak gaz ile birlikte baca tozu içerisine karıştığı ve enjeksiyon miktarının artmasıyla beraber baca tozundaki karbon miktarının düştüğü sonucuna varmışlar.

p3. MATERYAL VE METHOD**3.1. Materyal**

Bu bölümde, kömür enjeksiyonunun geliştirilmesine zemin hazırlamak ve yol göstermek amacıyla 2007 yılında İSDEMİR Yüksek Fırın No:1’de Pulvarize Kömür Enjeksiyon (PCI) kullanımının yüksek fırın prosesine etkilerine ilişkin olarak yapılan deneysel çalışmalar yer almaktadır.

3.1.1. Enjeksiyon Sistemi Verileri**3.1.1.1 Enjeksiyon Kapasitesi**

- i) Maksimum Enjeksiyon Hızı: 200 kg/TSM
- ii) Normal Enjeksiyon Hızı: 150 kg/TSM
- iii) Her tüyere karşılık gelen lans sayısı: 1 adet tekli lans

3.1.1.2 Yüksek Fırın No:1 için Enjeksiyon Miktarı

- i) Günlük Üretim: 5000 TSM/gün
- ii) Tüyer Sayısı: 24 adet
- iii) Enjeksiyon Miktarı: 31.25–41.67 ton/saat

3.1.2 Pulvarize Sistemi Verileri

- i) Pulvarize Kapasitesi: 120 ton/saat (maksimum)
- ii) Pulvarize Makine Sayısı: 2 set döner öğütücü tablalı dikey silindir tip değirmen

iii) Pulvarize Edilecek Kömür Çeşitleri: Bitümlü kömür – antrasit kömürü

3.1.3 Deneyisel Çalışmada Kullanılan Kömürlerin Özellikleri

Çizelge 3.1. 2007 yılında İSDEMİR’e Alınan Kömürlerin Fiziksel Özellikleri

Numune Geliş	Toplam	Uçucu	KÜL	HGI	Kalori	CRI %	CSR %
15.01.2007	8.94	26.61	9.41	68	6841	26.90	45.77
16.01.2007	9.72	22.83	8.93	81	6891	20.29	61.17
31.03.2007	8.67	27.12	8.85	66	6883	22.58	61.98
02.04.2007	10.28	22.83	8.45	82	6930	20.63	63.89
25.06.2007	8.94	26.86	10.30	66	6710	30.08	45.98
01.12.2007	9.08	24.54	11.03	72	6649	22.82	56.33
07.08.2007	11.37	24.93	8.50	78	6770	23.34	59.59
13.09.2007	8.47	35.80	8.34	46	6691	40.23	24.30
17.09.2007	10.23	22.70	8.82	84	6849	20.98	68.98
26.01.2007	8.36	25.51	8.69	68	7024	28.22	56.12
09.04.2007	8.29	25.36	8.31	73	7090	30.31	55.73
20.04.2007	8.06	27.51	8.68	68	7036	35.26	44.17
13.06.2007	8.14	27.05	8.56	75	7013	31.71	47.72
17.08.2007	7.05	29.02	8.37	66	7090	31.90	47.65
04.09.2007	7.50	29.30	8.64	64	7050	33.99	42.21
06.11.2007	6.92	29.08	7.85	68	7143	29.78	52.12
04.05.2007	8.20	25.13	8.67	75	7041	24.01	62.29
05.05.2007	8.77	21.44	8.45	84	7014	21.42	65.83
11.09.2007	8.17	26.73	8.69	70	6959	39.05	33.82
04.06.2007	10.38	28.22	9.39	68	6728	26.01	53.05
27.11.2007	6.35	28.52	8.97	75	7122	21.27	63.00
31.01.2007	9.78	22.30	8.88	73	6890	23.82	62.44
06.04.2007	8.44	22.97	9.22	75	6921	22.68	66.48
10.07.2007	8.72	23.20	9.58	73	6852	20.93	65.36
08.10.2007	8.41	23.22	9.25	80	7154	22.09	64.51
17.11.2007	10.12	28.25	13.73	65	6386	39.92	29.91
Ortalama	8.74	26.04	9.1	71.65	6912.58	27.32	53.86

Çizelge 3.2. 2007 Yılında İSDEMİR'e Alınan Kömürlerin Kimyasal Özellikleri

Numune Geliş Tarihi	% SiO₂	% Al₂O₃	% Fe₂O₃	% S	% P₂O₅	% Na₂O	% K₂O	% P	% Zn
15.01.2007	57.280	31.198	4.837	0.138	0.203	0.202	0.717	0.203	0.034
16.01.2007	58.543	32.197	2.264	0.039	0.425	0.206	0.652	0.186	0.039
31.03.2007	58.850	27.989	4.887	0.335	0.345	0.229	0.698	0.151	0.016
02.04.2007	59.470	32.124	2.492	0.067	0.461	0.183	0.729	0.201	0.017
25.06.2007	59.572	30.114	6.737	0.269	0.961	0.198	0.684	0.130	0.034
01.12.2007	55.846	32.887	4.829	0.260	0.699	0.196	0.537	0.305	0.020
07.08.2007	59.320	33.676	3.059	0.026	0.568	0.320	0.600	0.248	0.037
13.09.2007	68.433	22.714	3.638	0.087	0.247	0.243	0.836	0.108	0.035
17.09.2007	48.664	34.791	5.721	0.146	1.320	0.730	0.540	0.577	0.033
26.01.2007	51.530	27.757	7.650	0.780	0.347	0.515	2.039	0.152	0.010
09.04.2007	51.380	28.195	8.397	0.224	0.475	0.303	2.028	0.207	0.012
20.04.2007	51.800	28.081	8.863	0.846	0.295	0.033	2.040	0.129	0.012
13.06.2007	50.200	27.166	9.150	1.010	0.352	0.510	1.860	0.153	0.012
17.08.2007	52.440	27.404	8.417	1.030	0.344	0.485	1.340	0.150	0.020
04.09.2007	52.477	26.854	8.159	1.165	0.302	0.214	2.291	0.132	0.026
06.11.2007	51.990	26.503	9.890	0.770	0.356	0.431	1.284	0.155	0.013
04,05.2007	50.390	30.459	6.927	0.703	0.919	0.286	2.052	0.401	0.012
05,05.2007	50.500	30.523	5.841	0.929	0.845	0.158	1.843	0.369	0.012
11.09.2007	53.162	26.958	8.481	1.040	0.313	0.272	2.114	0.137	0.027
04.06.2007	50.260	30.577	7.544	0.523	0.954	0.889	1.932	0.416	0.012
27.11.2007	47.140	30.693	6.465	1.130	0.933	1.140	1.800	0.408	0.0069
31.01.2007	54.860	30.376	4.751	0.174	1.264	0.081	0.830	0.552	0.013
06.04.2007	57.920	31.283	4.568	0.200	1.155	0.079	0.807	0.504	0.016
10.07.2007	57.230	30.652	4.335	0.165	1.399	0.042	0.894	0.610	0.016
08.10.2007	57.520	30.084	4.247	0.169	1.466	0.098	0.880	0.660	0.018
17.11.2007	48.760	25.279	9.071	1.150	0.168	0.394	2.636	0.161	0.012
Ortalama	54.44	29.48	6.20	1.64	0.51	0.32	1.33	0.28	0.02

Çizelge 3.3.İSDEMİR A.Ş’de Kullanılan Pulvarize Kömürün Şartları

ÖZELLİK	% DEĞER	UYG. STD.’LAR
Nem	% 8 max.	(ASTM D 2961–93)
Kül	% 11 max.	(ASTM D 3174–93)
Sabit Karbon	% 53 min.	(ASTM D 3172–89 (1993))
Uçucu Madde	% 30–36	(ASTM D 3175-89a (1993))
Kükürt	% 0.50 max.	(ASTM D 4239–94)
Külde K ₂ O	% 1,40 max.	(ASTM D 4326–94)
Külde Na ₂ O	% 0,40 max.	(ASTM D 4326–94)
Külde Toplam Alkali	% 1,8 max.	(ASTM D 4326–94)
Külde Al ₂ O ₃	% 27 max.	(ASTM D 4326–94)
Külde P	% 0,40 max.	(ASTM D 4326–94)
O ₂ Miktarı	% 10 max.	(ASTM D 3176–89)
Işık Geçirgenliği (Bitümlü kömürlerde uygulanır)	% 90 min.	(ASTM D 5263–92)

3.2. Metot

Bu çalışmada kullanılan ve özellikleri test edilen pulverize kömür genellikle ithal olup özelliklerini belirlemek için yapılan testler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Elek Analizleri (ASTM D 4239–04a) tane boyutu dağılımını tespit etmek üzere değişik elek serileri kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.1).

Numune Hazırlama (ASTM D 2013–04): Birincil kırma işlemine tabi tutulmuş numunenin analizlerinin yapılabilmesi için 0.250 mm (60 mesh) boyutunun altına ufalanması işlemidir (Şekil 3.2).



Şekil 3.1 Numune Hazırlamada Kullanılan Elekler



Şekil 3.2. Analiz İçin Numune Hazırlama Cihazı

Toplam Kükürt Tayini (ASTM D 4239-94): 0.25 gr kömür analiz numunesinin infrared ortamında toplam kükürt tespiti yapılır. Sonuçlar cihazın monitöründen izlenir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Toplam Kükürt Analizi Yapılan Cihaz

Uçucu Madde Tayini (ASTM D 3175–89a): Numunenin soğuk fırına oksijenli ortamda açık kroze ile konularak fırının 750 °C'ye ayarlanmasıyla kül tayini yapılır. 950 °C'ye çıkarılmış fırına kapalı kroze ile oksijensiz ortamda konulan numunenin uçucu madde miktarı tespit edilir.

Kalorifik Değer Tayini (ASTM D 5868–04): 0.250 mm tane boyutuna öğütülmüş yaklaşık 1 gr numunenin kullanılmasıyla kalorifik değer tayinini sağlar. Sonuçlar cihazın monitöründen dijital olarak izlenir.

Toplam Nem Tayini (ASTM D 2961–93): Yaklaşık 40 °C'de numunenin yüzey neminin daha hızlı bir şekilde tespit edilmesi için kullanılır. Yüzey nem ve analitik nemin birlikte kullanılmasıyla toplam nem tayini yapılır (Şekil 3.4).

Analitik Nem Tayini (ASTM D 3173–03): Oda sıcaklığında sabit tartıma gelmiş numunenin Etüv cihazında 105 °C'de en az iki saat kurutulmasını sağlayarak numunenin analitik nemi tespit edilir.



Şekil 3.4. Toplam Nem Tayini Cihazı

Kok ve Kömür Küllerinin X Ray Cihazıyla Element Analizi (ASTMD 4326): 0.6 gr numune 6.6 gr ergitme kimyasalı kullanılarak özel bir fırında eritilir ve kalıplara dökülür. Çıkan numune X-Ray cihazında analiz edilir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5 Kimyasal Analizlerin Yapıldığı X-Ray Cihazı

Sıvı ham demir Kimyasal Analizi (E-415-99a) : Sıvı pik potalarından özel bir kartuş yardımıyla alınan pik numunesi laboratuvarda taşlama ve zımpara makineleriyle parlatıldıktan sonra Optik Emisyon Spektrometresinde analizi yapılır (Şekil 3.6)



Şekil 3.6 Sıvı Pik Analizlerinin Yapıldığı Optik Emisyon Cihazı

3.3. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda bizzat işletme şartlarından yararlanılarak Yüksek Fırın No 1 için PCI kullanmaya başlamadan önce ve sonra gözlemlenen fırın parametreleri ile üretim esnasında yüksek fırından alınan pik ve baca tozu numunelerinin X-Ray, Optik Emisyon ve Karbon-Kükürt tayin cihazlarıyla yapılan analizleri takip edilmiştir.

Çizelge 3.4. PCI Kullanımından Önce YF1 Üretim Parametreleri

GÜN	SHD TON/GÜN	Üflen en Hava Sıc. (°C)	Tüyer Önü Alev Sıc.(°C)	Fırın Verimi	Pik %Si Ort.	Pik %S Ort.	% C
19.04.07	2448.05	892	2206.55	1.752	0.526	0.075	36.95
20.04.07	2483.05	889	2199.35	1.771	0.573	0.076	38.77
21.04.07	2425.60	868	2182.46	1.794	0.532	0.075	35.97
22.04.07	2426.30	880	2193.38	1.783	0.565	0.087	34.65
23.04.07	2398.75	901	2221.14	1.774	0.596	0.097	36.61
24.04.07	2455.95	898	2210.83	1.779	0.553	0.105	38.53
25.04.07	2423.25	900	2214.77	1.769	0.444	0.108	41.25
26.04.07	2399.35	898	2211.38	1.758	0.579	0.097	33.52
27.04.07	2437.70	904	2218.71	1.786	0.525	0.099	40.58
28.04.07	2304.90	885	2198.72	1.791	0.504	0.115	43.61
29.04.07	2290.15	906	2230.95	1.789	0.597	0.098	39.87
30.04.07	2072.95	900	2231.63	1.790	0.498	0.088	43.99
01.05.07	2090.90	895	2206.94	1.788	0.576	0.083	37.84
02.05.07	2397.20	897	2208.65	1.803	0.558	0.106	35.42
03.05.07	2423.15	887	2195.58	1.815	0.453	0.091	36.69
04.05.07	2202.05	871	2182.31	1.798	0.550	0.075	41.29
05.05.07	2187.00	885	2173.64	1.823	0.562	0.074	36.24
06.05.07	2275.65	879	2190.9	1.824	0.549	0.082	37.69
07.05.07	2409.50	889	2198.28	1.835	0.454	0.078	44.51
08.05.07	2405.85	873	2184.81	1.822	0.462	0.085	40.05
09.05.07	2380.30	870	2179.1	1.783	0.581	0.082	39.46
10.05.07	2305.05	881	2167.91	1.789	0.488	0.072	42.58
11.05.07	2286.70	870	2183.73	1.778	0.505	0.080	36.67
12.05.07	2353.60	868	2177.98	1.786	0.474	0.088	39.47
13.05.07	2409.60	882	2193.66	1.823	0.576	0.077	37.53
14.05.07	2258.25	891	2199.4	1.826	0.563	0.083	35.82
15.05.07	2333.65	900	2211.79	1.801	0.566	0.083	33.24
16.05.07	2476.00	889	2199.86	1.806	0.461	0.075	35.68
17.05.07	2288.35	901	2218.54	1.795	0.596	0.081	36.71
18.05.07	2263.65	908	2215.93	1.798	0.550	0.078	32.55
19.05.07	2386.20	902	2235.86	1.791	0.585	0.077	35.97
20.05.07	2128.15	905	2227.38	1.808	0.592	0.084	31.26
21.05.07	2122.20	909	2233.42	1.800	0.589	0.082	32.82
22.05.07	2085.90	903	2210.6	1.797	0.596	0.094	32.17
23.05.07	2427.90	902	2228.9	1.775	0.572	0.093	32.2
24.05.07	2372.20	895	2219.05	1.779	0.525	0.084	33.92
25.05.07	2326.20	899	2211.03	1.771	0.575	0.081	35.46
26.05.07	2186.00	897	2223.5	1.784	0.507	0.077	35.07
27.05.07	2343.15	883	2191.1	1.788	0.597	0.090	31.28
28.05.07	2417.55	890	2203.71	1.792	0.533	0.083	32.57

29.05.07	2351.45	900	2212.76	1.781	0.581	0.098	32.6
30.05.07	2412.95	903	2220.99	1.777	0.567	0.086	31.48
31.05.07	2208.58	902	2213.05	1.780	0.598	0.097	38.67
01.06.08	2377.00	905	2230.51	1.768	0.550	0.101	33.62
02.06.08	2453.70	893	2208.37	1.772	0.596	0.096	37.81
09.06.08	2469.55	893	2205.66	1.759	0.517	0.088	35.06
10.06.08	2288.55	903	2215.57	1.768	0.590	0.083	38.32
12.06.08	2201.55	900	2212.57	1.764	0.594	0.082	35.12
13.06.08	2478.75	889	2221.27	1.769	0.574	0.090	32.44
14.06.08	2379.95	896	2222.97	1.773	0.505	0.082	31.29
15.06.08	2440.30	892	2204.55	1.770	0.585	0.076	35.18
16.06.08	2459.45	900	2214.04	1.768	0.568	0.079	34.75
17.06.08	2412.90	896	2204.8	1.775	0.556	0.097	38.73
18.06.08	2336.00	904	2227.62	1.779	0.587	0.096	32.29
19.06.08	2457.05	899	2234.86	1.769	0.577	0.079	34.52
20.06.08	2462.75	889	2228.88	1.783	0.564	0.088	33.64
21.06.08	2150.35	898	2233.59	1.789	0.588	0.076	36.43
22.06.08	2397.00	903	2229.67	1.802	0.523	0.075	35.21
23.06.08	2393.30	905	2236.53	1.791	0.549	0.089	32.16

Çizelge 3.5 PCI Kullanımından Sonra Oluşan YF1 Üretim Parametreleri

GÜN	SHD Ton/ Gün	HAVA SIC. (°C)	ALEV SIC. (°C)	Fırın Verimi	Pik %Si Ort.	Pik %S Ort.	% C
17.07.07	2851,40	913	2100,23	1,953	0,653	0,062	29,76
18.07.07	2702,90	915	2158,04	1,947	0,671	0,062	28,15
21.07.07	2770,95	919	2089,03	1,944	0,763	0,065	27,72
22.07.07	2719,10	923	2118,22	2,052	0,631	0,045	26,58
23.07.07	2836,65	915	2113,42	2,049	0,665	0,062	29,52
24.07.07	2668,65	916	2141,45	2,059	0,724	0,069	27,82
25.07.07	2744,50	923	2156,78	2,081	0,636	0,056	25,22
27.07.07	2676,00	916	2170,70	2,087	0,607	0,067	27,00
28.07.07	2857,95	917	2149,09	2,102	0,624	0,068	27,78
29.07.07	2582,10	925	2134,48	2,115	0,731	0,067	26,53
30.07.07	2632,45	920	2108,77	2,116	0,698	0,070	26,46
31.07.07	2854,20	919	2164,63	2,078	0,625	0,061	29,68
04.09.07	2558,35	911	2096,15	2,061	0,629	0,058	29,08
08.09.07	2503,25	913	2112,21	2,052	0,645	0,058	27,06
11.09.07	2874,65	915	2156,41	2,049	0,713	0,041	28,55
12.09.07	2783,70	917	2134,27	2,001	0,762	0,047	27,15
14.09.07	2815,20	924	2160,19	2,081	0,658	0,055	29,01
15.09.07	2654,65	918	2168,34	2,097	0,853	0,062	27,54
16.09.07	2712,25	913	2105,04	2,111	0,653	0,056	29,67

26.09.07	2583,85	918	2120,92	1,987	0,756	0,057	25,56
27.09.07	2964,35	915	2142,40	1,999	0,747	0,064	26,06
29.09.07	2534,00	926	2177,65	2,101	0,753	0,061	28,15
30.09.07	2948,45	935	2154,63	2,059	0,693	0,054	29,65
16.11.07	2627,30	916	2165,62	2,087	0,654	0,068	26,58
17.11.07	2845,55	928	2172,35	2,034	0,726	0,064	23,61
18.11.07	2630,15	921	2166,93	2,038	0,761	0,057	29,93
19.11.07	2603,80	916	2159,08	2,059	0,775	0,066	27,1
20.11.07	2640,30	919	2136,31	2,084	0,638	0,061	26,86
21.11.07	2622,00	914	2124,95	2,074	0,826	0,066	27,49
22.11.07	2654,05	923	2177,18	2,056	0,651	0,061	24,66
23.11.07	2867,70	914	2130,34	2,089	0,683	0,058	27,41
24.11.07	2742,45	920	2106,94	2,015	0,691	0,062	26,59
25.11.07	2710,95	916	2182,86	2,023	0,687	0,069	28,93
30.11.07	3045,75	923	2120,32	2,041	0,625	0,073	29,02
25.12.07	2998,65	918	2177,86	2,045	0,633	0,063	29,04
26.12.07	2692,25	915	2119,45	2,053	0,674	0,066	29,75
27.12.07	2702,50	912	2154,52	2,019	0,670	0,069	27,15
28.12.07	2943,60	911	2178,88	2,011	0,656	0,071	26,04
29.12.07	2726,30	914	2129,25	1,976	0,690	0,072	27,31
30.12.07	2790,60	913	2133,84	1,983	0,709	0,061	28,73
31.12.07	2622,80	921	2134,98	1,992	0,762	0,071	26,52
01.01.08	2650,35	918	2151,98	2,031	0,670	0,069	29,84
02.01.08	2628,45	916	2137,13	2,017	0,683	0,066	25,58
05.01.08	3029,75	915	2148,23	2,025	0,688	0,054	27,28
06.01.08	2774,15	918	2175,16	2,071	0,711	0,068	29,5
07.01.08	2650,90	921	2099,42	2,093	0,649	0,060	26,71
08.01.08	2610,90	919	2144,70	2,130	0,728	0,067	27,09
09.01.08	2774,55	914	2113,91	2,103	0,837	0,061	25,41
10.01.08	2726,25	922	2163,08	2,065	0,659	0,055	24,58
11.01.08	2668,25	920	2183,92	2,057	0,731	0,053	25,22
12.01.08	2706,95	915	2129,67	2,048	0,748	0,051	29,5
13.01.08	2888,50	917	2167,72	2,031	0,688	0,059	28,88
14.01.08	2702,50	922	2181,74	2,015	0,627	0,049	28,27
15.01.08	2804,95	918	2175,90	2,061	0,640	0,065	29,18
16.01.08	2824,15	922	2112,64	2,039	0,663	0,058	29,84
17.01.08	2556,25	914	2124,84	2,074	0,744	0,064	27,45
18.01.08	2540,20	923	2134,43	2,005	0,710	0,055	28,19
19.01.08	2882,60	912	2180,81	2,014	0,658	0,067	26,23
20.01.08	2852,30	911	2115,33	2,019	0,706	0,059	29,24

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, pulvarize kömürün yüksek fırın prosesine etkilerinin incelenmesi amacıyla, İSDEMİR Yüksek Fırın No: 1’de kullanımı esnasında yüksek fırın proses şartlarına olan etkileri incelenmiş, yapılan deney ve gözlem sonuçları ortaya konulmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, yüksek fırın prosesinin çok etkileşimli karmaşık bir proses olması ve bunun yanında prosesin her noktasının somut olarak ölçülememesinden dolayı elde edilen sonuçları tamamen formüle etmekten ziyade, prosese olan etkiler ve genel eğilimler ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar yüksek fırın fiziksel özellikleri, hammadde kalitesi, kullanılan kontrol ve teknolojik sistemlere göre de değişiklik gösterebilir.

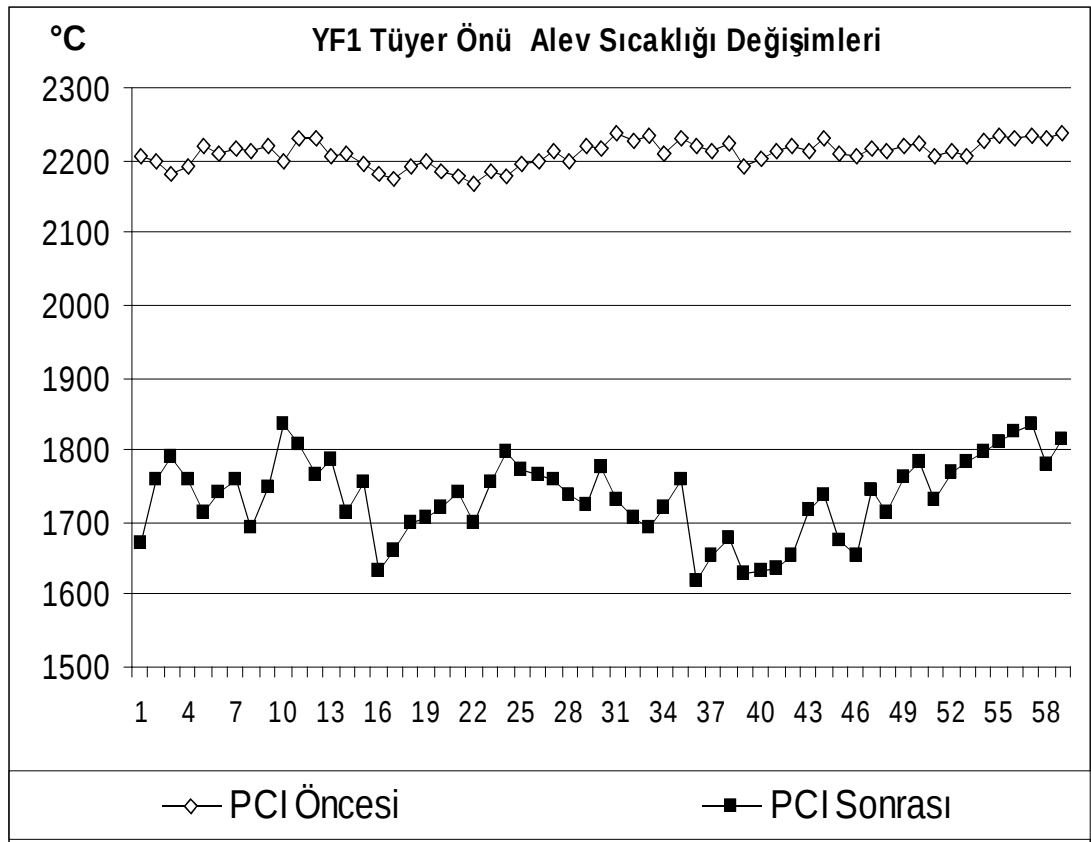
Değerlendirmeler yapılırken fırın duruş şartları öncesi ve sonrası, hammadde kalitesinin üretimi kötü yönde etkilediği durumlar göz ardı edilmiş olup normal proses şartları baz alınmıştır.

4.1. Tüyer Önü Alev Sıcaklığı Değişimi

Düzenli fırın prosesi sağlamak için alev sıcaklığının stabil ve optimum seviyede olması gerekir. Alev sıcaklığının düşmesi tüyer önü ergitme kapasitesinin düşmesi anlamına gelir ki bu da ilk bakışta temel felsefesi “yakıt oranını düşürmek” olan kömür enjeksiyonuna ters düşmektedir. Sürekli dalgalanma, yumuşama-ergime (koheziv) bölgesinin şeklinin bozulmasına ve kararsız bir fırın prosesine sebep olur. Alev sıcaklığının çok yüksek olması fırında sıcak askılanmaya ve fırın gövdesinde ısı yükünün artmasına, çok düşük olması ise, fırın iç ısı dengesinin bozulmasına, cevher redüksiyonun zayıflamasına ve proste sıkıntıların yaşanmasına yol açar.

Şekil 4.1.’de görüldüğü gibi kömür enjeksiyonu tüyer önü alev sıcaklığını düşürmektedir. Bu düşüş aynı zamanda tüyer önü ergitme kapasitesinin düşmesi anlamına gelir. Pulvarize kömürün alev sıcaklığını düşürme etkisi şu şekilde avantaja

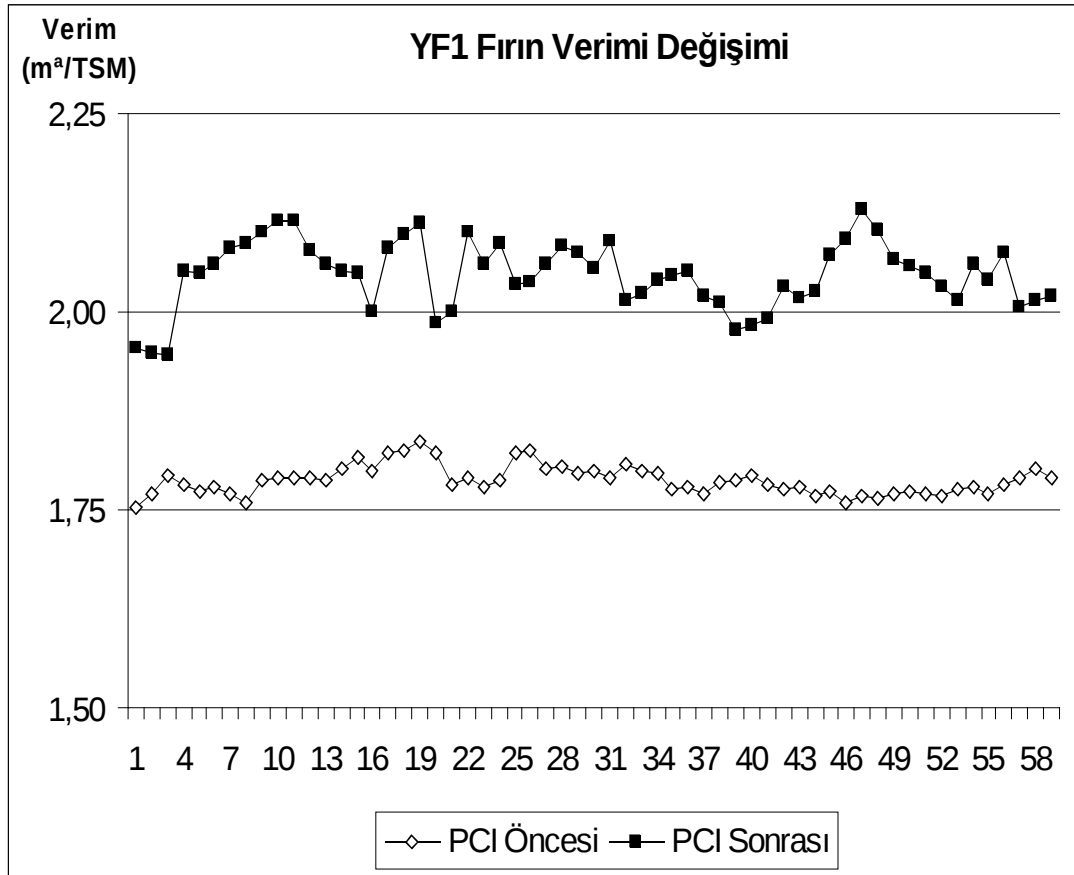
dönüştürülür; alev sıcaklığının düşmesini engellemek için, üflenene toplam oksijen miktarı, üflenene havanın sıcaklığı artırılır ve sıcak hava rutubeti düşürülür. Bu durumda, tüyer önündeki oksijen konsantrasyonu ve kömürün yanma reaksiyon hızı artar. Kömürün tüyer önündeki reaksiyonları gereği oksijen miktarının artmasıyla daha fazla CO üretilir, üretilen bu CO demir cevheri olarak kullanılan hematitin (Fe_2O_3) indirgenmesinin artması anlamına gelir (4.4.). Böylece demirin indirgenmesinde kullanılan kok miktarında azalma meydana gelir ve fırın verimliliği artar.



Şekil 4.1. PCI öncesi ve Sonrası Tüyer Önü Alev Sıcaklığı Değişimi

4.2. Fırın Verimliliği Değişimi

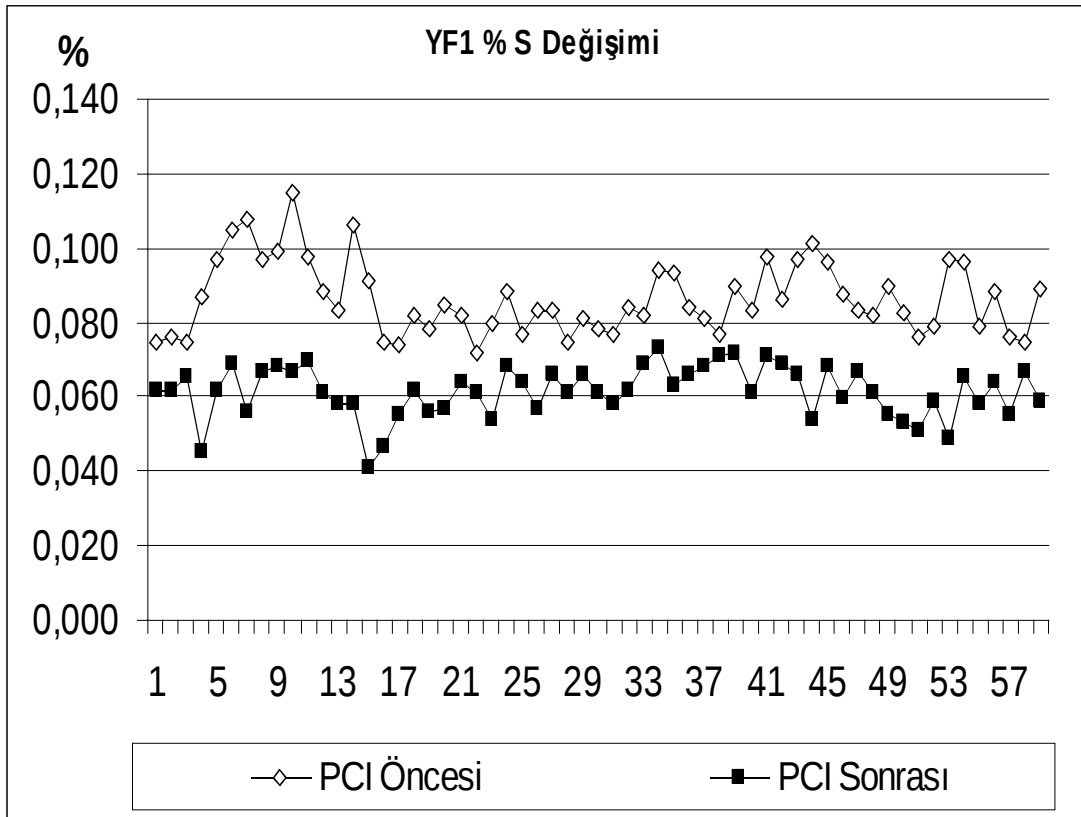
Fırın verimliliği (m^3/TSM), fırının birim faydalı hacmi başına düşen sıcak metal üretim miktarına denir. Fırınları karakterize eden ölçütlerden biridir. Yüksek fırın verimliliğini artıran en önemli etken, girdi oksijenin artırılmasıdır. Bunun da en ideal yolu kömür enjeksiyonu ile birlikte oksijen zenginleştirme yapmak ve hava sıcaklığını artırmaktan geçer. PCI kullanımıyla beraber, kömürün yanması sonucu oluşan indirgeyici gaz miktarındaki artışla beraber daha fazla cevher ergitilmesi, pulvarize kömür enjeksiyonunun oksijen zenginleştirmesine imkan tanınması ve sonucunda fırın faydalı hacminin artması ile üretimde artış gözlenir. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi kömür enjeksiyon miktarındaki artış ile fırın verimliliğinde artış gözleniyor.



Şekil 4.2. PCI öncesi ve Sonrası Fırın Verimliliği Değişimi

4.3. Sıcak Metalde % S Miktarı Değişimi

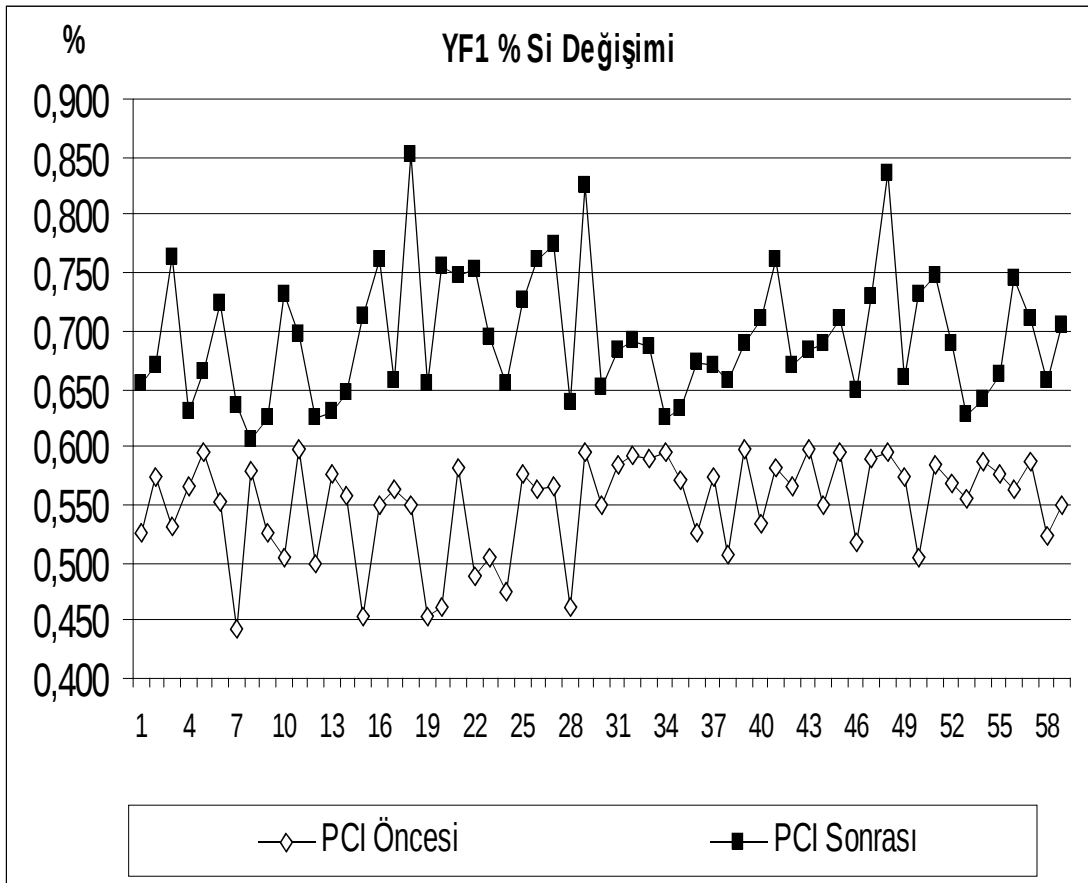
Sıcak metal kalitesini belirleyen ölçütlerden biri olan sıcak metaldeki % kükürt miktarı, hammadde girdilerinin kükürt içeriğine bağlıdır. Yüksek fırına giren girdilerden % kükürt miktarı en yüksek olan ise koktur. Kömür enjeksiyonuyla beraber kok yerine kükürt içeriği daha düşük olan enjeksiyon kömürü kullanılır ve kükürt girdisinde azalma sağlanır. Ayrıca kömür enjeksiyonuna bağlı olarak sıcak metal sıcaklığı da artar. Bunun nedeni ise koka göre reaktivitesi daha yüksek olan pulvarize kömürün, yanma veriminin elverişli olduğu şartlarda, doğrudan yüksek sıcaklık bölgesine enjekte edilerek, fırın termal kapasitesini artırması olarak ifade edilir. Sıcak metal sıcaklığı arttığında ise yüksek ısı potansiyeli oluşur ve daha fazla kükürt cürufa geçer. Şekil 4.3.'te görüldüğü gibi kömür enjeksiyonu ile sıcak metal kükürt içeriği düşmektedir



Şekil 4.3. PCI öncesi ve Sonrası % S Değişimi

4.4. Sıcak Metalde % Si Miktarı Değişimi

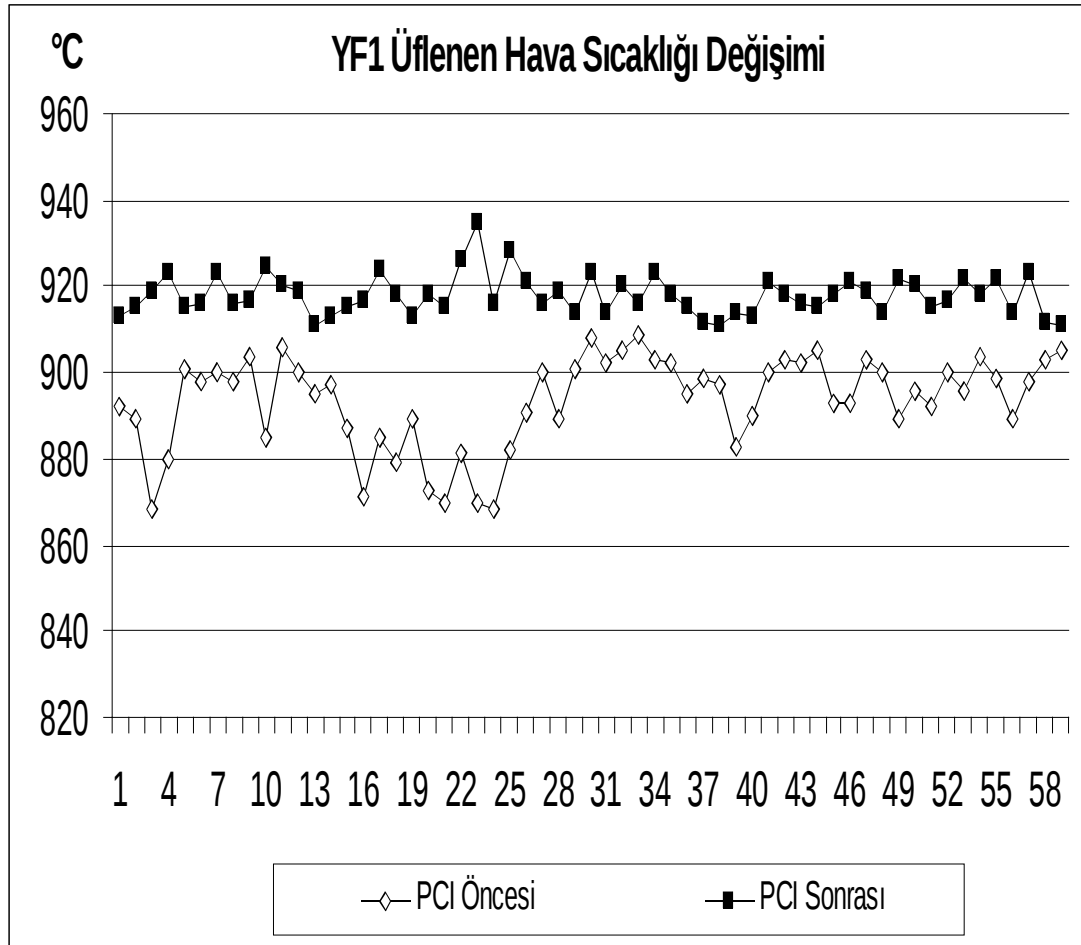
Sıcak metal kalitesini belirleyen diğer bir ölçüt ise sıcak metaldeki % Si miktarıdır. Kömür enjeksiyonu ile birlikte sıcak metal sıcaklığında artış gözlenir. Bunun sebebi ise; ergime bölgesi ve haznedeki yüksek ısı potansiyelinin artmasıyla beraber cüruf yapısında bulunan SiO_2 'nin yüksek sıcaklıktaki deadman (ölü bölge) kokunun gözenekleri arasında süzülürken kokun karbonu ile reaksiyona girmesi ve indirgenerek silise ayrışması (4.5.) sonucunda sıcak metaldeki silis miktarının artması şeklinde ifade edilir. Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi enjeksiyon miktarındaki artışa paralel olarak silis miktarının arttığı görülmüştür.



Şekil 4.4. PCI öncesi ve Sonrası % Si Değişim

4.5. Üflenlen Havanın Sıcaklık Değişimi

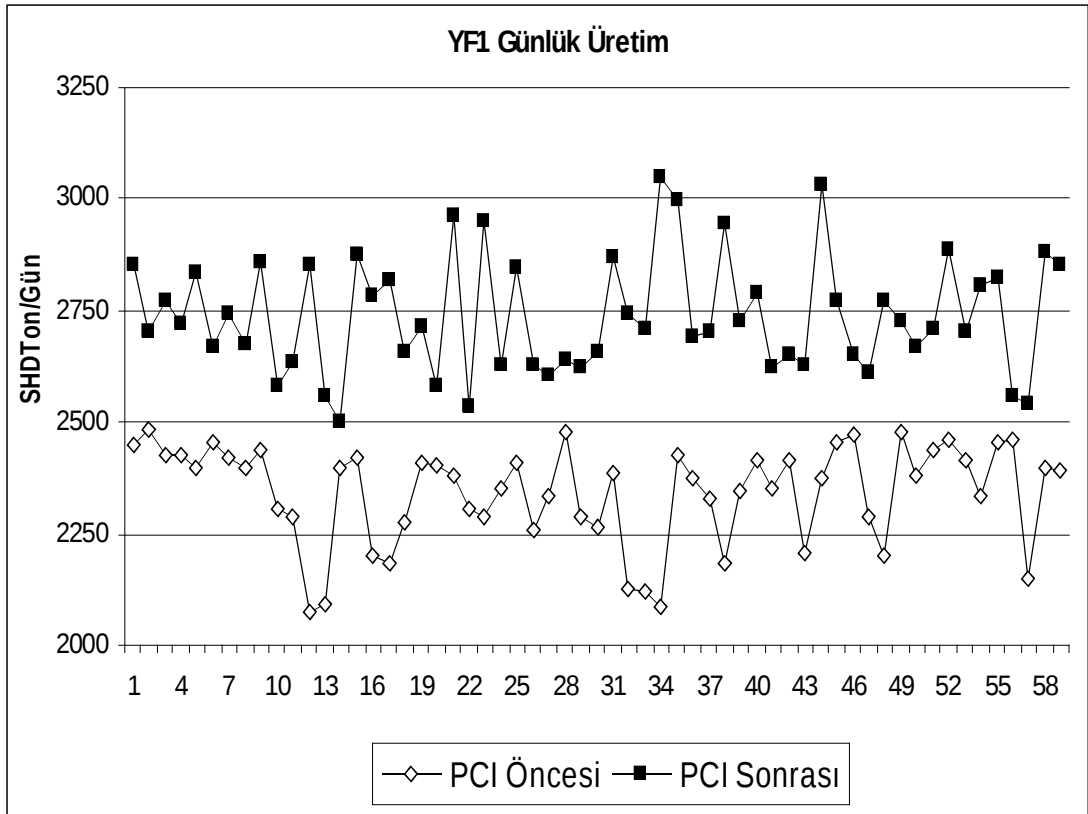
Kömür tüyer önüne girdiğinde öncelikli olarak ortamın ısınıp ısınıyor. Bir başka deyişle kömür enjeksiyonu ile tüyer alev sıcaklığı düşer. Alev sıcaklığının düşmesi ise yumuşama-ergime bölgesinin ergitme kapasitesinin düşmesi anlamına gelir. Bu nedenle, tüyer alev sıcaklığının düşmesine izin vermemek için sıcak hava sıcaklığı artırılarak alev sıcaklığı kontrol altına alınır. Sıcak hava sıcaklığının artırılması kömürün yanma reaksiyonunu artırdığı ve tüyer önündeki kömürün soğutma etkisini giderdiği için kömürün yanma verimi de artar. Dolayısıyla kömür oranı artırılarak kok oranı azaltılabilir. Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi kömür enjeksiyonu ile beraber üflenlen havanın sıcaklığı da artırılmıştır.



Şekil 4.5. PCI öncesi ve Sonrası Üflenlen Hava Sıcaklık Değişimi

4.6. Günlük Üretim Değişimi

Daha önce de belirtildiği gibi kömürün yanması sonucu oluşan indirgeyici gaz miktarındaki artış, kokun yerine daha az hacim kaplayan pulvarize kömürün kullanılması ve fırın faydalı hacminin artmasıyla beraber üretimde artış sağlanır. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi PCI kullanımıyla beraber günlük üretimde artış olduğu gözlenmektedir.

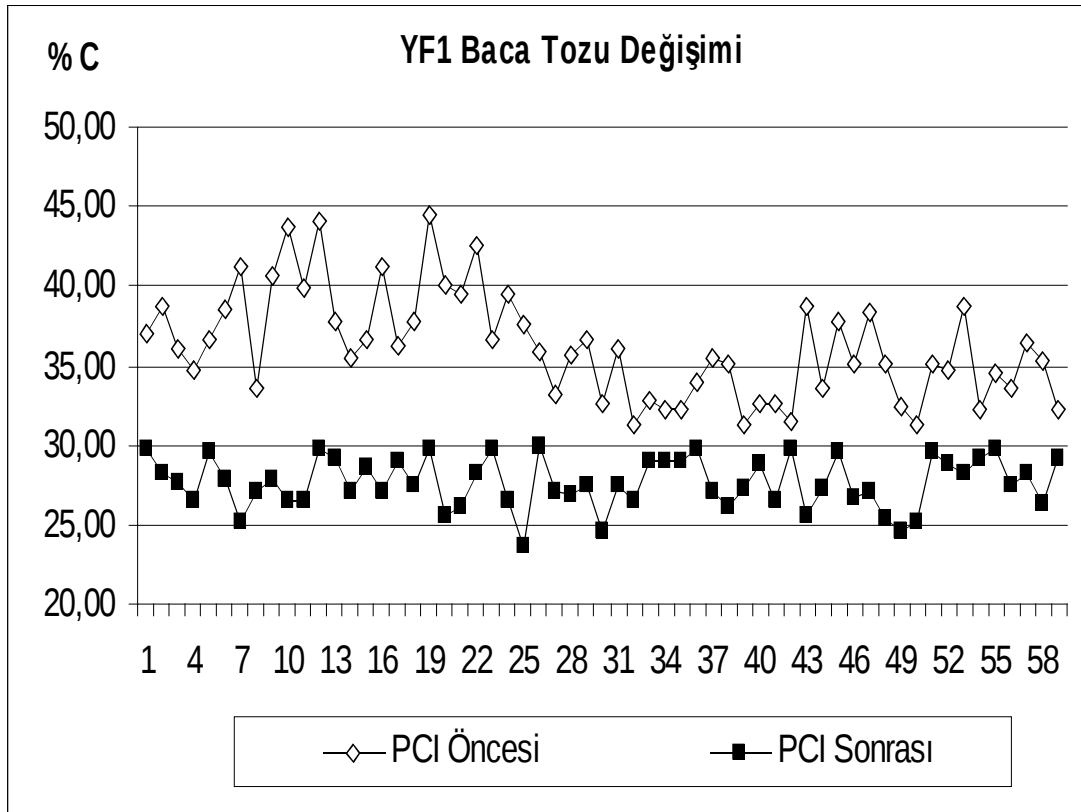


Şekil 4.6. PCI öncesi ve Sonrası Günlük Üretim Miktarı Değişimi

4.7. Baca Tozu Değişimi

Yüksek fırın, sıcak metal üretiminin yanında bir gaz jeneratörü gibi çalışır. Yüksek fırın prosesini terk eden atık gazlar başka proseslerde yakıt amaçlı olarak kullanılır. Sonraki proseslerde verimli bir şekilde kullanılabilmesi ve kalorisinin artırılabilmesi için gaz temizleme işleminden geçer. Gaz temizleme işleminin ilk adımında, yüksek hıza sahip atık gazlarla birlikte taşınan tozlar, yoğunluk farkının ve

yerçekiminin de etkisiyle ayrıştırılır. Yüksek fırını terk eden atık gazların taşıdığı bu tozlara “Baca Tozu” denir. Baca tozu içerisindeki karbon miktarı, enjekte edilen kömürün yanma verimini gösteren en önemli faktörlerden biridir. Fırın içerisinde yanmayan pulvarize kömürün bir kısmı fırın merkezinden yükselen sıcak gaz ile birlikte fırını terk ederek baca tozu içine karışır. Kömür enjeksiyonunun yüksek fırın baca tozuna etkisini incelemek için normal proses şartlarında yapılan kömür enjeksiyonu esnasında baca tozundan alınan numunelerle kömür enjeksiyonu öncesinde baca tozundan alınan numuneler incelendi. Şekil 4.7.’de görüldüğü gibi düzenli bir fırın prosesi ile enjekte edilen kömürün yanması verimli bir şekilde sağlandığında baca tozundaki karbon miktarının azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.7. PCI Öncesi ve Sonrası Baca Tozu Değişimi

5. SONUÇLAR

1. Pulvarize kömürün yüksek fırına enjeksiyonundaki temel amaç, fırın proses şartlarının bozmadan kullanılmakta olan kok miktarını azaltarak, azaltılan kokun yerine maliyeti daha düşük olan pulvarize kömür kullanmaktır.
2. Pulvarize kömür enjeksiyonunun yüksek fırın prosesine olumlu ve olumsuz etkileri vardır. Enjeksiyondan kazanç olumsuz etkilerin giderilmesi oranında sağlanabilir.
3. Pulvarize kömür enjeksiyonu, kararlı bir fırın prosesi elde edilmesinde, sıcak maden kalitesinin artırılmasında ve özellikle yakıt tasarrufu sağlanmasında çok önemli bir rol oynar.
4. Kömür enjeksiyonundan sağlanan maliyet tasarrufunun en önemli sebebi, kok oranının azaltılıp yerine maliyeti kok maliyetinin yaklaşık %50-60'ı kadar olan pulvarize kömür kullanılmasıdır.
5. Pulvarize Kömür enjeksiyonu proses şartlarında oluşan olumsuzluklara ani müdahale şansı tanır ve proses kolaylığı sağlar.
6. Pulvarize kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile beraber sıcak metal üretimi artar. Üretim artışının en önemli sebebi, kömürün yanması sonucu oluşan indirgeyici gaz miktarındaki artış, kokun yerine daha az hacim kaplayan pulvarize kömürün kullanılması ve fırın faydalı hacminin artırılmasıdır
7. Pulvarize kömür enjeksiyonu miktarının artırılması ile tüyer alev sıcaklığı düşer. Alev sıcaklığındaki bu düşüş, üflenen havanın oksijeninin ve sıcaklığının artırılmasına, hava rutubetinin azaltılmasına, dolaylı olarak kok oranının düşürülmesine ve fırın verimliliğinin artırılmasına zemin hazırlar. Alev sıcaklığı normal proses şartlarında mümkün olduğu kadar sabit tutulmalı, dalgalanmasına müsaade edilmemelidir.
8. Pulvarize kömür enjeksiyon miktarındaki artışa paralel olarak % silis miktarının arttığı görülmüştür. Bunun sebebi ise; ergime bölgesi ve haznedeki yüksek ısı potansiyelinin artmasıyla beraber cüruf yapısında bulunan SiO_2 'nin yüksek

sıcaklıktaki deadman (ölü bölge) kokunun gözenekleri arasında süzülürken kokun karbonu ile reaksiyona girmesi ve indirgenerek silise ayrışması ve sıcak metaldeki silis miktarının artması şeklinde ifade edilir.

9. Pulvarize kömür enjeksiyonu efektif olarak kullanıldığında sıcak metal kalitesini artırır.
10. Pulvarize kömür enjeksiyon miktarındaki artış sıcak metaldeki % kükürt miktarının düşmesine neden olur. Bunun sebebi ise, yüksek ısı potansiyelinin olduğu şartlarda cüruf viskozitesinin azalmasıyla beraber daha fazla kükürdün cürufa geçmesi.
11. Pulvarize kömür enjeksiyonundan maksimum verim elde etmek için önemli etkenlerden biri de kömür yanma veriminin yüksek olmasıdır. Bunu sağlayabilmek için enjekte edilen kömürün en az % 80'ninin 200 mesh (80 mikron) altında olması gerekir.
12. Sıcak hava sıcaklığının artırılması, kömürün yanma reaksiyonunu hızlandırdığı ve tüyer önündeki soğutma etkisini karşıladığı için kömür yanma verimini artırır.
13. Kömürün tüyer önü soğutma etkisi ne kadar azaltılırsa o kadar fazla kömür enjeksiyonu yapılabilir.
14. Düzenli bir fırın prosesi ile enjekte edilen kömürün yanması verimli bir şekilde sağlandığında baca tozundaki karbon miktarının azaldığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

ACIRL Ltd., Coal Use in Steelmaking, June 2007

BENNETT, P., STAINLAY, R., 2001, "PCI Coal –Status and Forecast", 1st International Meeting on Ironmaking

BEPPLER,E., GROßPIETSCH, K-H., LOUIS, G. and NELLES, L., 1999, "Impact of Coke Quality on the Operating Performance of Blast Furnace" Coke Making International 2/99, P-32-39

BORTZ, S., and FLAMENT, G., 1983, Experiments on Pulvarized Coal Combustion Under Conditions Simulating Blast Furnace Environments, Ironmaking and Steelmaking,

BORTZ, S., FLAMENT, G., 1983, Experiments on Pulvarized Coal Combustion Under Conditions Simulating Blast Furnace Envirements, Ironmaking and Steelmaking, 10

BOUMAN, W., HILL, G., and WALTER, L. L., 1995, "Blast Furnace Granular Coal Injection", Fourth Annual Coal Technology Conference, Denver, CO,

CHEN, C., 2005, Numerical Analysis For The Multi-Phase Flow Of Pulverized Coal Injection Inside Blast Furnace Tuyere

COOPER, G., GATHERGOOD, D. S., and, 1988 "Blast Furnace Injection - Why Granular Coal"? Steel Technology International

DELASSAT, Y., PICARD, M., PRADO, G., ALEBOYER, H., SIMON, O., 1990, The 9th. PTD Conference AIME

ERDEMİR, 2000–2001–2002, Yüksek Fırın Çalışma Notları

GATHERGOOD, D. S., 1988, "Coal Injection Into the Blast Furnace", International Iron & Steel Institute Committee on Technology

HAN A, J., SHENG, C., QIAO A, Y., XU A*, M., YAN B,1, R., ZHENG A, C., "Status of trace element emission in a coal combustion process: a review"

HARTLEY, B.K., MALDONADO, R.R., 1994, Operation with High Levels of Coal Injection at Scunthorpe Works, Merillville, Indiana

HASHIMOTO, S., SASAKI, S., 1989, "Coke in the Blast Furnace-Property Requirements and How to Realize Them" McMaster Symposium No.17, Coke Properties Required by the Blast Furnace for Stable Operation P-1

HORROCKS, K., MCCARTHY, M., THOMSON, A., and ZULLI, P., 1996, "Pulvarized Coal Injection in Ironmaking Blast Furnaces", The Australian Coal Review

HUTNY, W.P., GIROUX, L., ANTHONY, J., PRICE, J.T., 1996, Quality of Coal For Blast Furnace Injection, Blast Furnace Injection Symposium, Cleveland

ISHII, K., 2000, Advantage Pulvarized Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation, Research Group of PC Combustion in Blast Furnace, iron Making 54th Committee

İSDEMİR Kömür Bildirisi, 2007

İSDEMİR Web Sayfası, www.isdemir.com.tr

KAÇAR, Y., 2001, Pulvarize Kömür Enjeksiyonunun Yüksek Fırın Prosesine Etkisi, 1.Ulusal Demir Çelik Sempozyumu

KOBE STEEL LTD, 1991, Blast furnace Operation with High Coal Injection Rate

KWASNOSKI, D., and WALTER, L. L., 1993, "Blast Furnace Granular Coal Injection", Second Annual Clean Coal Technology Conference, Atlanta, GA,

KWASNOSKI, D., and WALTER, L. L., 1994, "Blast Furnace Granular Coal Injection", Third Annual Coal Technology Conference, Chicago, IL,

LOCKWOOD, F.C., TAKEDA, K., 1997, Integrated Mathematical Model of Pulvarized Coal in a Blast Furnace, ISIJ International, Vol. 37

MATHIESONA, J.G., ROGERSA, H.B, TRUELOVEB, J.S., 2004, "Toward an understanding of coal combustion"

ÖZGEN, O.N., 1986, “Yüksek Fırında Kok Kalitesi”, ERDEMİR Eğitim Yayınları 106

SİNOSTEEL/MECC, ISDEMIR Project, 2006

STEEGHS, A.G.S., SCHOONE, E.E., TOXOPEUS, H.L., 1998, High Coal Injection Rates Into The Blast Furnace of Hoogovens Ijmuiden, Netherlands

SUGATA, M., TAMURA, K., YAMAGUCHI, K., 1990, Proceedings of the 6th IISC, Vol. 2

TATEOKA, M., 1993, Development of Pulvarized Coal Injection Into Blast Furnace in Japan, Nippon Steel

USA Energy Department, 2002, Pulverized Coal Injection (PCI) Coal Combustion Behavior And Residual Coal Char Carry Over In The Blast Furnace During PCI At High Rates

WAGURI, S., 2003, Pulverized Coal Injection for Blast Furnace (PCI), Ferram vol.8, p371

YAMAGATA, Y., ITO, R., SHIBATA, K., GOTO, G., YABATA, T., MIZUGUCHI, I., 1996, High Rate of Pulverized Coal Injection at Kakogawa Blast Furnaces, Kobe Steel

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında İskenderun'da doğdu. İlköğretim ve orta öğretimi İskenderun'da bitirdikten sonra 1994 yılında ODTÜ Kimya bölümünde lisans eğitimine başlayıp Ocak 2000' de mezun oldu. 2001 yılında askerlik hizmetini yerine getirdi. Eylül 2002' de İSDEMİR A.Ş. Kalite Metalürji Müdürlüğü Spektral Analiz Laboratuvarında Kimyager olarak işe başladı. Halen aynı firmada görevine devam etmektedir. 2005 yılında Prof.Dr. Oktay Bayat Bey'in danışmanlığında Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği'nde başladığı yüksek lisansını 2008 Mayıs ayında tamamladı. Evli ve 2 çocuk babasıdır.