İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PULVERİZE KÖMÜR ENJEKSİYONUNUN YÜKSEK FIRIN PROSESİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met.Müh. Yılmaz KAÇAR
(506991403)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kelami ŞEŞEN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ercan AÇMA

: Yrd.Doç.Dr. Yılmaz KARAKAŞ

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Seramik Programı'nda hazırlanmış yüksek lisans tez çalışmasıdır.

Yüksek lisans programına çok zor şartlar altında, yaklaşık 4 saatlik mesafeden gelip gitmeme ve zaman zaman iş yeri ile yüksek lisans arasında tercih yapmak durumuyla karşı karşıya kalmış olmama rağmen, yüksek lisansa devam etme arzu ve şevkimi hiç kaybetmedim. Bana master programının başından sonuna kadar sürekli destek olan, fikirleriyle çalışmalarıma ışık tutan sevgili hocam Sayın Prof.Dr. Kelami ŞEŞEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Fabrika çalışmalarımda beni sürekli olarak araştırmacı yönde teşvik eden ve bilimsel çalışma yönüyle örnek aldığım başmüdürüm Sn. Mehmet YANMAZ'a ve çalışma hayatımda sürekli olarak destek ve teşviklerini gördüğüm Yüksek Fırınlar Müdürü Sn. M.Şevket EROL'a, tez çalışması sırasında fikirlerinden sürekli istifade ettiğim çok değerli çalışma arkadaşlarım Sn. İlker UYSAL ve Sn. Selim ERDOĞAN'a, tez sırasında işletme tecrübelerinden istifade ettiğim tüm Erdemir 1.Yüksek Fırın personeline teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tezin hazırlanması sırasında fikirlerinden istifade ettiğim sevgili arkadaşım Araştırma Görevlisi Sn. Serdar AKTAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin bu hale gelmesi için maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme ve beni seven, bana değer veren tüm dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezimi, 27 Ağustos'ta 3. yaşına girecek olan sevgili kızım Ayşenur'a ithaf ediyorum.

Haziran, 2003

Yılmaz KAÇAR

İÇİNDEKİLER **Sayfa No**

TABLO LİSTESİ V
ŞEKİL LİSTESİ Vİ
ÖZET Vİİİ
ABSTRACT İX

BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ 1

BÖLÜM 2. TEORİK İNCELEMELER 3

2.1. Pulverize Kömürün Yanma Karekteristiği 3
2.1.1. Tutuşma 5
2.1.2. Uçucu Maddenin ayrışması 7
2.1.3. Char Yanması 7

2.2. Yanma 7
2.2.1. Tek Bir Kömür Partikülünün Yanma Karekteristiği 7
2.2.2. Pulverize Kömür Grubunun Yanması 9

2.3. Pulverize Kömürün Yüksek Fırındaki Yanma Davranışı 11
2.3.1. Pulverize Kömürün Raceway'de Yanması 12
2.3.2. Kömürün Raceway'de Yanması Sonrasında Gaz Kompozisyonu Dağılımı 15
2.3.3. Kömürün Raceway'de Yanması Sonrasında Sıcaklık Dağılımı 18

2.4. Pulverize Kömür Yanma Verimini Etkileyen Faktörler 21
2.4.1. Kömür Özelliklerinin Etkisi 23
2.4.1.1. Kömür Türünün Etkisi 23
2.4.1.2. Kömür Uçucu Madde Miktarının Etkisi 25
2.4.1.3. Kömür Kül Miktarının Etkisi 27
2.4.1.4. Kömür Rutubet İçeriğinin Etkisi 28
2.4.1.5. Kömür Sabit Karbon Miktarının Etkisi 28
2.4.1.6. Kömür Maseral Yapının Etkisi 29
2.4.1.7. Kömür Ebadının Etkisi 29
2.4.2. Yüksek Fırın Proses Şartlarının Kömür Yanma Verimi Üzerine Etkisi 32
2.4.2.1. Havadaki Oksijen Oranının Etkisi 32
2.4.2.2. Hava Sıcaklığının Etkisi 33
2.4.2.3. Tüyer Hızının Etkisi 34
2.4.2.4. Fırın İçi Şarj Dağılımının Etkisi 34
2.4.2.5. Şarj Malzeme Kalitesinin Etkisi 36
2.4.2.6. Kömüre Yapılacak İlavelerin Etkisi 38
2.4.2.7. Enjeksiyon Miktarının Etkisi 39
2.4.3. Enjeksiyon Lans Sisteminin Etkisi 40
2.4.3.1. Lans Geometrisinin Etkisi 41

2.4.3.2. Çift Lans Sisteminin Etkisi 44
2.4.3.3. Oxy-Coal Lans Sisteminin Etkisi 46

2.5. Pulverize Kömür Enjeksiyonunun Yüksek Fırın Prosesine Etkisi 48
2.5.1. Raceway Koşulları Üzerine Etkisi 50
2.5.2. Alev Sıcaklığı Üzerine Etkisi 52
2.5.3. Fırın Geçirgenliği Üzerine Etkisi 53
2.5.4. Deadman Kok Yapısına Etkisi 54
2.5.5. Fırın Verimliliği Üzerine Etkisi 56
2.5.6. Sıcak Metal Kalitesi Üzerine Etkisi 56
2.5.7. Curuf Özellikleri Üzerine Etkisi 57
2.5.8. Fırın Duvarındaki Isı Yükü Üzerine Etkisi 57
2.5.9. Baca Tozu Üzerine Etkisi 60
2.5.10. Fırın İşletme Şartlarının Kontrolü Üzerine Etkisi 60
2.5.11. Kok Oranının Azaltılması Üzerine Etkisi 61
2.5.12. Maliyetler Üzerine Etkisi 63

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 67

3.1. Kullanılan Hammaddeler 65
3.1.1. Enjeksiyon Kömürleri 65
3.1.2. Kok 66
3.1.3. Sinter 66
3.1.4. Pelet 67
3.1.5. Parça Cevher 67
3.2. Kullanılan Cihaz, Alet ve Malzemeler 67
3.3. Deneysel Çalışmaların Yapılışı 69
3.3.1. Kömür Enjeksiyonunun Alev Sıcaklığı Üzerine Etkisinin İncelenmesi 69
3.3.2. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Gaz Geçirgenliği Üzerine Etkisinin İncelenmesi 69
3.3.3. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Verimliliği Üzerine Etkisinin İncelenmesi 70
3.3.4. Kömür Enjeksiyonunun Sıcak Metal Kalitesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi 70
3.3.5. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Duvarındaki Isı Yükü Üzerine Etkisinin İncelenmesi 71
3.3.6. Kömür Enjeksiyonunun Baca Tozu Üzerine Etkisinin İncelenmesi 71
3.3.7. Kömür Enjeksiyonunun Kok Oranının Azaltılması Üzerine Etkisinin İncelenmesi 72
3.3.8. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Gövde Basınçları Üzerine Etkisinin İncelenmesi 72

BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR ve İRDELEME 73

4.1. Kömür Enjeksiyonunun Alev Sıcaklığı Üzerine Etkisini 73
4.2. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Gaz Geçirgenliği Üzerine Etkisi 76
4.3. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Verimliliği Üzerine Etkisi 79
4.4. Kömür Enjeksiyonunun Sıcak Metal Kalitesi Üzerine Etkisi 80
4.5. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Duvarındaki Isı Yükü Üzerine Etkisi 83

4.6. Kömür Enjeksiyonunun Baca Tozu Üzerine Etkisi 85
4.7. Kömür Enjeksiyonunun Kok Oranının Azaltılması Üzerine Etkisi 86
4.8. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Gövde Basınçları Üzerine Etkisi 90
4.9. Kömür Enjeksiyonunun Yakıt Maliyeti Üzerine Etkisi 91

BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER 93

KAYNAKLAR 97

ÖZGEÇMİŞ 100

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	**:** Pulverize kömürün yanma süreci	**4**
Şekil 2.2	**:** Tutuşma sürecinde kömüğrün yapısal değişimi	**5**
Şekil 2.3	**:** Kömür gözenek yapısına göre alev yapısının değişimi	**6**
Şekil 2.4	**:** Tek bir kömür partikülü çevresinde oluşan alevin yüksek hızlı bir kamera ile çekilmiş görüntüsü	**8**
Şekil 2.5	**:** Tek bir kömür partikülünün yanma mekanizması	**9**
Şekil 2.6	**:** Yanma bölgesindeki parçacık konsantrasyonuna göre yanma oranı değişimi	**10**
Şekil 2.7	**:** Pulverize kömür grubunun yanması	**10**
Şekil 2.8	**:** Deney düzeneği	**11**
Şekil 2.9	**:** Enjeksiyon lans pozisyonu ve oksijen zenginleştirmenin kömür yanma verimi üzerine etkisi	**13**
Şekil 2.10	**:** Raceway reaksiyonlarının şematik görünümü	**14**
Şekil 2.11	**:** 1250 ^{o}C hava sıcaklığında ayrışan uçucu gazların enjeksiyon noktasından uzaklığa göre değişimi	**16**
Şekil 2.12	**:** Enjeksiyon noktasında uzaklığa göre gaz konsantrasyonu değişimi	**17**
Şekil 2.13	**:** Raceway'de gaz dağılımı	**18**
Şekil 2.14	**:** Oksijen oranına ve enjeksiyon noktasından uzaklığa bağlı olarak ortam gaz sıcaklığı ve kömür yanma verimi değişimi	**19**
Şekil 2.15	**:** Pulverize kömürün yanma alevi görüntüsü	**20**
Şekil 2.16	**:** Yanmakta olan iki farklı kömürün kesit görüntüsü	**24**
Şekil 2.17	**:** Kömür uçucu madde miktarının etkisi	**25**
Şekil 2.18	**:** Uçucu madde miktarının kömür yanma verimi üzerine etkisi	**26**
Şekil 2.19	**:** Uçucu madde miktarının kömür enjeksiyon miktarı üzerine etkisi	**27**
Şekil 2.20	**:** Kömür külünün enjeksiyon miktarı üzerine etkisi	**28**
Şekil 2.21	**:** Kömür tane ebadının yanma verimi üzerine etkisi	**30**
Şekil 2.22	**:** Kömür sabit karbon miktarının kömürün öğütülebilirliği üzerine etkisi	**31**
Şekil 2.23	**:** Kömür enjeksiyon tesisi akış şeması	**31**
Şekil 2.24	**:** Oksijen zenginleştirmenin kömür yanma verimi üzerine etkisi	**32**
Şekil 2.25	**:** Hava sıcaklığının kömür enjeksiyon miktarı üzerine etkisi	**33**
Şekil 2.26	**:** Kok reaktivitesinin kömür yanma oranı ve kok tozlaşması üzerine etkisi	**36**
Şekil 2.27	**:** Kok redüklenme indeksi (RDI) ve enjeksiyon oranına göre fırın içi termal ısı değişimi	**38**
Şekil 2.28	**:** Kömür enjeksiyon miktarı artışının yumuşama-ergime bölgesiüzerine etkisi	**40**
Şekil 2.29	**:** Geleneksel tek lans tipi enjeksiyon sistemi	**41**

Sayfa No

Şekil 2.30 : Geometrik lans tipleri **42**
Şekil 2.31 : Lans geometrisinin pulvberize kömürün saçılması üzerine etkisi **43**
Şekil 2.32 : Enjeksiyon lansı et kalınlığının kömürün tutuşabilirliği üzerine etkisi **43**
Şekil 2.33 : Yüksek türbülanslı lansın kömür yanma verimi üzerine etkisi **43**
Şekil 2.34 : Eksantrik çift lans sistemi **44**
Şekil 2.35 : Enjeksiyon lans tipine göre yanma yüzey alanı değişimi **45**
Şekil 2.36 : Lans tipine göre yanma verimi değişimi **45**
Şekil 2.37 : Çift ve tek lanslı enjeksiyon sisteminde pulverize kömür grubunun yanma alevi görüntüsü **46**
Şekil 2.38 : NKK'da kullanılan oxy-coal lansın kesit resmi **47**
Şekil 2.39 : Oxy-coal enjeksiyon lansı kullanımının dead-man çevresindeki kok tozlarının azaltılması üzerine etkisi **47**
Şekil 2.40 : Kömür enjeksiyonu yaparken karşılaşılabilecek problemler **49**
Şekil 2.41 : Raceway çevresi kok yapısı **51**
Şekil 2.42 : Kömür enjeksiyon miktarının artışı ile tüyuer önünde yanan kok miktarının değişimi **55**
Şekil 2.43 : Kömür enjeksiyon miktarının raceway ve dead-man kok sıcaklığı üzerine etkisi **55**
Şekil 2.44 : Tüyer hızının fırın duvarındaki ısı yüküne etkisi **58**
Şekil 2.45 : Enjeksiyon miktarının artırılmasının refrakter sıcaklığı ve tepe gazı analizi üzerine etkisi **59**
Şekil 2.46 : Ilva Taronto yüksek fırınlarında kömür enjeksiyonuna bağlı olarak yakıt maliyetindeki düşüş **63**
Şekil 4.1 : Kömür enjeksiyon miktarının alev sıcaklığı üzerine etkisi **75**
Şekil 4.2 : Kömür enjeksiyonunun fırın gaz geçirgenliği üzerine etkisi **78**
Şekil 4.3 : Kömür enjeksiyon miktarının fırın iç basıncına etkisi **79**
Şekil 4.4 : Kömür enjeksiyon miktarının fırın cevher/kok oranına etkisi **80**
Şekil 4.5 : Kömür enjeksiyon miktarının fırın verimliliği üzerine etkisi **81**
Şekil 4.6 : Kömür enjeksiyon miktarının sıcak metal sıcaklığı üzerine etkisi **82**
Şekil 4.7 : Kömür enjeksiyonunun sıcak metaldeki % Si üzerine etkisi **83**
Şekil 4.8 : Kömür enjeksiyon miktarının sıcak metaldeki % S üzerine etkisi **84**
Şekil 4.9 : Kömür enjeksiyon miktarının fırın duvarındaki ısı yüküne etkisi **85**
Şekil 4.10 : Kömür enjeksiyonunun baca tozu içerisindeki karbon miktarına etkisi **87**
Şekil 4.11 : Kömür enjeksiyon miktarının kok miktarının azaltılması üzerine etkisi **88**
Şekil 4.12 : Kömür enjeksiyon miktarının toplam yakıt oranının azaltılması üzerine etkisi **90**
Şekil 4.13 : Kömür enjeksiyon miktarının fırın gövde basınçları üzerine etkisi **92**
Şekil 4.14 : Kömür enjeksiyonunun kok maliyeti üzerine etkisi **93**
Şekil 4.15 : Kömür enjeksiyonunun toplam yakıt maliyeti üzerine etkisi **94**

PULVERİZE KÖMÜR ENJEKSİYONUN YÜKSEK FIRIN PROSESİNE ETKİSİ

ÖZET

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

Kömür enjeksiyonunun amacına ulaşabilmesi için öncelikli olarak gerekli yanma şartları sağlanmalı ve gerekli proses şartları sağlanmalı, prosese olan yan etkileri minimize edilmelidir. Aksi takdirde, kömür enjeksiyonunun tek başına artırılması ile kok oranında bir düşme kaydedilemeyeceği gibi, tam tersine yakıt oranı artması ve, proses şartlarının bozulması ile karşı karşıya kalınır.

Kömür enjeksiyonu ile çalışılan şartlarda karşılaşılan en ciddi problem, fırın gaz geçirgenliğinin bozulmasıdır. Raceway'de yanma fırsatı bulamayan kömür tanecikleri, fırının iç bölgelerinde gaz akışını engelleyerek, fırın gaz geçirgenliğinin düşmesine neden olur. Ayrıca, enjeksiyonla çalışılan şartlarda kok oranı azaltıldığından, fırın içerisinde cevher/kok oranı artar. Bu durum da fırın geçirgenliğini olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle, kömür enjeksiyonu yapılan şartlarda, merkezi gaz geçirgenliğini artırıcı tedbirler alınmalıdır.

Enjekte edilen kömürün tamamen kokun yerini alması söz konusu değildir. Kokun yüksek fırında yakıt olarak kullanımı haricinde fırın gaz geçirgenliğini sağlama ve şarj dağılımını düzenleme, termal stresleri azaltma gibi görevleri de bulunmaktadır. Oysa, kok oranının ¼'ü kadar kömür enjeksiyonu bile fırın geçirgenliğini ciddi bir şekilde bozabilmekte, fırın verimliliği düşürebilmektedir.

Pulverize kömür enjeksiyonunun, yüksek fırın prosesi üzerinde olumlu ve olumsuz çok fazla etkileri vardır. Olumsuz etkileri ortadan kaldırmak veya minimize etmek, olumlu etkilerden ise tam olarak istifade etmek gerekir. Kömür enjeksiyonunun yüksek fırınlarda verimli bir şekilde kullanımı, tamamen tüm parametrelerin optimizasyonu ile mümkündür. Fırına enjekte edilen kömürün optimum bir miktarı vardır. Aynı zamanda, kömür enjeksiyonu yapılırken modifiye edilmesi gereken tüm parametre ve proses değerlerinin de bir optimum değeri veya aralığı vardır. Aksi takdirde kömürün avantajlarından istifade edilemez.

Yüksek fırınlarda sıcak metal üretiminin yaklaşık yarısı kadar kok kullanıldığı düşünülecek olursa, kok miktarında elde edilecek çok küçük bir tasarruf bile maliyetlerin önemli ölçüde düşmesine neden olacaktır. Bu noktadan hareketle, pulverize kömürün yakıt enjeksiyonu olarak kullanılması oldukça yüksek avantajlar getirecektir. Pulverize kömür enjeksiyonu, maliyetlerde sağladığı düşüş ve kömürün en yaygın yakıt olmasından dolayı, en önemli ilave yakıt enjeksiyonu olma özelliğini devam ettirecektir.

THE EFFECTS OF PULVERIZED COAL INJECTION ON BLAST FURNACE PROCESS

ABSTRACT

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

Primarily, to reach at the target for pulverized coal injection, required coal combustion conditions must be available, all the requirements must be taken and the adverse effects of pulverized coal on blast furnace must be minimized. Otherwise, It is not possible to achieve reducing coke rate.

The most serious problem during the time working with pulverized coal injection is increasing of furnace permeability resistance. The coal particles, which is not combusted in the raceway, decrease furnace gas permeability by clogging the pores. Ore/coke ratio increases by decreasing of injection rate during the coal injection. So, it is required to increase furnace center gas permeability during the injection.

It is impossible to use only coal instead of coke as fuel. Because, the coke has another duties such as getting better gas permeability, arranging furnace inner charging conditions and reducing termal stresses in the furnace. The pulverized coal injection also at a quantity of one fourth of coke rate is enough to make worse the furnace permeability, process conditions and the productivity.

Pulverized coal injection has lots of positive and negative effects on blast furnace process. It is required to get rid of or minimized negative effects and It is required to benefit from positive effects as much as possible. The effective usage of pulverized coal in the blast furnace is possible by optimizing all the process parameters. Pulverized coal which is injected into the blast furnace has an optimum level. As well, all the process parameters have an optimum points. Otherwise, It is not possible to get benefit from using of pulverized coal injection.

If It is assumed that, the coke used as fuel approximately by the half of hot metal at blast furnaces, a small amount of coke saving will also cause to reduce of costs significantly. So, the usage of pulverized coal injection can get enormous advantages. By the aspect of decreasing costs and being common fuel, pulverized coal injection is the most preferable additional fuel injection now, and so on.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

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

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

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

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

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

Yüksek fırın prosesi çok etkileşimli, kompleks bir prosestir ve hala aydınlatılamamış, üzerinde tartışılan pek çok noktası bulunmaktadır. Yüksek fırınlarda kömür enjeksiyonunun her ne kadar 140-150 yıllık bir mazisi bulunsa da

son 10 yıl içerisinde ciddi ilerlemeler kaydedilmiştir. Geliştirilmeye çok açık noktasının bulunması ve maliyetlerde sağladığı düşüş nedeniyle, bu alanda büyük bir rekabet ve çok geniş araştırmalar ortaya çıkarmıştır. Bilindiği gibi yüksek fırında sıcak metal üretiminin yaklaşık yarısı kadar kok kullanılmaktadır. Yakıt olarak kullanılan kok'un, maliyeti kendisinden yaklaşık %40-50 daha düşük olan enjeksiyon kömürü ile yer değiştirmesi sonucunda çok yüksek oranlarda maliyet tasarrufu sağlanır.

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

2. TEORİK İNCELEMELER

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

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

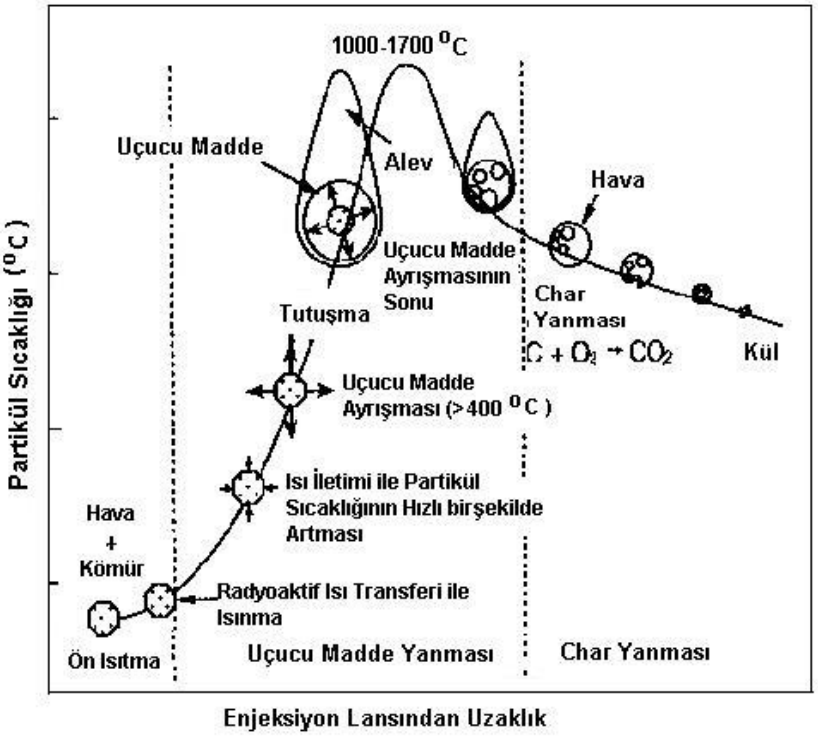
2.1. Pulverize Kömürün Yanma Karekteristiği

Kömürün yüksek fırında yanması ile ilgili temel prensip, *"kömürün raceway'i terketmeden önce yanması gerekir"* prensibidir. Bu durumun gerçekleşebilmesi için gerekli tüm şartların sağlanması gerekir. Aksi takdirde, kömür enjeksiyonu yüksek fırın proses şartlarını negatif yönde etkiler ve maliyetleri artırır [24].

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

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

Şekil 2.1'de pulverize kömürün yüksek fırındaki yanma süreci görülmektedir. Kömür partikülleri fırına enjekte edilirken önce alev sıcaklığının etkisiyle bir ön ısıtmaya maruz kalır. Sonrasında, uçucu madde ayrışır ve tutuşma ile birlikte gaz fazına geçiş başlar. Uçucu maddenin ayrışması esnasında kömür türüne bağlı olarak sabit karbon da yanmaya başlar. Yanma süreci içerisinde partikül sıcaklığı hızlı bir şekilde artar. Uçucu maddelerin ayrışmasından sonra char yanması başlar. Char'ın yanması, uçucu maddenin yanmasından daha yavaştır. Sonuç olarak, yanma sonrasında enerji ve kül açığa çıkar.

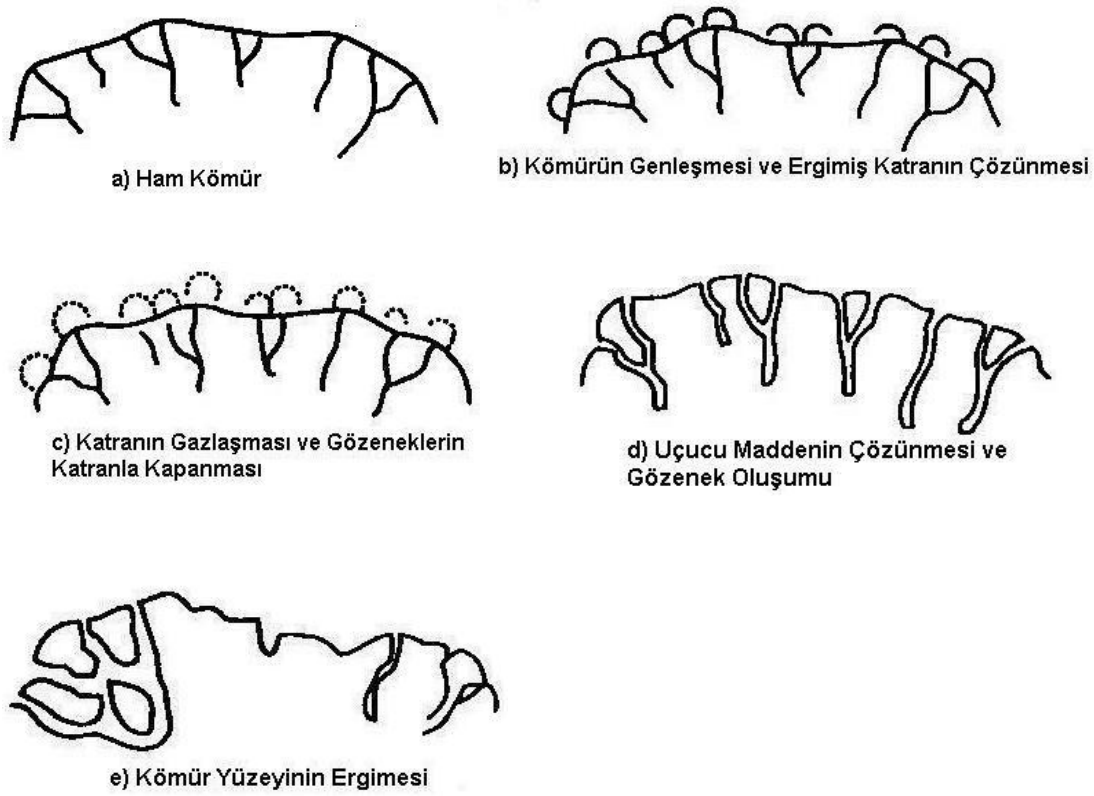


Şekil 2.1. Pulverize kömürün yanma süreci [24]

Yanma sürecinin daha iyi anlaşılması için aşağıdaki adımlarım incelenmesi gerekir.

2.1.1. Tutuşma

Kömür partiküllerinin tutuşması çok aşamalı bir süreçtir. Bir parçacık homojen yada heterojen bir şekilde tutuşur. Küçük boyutlu parçacıkların sıcaklığı hızlı bir şekilde yükselir, uçucu madde hızlı bir şekilde ayrışır ve homojen bir tutuşma gerçekleşir. Diğer taraftan büyük boyutlu parçalar (>100 μm) daha yavaş (<100 k/s) ve heterojen bir şekilde tutuşur [24].



Şekil 2.2. Tutuşma sürecinde kömürün yapısal değişimi [24]

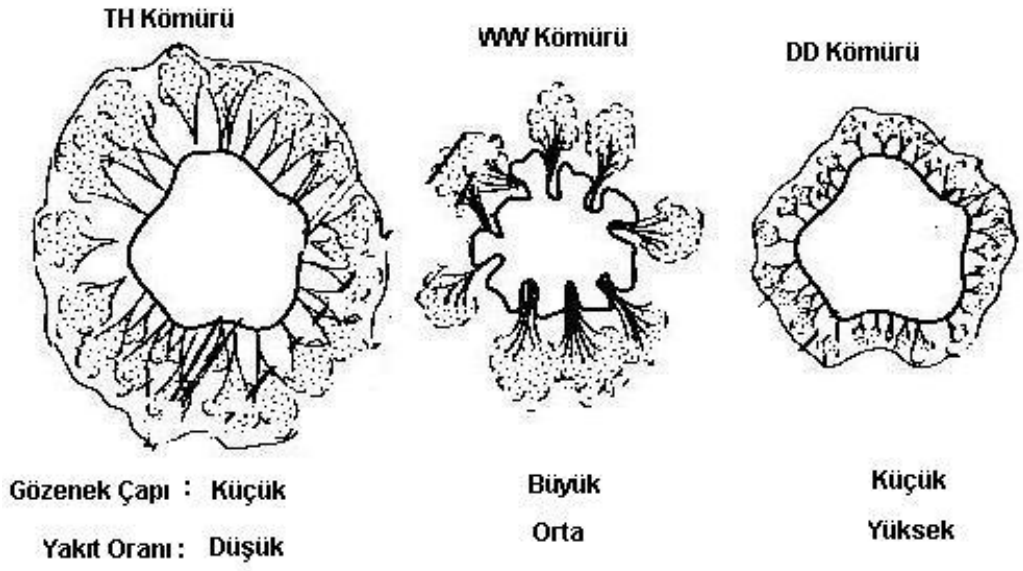
Pulverize kömürün tutuşma mekanizması, yanma olayına ışık tutması açısından oldukça önemlidir. Tutuşma ve yanma, ısı, kütle transferi ve kimyasal reaksiyon ile yönlenir. Bu aşamalar maseral yapı, spesifik yüzey alanı, gözenek yapısı, uçucu madde, karbon içeriği gibi kömürün temel özellikleri ile doğrudan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

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

Bu sonuçlara göre;

- Kömürün genleşmesi ile birlikte yüzey alanı artar,
- Yüzeyde ve gözeneklerdeki katran çözünür,
- Tutuşma tüm yüzey boyunca yayılır, katran, uçucu madde ayrışır,
- Külün ergimesi ile birlikte yüzey alanı küçülür,
- Yüzey tamamen ergir ve ayrışır.

Şekil 2.3'te 3 farklı kömürün tutuşma sırasındaki yüzey alanı değişimi görülmektedir. Tutuşma sürecinde yüzey alanı değişimi açısından bakıldığında TH ve DD kömürleri aynı davranışı gösterirken WW kömürü oldukça farklı bir özellik gösterir.



Şekil 2.3. Kömür gözenek yapısına göre oluşan alev yapısının değişimi [24]

Gözlem sonucunda TH ve DD kömürlerinin yüzeyinde küçük gözenekler görülürken WW kömüründe ise büyük girinti çıkıntılar ve balon tip char yapısı görülmüştür. Bu sonuç, kömür yapısına göre yanma sonucunda kömür çevresinde oluşacak olan alevin yapısının da farklı bir şekilde olmasına sebep olur.

TH ve DD kömürlerinde, uçucu madde kömür yüzeyinden homojen bir şekilde ayrışır ve parçacığı homojen bir alev sarar. Tutuşma, yalnızca yüzeyde meydana gelir.

Tutuşma, yüzey sıcaklığını hızlı bir şekilde artırır ve yüzeye yakın uçucu maddeler güçlü bir şekilde ayrışarak gaz fazına dönüşür.

WW kömürü geniş gözenek yapısına sahip olduğundan uçucu madde geniş aralıklardan açığa çıkar. Bu durumda tutuşma sonrasında oksijen yüzeye difüze olacağından yüzey reaksiyonu başlar. Bu ise, yüzey sıcaklığının daha yüksek olmasına, yüzeyin ergimesine, gözeneklerin dolmasına sebebiyet verir. Fakat, uçucu madde, kapanmış olan gözeneklerden dışarıya incelenen diğer 2 tür kömüre göre daha hızlı bir şekilde çıkar [24].

2.1.2. Uçucu Maddenin Ayrışması

Pulverize kömürün yanması aşamasında uçucu madde yaklaşık 10 msn içerisinde tamamen ayrışır. Uçucu madde kömürü bu kısa sürede terk etmesine rağmen alev stabilizasyonu ve yanma üzerinde büyük rolü vardır [30].

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

2.1.3. Char Yanması

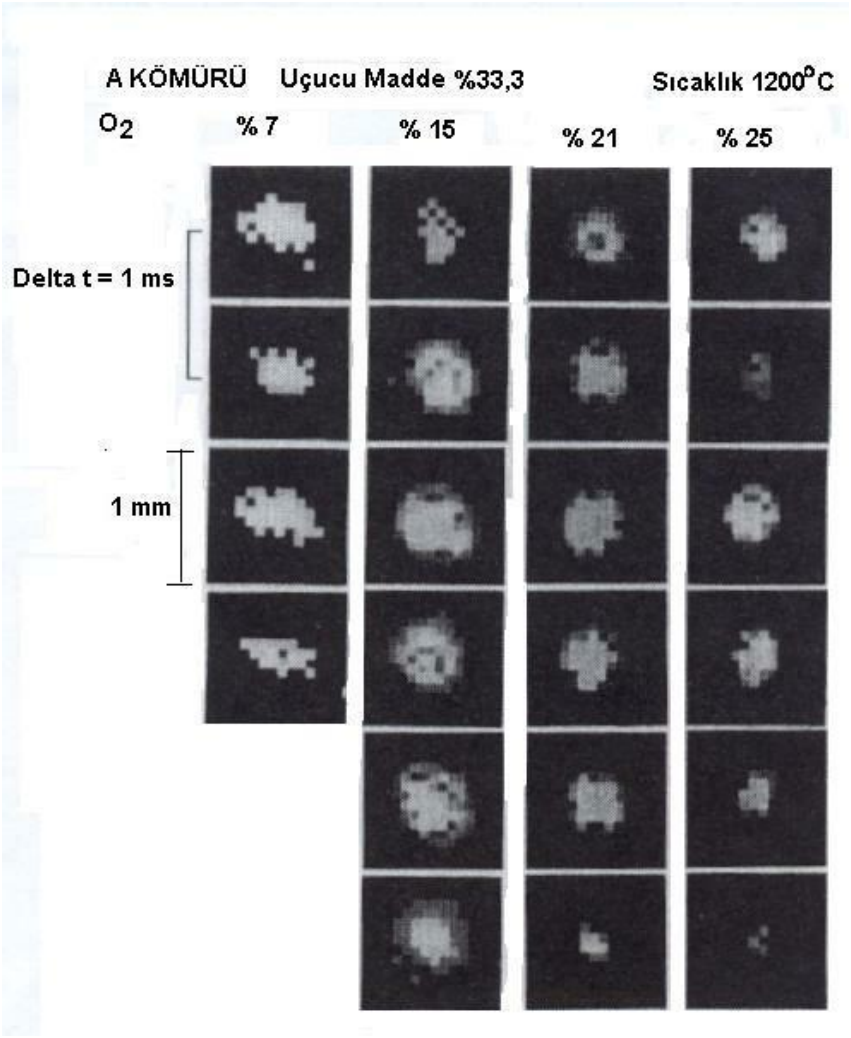
Uçucu madde uzaklaştıktan sonra geri kalan kül, inorganik bileşenler ve karbondan oluşan sıcak kütleye char denir. Char yanması süreçi de en az bu ana kadarki süreç kadar kompleks bir davranış gösterir. Bu sebeple, bu aşamadaki reaksiyon karekteristikleri, reaksiyon kontrolü, tane sınırlarında difüzyon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

2.2. Yanma

2.2.1. Tek Bir Kömür Partikülünün Yanma Karekteristiği

Şekil 2.4'te tutuşma sonrasında kömür partikülünün çevresinde oluşan alevin aldığı şekil görülmektedir. Bu fotoğraflar çok yüksek hızlı bir fotoğraf makinası ile görüntülenmiştir. % 33,3 oranında uçucu madde içeren tek bir kömür partikülünün ortam oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak yanma karekteristiği hakkında bilgi vermektedir [24].

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

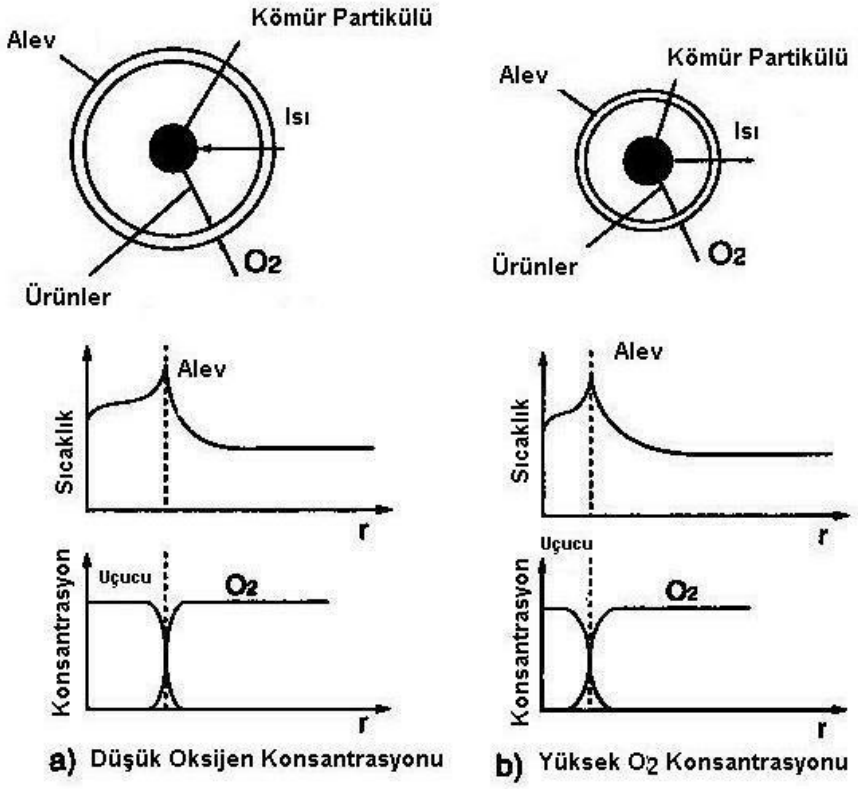


Şekil 2.4. Tek bir kömür partikülü çevresinde oluşan alevin yüksek hızlı bir kamera ile çekilmiş görüntüsü [24]

Şekil 2.4'te tutuşmanın hemen sonrasında tek bir taneciğin çevresindeki alevler görülmektedir. Fotoğraflar yüksek hızlı bir fotoğraf makinası ile çekilmiştir. %33,3 uçucu madde içeren bir partikülün oksijen konsantrasyonundaki değişime bağlı olarak yanma değişimi görülmektedir. Tutuşmanın hemen sonrasında parçacığın etrafında maddenin yaymış olduğu geniş alevler görülür. Alevler genişler, büzülür, kaybolur ve sonrasında char yanması başlar. Genişleyen alevlere focus yapıldığında, oksijen konsantrasyonundaki artışla birlikte alevlerde küçülme gözlenir. 300 mm uzaklıktaki bir partikülün %7 oksijen içeren bir ortamdaki yanma verimi %50 iken, %25 oksijen içeren bir ortamda %70'e ulaşır. Tek bir parçacığın yanma mekanizması Şekil 2.5'deki gibidir [24].

Şekil 2.5'de görüldüğü gibi, oksijen konsantrasyonu ne kadar yüksek ise parçacıktan ayrılan uçucu maddenin de yanma hızı o kadar yüksek olur. Bu ise bir sonraki

aşama olan pyrolizi artırır. Oksijen konsantrasyonu düşük ise, alevler enine genişler, çevreleyen alana ısı yayar.

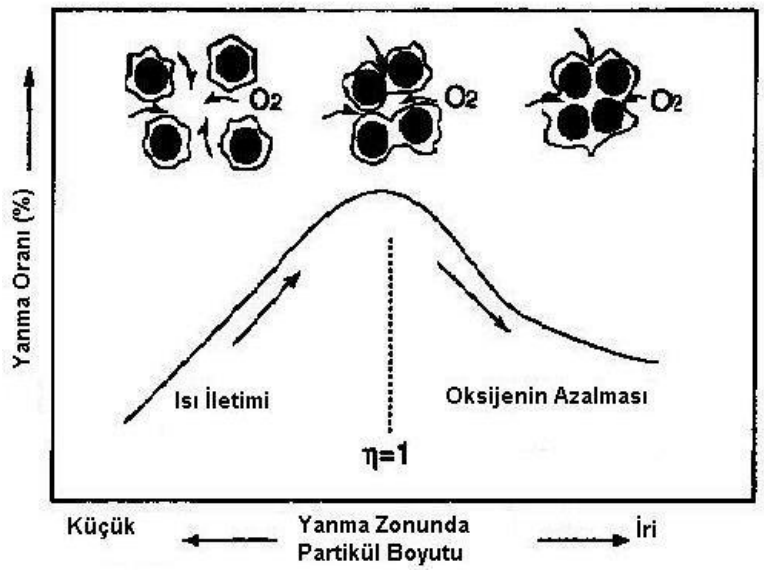


Şekil 2.5. Tek bir kömür partikülünün yanma mekanizması [24]

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

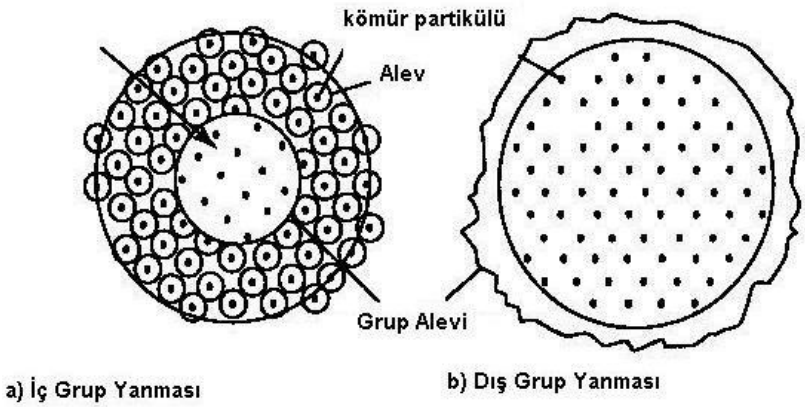
2.2.2. Pulverize Kömür Grubunun Yanması

Şekil 2.6'da, lokal bir partikül grubunun yanma paterni görülmektedir. Şekil 2.6'nın sol yarısında görüldüğü gibi kömür partiküllerinin birbirinden ayrı olarak bulunması oksijenin her bir partiküle daha kolay ulaşmasına ve doğal olarak yanma reaksiyonunun hızlanmasına sebep olur. Bu, pulverize kömür yanma verimini artırır. Şekil 2.6'nın sağ yarısında görüldüğü gibi kömür partiküllerinin birbiri ile iç içe girmesi oksijenin temas yüzeyini küçülttüğünden reaksiyon verimini de düşürür [11].



Şekil 2.6. Yanma bölgesindeki parçacık konsantrasyonuna göre yanma oranı değişimi [24]

Şekil 2.7'de bir pulverize kömür grubunun kesit resmi görülmektedir. Bu partikül grubu, yüksek konsantrasyonlu bir oksijen kaynağı ile karşılaşırsa Şekil 2.7'deki gibi birbirinden bağımsız ve homojen bir şekilde iç grup yanması şeklinde yanar. Oksijen kaynağı yetersiz partiküller birbiri ile iç içe geçmiş ve düzensiz bir formda ise dış grup yanması şeklinde yanar. Bu şekilde bir yanmada ise yanma verimi düşme yönünde eğilim gösterir. Yüksek orandaki bir enjeksiyon miktarı (>200 kg/TSM) stokiometrik oksijen oranını 1'in altına düşürür. İyi bir yanma verimi için pulverize kömür parçalarının mümkün olduğu kadar geniş bir alana dağılması gerekir [11].

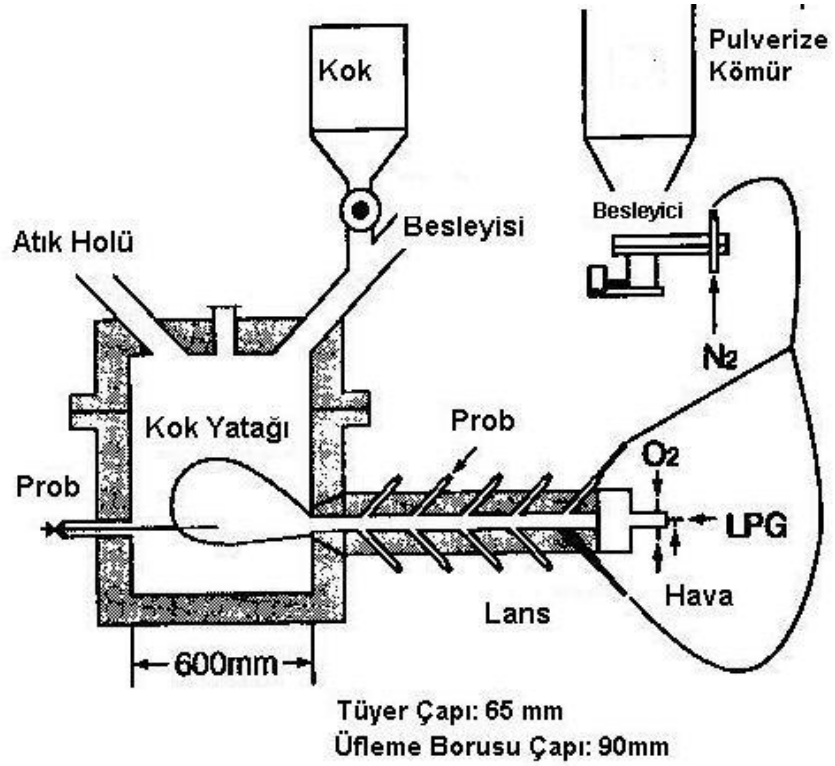


Şekil 2.7. Pulverize kömür grubunun yanması [24]

2.3. Pulverize Kömürün Yüksek Fırındaki Yanma Davranışı

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

Yanma verimi ve yanma sıcaklığı Şekil 2.8'deki düzenek sistemi ile belirlenmiştir. Tablo 1, deney koşullarını göstermektedir. Yanma verimi yanma sonrası kömür içerisindeki yanabilir maddenin değişimi prensibine göre ölçülmüştür. Yanma verimi, enjeksiyon noktasından 600 mm sonra hızlı bir şekilde artmaya başlar. Bu mesafede kömürün hızlı pyrolizi sonrasında açığa çıkan uçucu maddenin yanması büyük rol oynamaktadır [5].



Şekil 2.8. Deney düzeneği [5]

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

yükselmiştir. Bu artıştaki en büyük etken, kömür tanecikleri arasındaki mesafenin açılması ve reaksiyon hızının artmasıdır [5].

Enjeksiyon mesafesi daha da artırıldığında ise yanma veriminin artma eğiliminin geri döndüğü gözlenmiştir [36].

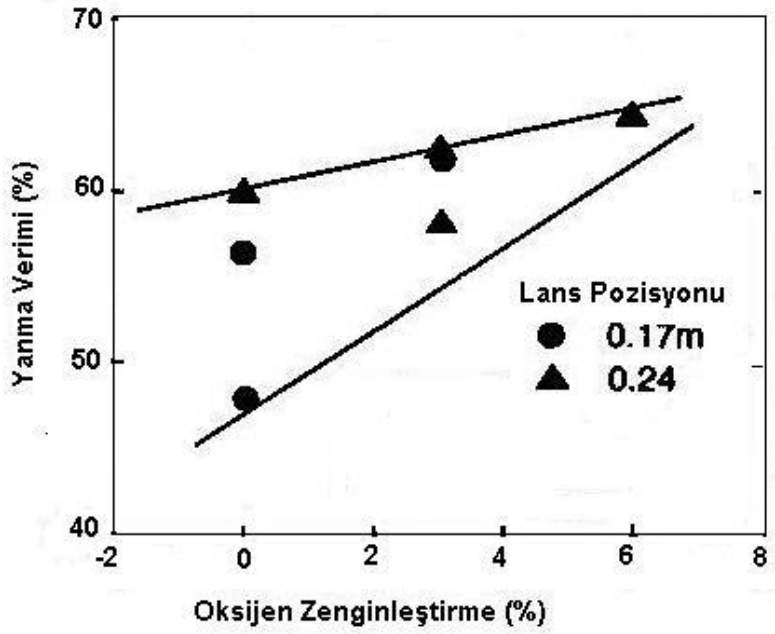
Tablo 2.1. Deney koşulları [5]

Gaz Hacmi	350 Nm^3/saat	
Üflenen Havanın Sıcaklığı	1200 ^oC	
Üfleme Borusu içerisindeki Hız	82 m/sn	
Kömür Enjeksiyon Oranı	48,65 kg/saat	
Oksijen İçeriği	% 21	
Pulverize Kömür Oranı	150 kg/TSM	
Boyut Dağılımı	-74 μm (%80)	
Ortalama Kül Analizi		
Uçucu Madde (%)	Sabit Karbon (%)	Kül (%)
33,2	57,0	9,8

2.3.1. Pulverize Kömürün Raceway'de Yanması

Raceway'de pulverize kömürün yanması ile kokun yanması arasında adeta bir rekabet vardır. Raceway'deki yanma karekteristiklerini incelemek için Şekil 2.8'deki deney düzeneği kullanılarak gaz konsantrasyonları incelenmiştir. Optik fiberler kullanılarak aynı anda çift yönlü olarak sıcaklık dağılımı ölçülmüştür. Optik fiberler su soğutmalı metal tüblerle korunarak raceway'e sokulmuştur. Optik fiberler raceway'e ulaştığında termal radyasyon iletilerek değerler çevrilir [5].

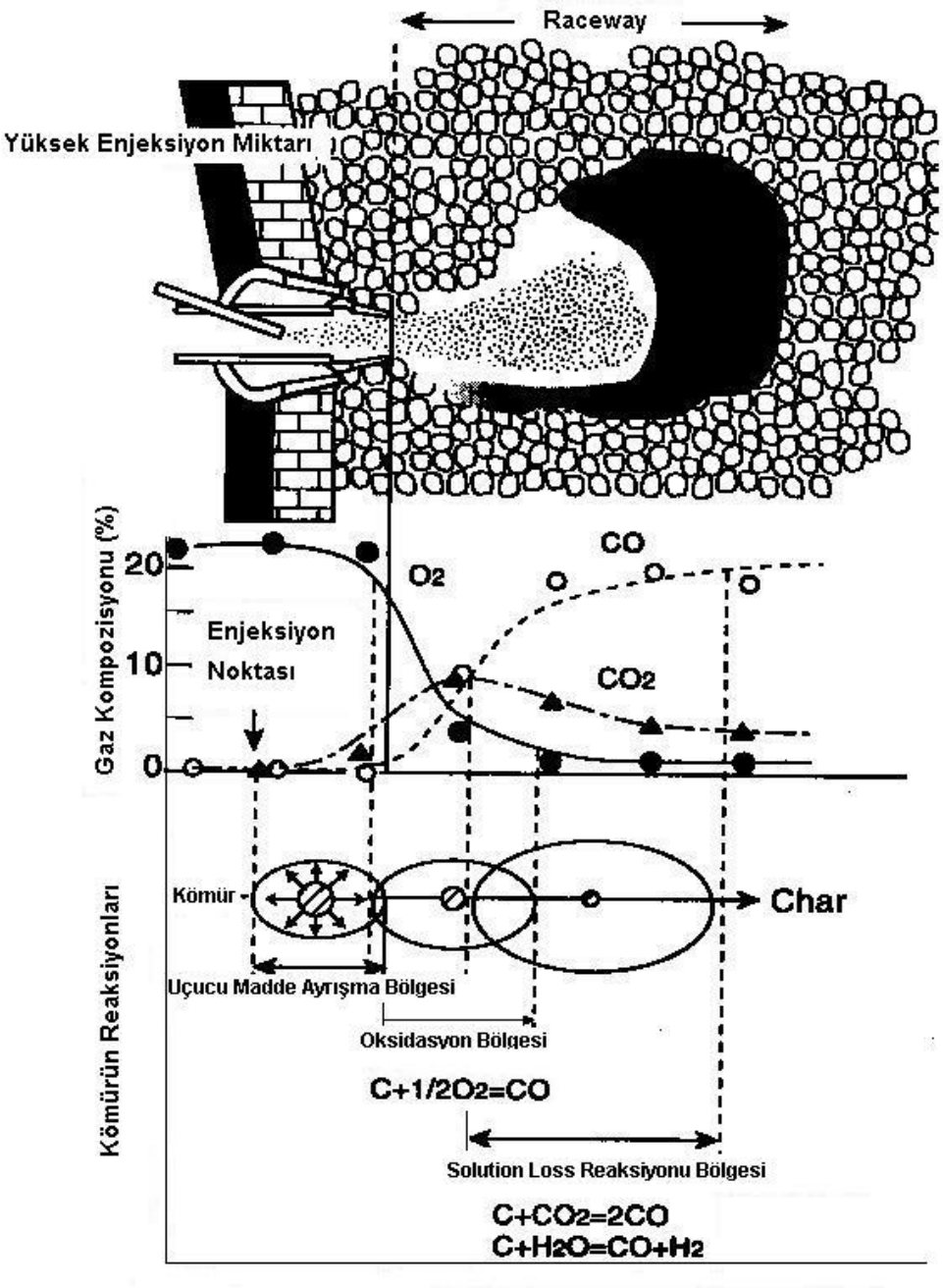
Şekil 2.9'da aynı zamanda lans pozisyonuna bağlı olarak yanma verimindeki değişim görülmektedir. Enjeksiyon lans ucu, tüyer ucundan 24 cm. geride tutulduğunda oksijen zenginleştirme miktarının artışı ile birlikte yanma verimi de artar. Lans pozisyonun kömürün yanma verimi üzerinde belirgin bir etkisi vardır.



Şekil 2.9. Enjeksiyon lans pozisyonu ve oksijen zenginleştirmenin kömür yanma verimi üzerine etkisi [24]

Lans ucu ile tüyer ucu arasındaki mesafesinin optimum değerde olması (20-25 cm) kömürün ön ısıtılması için zaman kazanılması, dolayısıyla kömürün raceway'de yanmasını hızlandırmak anlamına gelir [5].

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



Şekil 2.10. Raceway reaksiyonlarının şematik görünümü [5]

Kömürün yanması, ortam koşulları nedeniyle kompleks ve çok aşamalı bir prosestir. İyi bir yanmanın gerçekleşebilmesi için yanma prosesinin üfleme borusu içinde başlayıp race-way içinde tamamlanması gerekir. Aksi takdirde yakıt oranında artışa, işletme problemlerine, raceway'in bloke olmasına, fırın geçirgenliğinin düşmesine, duvar gaz geçirgenliğinin artmasına, W tipi kohesive zon oluşumuna, dolayısıyla duvarlarda ısı kaybına ve fırın verimliliğinin düşmesine sebep olur [28].

Şekil 2.10'da da görüldüğü gibi, uçucu maddelerin ayrışması sonrasında C ve H_2 'nin oksidasyonu sonucu ve CO_2 ve H_2O oluşumu gerçekleşir. Bir sonraki adımda ise, endotermik olan çözelti kaybı reaksiyonları (solution loss reaksiyonları) gerçekleşir. Proses şartlarında tüm endotermik reaksiyonların mümkün olduğu kadar minimize edilmesi gerekir. Bunun için ortam oksijen konsantrasyonu ve hava sıcaklığını artırmak en etkili çözümdür.

Kömürün raceway'deki reaksiyonları;

$C+O_2+N_2 \rightarrow CO_2+N_2$ Ekzotermik Reaksiyon (1.1)

$CO_2+C \rightarrow 2CO$ Endotermik Reaksiyon (1.2)

$C+H_2O \rightarrow CO+H_2$ Endotermik Reaksiyon (1.3)

Kömür parçacıklarının üfleme borusu-tüyer-raceway sisteminde kalma süresi ortalama 10-20 msn'dir. Bu süre ise yanmanın tam olarak gerçekleşebilmesi için çok kısıtlıdır. Yanmamış kömüre ilave olarak, fırın tepesinden şarj edilen kokun raceway'e inmesi ile birlikte oksijen tüketimi artar. Sonuç olarak, yanmamış kömürün reaktivitesi yanma prosesi üzerinde çok önemli bir rol oynamaktadır [29].

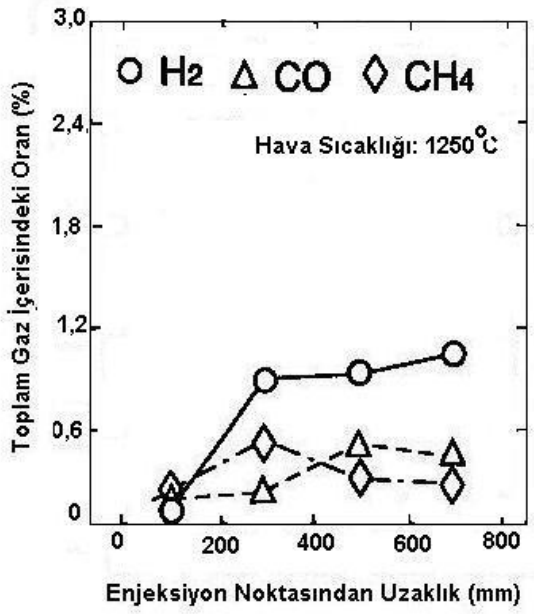
Yüksek fırın prosesinde yanma verimi bir çok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerden bir kaçı üfleme borusu–tüyer-raceway sistemindeki fazla oksijen ve hava sıcaklığı gibi bazı teknolojik limitlerin artırılabilmesi ile ilgilidir. Enjeksiyon modelinin seçimine göre de bazı kısıtlamalar olabilmektedir. Öte yandan, kömürlerin farklı yanma özellikleri göz önünde bulundurularak yapılan seçim ile yanma veriminde belirgin bir artış kaydedilebilir. Ayrıca, oksijen zenginleştirme, yüksek hava sıcaklığı, düşük tüyer hızı, uygun fırın içi şarj dağılımı da kömür yanma verimini etkileyen en önemli etkenlerdir.

2.3.2. Kömürün Raceway'de Yanması Sonrasında Gaz Kompozisyonu Dağılımı

Tüyerler önünde yer alan proses hakkında bilinen ilk araştırmalar yaklaşık 200 yıl öncesinde başlamıştır. İlk çalışmalar tüyer önünde oluşan farklı bölgelerdeki sıcaklık dağılımlarından yola çıkarak fikir yürütme şeklinde olmuştur. 1840 yıllarından itibaren kullanılan ve günümüzde oldukça geliştirilen metod ise tüyer önünden gaz örneği alma tekniğidir [15].

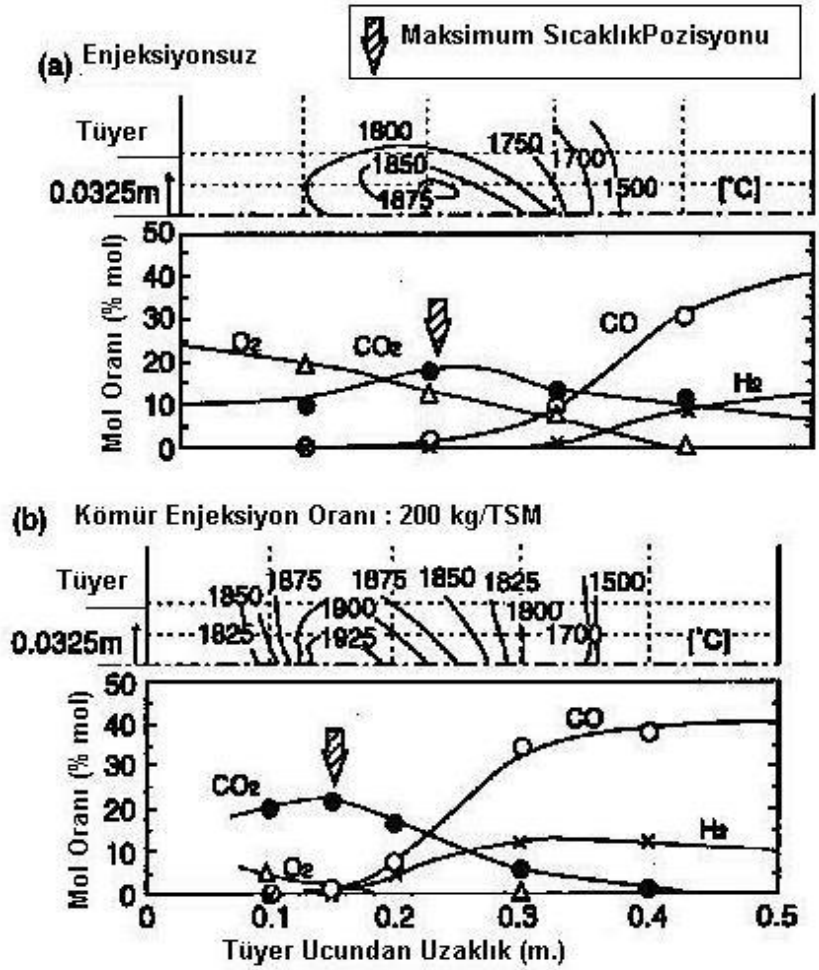
1900'lü yılların başında her tüyerin önünde sabit uzunlukta "raceway" adı verilen küresel bir yanma bölgesi olduğu tespit edildi. Bu, yüksek fırın prosesi için en önemli ve bariz gelişmelerden biriydi. Kinney'in bulguları, o zamana kadar hakim olan raceway'in fırın merkezine kadar uzadığı görüşüne karşılık, hazne çapı büyüdükçe, fırın merkezinde aktif olmayan bölgenin büyüdüğünü göstermiştir [36].

Kömürün yanması esnasında öncelikle uçucu maddeler ayrışır. Şekil 2.11 kömürün 1250^{o}C hava sıcaklığı ile prolizi sonrasında oluşan gaz dağılımını göstermektedir. Uçucu madde, çok yüksek oranlarda H_2, CO ve CH_4 gazlarından oluşmaktadır. CH_4'ün ayrışması düşük sıcaklıklarda, H_2 ve CO'in ayrışması ise daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir [15].



Şekil 2.11. 1250^{o}C hava sıcaklığında ayrışan uçucu gazların enjeksiyon noktasından uzaklığa göre değişimi [29]

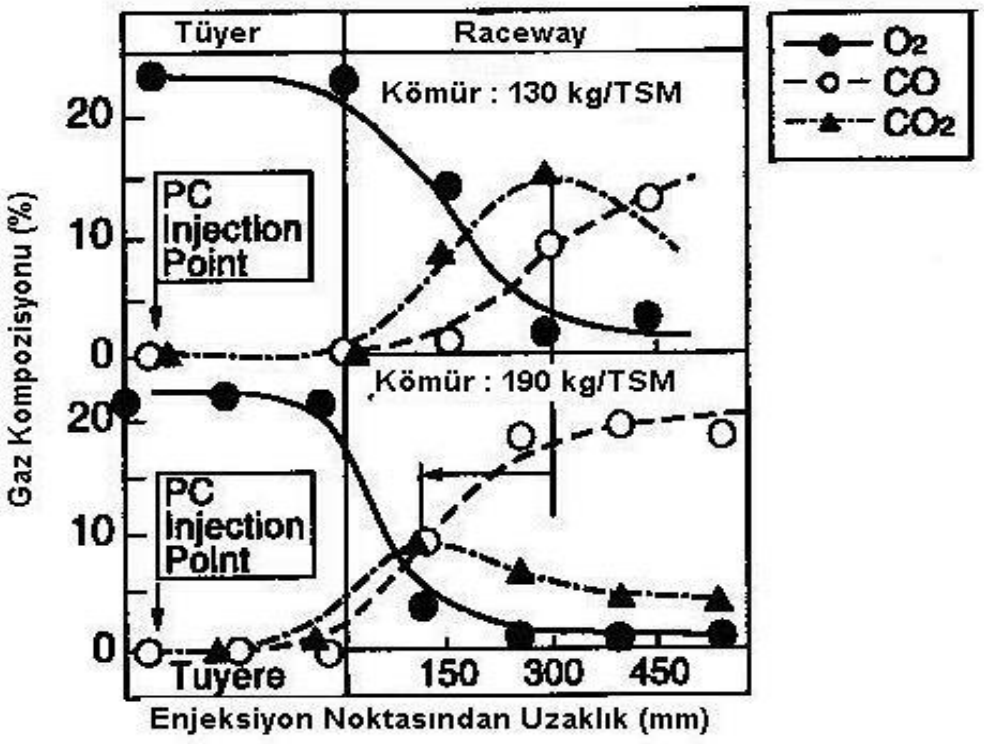
En yüksek sıcaklığa tüyer merkez ekseni boyunca ulaşılır. Raceway'deki oksijen, enjekte edilen pulverize kömür tarafından hızlı bir şekilde tüketilir ve sıcaklığın maksimum olduğu noktada CO_2 konsantrasyonu da maximuma ulaşır. Sırf kok ile çalışılan (enjeksiyonsuz) durumda gaz kompozisyonu ve sıcaklık dağılımı, sıcak kok ve raceway'deki oksijen miktarı ile belirlenir. Pulverize kömür enjekte edildiğinde, yanmanın ilk periyodunda hızlı bir şekilde uçucu madde yanar ve geri kalan serbest karbonun yanma karekteristikleri raceway'deki gaz kompozisyonu ve sıcaklık dağılımında belirleyici rol oynar. Enjeksiyon miktarının artması, oksijen tüketiminin artması ve yanma noktasının tüyer yönüne doğru kayması anlamına gelir.



Şekil 2.12. Enjeksiyon noktasından uzaklığa göre gaz konsantrasyonu değişimi [24]

Şekil 2.12'de Kokogawa 1. yüksek fırınında, pulverize kömürün raceway'deki gaz kompozisyonu üzerine etkisi görülmektedir. Tüm durumlarda tüyer ucundan fırın içine doğru gidildikce oksijen konsantrasyonu hızla düşmeye başlar, CO_2 konsantrasyonu ise hızlı bir şekilde artar. Pulverize kömürün raceway'de yanması için oldukça kısa bir yanma mesafesi ve yanma süresi vardır [25].

Şekil 2.13'de görüldüğü gibi, yanma reaksiyonun en efektif gerçekleştiği nokta olan, CO_2'nin en yüksek olduğu nokta, aynı zamanda en yüksek sıcaklığın olduğu nokta, kömür enjeksiyon oranının artışı ile birlikte tüyer yönünde kayar.



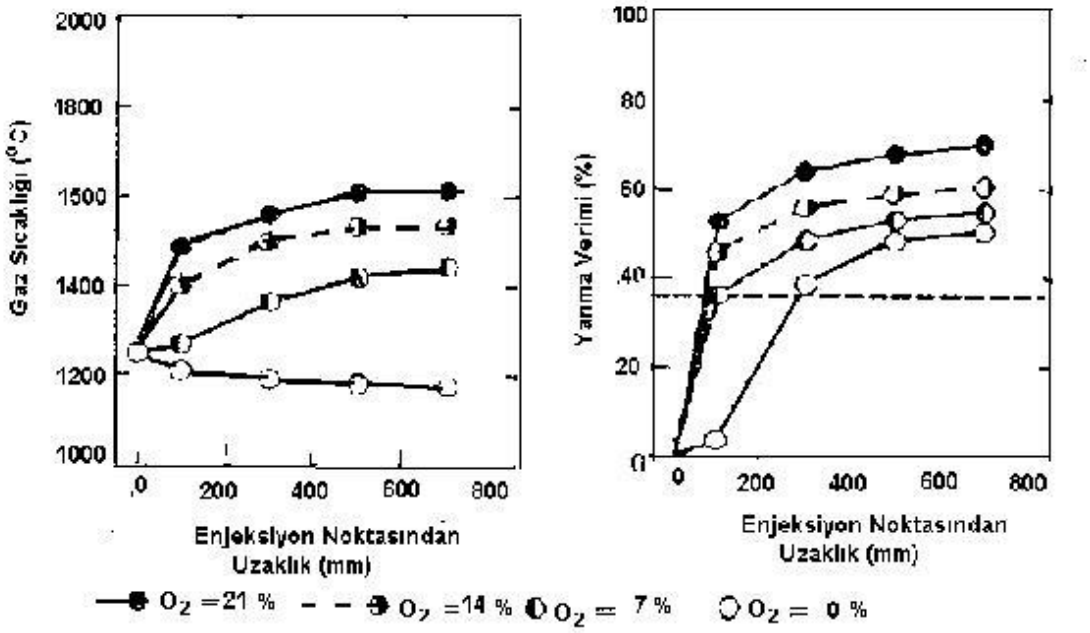
Şekil 2.13. Raceway'de gaz dağılımı [25]

Bu sonuca göre, yüksek uçucu içerikli kömürler kullanılarak yapılan kömür enjeksiyonunda daha önceki sonuçta olduğu gibi yanma bölgesi tüyer yönünde kayar ve duvar sıcaklığında artışa neden olur. Ayrıca, kül miktarının da yanma üzerinde belirgin etkisi vardır ve pulverize kömürün yanma verimi kok reaktivitesinin değişiminden etkilenmektedir. Fakat, kok reaktivitesi artışının gaz kompozisyonu dağılımını değiştirdiği ve yanma bölgesinin tüyer yönünde kaymasına neden olduğu görülmüştür [34].

Yanma Verimi; (Kömür İçerisindeki Yanabilir Kısmın Redüklenme Oranı/Kömür İçerisindeki Yanabilir Kısım) X 100, şeklinde formülüze edilebilir.

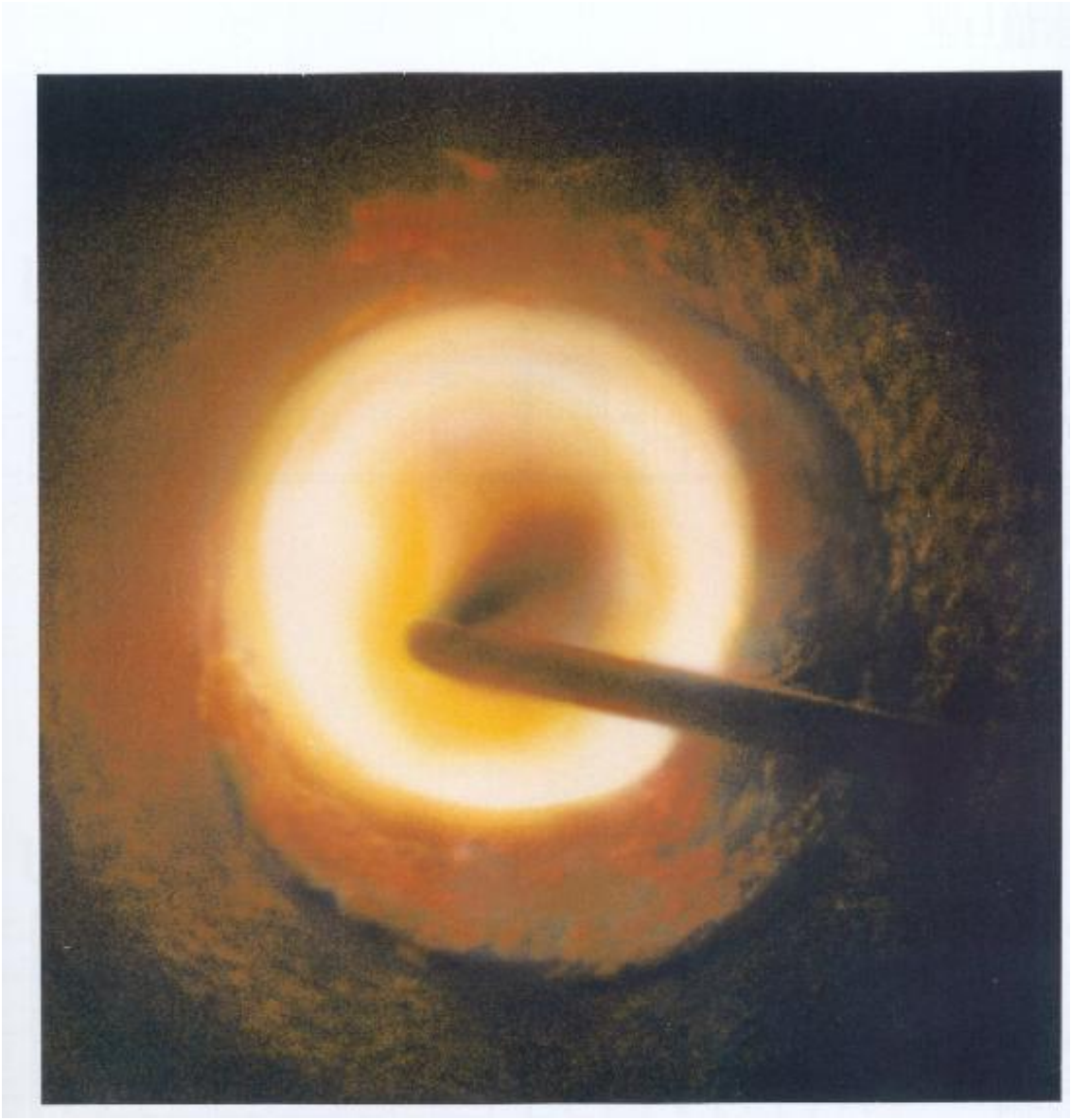
2.3.3. Kömürün Raceway'de Yanması Sonrasında Sıcaklık Dağılımı

Tüyer önü oksijen konsantrasyonu artırıldığında ilk olarak uçucu maddelerin yanması ile birlikte ortam gaz sıcaklığı artış ivmesi kazanır. Uçucu gazların sıcaklığındaki bu artış oranı kömürün yanma verimi ile doğrudan ilgilidir [14].



Şekil 2.14. Oksijen oranına ve enjeksiyon noktasından uzaklığa bağlı olarak ortam gaz sıcaklığı ve kömür yanma verimi değişimi [35]

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



Şekil 2.15. Pulverize kömürün yanma alevi görüntüsü

2.4. Pulverize Kömür Yanma Verimini Etkileyen Faktörler

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

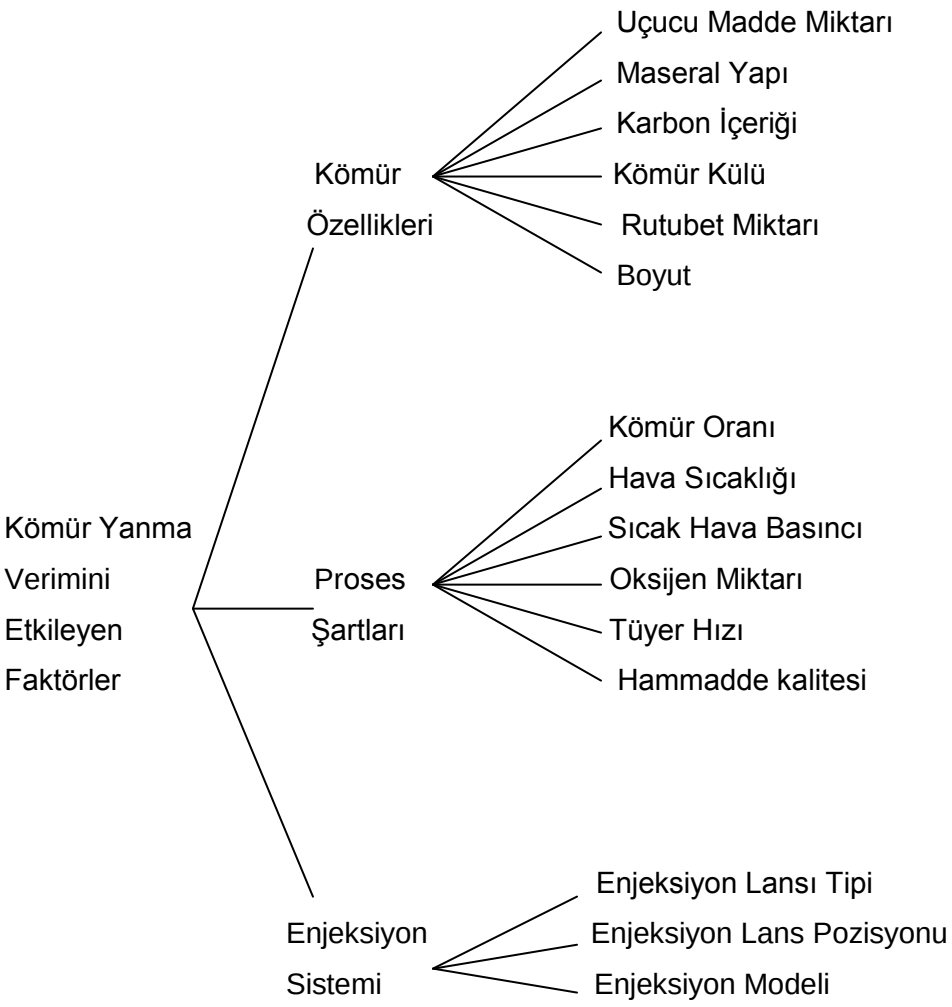
Yüksek pulverize kömür enjeksiyonu oranına başarılı bir şekilde ulaşabilmek için fırın gaz geçirgenliğinin iyileştirilmesi ve ısı kayıplarının minimize edilmesi gerekir. Her ikisini de elde etmek için kömürün yanabilirliğinin iyileştirilmesi en önemli faktördür.

Kömür enjeksiyonu ile birlikte fırın kesiti boyunca etkili gaz dağılımını mümkün olduğu kadar sabit tutmak gerekir. Yüksek uçuculu kömür kullanılarak, yüksek enjeksiyon uygulandığında yüksek gaz hızı ve gaz sıcaklığından dolayı raceway derinliği artar. Tüyerler önünde kömür taneciklerinin koklara çarpması, kok üzerinde termo-mekanik bir stres oluşturur. Kokun parçalanması sonucu oluşan parçacıklar ve yanmayan kömür taneleri raceway'in arkasında kalın bir birikim oluşturur. Bu birikim gazı merkezden uzaklaştırarak fırın duvarına yönlendirir ve fırın refrakterindeki ısı yükü artar. Aynı zamanda fırın merkezi gaz akışının zayıflaması sonucu fırın ısı potansiyeli, ergimenin merkeze göre daha zayıf olması gereken duvar kenarında, kaybolur. Bu durumda fırın merkezi geçirgenliğinin artırılması için fırın merkezine ilave kok şarjı yapılır. Ayrıca mevcut kullanılan tuyer çapları büyütülerek gaz hızı yavaşlatılır [20].

Pulverize kömür enjeksiyon oranının artışı ile birlikte ortam oksijen konsantrasyonu düşer ve buna bağlı olarak kömürün yanabilirliği de düşer. Yanmayan kömür partikülleri raceway'i aşarak deadman'e ve fırın içerisine yönlenir. Bunun sonucunda ise fırın içi gaz geçirgenliği düşer, sıvı geçirgenliği ve deadman'in süzme kapasitesi düşer, yanmamış kömür miktarına bağlı olarak deadman'in özellikleri bozulur. Ayrıca, boduard reaksiyonlarının artmasıyla yakıt oranı artar [31].

Yukarıda pulverize kömürün yüksek fırın prosesine olan önemli negatif etkilerinden örnekler verilmiştir. Tüm bu negatif etkiler, "yakıt oranını düşürmek" temel felsefesi olan pulverize kömür kullanımını amacından uzaklaştırır. Bu nedenle, pulverize kömürün verimli bir şekilde kullanılabilmesi için kömür yanma veriminin iyileştirilmesi ve prosese olan kömür enjeksiyonun yüksek fırın prosesine olan negatif etkilerinin

alınacak önlemler ile bastırılması gerekir. Aksi takdirde büyük bir avantaj olan kömür enjeksiyonu kullanımı, büyük dezavantajlar zincirine dönüşebilir.



Raceway'de maksimum miktarda kömür yakabilmek için;

- Ortamda yanma için yeterli oksijen miktarının bulunmalı,

- Enjekte edilen kömür ve sıcak havanın hızlı bir şekilde karışmalı, mümkün olduğu kadar geniş yanma yüzey alanına dağılarak yanma kısa bir süre içerisinde gerçekleşmeli,

- Kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri uygun olmalı,

- Raceway koşullarındaki kokun karbonunun oksijenle yanmasından önce kömürün karbonu yanmalı,

- Kömürün raceway'e giriş hızı düşük olmalı,

- Kömür haricinde kullanılan sinter, pelet, kok gibi hammaddelerin kalitesi uygun olmalı,

- Fırın gaz geçirgenliğini artırıcı tedbirler alınmalı

2.4.1. Kömür Özelliklerinin Etkisi

2.4.1.1. Kömür Türünün Etkisi

Kömür başlıca 4 adımla sınıflandırılabilir.

- Derecelerine Göre
- Sertliğine Göre
- Toplam Rutubet ve Karbon Miktarına Göre
- Kahverengi Kömürler ve Linyitler

ASTM D 388 standardı, kömürü metamorfizm yada linyitten antrasite doğru doğal serisi içerisinde incelemektedir. Bu sıralamada sabit karbon ve ısı kapasitesi derecelendirme kriteri olarak dikkate alınmıştır. Yüksek dereceli kömürler kuru bazda ve karbon miktarına göre, daha düşük dereceli kömürler ise yaş bazda ve ısı kapasitesine göre sınıflandırılırlar [24].

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

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

Antrasit, sert, kırılgan, siyah renkli, oldukça metamorfazlaşmış bir kömürdür. Isı kapasitesi alt bitümlü kömürlerden daha düşük, rutubet içeriği düşük ve karbon

içeriği yüksektir. Tablo 2'de görüldüğü gibi, kömür örneği olarak PR ve K-9 kömürleri kullanılmıştır [24].

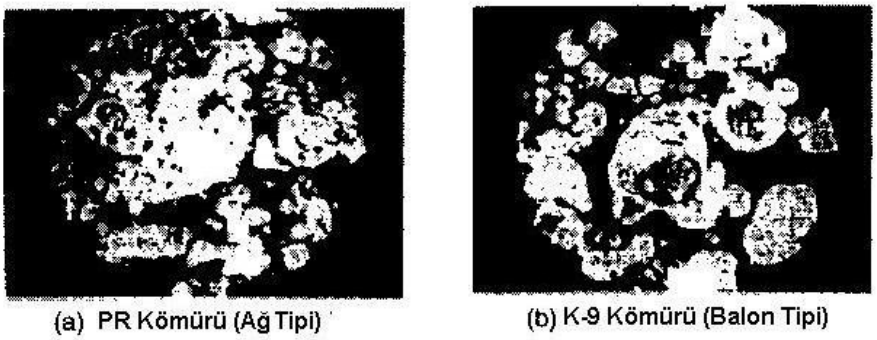
Tablo 2.2. Deney sırasında kullanılan kömürlerin özellikleri [24]

Kömür Adı	Uçucu Madde (%)	Sabit Karbon (%)	Kül (%)	Rutubet (%)
PR	39,2	63,5	2,5	4,8
K-9	18,8	70,2	10,4	0,6

PR kömüründe sıcak hava sıcaklığının artışı ile uçucu madde emisyon oranında da artış görülmüştür. Fakat sabit karbonda bir dönüşüm olmamıştır. Bir diğer değişim ise uçucu madde emisyonunun artışı ile alev yüzey alanının genişlemesi şeklinde olmuştur.

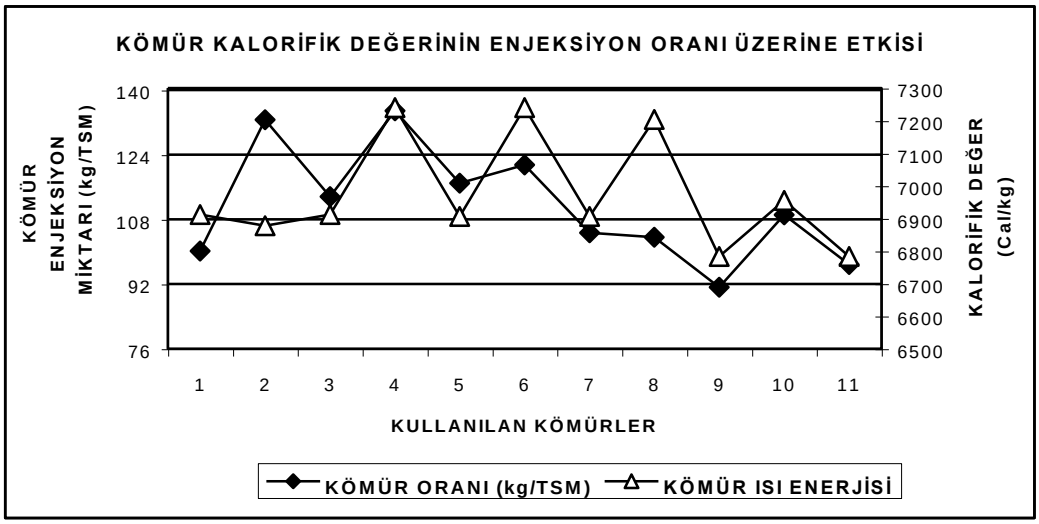
K-9 kömüründe de PR kömüründeki oran kadar olmasa bile, sıcak hava sıcaklığının artışı ile birlikte uçucu madde emisyonu artar. Fakat, sabit karbon dönüşümünde azalma gözlenir. Ayrıca, spesifik yüzey alanında düşme gözlenmiştir. Bu durumun temel sebebi; K-9 kömürünün kül ergime sıcaklığının düşük olması ve ergiyen külün partikül yüzeyindeki gözenekleri kapatmasıolmuştur.

Bu iki farklı kömürün spesifik yüzey alanı üzerinde göstermiş olduğu değişimin sebebinin char yapısındaki farklılıktan kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 2.16, deney sırasında kullanılan her iki kömürün de yanmadan yapısını göstermektedir. PR kömürü char partikülleri ağ yapısı tipinde ve genişleyen yüzey eğiliminde, K-9 kömürü ise balon tipi yapı özelliği göstermektedir. Bu gözlemler, char yapısının kömürün reaktivitesini belirleyici bir rol oynayan, tutuşma özelliğini etkileyen önemli bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır [24].



Şekil 2.16. Yanmakta olan iki farklı kömürün kesit görüntüsü [24]

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



Şekil 2.17. Enjeksiyon kömürü kalorifik değerinin kömür enjeksiyon miktarı üzerine etkisi [40]

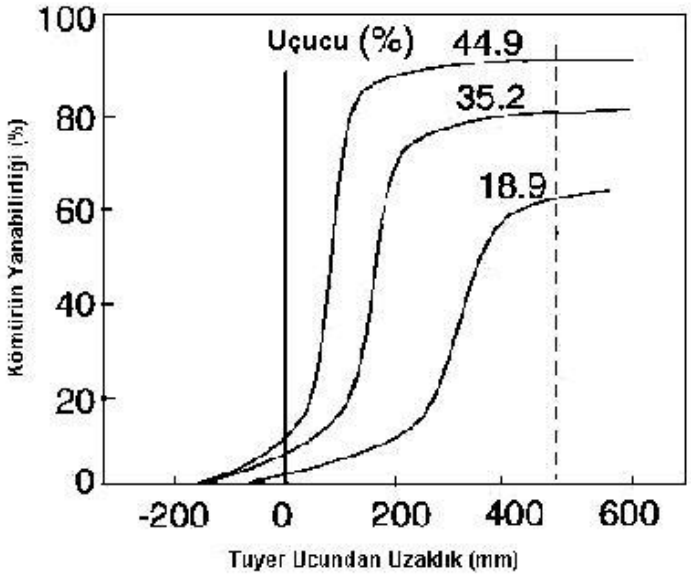
Şekil 2.17'de, farklı kalorifik değerlere sahip 11 farklı kömürün, enjeksiyonun artırılması üzerine etkisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kömür kalorifik değerinin artışı ile birlikte enjeksiyon oranında, bir başka deyişle kömür yanma veriminde artış olduğu görülmüştür.

2.4.1.2. Kömür Uçucu Madde Miktarının Etkisi

Kömürün prolizi sırasında açığa çıkan hidrojen, karbon monoksit, metan, diğer hidro karbonlar gibi yanıcı gazlardan ve CO_2, su buharı gibi yanıcı olmayan gazlardan oluşan bileşime uçucu madde denir. Kömürün derecesi ve maseral yapısı uçucu madde miktarını doğrudan etkiler [14].

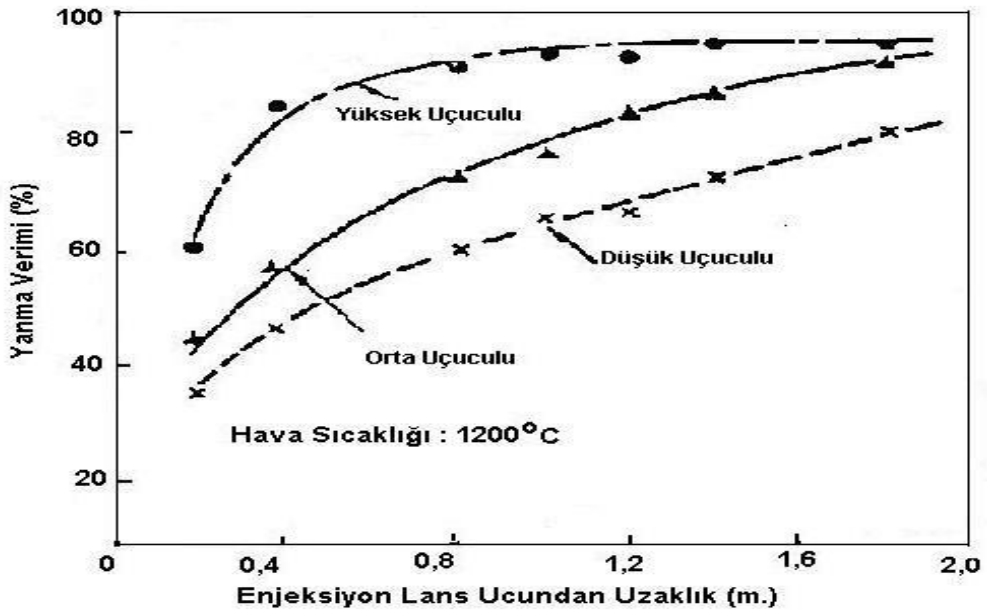
Kömür uçucu madde miktarının kömür enjeksiyonunun artırılması üzerindeki etkisine iki farklı açıdan yaklaşılabilir. Birinci yaklaşım, düşük uçuculu kömürün karbon miktarı yüksek olduğu için kömür-kok yer değiştirme oranı da yüksektir. Bu sonuca göre, düşük uçuculu kömür kullanarak yüksek oranda kok azaltılabilmesi gerekir. İkinci yaklaşım ise, yüksek uçuculu kömürün yanma reaksiyon hızı yüksektir ve kömür verimli bir şekilde yakılmasına imkan sağlayarak yüksek oranda

enjeksiyon yapılmasına ve kok oranının azaltılmasına imkan sağlar. İki yaklaşım da incelendiğinde, yüksek oranda kömür enjeksiyonu yaparak, yakıt olarak kullanılmakta olan kok miktarını azaltma hedefine en uygun seçim yüksek uçuculu kömür kullanmaktır. Çünkü, düşük uçuculu kömürün teorik olarak her ne kadar daha fazla kokun yerini alabilme potansiyeli olsa bile, yanma verimi düşük olduğu için kok oranın azaltılması yönündeki etkisi yüksek uçuculu kömüre göre daha düşük olacaktır [34].



Şekil 2.18. Uçucu madde miktarının kömür yanma verimi üzerine etkisi [29]

Uçucu miktarının artması bir bakıma sabit karbonun düşmesi anlamına gelmiş olsa da yanma reaktivitesinin artması karbon miktarındaki düşmeden kaynaklanan kaybı fazlasıyla telafi etmektedir. Bu konu da ortak olan görüş, orta uçuculu kömür kullanımıdır. Böylelikle, yüksek kömür-kok yer değiştirme oranı ve yüksek reaksiyon hızı ile daha verimli bir enjeksiyon yapılabilir. Fakat bilindiği gibi orta uçuculu, sürekliliği olan homojen bir kömür kaynağı bulabilmek hem ekonomiklik açısından, hem de kaynakların kısıtlı olması açısından tercih edilmemektedir. Fakat, düşük uçuculu kömürler ile yüksek uçuculu kömürleri homojen bir şekilde karıştırıp yüksek fırınlara enjekte eden tesisler mevcuttur. Bu durumda ise tam homojen bir karışımın oluşturulamaması yanma verimi açısından en büyük handikabı oluşturur [7].



Şekil 2.19. Uçucu madde miktarının kömür enjeksiyon miktarı üzerine etkisi [24]

Hoogovens Ijmudien fabrikalarında tablo 3'te görülen 4 farklı uçucu miktarına sahip kömürler kullanılarak yapılan laboratuvar test çalışmaları sonucunda, uçucu madde miktarı artışı ile ve enjeksiyon noktasından uzaklığa göre kömürün gazlaşma oranının arttığı görülmüştür.

Tablo 2.3. Uçucu madde miktarı ve enjeksiyon noktasından uzaklığa göre kömürün gazlaşma oranındaki değişim. [29]

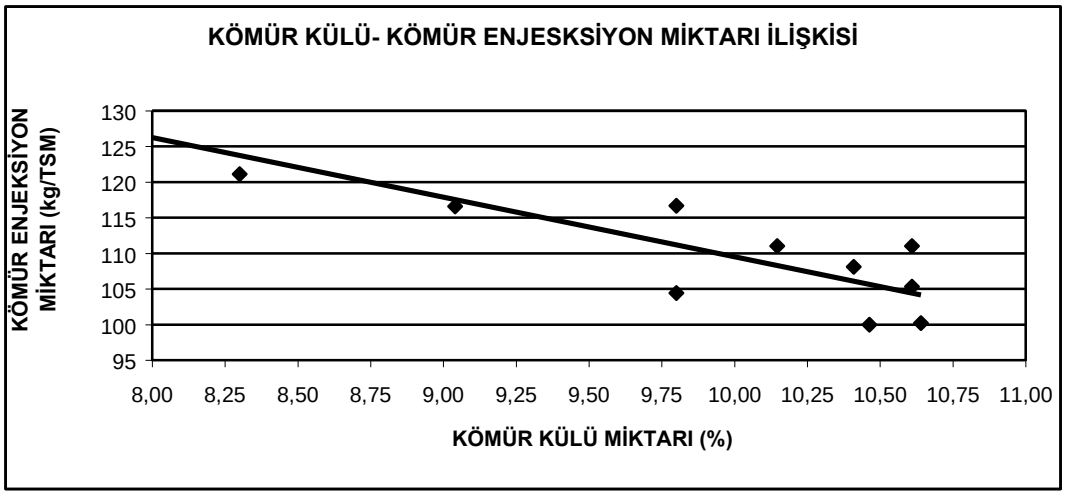
Kömür Adı	**Uçucu Madde Miktarı (%)**	**Enjeksiyon Noktasından Uzaklığa Göre Gazlaşma Yüzdesi (%)**		
		1 m.	**2 m.**	**3 m.**
A	4	20	25	45
B	18	45	55	75
C	33	50	70	80
D	38	65	70	80

2.4.1.3. Kömür Kül Miktarının Etkisi

Kömür külü miktarı, curuf kompozisyonu, curuf hacmi ve curuf ergime sıcaklığı üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, kül miktarının yüksek olması, karbon

miktarının düşük olması anlamına geleceği için yakıt oranının artmasına neden olur ve kömürün soğutma etkisini artırır [34].

Kömürün kül miktarının düşük olması kömürün yanma performansını olumlu yönde etkiler. Kömür külü çeşitli mineral ve bileşenleri içerisinde bulundurun kompleks bir yapıdır. Bu inorganik kömür bileşenleri, yanma esnasında kimyasal ve fiziksel dönüşümlere maruz kalarak gaz, sıvı ve katı fazında orta dereceli kül yapısını oluşturur. Şekil 20'de farklı kül içeriğine sahip enjeksiyon kömürlerinin enjeksiyon oranına etkisi görülmektedir. Kül miktarının düşük olması, en basit ifade ile karbon oranının yada uçucu miktarının yüksek olması ve curuf hacminin düşük olması anlamına geleceği için, kömürün yanabilirliği üzerinde olumlu etki yapacaktır.



Şekil 2.20. Kömür külünün enjeksiyon miktarı üzerine etkisi [39]

2.4.1.4. Kömür Rutubet İçeriğinin Etkisi

Yüksek fırına enjekte edilen kömürün rutubet içeriği, kömürün raceway'deki soğutma etkisini, dolayısıyla yanma verimini olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle kömür, yüksek fırına enjekte edilmeden önce kömür enjeksiyon tesisinde kurutularak rutubeti %1'in altına düşürülmelidir. Kömür rutubetinin yüksek olması, daha fırına girmeden önce hatlarda tıkanıklığa yol açacağı, taşınmada enjeksiyonun sürekliliğini bozacağı için istenmez [35].

2.4.1.5. Kömür Sabit Karbon Miktarının Etkisi

Sabit karbon miktarı, kömürün uçucu, kül ve rutubet miktarı dışında kalan aktif karbon miktarıdır. Kömürün karbonunun yanması sonucunda açığı çıkan enerji ne kadar yüksek ise, kömür-kok yer değiştirme oranı da o kadar yüksek olur. Yer

değiştirme oranı, enjeksiyon için gerekli kömür miktarına karşılık azaltılan kok miktarı olarak açıklanabilir. Kömür-kok yer değiştirme oranını etkileyen önemli faktörler, kömürün karbon miktarı, kömür kalorifik değeri ve kömürün oksijenle vereceği reaksiyonun hızıdır. Yapılan denemeler sonucunda, yüksek uçuculu kömürlerin karbon miktarı düşük uçuculu kömürlere göre daha düşük olmasına rağmen daha yüksek yer değiştirme oranı elde edilmiştir. Bunun nedeni, daha önce de belirtildiği gibi yüksek uçuculu kömürlerin reaksiyon hızı, düşük uçuculu kömürlere göre daha yüksek olduğundan karbon miktarının düşük olması reaksiyon hızının fazla olması ile kapatılmakta ve daha yüksek yanma verimi elde edilmektedir [24].

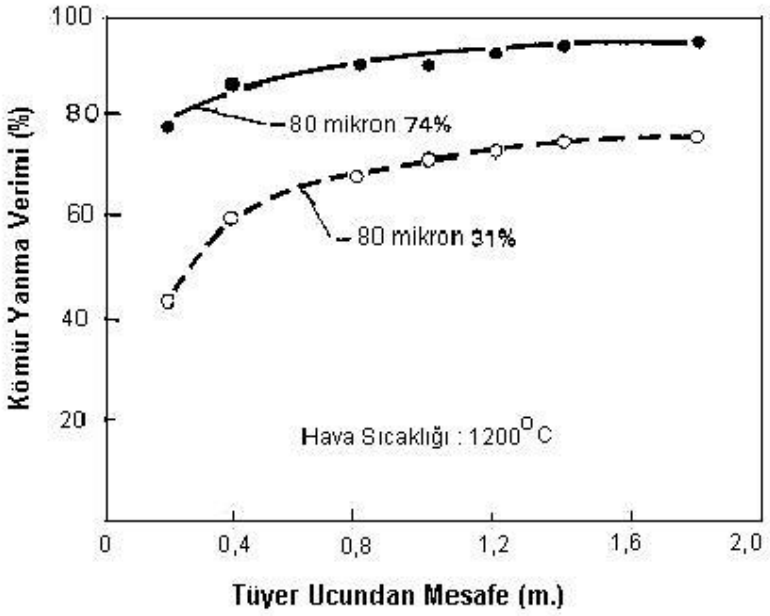
2.4.1.6. Kömür Maceral Yapısının Etkisi

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

Maseral yapının özellikle uçucu madde miktarı üzerine büyük etkisi vardır. Liptinit ve vitrinit, düşük inertinit madde içeren yüksek uçuculu kömürlerdir ve yanma verimleri yüksektir. Kömür maserallerinin yanma ve piroliz sırası; liptinit>vitrinit>inertinit (fusinit) şeklindedir. Aktif madde (vitrinit– liptinit) bileşeni kömür maserallerinin yanabilirlik parametresi olarak kullanılır. Vitrinitten oluşmuş char'ın yanabilirliği en iyi yanabilirliğe sahiptir. İnertinitlerden oluşmuş char'ın yanma verimi ise düşüktür [32].

2.4.1.7. Kömür Ebadının Etkisi

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



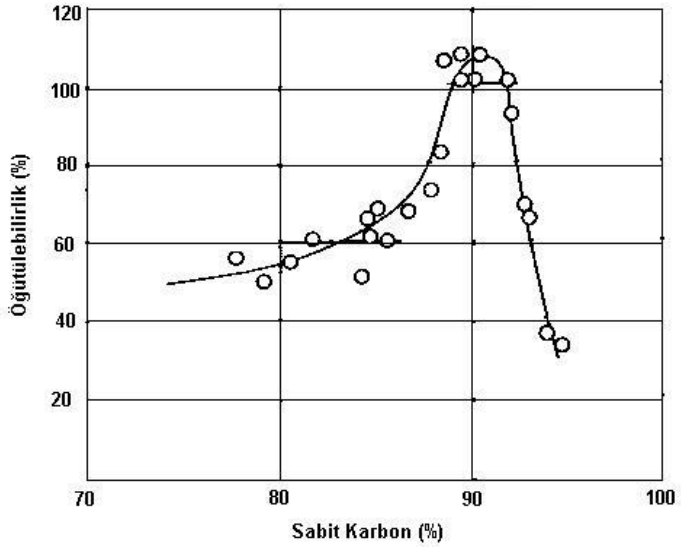
Şekil 2.21. Kömür tane ebadının yanma verimi üzerine etkisi [29]

Dünya üzerinde kömür enjeksiyonu kullanan yüksek fırınların bu konu ile ilgili hemfikir olduğu nokta enjekte edilen kömürün %80'inin 200 mesh'in (80 micron) altında olması gerektiği şeklindedir. Şekil 2.21'de kömür boyut dağılımının yanma verimi üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu sonuca göre 80 μm altındaki kömür oranı %31'den %74'e çıkarılması ile yanma veriminin de %60'dan %80'e çıkmaktadır [29].

Kömürün tane ebadının düşürülmesinin kömür taşınması esnasında hatlarda tıkanıklıklığa yol açma ve enjeksiyonun homojen yapılamaması gibi problemlerin işletme şartlarında çözülerek mümkün olduğu kadar minimum tane ebadında kömür enjeksiyonu yapılmalıdır [35].

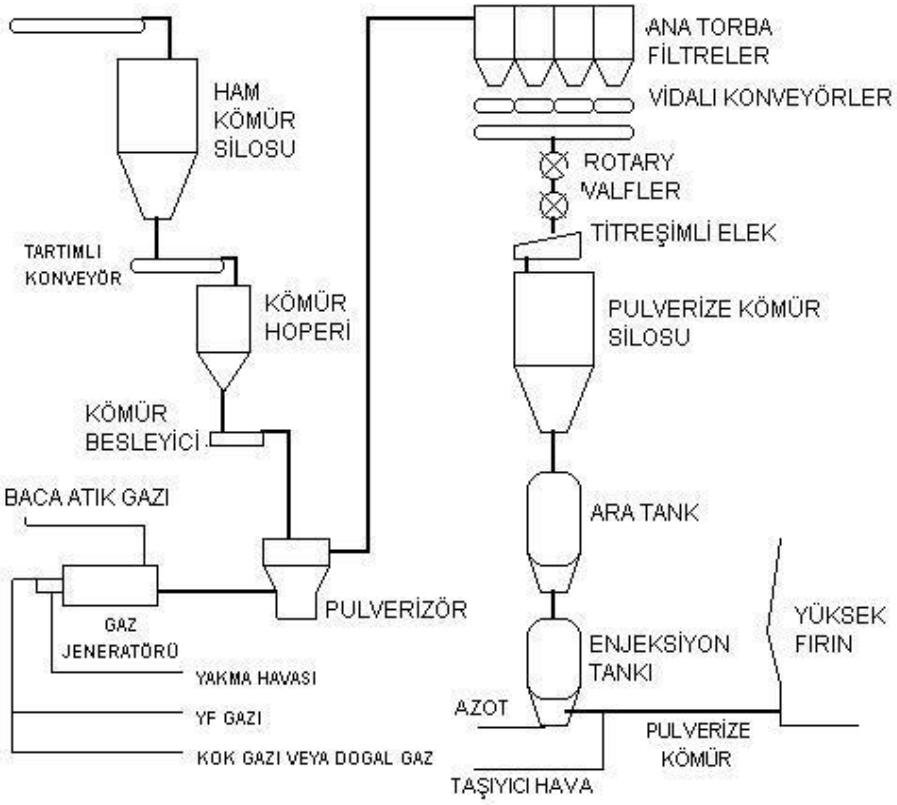
Kömürün öğütülebilirlik indeksinin kömürün öğütülmesi, hatlarda taşınması ve yanabilirliği üzerinde oldukça önemli etkisi vardır. Öğütülebilirlik indeksi (Hardgrove İndeks) düşük olan kömürlerin sertliği düşüktür. Ayrıca, bu tür kömürlerin kullanımı sırasında hatlarda taşınma zorluğundan dolayı enjeksiyonun homojenliği, dolayısıyla yanma verimi ve proses kararlılığı bozulur [34].

Öğütülebilme indeksi (HGI) 42'nin altına düşerse pulverizör kapasitesi düşer ve pulverizörün elektrik sarfiyatı artar. Yaygın olarak tercih edilen, öğütülebilirlik indeksi 50-60 arasında olan enjeksiyon kömürlerinin kullanımıdır [35].



Şekil 2.22. Kömür sabit karbon miktarının kömürün öğütülebilirliğine etkisi [35]

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

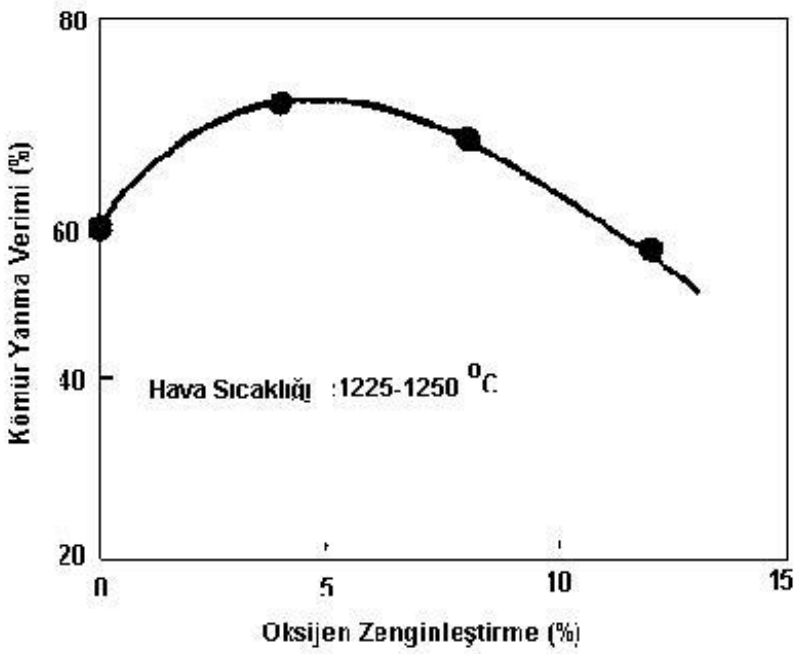


Şekil 2.23. Kömür Enjeksiyon Tesisi Akış Şeması

2.4.2. Yüksek Fırın Proses Şartlarının Kömür Yanma Verimi Üzerine Etkisi

2.4.2.1. Havadaki Oksijen Oranının Etkisi

Tüyerlerden enjekte edilen kömürün ideal olarak raceway içerisinde tamamen yanması gerekir. Bu süre ise her fırının karekteristik yapısına ve proses şartlarına göre değişmekle beraber yaklaşık 20-30 msn. dir. Bir başka ifade ile, kömürün verimli bir şekilde yanabilmesi için raceway'de kömür tanecikleri ile oksijen reaksiyonunun mümkün olduğu kadar hızlı gerçekleşmesi ve üflenen hava oksijen oranının yüksek olması gerekir. Bu noktadan hareketle, kömür enjeksiyonu yapılan yüksek fırınlarda oksijen zenginleştirme yapılarak, üflenen havanın oksijen oranı artırılır ve kömürün yanması için elverişli şartlar oluşturulur. Şekil 2.24'de laboratuvar test fırınında oksijen oranının kömür yanma verimi üzerine etkisi incelenmiş ve oksijen zenginleştirme oranın belirli bir değere kadar kömür yanma verimini artırdığı görülmüştür.



Şekil 2.24. Oksijen zenginleştirmenin kömür yanma verimi üzerine etkisi [29]

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

Oksijen zenginleştirme ile;

- kömürün yanma reaksiyonu hızlandırılır,

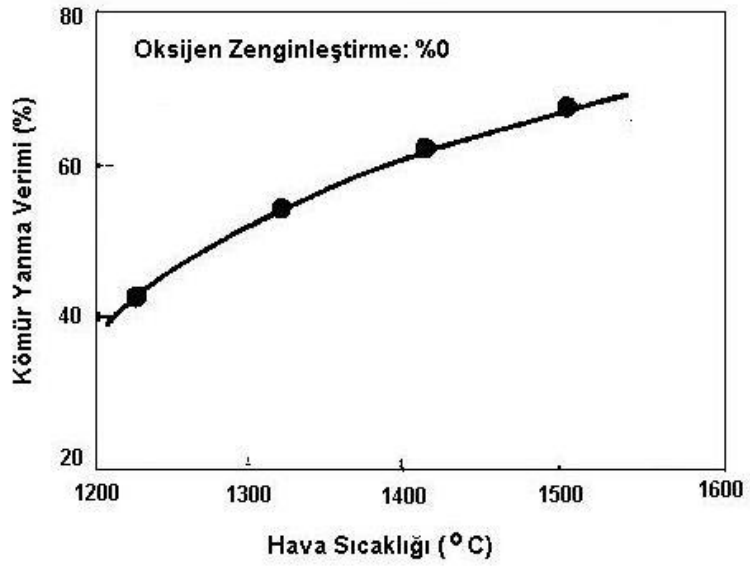
- optimum alev sıcaklığı ve ergime şartları elde edilir,

- fırın içi gaz geçirgenliği ve gaz hızı kontrol altına alınır.

2.4.2.2. Hava Sıcaklığının Etkisi

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

Sıcak hava sıcaklığının artırılması, kömürün yanma reaksiyonunu hızlandırdığı ve tüyer önündeki soğutma etkisini karşıladığı için kömürün yanma verimini artırır. Şekil 2.25'de hava sıcaklığının artırılmasının kömür yanma verimi üzerine etkisi görülmektedir. Görüldüğü, gibi üflenen havanın sıcaklığının artırılması, kömürün yanma verimini artırmış ve kömür oranı artırılarak kok oranı azaltılmıştır. Kömür enjeksiyon kullanımındaki öncelikli amaç, kok oranını azaltmaktır. Bu nedenle, hava sıcaklığını artırıp, kömür oranını artırmak ve kok oranında bir değişim yapmamak zaman zaman prosesteki dengeleri ayarlamak için kullanılan bir metod olsa bile, enjeksiyonun amacına tam olarak hizmet etmez.



Şekil 2.25. Hava sıcaklığının kömür enjeksiyon miktarı üzerine etkisi [29]

2.4.2.3 Tüyer Hızının Etkisi

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

Tüyer hızının, yüksek fırın yumuşama-ergime bölgesi olarak bilinen ve fırının en kritik bölgesi olan kohesive bölgenin şekillendirilmesi üzerinde çok büyük önemi vardır. Tüyer hızının çok yüksek olması yumuşama-ergime bölgesinin üst bölgelere kaymasına ve fırın iç basıncının yükselerek fırın içi gaz geçirgenliğinin düşmesine neden olur. Ayrıca, yüksek tüyer hızlarında raceway'de yanma fırsatı bulamayan kömür partikülleri deadman kok'unun gözeneklerini kapatarak deadman gaz geçirgenliğini ve sıcak metal süzme kapasitesini düşürür. Tüyer hızının çok düşük olması ise yumuşama-ergime bölgesinin fırının alt bölgelerine kaymasına ve redüksiyonun tam yapılamamasına ve deadman kok yapısının bozulmasına neden olur [14].

Bu konu ile ilgili olarak yapılan araştırma, işletme pratikleri ve dünyadaki kömür enjeksiyonlu yüksek fırınlar açısından bakıldığında, kömür enjeksiyonu yapılan durumda ideal tüyer hızının 210-220 m/sn civarlarında olması gerektiğidir [14].

2.4.2.4. Fırın İçi Şarj Dağılımının Etkisi

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

Yüksek enjeksiyon oranlarında istikrarlı proses şartlarının oluşturulabilmesi için fırın merkezi gaz geçirgenliğinin iyileştirilmesi gerekir. Merkezi gaz geçirgenliğinin iyileştirilmesi ile raceway'de üretilen gazın ergime bölgesine yönlendirilmesi sağlanır ve fırın duvarında ısı kaybı önlenir. Bu amaçla uygulanan en etkili yöntem, merkezi kok şarjı yapılmasıdır. Merkezi kok şarjı yapılmasının aynı zamanda dead-man' kokunun yenilenmesi ve deadman kok geçirgenliğinin artırılması üzerinde de büyük faydası vardır [28].

Enjeksiyon oranının artmasının etkisiyle güçlenmiş olan duvar kenarı gaz akışını zayıflatmak için merkezi kok şarjının artırılması, duvar kenarı gaz akışını zayıflatılması gerekir. Merkezi gaz geçirgenliğinin artırılmasına yönelik diğer bir metod ise, duvar kenarına ince ebatlı sinter ve küçük ebatlı kok şarjı (fındık kok) yapılmasıdır [30].

Kwangyang yüksek fırınlarında her iki metod da etkili bir şekilde kullanarak düşük sinter kalitesi ile çalışılan durumda bile fırın geçirgenliği kontrol altına alınmış ve sorunsuz bir şekilde 150 kg/TSM kömür enjeksiyon oranına ulaşılmıştır. Genel olarak ifade edilecek olursa, merkezi kok şarjı ile birlikte, 90 kg/TSM'den 110 kg/TSM'ye, duvar kenarına fındık şarjı ile, 110 kg/TSM'den 130 kg/TSM'ye, duvar kenarına ince sinter şarjı ile 130 kg/TSM'den 150 kg/TSM kömür enjeksiyon seviyesine ulaşılmıştır [30].

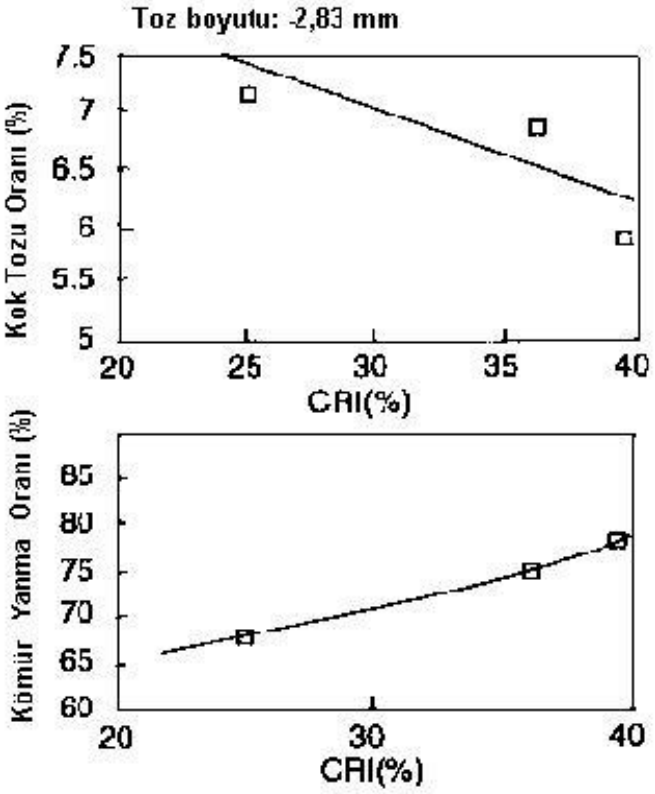
Yüksek pulverize kömür enjeksiyonun yapıldığı fırınlarda merkezi geçirgenliğin artırılması ve deadman kokunun boduard reaksiyonlarına karşı korunması ve sürekli olarak yenilenmesi için fırın merkezine ilave kok şarjı yapılır [27]. Bu, aynı zamanda fırın içi gazlarını duvar kenarından kohezive zona doğru kaydırarak, duvarda kaybolan ısı yükünü düşürür. Duvar kenarındaki kok miktarının artışı ve merkezdeki kok miktarının düşüşü kohezive zonun "S" şeklini almasına sebep olur. Böyle bir kohezive zone şekli ise ısı kaybının artmasına, basınç kaybına, sıcak hava basıncının dalgalanarak düzensiz fırın prosesine yol açar. Uygun bir ergime bölgesi (kohesive bölge) elde etmek ve yüksek kömür enjeksiyon oranlarında bile kararlı bir fırın çalışması sağlayabilmek için iyi bir malzeme dağılımı şarttır.

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

2.4.2.5. Şarj Malzeme Kalitesinin Etkisi

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

Yüksek fırın şartlarında kok, yüksek basınç ve sıcaklığın etkisiyle sürekli olarak bir mekanik aşınma ve parçalanmaya maruz kalır. Kömür enjeksiyon miktarının artması ve kok miktarının azalması ile birlikte şarj edilen kok'un parçalanması hızlanır, gaz geçirgenliği düşer, dead-man kok yapısı bozulur. Ayrıca, kok, yüksek fırın içerisinde termal ve mekanik şokları absorblayan bir yapıya sahip olduğundan, kok miktarının azalması ile birlikte düzensiz şarj hareketlerinde artış gözlenir. Tüm bu etkenler, kömür enjeksiyonunu sınırlayan ve yanma verimini düşüren etkenlerdir [14].



Şekil 2.26. Kok reaktivitesinin kömür yanma oranı ve kok tozlaşması üzerine etkisi [24]

Bu nedenle, kömür enjeksiyonu yapılan bir yüksek fırında, kok'un fiziksel ve kimyasal özelliklerinin enjeksiyonsuz şartlara göre daha iyi olması gerekir. Özellikle, kok stabilitesinin 60'dan büyük, kok reaktivitesinin (CRI: Kok reaktivite indeksi) 35'den büyük olması ve ortalama tane boyutunun ise 50 mm'nin üzerinde olması gerekir [17].

Kömür enjeksiyon oranının artmasıyla birlikte fırın içi kok boyutunda düşme görülmekte ve fırının alt bölgelerinde geçirgenlik düşmektedir. Şarj edilen kokun mukavemetinin artmasıyla birlikte kok boyutunda artış sağlanır ve kok tozlaşması azalır. Bu durum, fırın geçirgenliğini artırıcı yönde etki gösterir [29].

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

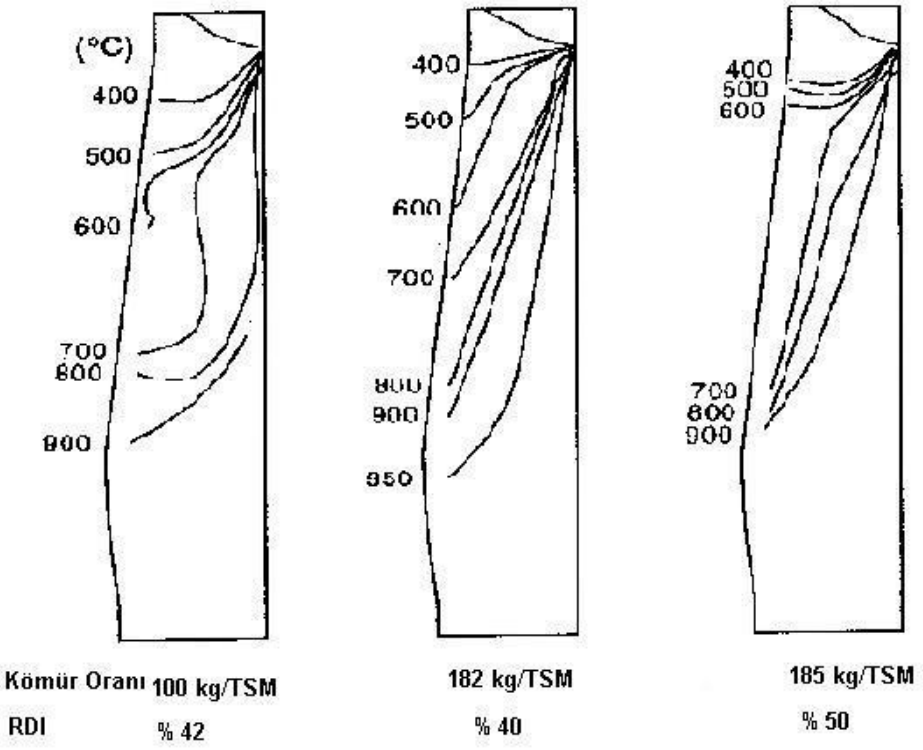
Yüksek enjeksiyon oranlarında fırın geçirgenliği üzerinde en önemli etkiye sahip hammaddelerden biri sinterdir. Sinter'in tane boyutunda homojenlik sağlanması pelet'e göre daha zordur ve yapı olarak parçalanmaya daha müsaittir. Özellikle, yüksek sinter oranı ile çalışıldığı durumlarda fırın geçirgenliğini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

Merrilville yüksek fırınlarında +6,3 mm tane boyutu için sinter oranı %70'den %75'e çıkarılarak, kok mukavemeti (M40) ise % 78'lerden %88'lere çıkarılarak yüksek enjeksiyon ve sinter oranlarında düzgün bir fırın çalışması sağlanmıştır [17].

Sinter kalitesini belirleyen en önemli kriterlerden indirgenme kırılma indeksi (RDI), indirgenebilirlik indeksi (RI) ve yumuşama–ergime özelliklerinin özellikle yüksek kömür enjeksiyon oranlarında büyük önemi vardır. Şekil 2.27'de sinter RDI oranı artışının fırın içi termal ısı dağılımı üzerine etkisi görülmektedir. RDI oranı artışı ile birlikte duvar kenarı gaz akışının da artmasının etkisiyle düşük sıcaklık termal zon'u fırının üst bölgelerine doğru kaymaktadır [24].

Sinter indirgenme kırılganlığı (RDI), sinter bazitesinin (CaO/SiO_2) ve %FeO miktarının artışı ile birlikte düşer. Sinter CaO/SiO_2 değerinin %1,8'den %2,2'ye artırıldığı durumda indirgenme kırılma indeksinin (RDI) %45'den %27'ye düştüğü, sinter %FeO miktarının %6'dan %10'a çıktığı durumda ise %45'den %26'ya düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca, sinter $\%Al_2O_3$ ve %MgO değerinin artması ise sinter

kırılganlığını artırır. Sinter indirgenebilirliği, sinter CaO/SiO_2 oranının artışı ve %FeO miktarının azalması ile artar [38].



Şekil 2.27. Kok redüklenme indeksi (RDI) ve enjeksiyon oranına göre fırın içi termal ısı değişimi [24]

Özellikle, sinter indirgenme kırılganlığının fırın gaz geçirgenliği üzerine oldukça belirgin etkisi vardır. Yüksek kömür enjeksiyon oranlarında çalışılırken indirgenme kırılganlığı düşük tutulmalıdır. Bu amaçla, Japon ve Avrupa yüksek fırınlarında sinter kırılganlık indeksini (RDI), %40'ın altında tutmak, sinter indirgenebilirlik indeksini (RI) %65'in üstünde tutmak yönünde bir eğilim vardır [35].

2.4.2.6 Kömüre Yapılacak İlavelerin Etkisi

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

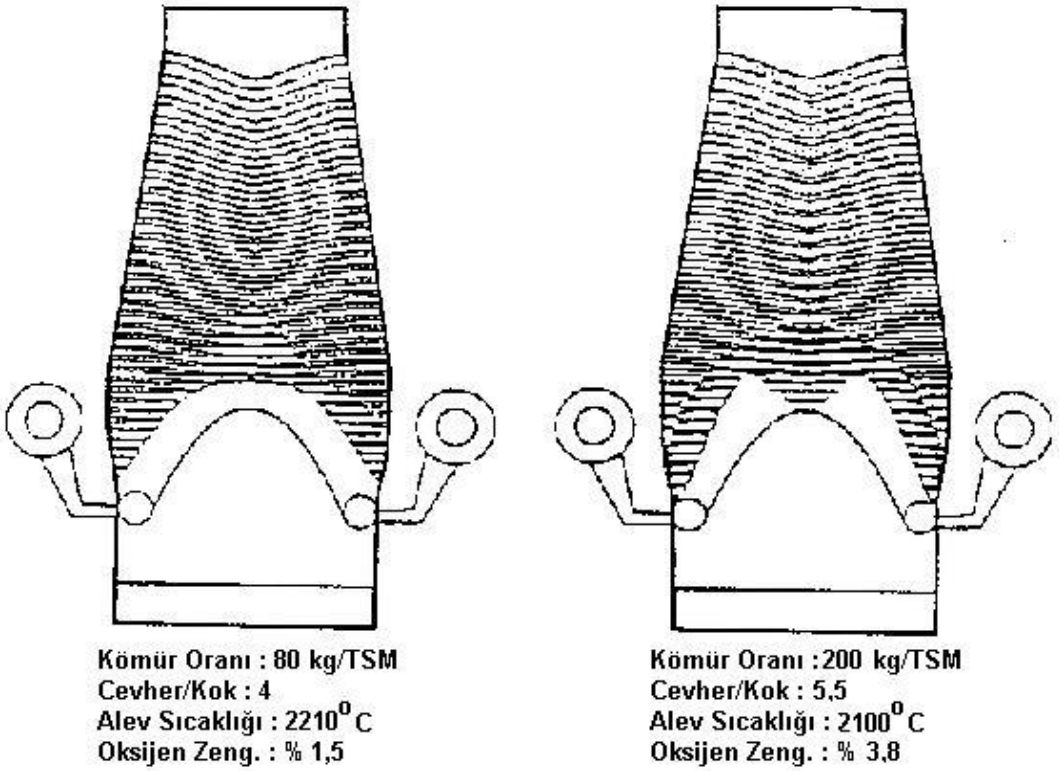
Bu konu ile ilgili olarak Hogovens demir-çelik fabrikalarında yapılan laboratuvar testleri çok olumlu sonuçlar vermiş, fakat gerçek prosese uygulandığında çok verimli olmadığı sonucuna varılmıştır. Schwelgern yüksek fırınlarında kömüre %2 oranında $CaCO_3$ karıştırılarak tüm tüyerlerden kömür enjeksiyonu yapılmış ve kömür enjeksiyon yanma veriminin bir miktar arttığı ve üretilen baca tozu miktarının azaldığı belirtilmiştir. $CaCO_3$ ilavesindeki amaç, ortamda var olan oksijenin reaksiyonu sonucu ilave CO gazı üretmek, dolayısıyla redükleyici gaz miktarını artırmaktır. Fakat, bu reaksiyon sonucunda aynı zamanda CaO'de üretilir. Bu ise doğrudan curuf kompozisyonunu etkiler, curuf bazitesini, curuf ergime sıcaklığını, curuf viskozitesini artırır ve fırın haznesinden curufun alınamaması gibi sorunlar ortaya çıkartabilir [14].

Kömüre $KMnO_4$ karıştırılarak da kömürün yanma verimini artırılabileceği ortaya konulmuştur. Shen'in yaptığı araştırmaya göre kömüre $KMnO_4$ ilavesi ile yanma zamanı kısaltılabilir. Fakat, bu tür ilavelerin curuf kompozisyonu ve diğer fırın parametreleri üzerine olan etkileri de düşürüldüğünde en son çare olarak ele alınmasında fayda vardır [24].

2.4.2.7. Enjeksiyon Miktarının Etkisi

Enjeksiyon miktarının artışı ile kısıtlı bir süre içerisinde kömürün oksijenle reaksiyona girip yanabilme olasılığı azalır ve yanma veriminde düşüş gözlenir. Yüksek enjeksiyon oranlarında raceway'de yanma fırsatı bulamayan kömürün bir kısmı fırın içerisinde boduard ve diğer reaksiyonlarla tüketilmekte, bir kısmı ise yüksek fırın gazları ile birlikte taşınarak fırını terketmektedir. Ayrıca, fırın içerisinde yakılamayan kömür fırın gaz geçirgenliğini, deadman geçirgenliğini bozar, yakıt oranında artışa ve fırın prosesinin bozulmasına neden olur [30].

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



Şekil 2.28. Kömür enjeksiyon miktarı artışının yumuşama-ergime bölgesi üzerine etkisi [24]

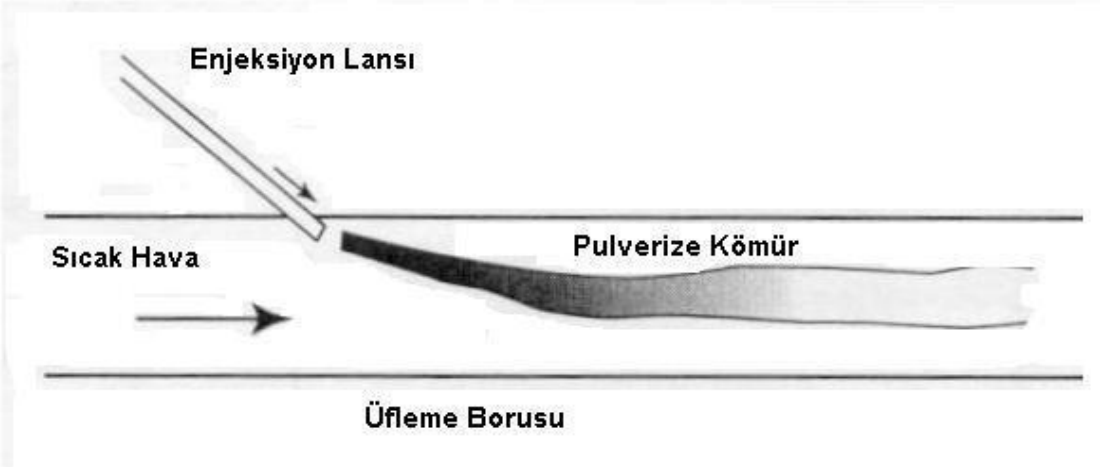
Yüksek kömür enjeksiyonu ile çalışılan şartlarda kömür yanma verimi düşer ve proses parametreleri iyi ayarlanamazsa yumuşama-ergime bölgesinin şekli bozulur. Şekil 2.28'de görüldüğü gibi 200 kg/TSM enjeksiyon seviyesinde kömürü verimli bir şekilde yakabilmek zordur. Fırın içi geçirgenliğin düşmesi ve raceway balonunun duvar kenarına kaymasının sonucu olarak W şeklinde kohesiv bölge yapısı oluşur. İdeal olan kohesiv bölge yapısı ters "V" şeklindeki yapıdır.

2.4.3. Enjeksiyon Lans Sisteminin Etkisi

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

için yapılacak en önemli değişikliklerden biri enjeksiyon lans sisteminin iyileştirilmesidir.

Pulverize kömür, enjeksiyon tesisinden basınçlı hava ile transfer edilerek enjeksiyon lansı vasıtasıyla üfleme borusu içerisine gönderilir. Üfleme borusu içerisindeki 200-250 m/s hıza sahip sıcak hava (1100^{o}C-1200^{o}C) ile birlikte tüyerler içerisinden geçerek yüksek fırına enjekte edilir.



Şekil 2.29. Geleneksel tek lans tipi enjeksiyon sistemi

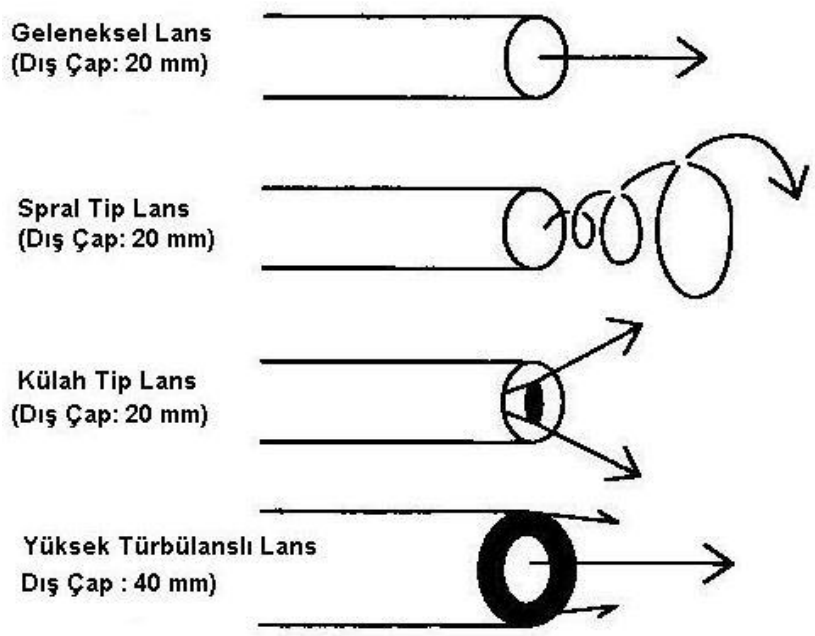
Enjeksiyon lansı ile tüyer burnu arasındaki mesafeyi artırmak da kömür yanma verimini artıran bir metodtur. Buradaki temel amaç ise, kömürün ısıtılmasının daha önce başlatılarak yanma prosesine zemin hazırlamak ve kömürün raceway'deki yanma süresini kısaltmaktır.

Kömürün verimli bir şekilde yanabilmesi için çok kısa bir süre içerisinde raceway bölgesinde tamamen gazlaşması gerekir. Aksi takdirde daha önce de anlatıldığı gibi fırın prosesinde olumsuz etkiler meydana getirir. Pulverize kömürün yanma süresinin azaltılması ve verimli yanmanın sağlanabilmesi için çeşitli enjeksiyon lans dizaynları geliştirilmiştir.

2.4.3.1. Lans Geometrisinin Etkisi

Enjeksiyon lansına gelen pulverize kömür tanecikleri çok yüksek bir momentuma sahiptir. Bu nedenle yönlerini değiştirmek ve maksimum saçılma sağlamak çok kolay değildir. Lanslarda yapılacak geometrik değişikler ile kömürün saçılma alanı genişletilebilir.

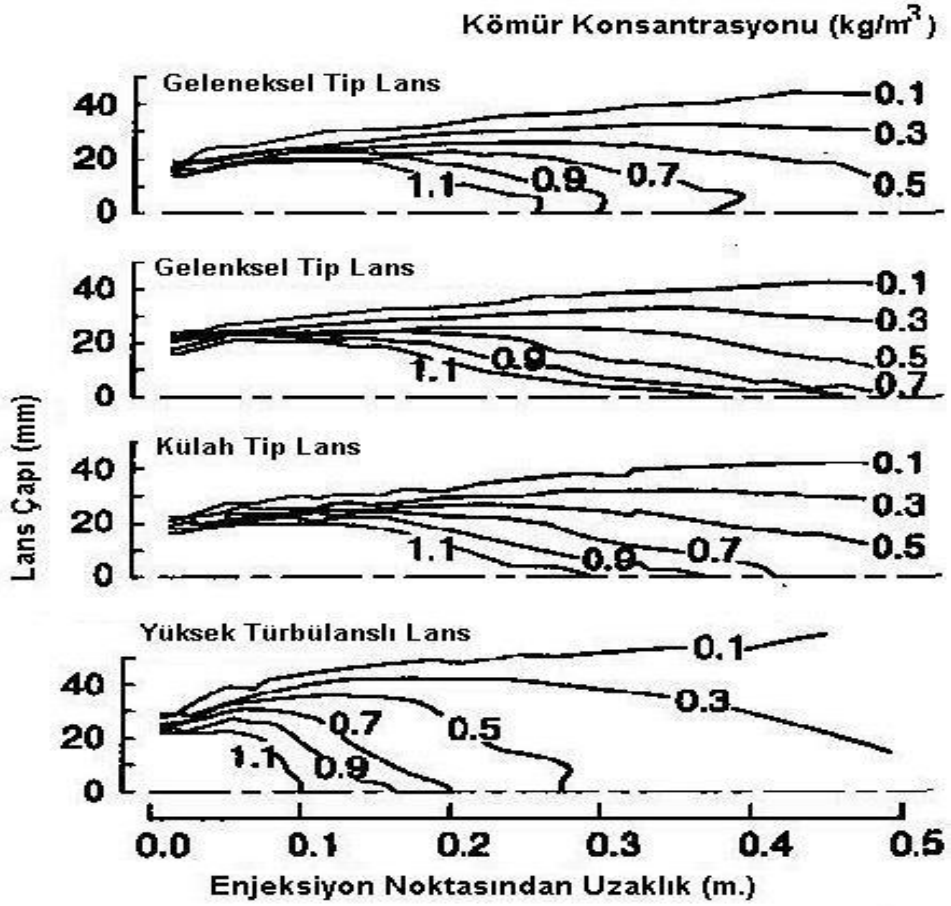
Takeda, şekil 2.29'da görülen 4 farklı tür geometrik enjeksiyon lansının, kömürün maksimum alana saçılması ve yanma verimi üzerine etkilerini incelemiştir. Bu sonuçlara göre, maksimum alana saçılma, yüksek türbülanslı lans tipinde elde edilmiştir. Tablo 4'te matematiksel modelleme yapılarak, lans geometrisinin kömürün yanma verimi üzerine olan etkisi görülmektedir [4].



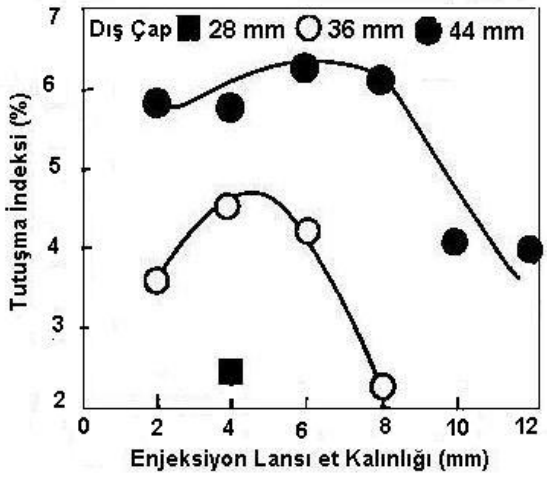
Şekil 2.30. Geometrik lans tipleri [24]

Tablo 2.4. Lans geometrisininin pulverize kömür yanma verimi üzerine etkisi [4]

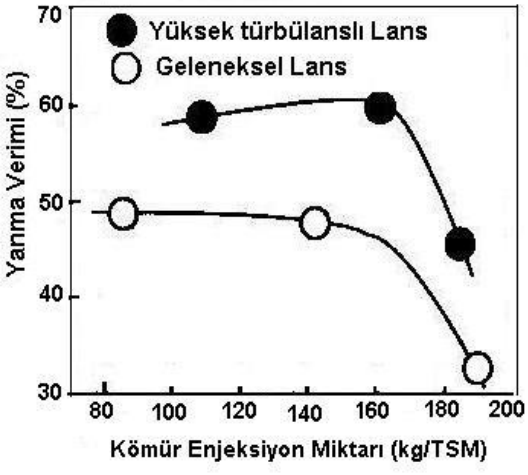
Lans Tipi	Yanma Verimi (%)
Geleneksel Lans	86,7
Spiral Tip Lans	87,2
Külah Tip Lans	87,1
Yüksek Türbülanslı Lans	90,5



Şekil 2.31. Lans geometrisinin pulverize kömürün saçılması üzerine etkisi [4]



Şekil 2.32. Enjeksiyon lansı et kalınlığının kömürün tutuşabilirliği üzerine etkisi [24]



Şekil 2.33. Yüksek türbülanslı lansın kömür yanma verimine etkisi. [24]

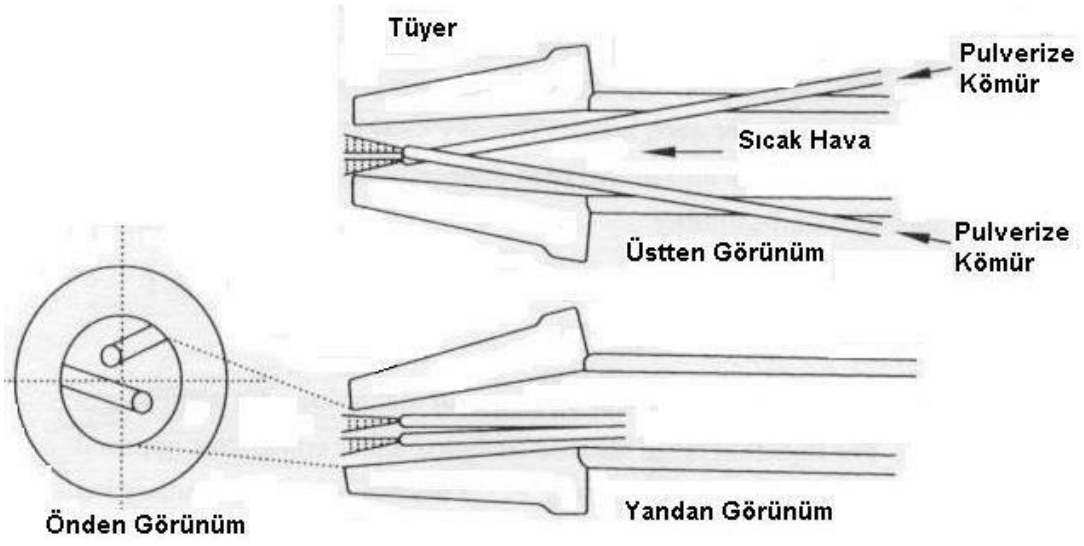
Takeda, yapılan araştırmalar sonucunda, lans çapı sabit tutularak lans et kalınlığının artırılmasının partiküllerin tutuşma oranını, dolayısıyla yanma verimini artırdığını

ortaya koymuştur. Fakat, lans et kalınlığı belirli bir değerden sonra enjeksiyon hızını artırıp kömürün saçılma oranı azaltarak yanma verimini düşürür [4].

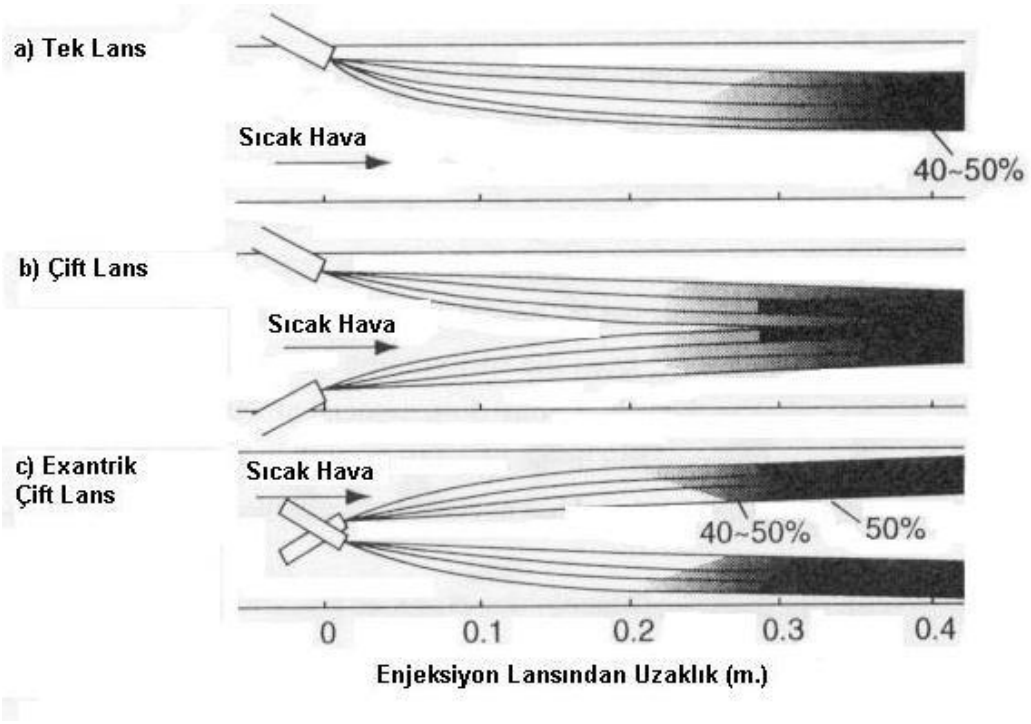
Sonuç olarak, lans geometrisini değiştirerek kömürün saçılma alanı genişletilir ve yanma verimi artırılır. En yüksek yanma verimi, yüksek türbülanslı ve et kalınlığı yüksek, enjeksiyon lansları kullanılarak elde edilir. Yüksek türbülanslı lans kullanıldığı durumda yanma verimi geleneksel lans kullanılan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

2.4.3.2. Çift Lans Sisteminin Etkisi

Çift lans ile kömürün saçılım oranı artırılarak kömür yanma verimi artırılır. Şekil 2.35'de 3 farklı lans sisteminin matematiksel modelleme yoluyla kömür yanma verimleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bu sonuçlara göre, exantrik çift lans ile en iyi yanma sağlanır. NKK yüksek fırınlarında eksantrik çift lans ile yapılan enjeksiyon ile tek lans ile yapılan enjeksiyona göre % 25 daha fazla yanma verimi elde edildiği belirtilmiştir. Ocak 1994'te NKK Fukuyama 4 no'lu yüksek fırınında, exantrik çift lans sistemi kullanılarak 218 kg/TSM enjeksiyon seviyesi yakalanarak rekor kırılmıştır.

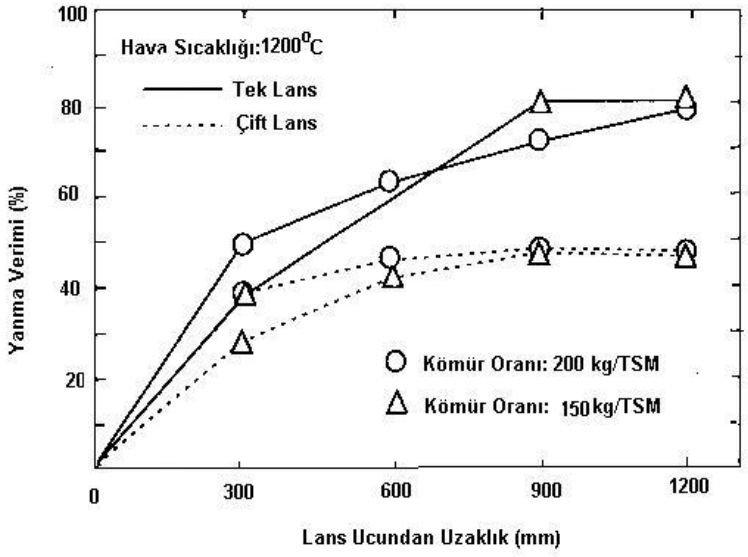


Şekil 2.34. Eksantrik çift lans sistemi [35]



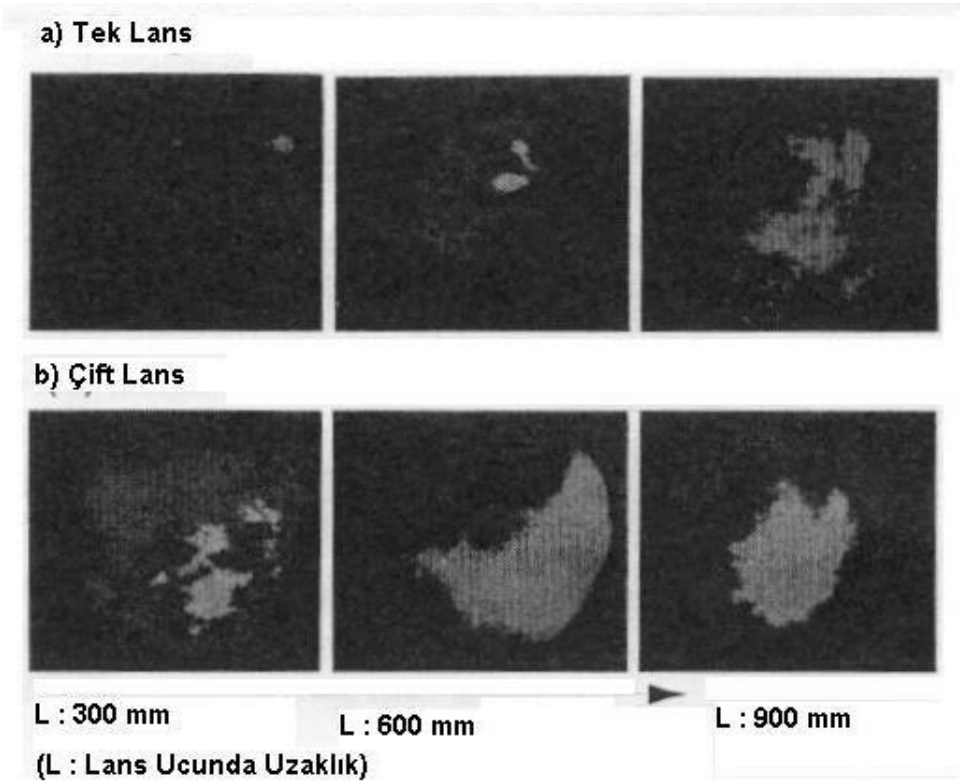
Şekil 2.35. Enjeksiyon lans tipine göre yanma yüzey alanı değişimi [24]

Şekil 2.35'te görüldüğü gibi, exantrik çift lans sistemi ile maksimum kömür yanma yüzey alanı elde edilmektedir. Şekil 2.36'da ise Fukuyama 4 no'lu yüksek fırınında 230 kg/TSM enjeksiyon seviyesinde tek lans sistemi kullanılarak yapılan enjeksiyonda kömür yanma verimi %58 iken, çift lans sistemine geçildiğinde yanma veriminin %74'e yükseldiği görülmektedir.



Şekil 2.36. Lans tipine göre yanma verimi değişimi [24]

Şekil 2.37'de kömürün çift lanstan enjeksiyonu ile tek lanstan enjeksiyonu esnasında çekilen fotoğraflar görülmektedir. Çift lanstan yapılan enjeksiyon ile kömür parçacıkalarının dağılma yüzeyi daha fazla genişletilir. Yanma yüzeyinin genişlemesi ise reaksiyon hızını artıran önemli bir etkendir.



Şekil 2.37. Çift ve Tek lanslı enjeksiyon sisteminde pulverize kömür grubunun yanma alevi görüntüsü [24]

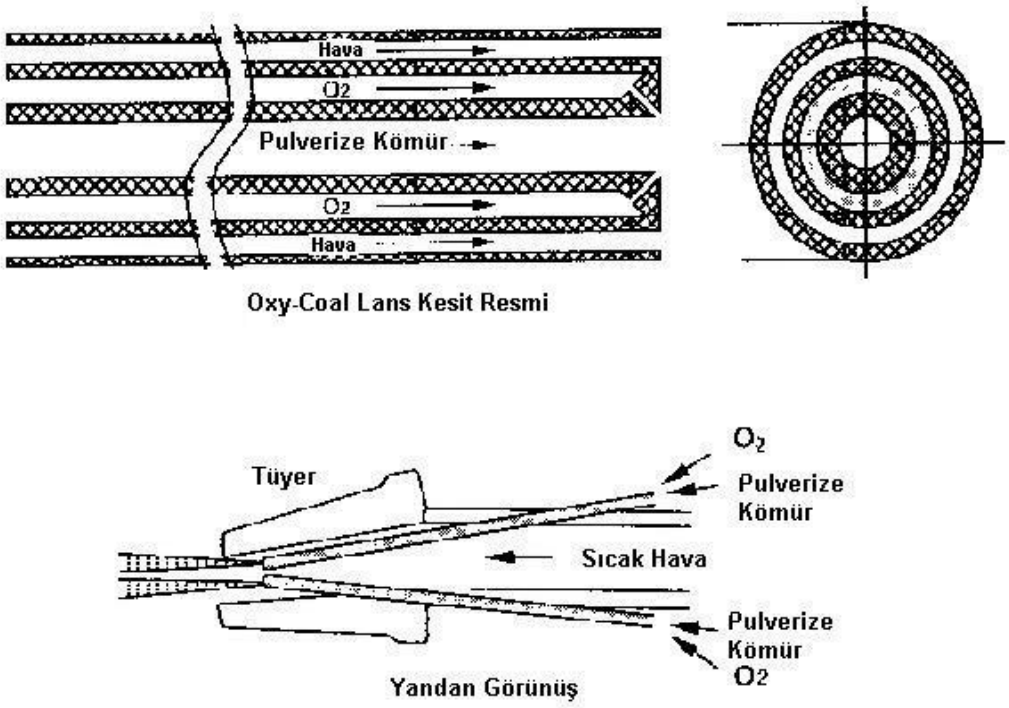
2.4.3.3. Oxy-Coal Lans Sisteminin Etkisi

Bu sistemde zenginleştirme amaçlı olarak verilen soğuk oksijen doğrudan lanstan kömürle birlikte verilmekte ve yanma veriminin artırılması hedeflenmektedir. İsveç SSAB yüksek fırınlarında spiral tip oxy-coal lanslar verimli bir şekilde kullanılmaktadır [24].

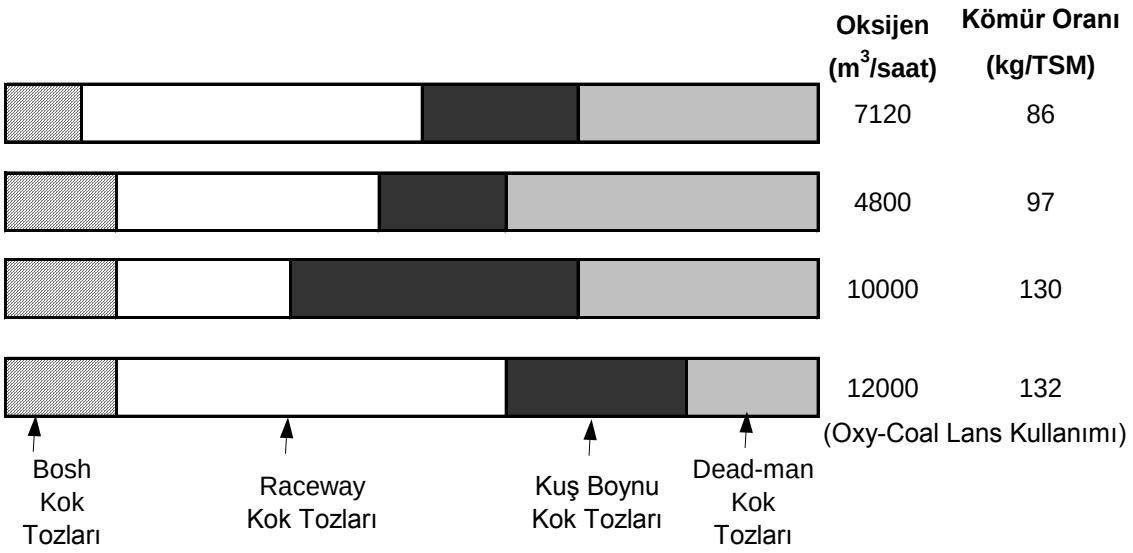
Kullanılan lansların iç çapı 9,8 mm, dış çapı 13,8 mm dir. Oxy-coal lansın dış çapı ise 27,6 mm dir. Şekil 2.38'de oxy-coal lansın kesit şekli görülmektedir.

Thysen oxy-coal lans kullanımı ile ilgili olarak, soğuk oksijenin gaz sıcaklığı ve gaz kompozisyonu üzerine etkileri üzerine yoğun araştırmalar yapmıştır. Araştırmalar sonucunda gaz kompozisyonları, sıcaklık dağılımını izlenmiş ve enjeksiyon

lansından verilen saf oksijenin kömürün yanma verimini artırdığını net olarak ortaya koymuştur [30].



Şekil 2.38. NKK'da kullanılan Oxy-Coal Lansın kesit resmi [24]



Şekil 39. Oxy-Coal enjeksiyon lansı kullanımının dead-man çevresindeki kok tozlarının azaltılması üzerindeki etkisi [30]

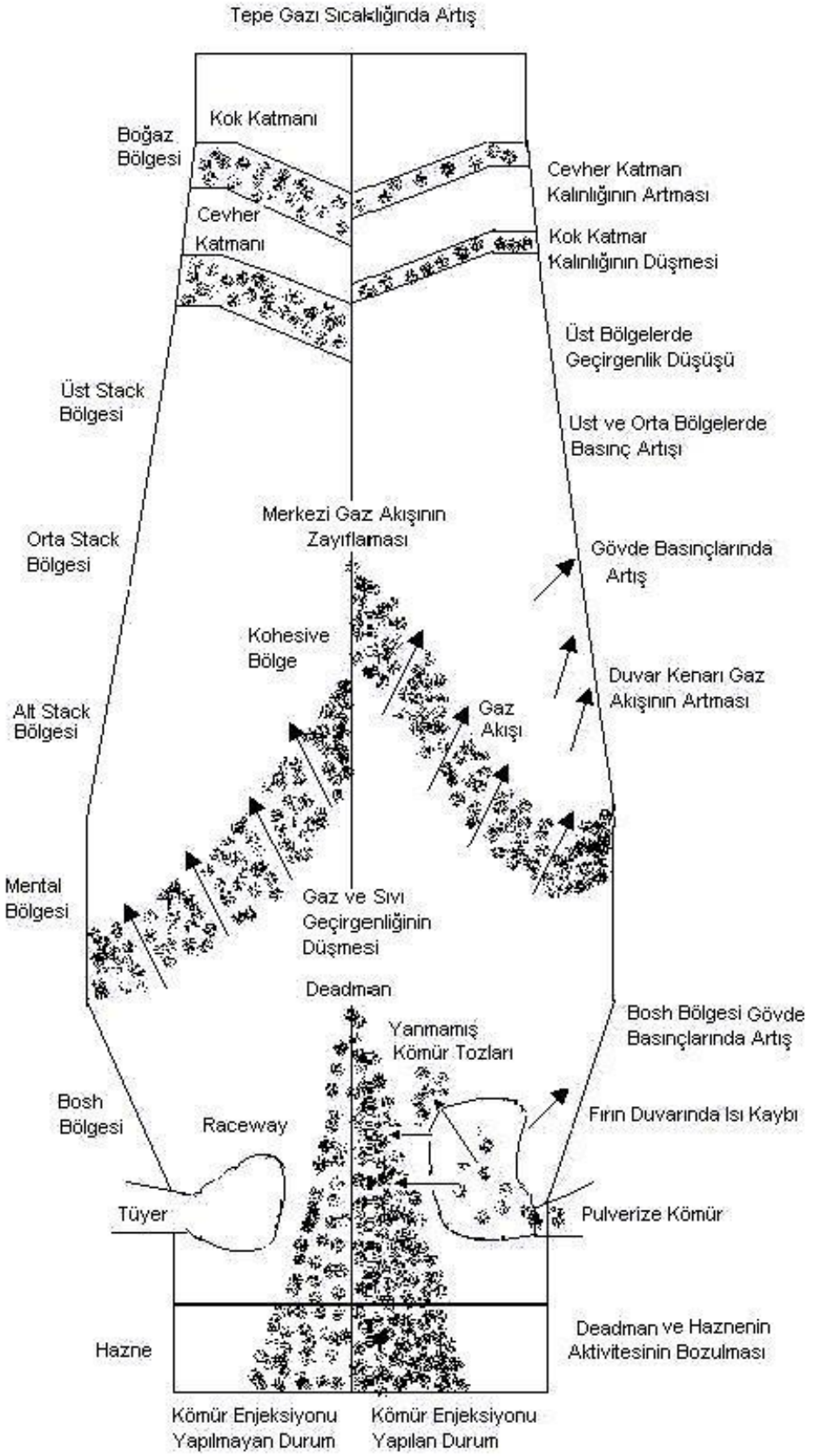
Kwangyang yüksek fırınlarında da oxy-coal lansın kömür yanma verimin artırılması ve dead-man çevresinde bulunan kok tozlarının azaltılması üzerinde oldukça etkili

olduğu görülmüştür. Şekil 2.39'da, Posco yüksek fırınlarında oxy-coal lansın verimli bir şekilde kullanılması ile raceway çevresindeki tozların özellikle kuş boynu tozlarının azaldığı görülmektedir.

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

2.5. Pulverize Kömür Enjeksiyonunun Yüksek Fırın Prosesine Etkisi

Şekil 2.40'da yüksek kömür enjeksiyon oranının yüksek fırın prosesine olumsuz etkileri görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi kömür enjeksiyonu yapılan şartlarda cevher/kok oranında artış, tüyer alev sıcaklığında düşüş, fırın duvarında ısı kaybı, merkezi gaz geçirgenliğinde zayıflama, deadman kok aktivitesinin bozulması gibi problemler yüksek fırın proses şartlarını ciddi oranda etkiler. Özellikle, yüksek kömür enjeksiyon oranlarında tüyer seviyesi ve fırın içi basınç farkında (delta P) artış ve fırın duvar kenarında ısı kaybında artış, yanma şartlarının bozulması ve kömür yanma veriminin düşmesi gibi belirgin durumlar gözlenir. Bu bölümde, kömür enjeksiyonun yüksek fırın prosesi üzerine olan olumlu, olumsuz etkileri teorik olarak incelenecek ve olumsuz etkilerinin nasıl minimize edileceği anlatılacaktır.



Şekil 2.40. Kömür enjeksiyonu yapılırken karşılaşılabilecek problemler [17]

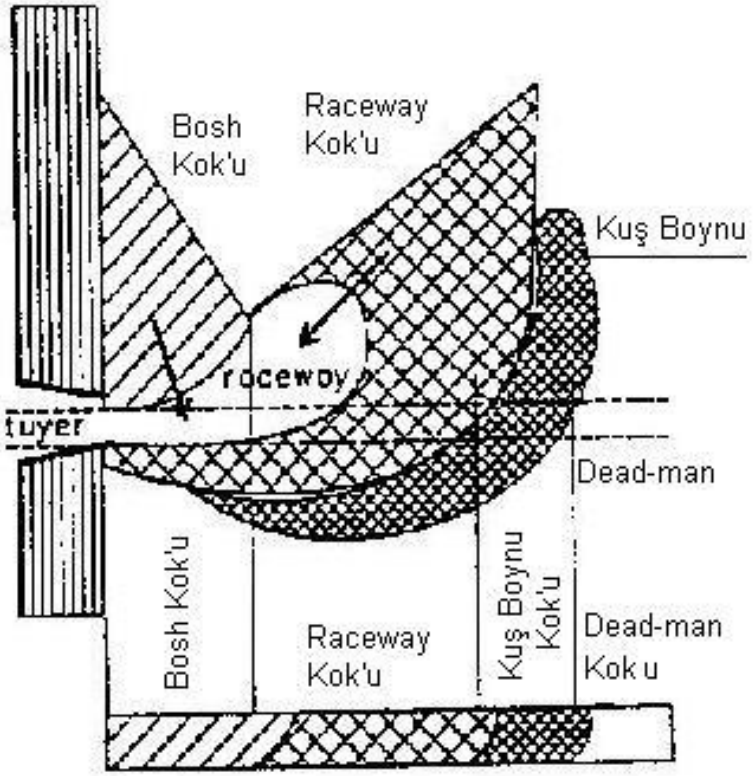
2.5.1. Raceway Koşulları Üzerine Etkisi

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

Kömür enjeksiyon oranının artışı ile beraber oksijen zenginleştirme de artırılırsa raceway derinliği artar. Enjeksiyon oranının artışı ile raceway'deki sıcaklık dağılımı ve kömür yanma veriminin de kontrol altına alınması gerekir. Şekil 2.11'de enjeksiyon oranındaki artışa paralel olarak raceway'deki gaz konsantrasyonu görülmektedir. Enjeksiyon oranı artışı ile birlikte raceway'deki CO_2 konsantrasyonu da tüyer uçuna doğru artış göstermektedir. Raceway'deki kütle ısı transfer hesabına göre maximum ısının bulunduğu yerde maksimum CO_2 konsantrasyonu bulunmaktadır. Bu sonuca göre, enjeksiyon oranı artışı ile beraber maksimum sıcaklık bölgesinin tüyer ucuna yaklaştığı söylenebilir [25].

Pulverize kömürün raceway kok yapısına etkilerini incelemek için Hoogovens Ijmudien 6 no'lu yüksek fırını raceway bölgesi kok yapısından numuneler alındı. Bu numuneler yüksek fırın duruşları sırasında 135, 175, 190 kg/TSM enjeksiyon seviyeleri sonrasında alınmıştır. Alınan toz numuneler önce elenerek kok ve kok olmayan numuneler ayrıldı. Sonraki aşamada ise mikroskop altında tane sayımı ve karbon reaktivite testleri sonucunda kömür kaynaklı tozlar tanımlandı. Şekil 2.31'de genel olarak bir tüyer seviyesi kok yapısı görülmektedir.

Fırın bosh bölgesinden inen koklar hava kesilir kesilmez raceway boşluğuna düşer ve üfleme sırasında raceway balonunun üst bölgesinde bulunur. Bu koklara "bosh kok'u" denir. Raceway bölgesini fırın merkezi yönünde çevreleyen küçük boyutlu ve yuvarlaklaşmış koklara ise "raceway kok'u" denir. Raceway koku sürekli olarak sıcak havadaki yoğun termal ve mekanik aşınmaya maruz kalır. Raceway kokunun hemen dışında ise "kuş boynu" olarak tabir edilen toz partikül oranının %50'lere çıktığı kompakt bir yapı takip eder. Kuş boynu, daha aktif olan raceway ve daha ilerisinde bulunan "deadman" ile karşılaştırıldığında daha düzgün köşegenel bir kok yapısına sahiptir. Kuş boynu raceway ve deadman arasında bir kabuk gibidir [31].



Şekil 2.41. Raceway çevresi kok yapısı [31]

Yukarıdaki bilgiler ışığında, tüyer seviyesinden numune alma probu ileriye doğru uzatılıp 4 farklı kok yapısından numuneler alınmıştır. Alınan numunelerde deadman koku'na rastlanmamıştır. Bu ise kuş boynu kabuk yapısının çok genişlemiş olduğunu göstermektedir. Değişik enjeksiyon seviyelerinde alınan numunelerde tüyer önü kok yapısının boyut değişimi takip edilmiştir. Bu sonuçlara göre enjeksiyon miktarının artırılması ile raceway kok'u içerisindeki tozlar % 10 seviyelerinden %20 seviyelerine çıkarken, kuş boynu kok yapısındaki tozların ise %50 seviyelerinden %60 seviyelerine çıktığı görülmüştür. Ayrıca, değişik enjeksiyon oranlarında bosh, raceway, kuş boynu kok yapılarının ortalama kok tane boyutu incelenmiş ve raceway koklarının daha düşük kok boyutuna sahip olduğu görülmüş ve enjeksiyon oranın artışı ile kok tane boyutunun düştüğü görülmüştür [31].

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

Yüksek kömür enjeksiyon oranında çalışılırken raceway çevresinde meydana gelen bu değişimler fırının alt bölgelerindeki ısı kaybını, fırın basıncını ve basınçtaki

dalgalanmaları artırmakta ve fırın gaz geçirgenliğini düşürmektedir. Enjeksiyon noktası raceway'e yaklaştırıldığında CO_2 konsantrasyonu raceway derinliğine doğru kayar. Enjeksiyon noktası ile raceway arasındaki mesafenin azaltılması partiküllerinin raceway'de kalma süresini azaltır, yanabilme şansını ve dolayısıyla yanma verimini düşürür.

Kwangyang yüksek fırınlarında, yüksek kömür enjeksiyon oranlarında kuş boynunun genişleyerek deadman ve fırın gaz geçirgenliğini bozmasının engellenmesi co-axial enjeksiyon lans sistemi ile çözülmüştür. Kwangyang 4 no'lu yüksek fırınında 1991 yılında yapılan denemeler sırasında, şekil 2.39'da görüldüğü gibi, kömür enjeksiyon miktarının artması ile birlikte kuş boynu katman kalınlığının arttığı, oxy-coal lans kullanımına geçildikten sonra ise azaldığı görülmüştür. Bundaki en büyük etki oxy-coal lanstan kömürle birlikte verilen oksijenin kömür yanma verimi artırması olmuştur [30].

Oksijen zenginleştirme, kömürün yanma verimliliğini artıran en önemli faktördür. Isı kaybını minimize ederek, sıcak hava sıcaklığını artırarak, sıcak hava basıncını artırarak, basınç dalgalanmalarını kontrol altına alarak, yeterli yanma verimliliğinin sağlanması yüksek pulverize kömür enjeksiyonunda kararlı fırın çalışmasının en önemli anahtarıdır. Yüksek kömür enjeksiyonunda raceway derinliğini muhafaza etmek için üflenen sıcak havanın hızı 210 m/s civarında olmalıdır [33].

Kömür enjeksiyon miktarının artırılması sırasında, özellikle yüksek fırın verimliliği ile çalışılırken, bosh gaz hacminde büyük artış olur. Bosh gaz hacminin artması, fırın duvarında ısı yükü artışı, fırın içi kayma hareketleri, sıcak metal sıcaklıklarının düşmesi gibi handikapları beraberinde getirir. Eğer buna bir de curuf hacminin ve curufta $\%Al_2O_3$ miktarının yüksek olması gibi etkenler de eklenirse, gerekli tedbirler alınmadığı takdirde proseste çok ciddi sorunlarla karşı karşıya kalınabilir. Bu sorunlarla başa çıkabilmek için öncelikle; oksijen zenginleştirme limit seviyeye kadar artırılmalı ve tepe basıncı düşürülmelidir, hava rutubeti kesinlikle minimize edilmelidir [30].

2.5.2. Alev Sıcaklığı Üzerine Etkisi

Enjeksiyon kömürünün yanması sonucu açığa çıkan yanma ürünleri CO, CO_2 ve H_2O'dur. Öte yandan açığa çıkan ısının bir kısmı enjekte edilen kömürün raceway sıcaklığına çıkarılması, sıcak kok ile yanma ürünleri arasında gerçekleşen endotermik reaksiyonların etkisi ile harcanır. Kömür ile birlikte fırına giren yüksek

orandaki hidrojen, su ve karbon arasında gerçekleşen endotermik reaksiyonların artmasına neden olur. Kömür, fırına enjekte edildiğinde raceway sıcaklığı sadece kok ile çalışılan duruma göre daha düşük olur. Fakat hava sıcaklığını artırarak, hava rutubetini düşürerek ve havadaki oksijen oranını artırarak bu düşüş önlenir. Bununla birlikte kömür miktar ve özellikleri kontrol edilerek de kömürün alev sıcaklığını düşürme etkisi ve fırın termal rejimine olan olumsuz etkisi engellenir. Kömürün raceway'deki soğutma etkisi ne kadar düşük olursa o kadar fazla kömür enjeksiyonu yapabilme imkanı vardır [34].

Kararlı bir yüksek fırın prosesinin ve sıcak metal kalitesinin sağlanması için alev sıcaklığının mümkün olduğu kadar sabit olması, dalgalanmaması ve belirli bir optimum seviyede olması gerekir. Alev sıcaklığının değişken olması yumuşama-ergime bölgesinin yapısının, fırın çalışmasının ve sıcak metal kalitesinin bozulmasına neden olur. Tüyer alev sıcaklığı, kömürün yanma kontrolünden ziyade, fırın kararlılığı sağlayan bir regülatör görevi görür. Scunthorpe yüksek fırın partiğine göre kömür enjeksiyonu yapılan şartlarda tüyer teorik alev sıcaklığı 2150^{o}C-2170^{o}C civarında olmalıdır [17].

2.5.3. Fırın Geçirgenliği Üzerine Etkisi

Kömür enjeksiyon seviyesinin düşük olduğu şartlarda kömür tamamen raceway'de yanar. Fakat, enjeksiyon oranı yavaş yavaş artırıldığında belirli bir değerden sonra kömür partikülleri raceway'de tamamen yanamaz. Yanmadan raceway'in dışına çıkan kömür tozlarının bir kısmı CO_2 ve H_2O ile reaksiyona girerek gazlaşır. Buna rağmen yanma fırsatı bulamamış partiküller raceway'in hemen ilerisinde bulunan deadman yapısına ve fırın içerisine yönlenir. Raceway'in dışına çıkan tozların bir kısmı deadman koku yapısına geçer, bir kısmı yüksek fırın gaz akışı yada curuf ile fırını terkeder, bir kısmı ise fırın içerisinde direkt redüksiyonlarla harcanır. Fırını terkeden kömür tozları gereksiz yere yakıt oranının artmasına, enjekte edilen kömürden faydalanılamamasına neden olur. Deadman yapısına geçen ve şarj malzemeleri arasına karışan kömür tozları ise fırın proses şartlarının bozulmasına ve fırın gaz geçirgenliğinin zayıflamasına neden olur [13].

Yüksek kömür enjeksiyon oranlarında tüyer seviyesindeki ortalama kok boyutunda CO_2 hücumunun da etkisiyle büyük bir düşüş görülür. Sonuç olarak, yüksek enjeksiyon oranlarında kok katmanlarının geçirgenliği ve süzme kapasitesi düşer, fırın geçirgenliği zayıflar. İyi bir fırın içi malzeme dağılımı ve hammadde kalitesi ile fırın içi gaz geçirgenliği iyileştirilir.

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

Scunthorpe yüksek fırınlarında 215 kg/TSM kömür enjeksiyonu ile çalışılan şartlarda iyi bir fırın geçirgenliği sağlanarak başarılı bir fırın çalışması elde edilmiştir [17].

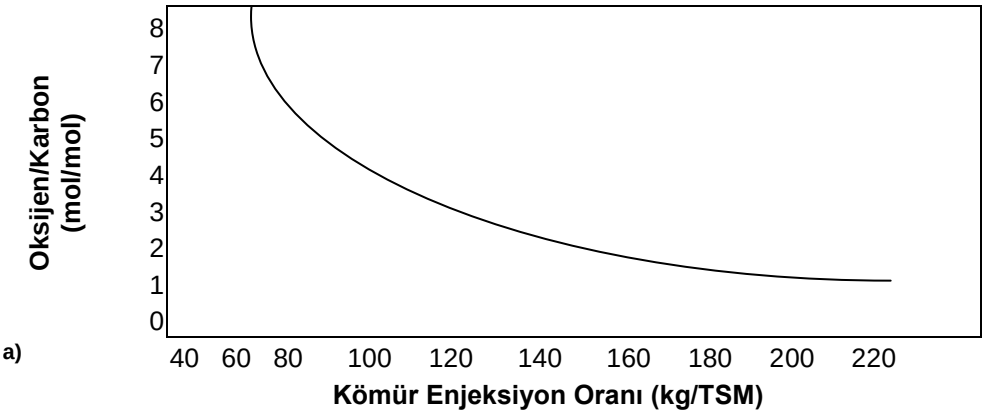
2.5.4 Deadman Kok Yapısına Etkisi

Raceway içerisinde yanamayan kömür parçacıklarının bir kısmı deadman kok yatağına gider. Bu ise deadman'in sıvı ve gaz geçirgenliğinin düşmesine neden olur. Ayrıca, raceway gazların önünü keserek, raceway balonun fırın duvarı yönüne kaymasına dolayısıyla fırın duvarında ısı kaybına ve yumuşama ergime bölgesinin şeklinin değişmesine neden olur. Bu problemin çözümü için kömürün raceway'i terketmeden yakılması ve deadman kokunu koruyacak önlemlerin alınması gerekir [28].

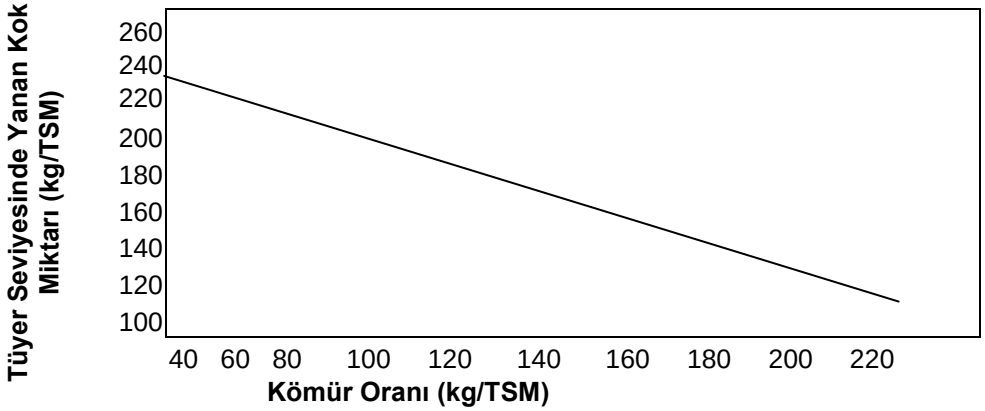
Yüksek kömür enjeksiyon oranlarında, fırın prosesinin kontrol edilmesinde tüyer önünde yanan kok miktarının çok büyük önemi vardır. Deadman kok'u sürekli olarak fiziksel özelliklerini ve dolayısıyla geçirgenliğini kaybetme ile karşı karşıyadır. Yanan kokun büyük bir kısmı yukarıdan tekrar şarj edilen kok ile yenilenmekle beraber deadman'in bir kısmı da yanarak harcanır. Bu nedenle, deadman'in tamamı üniform değildir. Enjeksiyon oranının artırılması ile birlikte deadman'in yenilenme zamanı da artar. Yenilenme zamanındaki bu artışın limit bir noktaya ulaşması neticesinde fırının alt bölgelerinde geçirgenlik problemi yaşanabilir [27].

Gaz ve sıvı fazların rahatlıkla geçebilmesi için dead-man kokunun geçirgenliği çok elverişli bir seviyede olmalıdır. Yüksek enjeksiyon oranlarında kok kullanımının azalması fırın boyunca gaz geçirgenliğinin azalmasına sebebiyet verir ve kömürün yanması sonucu kokun fırında kalma süresi artar [27].

Merkezi kok şarjı yapılması, deadman kokunun korunmasında boduard reaksiyonlarının önünü kestiği için büyük bir öneme sahiptir. Bu sayede deadman geçirgenliğinin düşmesine mahal vermeden düzgün bir fırın çalışması sağlanır [30].

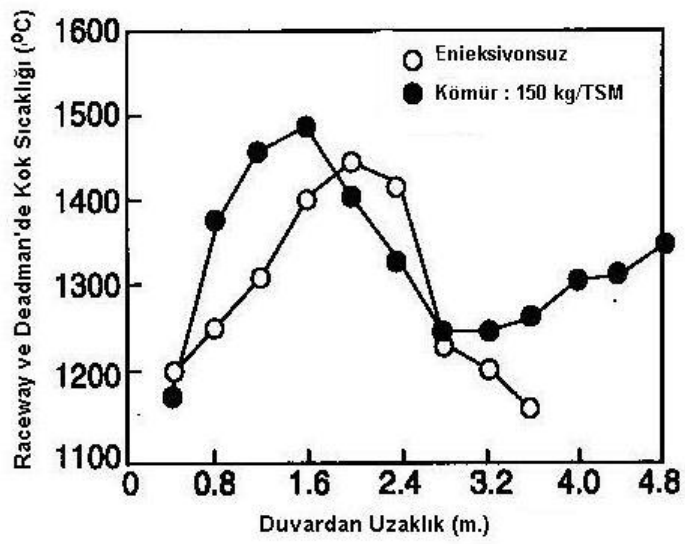


a)



b)

Şekil 2.42. Kömür enjeksiyon miktarının artışı ile tüyer önünde yanan kok miktarını değişimi [27]



Şekil 2.43. Kömür enjeksiyon miktarının raceway ve deadman kok sıcaklığı üzerine etkisi [24]

Şekil 2.43'te yüksek kömür enjeksiyon oranının raceway ve deadman kok sıcaklıkları üzerine etkisi görülmektedir. Bu ilişkiden de anlaşıldığı gibi, yüksek

enjeksiyon oranında, enjeksiyonsuz şartlara göre raceway kok sıcaklıkları daha yüksektir, fırının iç bölgelerine doğru gaz geçirgenliğinin de etkisiyle deadman kok sıcaklıklarında enjeksiyonsuz şartlara göre artış gözlenir.

Enjeksiyon oranı artışı ile deadman yapısındaki toz miktarı ve deadman kokunun parçalanması artar, buna bağlı olarak deadman'in geçirgenliği düşer [28].

2.5.5. Fırın Verimliliği Üzerine Etkisi

Kömür enjeksiyonunun fırın verimliliğini artırma yönünde bariz bir etkisi vardır. Enjeksiyon miktarının artırılması beraberinde oksijen zenginleştirme miktarı ve hava sıcaklığının da artırılmasını getirdiğinden fırın verimi de gözle görülür oranda artmaktadır. 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.

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

2.5.6. Sıcak Metal Kalitesi Üzerine Etkisi

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

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

Sıcak metal kükürt miktarını etkileyen en önemli faktör ise hammadde girdilerinin kükürt içeriğidir. Kükürt içeriği en yüksek olan hammaddenin ise kok olduğu

düşünülecek olursa, kok miktarı azaltılarak, yerine kükürt içeriği daha az olan kömür enjekte edilecek olursa sıcak metal kükürt miktarı düşer [17].

Hammade girdilerindeki Si miktarı değişmeden, sıcak metal silis miktarının artması, curuf içerisinde bulunan SiO_2 bileşiminin fırın içi yüksek ısı potansiyelinin etkisiyle sıcak deadman kokunun C'u ile reaksiyona girerek ve SiO_2'nin Si'e redüklenerek sıcak metaldeki Si miktarının artması şeklinde ifade edilebilir.

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

2.5.7. Curuf Özellikleri Üzerine Etkisi

Kömür kül miktarının curuf oluşum prosesi üzerine belirgin etkisi vardır. Curufun kükürt giderme kapasitesi ve curuf ergime sıcaklığı, kömür külü özelliklerine bağlı olarak etkileşim gösterir. Ayrıca, yanmamış kömür tozları ve yüksek fırın curufunun etkileşimi sonucunda curufun viscositesi düşer. Bunun sonucunda, hazneden curufun zamanında alınamaması, fırın içi basınç yükselmesi ve proses şartlarının bozulması gibi durumlar yaşanabilir. Asidik curuf bileşenlerinin curuf ergime sıcaklığını artırdığı bilinmektedir. Curuf ergime sıcaklığının artması ise curuf-metal ayrışımını güçleştiren ve curuf alma aşamasını olumsuz etkileyen bir etkendir [14].

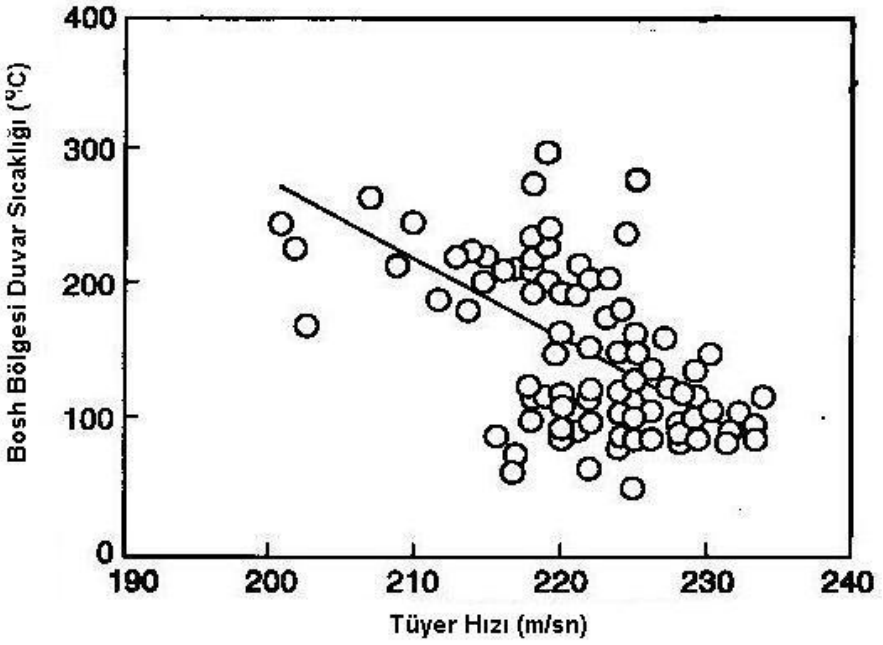
Kömür enjeksiyon miktarının artırılmasının hazneden curuf alınması üzerine oldukça baskın bir etkisi vardır. Raceway'de yanmayan kömür tozları curufun akışkanlığını düşürür. Bu durumda fırından curuf alınması güçleşir, haznede curuf seviyesi limit değerin üzerine çıktığında proseste olabilecek en küçük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

2.5.8 Fırın Duvarındaki Isı Yükü Üzerine Etkisi

Kömür enjeksiyonun artırılması ile enjeksiyonsuz duruma göre fırın duvarındaki ısı yükünde artış gözlenir. Enjeksiyon miktarının artırılması ile birlikte diğer proses parametreleri (oksijen miktarı, hava sıcaklığı, fırın içi malzeme dağılımı vb.) de uygun olarak değiştirildiği takdirde yüksek enjeksiyon oranlarında fırın duvarındaki

ısı yükündeki artış engellenebilir. Kömür yanma verimi için gerekli şartlar sağlanmaz ise fırın duvarındaki ısı yükünde ciddi oranlarda artış görülür. Bu ise, fırın enerjisinin gereksiz yere harcanması, yakıt sarfiyatının artması ve önlem alınmazsa fırın refrakterinin hasarlanmasına yol açar.

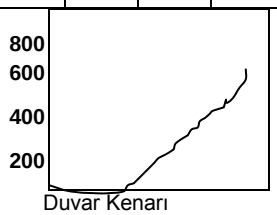
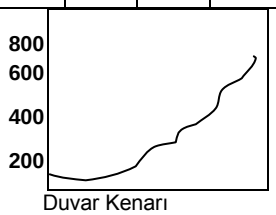
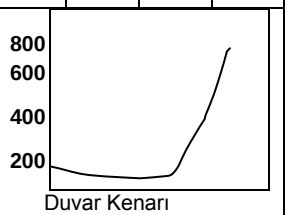
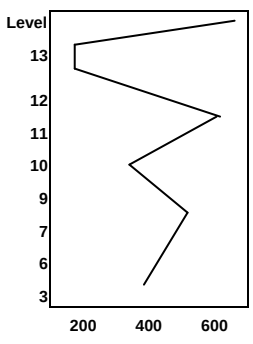
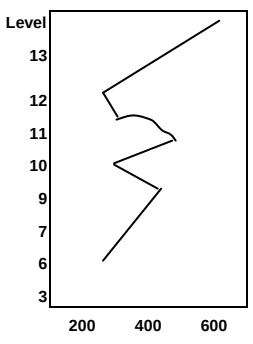
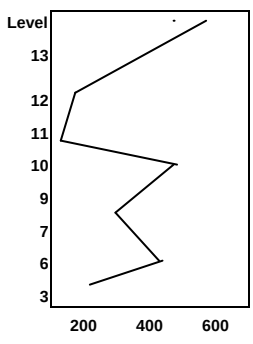
Pulverize kömür enjeksiyon oranının artışı ile birlikte raceway'de yanma fırsatı bulamayan kömür partikülleri, deadman geçirgenliğinin ve merkezi gaz akışının düşmesine neden olur. Bu koşullarda, tüyer hızının da yüksek olması durumunda merkezi geçirgenlik iyice bozulur ve yanma bölgesi tüyerler yönünde kayarak fırın refrakteri üzerindeki ısı yükünü artırır [17].



Şekil 2.44. Tüyer hızının fırın duvarındaki ısı yüküne etkisi [30]

Şekil 2.44'de tüyer hızının bosh bölgesi duvar sıcaklıklarına etkisi görülmektedir. Tüyer hızının yüksek olması kömürün raceway'de yanma şansını düşürür, raceway'in fırın merkezine doğru kaymasına ve fırın duvarındaki ısı yükünün azalmasına neden olur. Burada önemli olan fırın duvarında kaybolacak ısıdan elde edilen kazanç ile kömür yanma veriminden verilen tavizin dengelenmesi ve optimum seviyenin tespit edilmesidir. Özellikle, fırın refrakterinde ciddi hasarlanmalar var ise tüyer hızları bir miktar yükseltilebilir. Fakat bu uygulama mümkün olduğu kadar kohesiv bölgenin şeklini bozmadan tüyer hızının düşürülmesi şeklinde yapılmalıdır. Eğer tüyer hızı çok yüksek olursa (>260 m/s) deadman gaz geçirgenliği düşer ve sıcak gazlar geriye yansıyarak fırın duvarı yönüne kayar [14].

Yüksek kömür enjeksiyon oranlarında raceway'deki CO_2 konsantrasyonundaki değişimin de etkisiyle maksimum sıcaklık bölgesi, tüyer yönünde kayar. Bu ise fırının alt bölgelerinde ısı kayıplarının artmasına sebebiyet verir. Genellikle, yüksek enjeksiyon oranlarında fırın iç basıncının artması ile yüksek cevher/kok oranlarında kok katman kalınlığının düşmesi, raceway'in tüyerler yönünde kaymasına ve fırın duvarında ısı kaybına neden olur. Ayrıca, enjeksiyon artışı ile birlikte cevher/kok oranının artması, boduard reaksiyonun da artış, şarjdaki demirli malzeme miktarının artışı, fırın içi kok boyutunun düşmesi, fırın merkezi bölgesinde kok tozu miktarının artışı sonucunda fırın gaz geçirgenliği ve deadman geçirgenliğinin düştüğü gözlenir [27].

		DURUM 1				DURUM 2				DURUM 3			
Kok Oranı(kg/TSM)		479				461				468			
Kömür Oranı(kg/tsm)		100				160				190			
Cevher/Kok		4,15				4,96				5,41			
Kok	Oluk poziyonu	9	8	7	6	9	8	7	6	9	8	7	6
	Miktar (%)	40	50	10	0	10	20	50	10	10	20	60	10
Cevher	Oluk poziyonu	9	8	7	6	9	8	7	6	9	8	7	6
	Miktar (%)	10	50	30	10	60	20	20	0	60	20	10	10
Tepe Gazı Sıcaklığı (^oC)													
Refrakter Sıcaklığı (^oC)													

Şekil 2.45. Enjeksiyon miktarının artırılmasının refrakter sıcaklığı ve tepe gazı analizi üzerine etkisi [27]

İlva Taronto yüksek fırınlarında değişik fırın içi şarj dağılımları denenerek, kararlı bir merkezi gaz akışı sağlanmış, fırın duvarındaki ısı yükü kontrol altına alınmış ve kömür enjeksiyon sorunsuz bir şekilde artırılmıştır. Bu bağlamda, yüksek kömür enjeksiyon oranlarında duvar kenarındaki kok oranını düşürerek merkezdeki kok miktarını artırmak iyi bir merkez geçirgenliği elde edilmesini sağlar. Şekil 2.45'de enjeksiyon oranının 100 kg/TSM değerinden 190 kg/TSM'ye artırılması ile birlikte şarj dağılımındaki değişimin refrakter ve tepe gazı sıcaklığı üzerine olan etkisi görülmektedir [27].

2.5.9. Baca Tozu Üzerine Etkisi

Baca tozu içerisindeki karbon miktarı, enjekte edilen kömürün yanma verimini gösteren en önemli kriterlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu kritere göre, fırın içerisinde yanmayan pulverize kömürün bir kısmı fırın merkezinden yükselen sıcak gaz ile birlikte fırını terkederek baca tozu içerisine karışmaktadır [17].

Kömürün yanması için elverişli şartlar hazırlanmayıp tek başına enjeksiyon miktarı artırıldığında, baca tozundaki karbon ve baca tozu miktarında artış gözlenir. Oysa, daha öncede bahsedildiği gibi tek başına enjeksiyon miktarını artırmak kömür enjeksiyonun amacına terstir. Enjeksiyon miktarının artışı ile birlikte üflenen havanın oksijen oranı ve sıcak hava sıcaklığı artırılarak fırın içi termal ısısı korunur. Kömürün yanması sonucu ortaya çıkan ısı enerjisinin etkisiyle kömürün yanması için gerekli şartlar hazırlandığında, enjeksiyon miktarının artması ile birlikte baca tozundaki karbon miktarında düşüş gözlenir [17].

2.5.10. Fırın İşletme Şartlarının Kontrolü Üzerine Etkisi

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

Ancak, yüksek enjeksiyon oranlarında arızi sebeplerden dolayı enjeksiyonun kesilmesi fırın termal ısısının büyük oranda düşmesine sebep olur. Bu durumda prosesin kontrol altına alınabilmesi oldukça güçtür. Bu nedenle, enjeksiyonun kesilmesine neden olabilecek arızaların önüne geçilmesi gerekir. Yüksek fırın duruşları esnasında fırının iç termal ısısını kaybetmesi ve duruşun uzaması ihtimali göz önüne alınarak duruştan 8-10 saat önce enjeksiyon oranı düşürülmelidir. Queen Victoria yüksek fırınlarında duruştan 8 saat önce kömür enjeksiyonu 150 kg/TSM'den kademeli olarak 70 kg/TSM'ye düşürülmektedir. Özellikle, 24 saati geçecek duruşlardan 6-8 saat önce enjeksiyon tamamen sıfırlanmalıdır.

Yüksek kömür enjeksiyonu ile çalışılan fırınlarda daha kararlı bir proses sağlanır. Fırın termal balansı kontrolü iyi olmasından ve meydana gelebilecek muhtemel düzensizlikler durumunda kontrol kolaylığı ve çabukluk sağlandığından sıcak metal kalitesinde de iyi bir seviye elde edilir.

2.5.11. Kok Oranının Azaltılması Üzerine Etkisi

Yüksek fırına kömür enjeksiyonu yapılmasının en temel sebebi kok yerine maliyeti daha düşük olan kömürün kullanılmasıdır. Erdemir yüksek fırınlarında yaklaşık olarak 9 kg. kokun sağladığı ısı enerjisi 10 kg. pulverize kömür ile sağlanmaktadır [39]. Fakat enjeksiyon kömürünün maliyeti, kokun maliyetinin yaklaşık yarısı kadar olduğundan toplam yakıt maliyetinde önemli miktarda tasarruf sağlanmaktadır.

Kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile birlikte fırına yakıt olarak verilmekte olan kok miktarı azaltılır. Fakat, kokun yüksek fırında yakıt olarak kullanılması haricindeki en önemli görevi, gözenekli yapısıyla gaz ve sıvı geçirgenliği sağlayarak fırına maksimum miktarda hava üflenmesine izin vermesi ve kararlı bir fırın prosesinin sağlanmasına yardımcı olmasıdır [37]. Bu nedenle, enjeksiyon miktarının artırılması ile birlikte azaltılacak olan kok miktarının da bir alt limiti vardır.

Kömür enjeksiyon miktarı artırılırken proses parametreleri de uygun bir şekilde değiştirilir. Enjeksiyon miktarı artışının, fırın ısı potansiyelini artırdığı görüldüğünde şarjdaki kok oranı proses şartlarını bozmayacak oranda azaltılır. Böylece pulverize kömür miktarı artırılarak kontrollü olarak kok miktarı azaltılır. Kok miktarının azaltılmasının ve enjeksiyon miktarının artırılmasının fırın geçirgenliği, proses şartları ve toplam yakıt oranı açısından bir limit değeri vardır. Bu limitler aşıldığında, enjeksiyon amacından uzaklaşır. Toplam yakıt oranı artar, fırın verimliliği düşer, fırın çalışması bozulur [14].

Kimitsu yüksek fırınlarında, 220 kg/TSM kömür enjeksiyonunun verimli bir şekilde raceway koşullarında yakılabilmesine rağmen kok oranı belirli bir limit değerin altına düşürülemediği için, enjeksiyon oranının 130 kg/TSM seviyesinde tutulmasına karar verilmiştir [28].

Thyssen Schwelgern yüksek fırınlarında 1986-1990 yılları arasında, 200 kg/TSM kömür enjeksiyonu hedeflenerek çalışmalar yapıldı. Yapılan çalışmalar sonucunda 200 kg/TSM enjeksiyon seviyesine ulaşıldı, fakat fırının gaz geçirgenliği, kohesive bölge ve fırın çalışma limitlerinin zorlandığı ve toplam yakıt oranında artışa neden olduğu gerekçesiyle 173 kg/TSM enjeksiyon seviyesi, optimum enjeksiyon seviyesi olarak tespit edildi [14].

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

Tablo 2.5. Schwelgern yüksek fırınlarında kömür enjeksiyonunun artırılması [14]

	Birim	**1986**	**1987**	**1988**	**1988**
Kömür Oranı	(kg/TSM)	-	106	149	173
Kok Oranı	(kg/TSM)	482	376	334	305
Toplam Yakıt Oranı	(kg/TSM)	482	482	483	478
Hava Sıcaklığı	(^{o}C)	1129	1141	1159	1177
Hava Rutubeti	(g/ m^3)	30	16	10	6
Oksijen Oranı	(%)	21	21	22,4	22,4
Sıcak Metal Sıcaklığı	(^{o}C)	1487	1475	1478	1482
Sıcak Metalde Si	%	0,24	0,27	0,28	0,33

2.5.12. Maliyetler Üzerine Etkisi

Kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile;

-İlave enerji sağlandığından yakıt olarak kullanılan kok miktarı azaltılır,

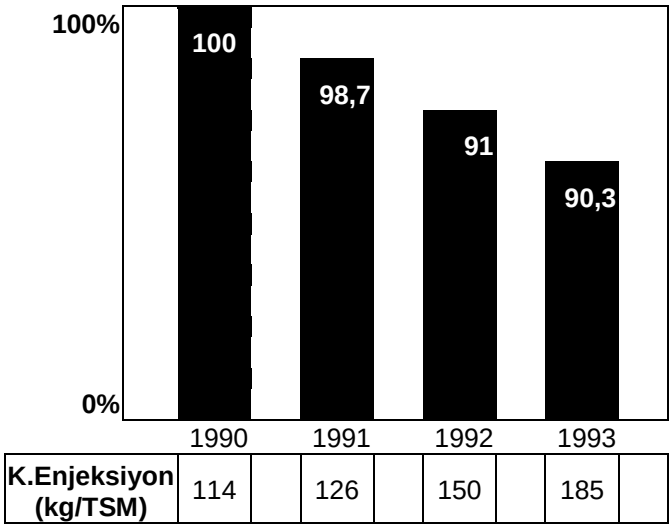
-Fırın kullanılabilir hacmi, oksijen zenginleştirme miktarı ve sıcak hava sıcaklığı artar, bunlara bağlı olarak ta üretim ve fırın verimliliği artar,

- Enerji maliyeti azalır,

-Aynı yakıt oranında yüksek fırın şarj kapasitesi artırılarak üretim artışı elde edilir,

-Kok üretiminin azaltılmasını dolayısıyla kok bataryalarının ömrünün uzaması sağlanır.

Taranto yüksek fırınlarında mümkün olan en düşük kok oranına doğru sürekli bir eğilim olduğundan yakıt maliyetleri belirgin bir şekilde düşmektedir. 1993 yılında Taranto'da kömür maliyeti kok maliyetinin % 60 kadardı. 1990 dan 1993 yılına kadar kömür enjeksiyonu sayesinde toplam yakıt maliyetinde % 10 düşüş sağlanmıştır (Şekil 2.46). 1992 ve 1993 yıllarında yakıt maliyeti düşüşünden elde edilen net kar 50 ve 56,6 milyon DM olmuştur [27].



Şekil 2.46. Ilva Taronto yüksek fırınlarında kömür enjeksiyonuna bağlı olarak yakıt maliyetindeki düşüş [27]

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

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

Kömür enjeksiyonu yapılırken sağlanan yakıt maliyeti tasarrufu şu şekilde hesaplanır;

Kok Maliyeti Tasarrufu:

Kok Tasarrufu (kg/TSM) x Sıcak Metal Üretimi (ton) x Kok Maliyeti (TL/kg)

Enjeksiyon Maliyeti :

Enjeksiyon Oranı (kg/TSM) x Sıcak Metal Üretimi (ton)x Kömür Maliyeti (TL/kg)

Toplam Yakıt Maliyeti Tasarrufu:

Kok Maliyeti Tasarrufu (TL)- Enjeksiyon Maliyeti (TL)

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kömür enjeksiyonunun maliyetlerde sağladığı avantajlarla demir-çelik sektöründe rekabetin bir ölçüsü olarak, özellikle son 10 yılda kömür enjeksiyonunun yüksek fırınlarda verimli kullanımının geliştirilmesine yönelik olarak çok yoğun araştırmalar yapılmıştır. Laboratuvar, simülasyon fırın ve gerçek yüksek fırın şartlarından elde edilen sonuçlarla kömür enjeksiyon teknolojisi oldukça gelişmiş ve gelişmeye devam etmektedir. Yüksek fırın prosesi oldukça kompleks ve çok etkileşimli bir proses olduğundan gerçek yüksek fırın sonuçları, laboratuvar çalışmaları ve simulasyon deneyleri ile desteklenmiş, ortaya oldukça başarılı sonuçlar çıkmıştır.

Bu bölümde, kömür enjeksiyonunun geliştirilmesine zemin hazırlamak ve bir ışık tutmak amacıyla, 2001 ve 2002 yıllarında Erdemir No.1 Yüksek Fırınında kömür enjeksiyonunun yüksek fırın prosesine etkilerine ilişkin olarak yapılan deneysel çalışmalar yeralmaktadır.

3.1. Kullanılan Hammaddeler

3.1.1. Enjeksiyon Kömürleri

Tablo 3.1. Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan enjeksiyon kömürlerinin analiz değerleri

Kömür Adı	Kömür Özellikleri					Kömür Analizi					KÖMÜR ORANI (kg/TSM)
	Kül (%)	Uçucu (%)	HGI	Sabit Karbon	Isı (Cal/Kg)	S (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	
A	11,40	33,72	52	55	6912	0,51	73,57	4,49	1,66	8,37	100
B	10,61	34,03	54	55	6877	0,38	78,91	4,70	1,44	2,89	132
C	8,30	32,03	61	60	6912	0,41	79,94	4,52	1,71	4,60	113
D	10,61	34,03	54	55	7240	0,38	78,91	4,70	1,44	2,89	134
E	8,30	32,03	61	60	6906	0,41	79,94	4,52	1,71	4,60	117
F	9,80	33,67	53	57	7240	0,43	73,74	4,37	1,27	10,39	121
G	9,04	30,49	65	61	6906	0,54	77,50	4,25	1,14	7,54	104
H	9,80	33,67	53	57	7204	0,43	73,74	4,37	1,27	10,39	103
I	10,64	32,88	55	56	6783	0,52	74,16	4,86	1,19	8,63	91
J	10,61	34,18	57	55	6955	0,35	72,21	4,83	1,31	10,69	109
K	10,64	32,88	55	56	6783	0,52	74,16	4,86	1,19	8,63	97
ORTALAMA	**9,58**	**32,68**	**58**	**58**	**7054**	**0,44**	**76,94**	**4,55**	**1,44**	**6,73**	**111**

Tablo 3.2. Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan enjeksiyon kömürlerinin kül analizleri [39]

Kömür Adı	Kül Analizi										
	Fe_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	MnO (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	P (%)	S (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	TiO_2 (%)
A	4,35	61,40	0,040	25,02	2,88	0,95	0,170	0,547	0,750	0,620	1,120
B	4,22	63,72	0,045	24,68	2,66	0,90	0,147	0,542	0,770	0,536	1,157
C	4,97	62,19	0,033	25,09	2,30	0,84	0,284	0,456	0,700	0,428	1,374
D	4,22	63,72	0,045	24,68	2,66	0,90	0,147	0,542	0,770	0,536	1,157
E	4,97	62,19	0,033	25,09	2,30	0,84	0,284	0,456	0,700	0,428	1,374
F	5,56	59,97	0,040	24,42	4,10	1,12	0,439	0,566	0,650	0,754	0,880
G	4,94	59,09	0,025	27,01	3,02	0,83	0,579	0,394	0,940	0,420	1,250
H	5,56	59,97	0,040	24,42	4,10	1,12	0,439	0,566	0,650	0,754	0,880
I	3,69	62,35	0,016	27,51	2,00	0,66	0,276	0,246	0,940	0,542	1,048
J	5,18	63,14	0,060	23,91	2,36	1,08	0,362	0,161	1,800	0,240	1,040
K	3,69	62,35	0,016	27,51	2,00	0,66	0,276	0,246	0,940	0,542	1,048
ORTALAMA	**4,75**	**61,71**	**0,034**	**25,44**	**2,69**	**0,88**	**0,322**	**0,432**	**0,843**	**0,500**	**1,180**

3.1.2 Kok

Tablo 3.3. Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan kokun analiz değerleri

% Nem	% Kül	% Uçucu	Sabit Karbon	%S	Stabilite	+75mm.	+25mm.	-25mm.
4,31	9	1,1	85,5	0,61	60	8	87	5

Tablo 3.4. Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan kok külünün analiz değerleri

Fe(%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO(%)	MgO(%)	S(%)	K2O(%)	Mn(%)	Zn(%)	P(%)	S(%)	Bazite
0,37	4,41	2,91	0,2	0,08	0,59	0,0345	0,03	0,001	0,03	0,58	0,04

3.1.3 Sinter

Tablo 3.5. Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan sinterin ortalama analiz değerleri

% Fe	% FeO	% SiO_2	% Mn	% Al_2O_3	% CaO	% MgO	% P	% S	% K_2O	% Zn	% Na_2O	Bazite
57,12	9,26	4,56	0,93	1,70	9,62	1,20	0,073	0,018	0,074	0,016	0,029	1,73

3.1.4 Pelet

Tablo 3.6. Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan peletin ortalama analiz değerleri

Fe (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	S (%)	K_2O (%)	Mn (%)	Zn (%)	P (%)	S (%)	Bazite
64,99	2,36	0,32	2,49	0,011	0,002	0,012	0,022	0,001	0,013	0,011	1,44

3.1.5 Parça Cevher

Tablo 3.7. Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan parça cevherin ortalama kimyasal analiz değerleri

Parça Cevher Adı	Fe	SiO_2	Mn	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	K_2O	Zn	Na_2O	B/A
A	57,77	3,68	1,59	1,04	0,44	0,15	0,045	0,114	0,069	0,013	0,021	0,125
B	59,77	2,87	0,66	1,53	0,53	0,15	0,047	0,038	0,024	0,017	0,013	0,154
C	59,13	3,03	2,11	1,2	0,54	0,18	0,055	0,104	0,049	0,008	0,02	0,17
D	59,04	3,85	1,46	1,1	0,57	0,24	0,056	0,013	0,089	0,027	0,027	0,163
E	60,04	3,5	0,88	0,94	0,44	0,13	0,051	0,035	0,035	0,011	0,024	0,128
F	60,41	3,54	0,55	1,4	0,52	0,21	0,055	0,041	0,028	0,015	0,012	0,147
G	59,03	2,68	1,48	0,94	0,82	0,31	0,04	0,044	0,028	0,019	0,011	0,312
Ortalama	**59,31**	**3,31**	**1,25**	**1,16**	**0,55**	**0,20**	**0,050**	**0,056**	**0,046**	**0,016**	**0,018**	**0,171**

3.2 Kullanılan Cihaz, Alet ve Malzemeler

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

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

Tablo 3.8. Sistemde bulunan ve deneysel çalışmalarda kullanılan dataların alındığı başlıca sensörler ve bulunduğu bölgeler

	Kullanılan Aletler /Ekipmanlar	**Alet/Ekipman Tipi**	**Amaç**	**Bulunduğu Yer**
1-	Sıcaklık Sensörleri	Termokupollar	-Fırına giren sıcak hava sıcaklığını ölçmek. - Fırın gövde refrakterinde oluşan sıcaklık değerlerini takip etmek. -Sıcak metal sıcaklığını daldırma yöntemiyle ölçmek. -Fırını terkeden gazların fırın boğaz çap kesiti boyunca sıcaklık dağılımını ölçmek.	-Sıcak havanın tüyerlere girişi öncesinde - Fırın gövde refrakterinin tüm kritik noktalarında (yaklaşık 2/3'ü bosh bölgesinde) - Portatif termokupol -Fırın gövde refrakterinin bittiği tepe noktada.
2-	Basınç Sensörleri	Transmitterler	-Fırına giren havanın sıcaklığını ölçmek. - Fırın gövde refrakterinde oluşan basınç değerlerini takip etmek. -Yüksek fırın tepe basıncını ölçmek.	-Sıcak havanın tüyerlere girişi öncesinde -Fırın gövde refrakterinin kritik noktalarında -Yüksek fırını terkeden sıcak gazların, fırını terkettiği nokta olan down comer borusu girişinde
3-	Gaz Sensörleri	Analizörler	-Yüksek fırını terkeden artık gazların % olarak bileşimlerini ölçmek.	-Fırını terkeden artık gazları taşıyan gaz borusu üzerinde
4-	Ağırlık Ölçüm Sensörleri	Loadceller	-Yüksek Fırına enjekte edilen kömür miktarının belirlenmesi -Yüksek fırına şarj edilecek malzemelerin tartılması. -Üretilen sıcak metalin tartılması.	-Kömür enjeksiyon tesisi enjeksiyon tankı. -Yüksek Fırın hammadde besleme sistemi şarj hazneleri -Çelikhane girişi sıcak metal kantarları
5-	Şarj Dağılım Oluğu	Döner Oluk	-Fırına Hammadde şarjının yapılması	-Fırın tepesi, boğaz bölgesi

3.3. Deneysel Çalışmaların Yapılışı

3.3.1 Kömür Enjeksiyonunun Alev Sıcaklığı Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Alev sıcaklığından kasıt, yanma reaksiyonları sonucunda tüyer önünde oluşan maksimum teorik sıcaklıktır. Alev sıcaklığı, hava sıcaklığı, ortama giren hava ve oksijen miktarı, sıcak hava rutubetinin bir fonksiyonu olarak formülüze edilip, yüksek fırın DCS ekranına aktarılan değerdir. Kömür enjeksiyon miktarının alev sıcaklığı üzerine etkisinin incelenmesi için tüm proses parametreleri sabit tutularak, enjeksiyon miktarı artırılmış ve alev sıcaklığı değişimi takip edilerek datalar kaydedilmiş ve prosesteki değişim gözlenmiştir.

Kömür enjeksiyonunun teorik tüyer alev sıcaklığı üzerine etkisinin incelenmesi için;

- Kömür enjeksiyon miktarı artırılmış,
- Şarjdaki kok, demirli hammadde, flaks, miktar ve özellikleri sabit tutulmuş,
- Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktarı, hava rutubeti) sabit tutulmuş,
- Fırın içi şarj malzeme döküş pozisyonları sabit tutulmuştur.

3.3.2. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Gaz Geçirgenliği Üzerine Etkisinin İncelenmesi

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

Kömür enjeksiyonunun fırın geçirgenliği üzerine etkisinin incelenmesi için;

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

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

3.3.3. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Verimliliği Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Fırına enjekte edilen kömür miktarının artırılması ile birlikte alev sıcaklığında düşüş gözlenmiştir.
- Sıcak hava sıcaklığı artırılmış,
- Oksijen zenginleştirme miktarı artırılmış,
- Sıcak hava rutubeti azaltılmış,

Alev sıcaklığı 2100^{o}C-2150^{o}C aralığında tutulmuştur.

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

Fırın Verimliliği (ton/gün/m^3) = Sıcak Metal Üretimi (ton/gün) / Faydalı Hacim (m^3)

Kömür enjeksiyonunun fırın verimliliği üzerine etkisinin incelenmesi için;

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

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

3.3.4. Kömür Enjeksiyonunun Sıcak Metal Kalitesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Kömür enjeksiyonunun sıcak metal kalitesi üzerine etkilerinin incelenmesi için hammadde girdileri değiştirilmeden enjeksiyon miktarı artırılmış ve sıcak metal analizlerindeki değişimler gözlenmiştir.

Sıcak metal kalite göstergesi olarak 3 kriter ele alınmıştır. Bunlar,
-Sıcak metal sıcaklığı,
-Sıcak metal "S" miktarı,

-Sıcak metal “Si” miktarıdır.

Bu amaçla, kömür enjeksiyon miktarı değişimi ile birlikte sıcak metal kimyasal analiz değerleri ve portatif daldırma tip termokupol ile ölçülen sıcak metal sıcaklıkları incelenmiştir.

Kömür enjeksiyonunun sıcak metal kalitesi üzerine etkisinin incelenmesi için;

- Kömür enjeksiyon oranı artırılırken, kok oranı azaltılmış,
- Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktarı, hava rutubeti, alev sıcaklığı) fırın iç ısı potansiyeli dikkate alınarak değiştirilmiş,
- Girdi hammaddelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri sabit tutulmuştur.

3.3.5 Kömür Enjeksiyonunun Fırın Duvarındaki Isı Yükü Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Kömür enjeksiyonunun, fırın duvarındaki ısı yükü üzerine etkisinin incelenmesi için enjeksiyon miktarındaki değişim ile birlikte fırın duvarında bulunan sıcaklık termokapıllarının ölçüm sonuçları izlenmiş ve enjeksiyon miktarı ile refrakter sıcaklığı arasında ilişki kurulmuştur. Bu amaçla, kömür enjeksiyonunun etkisinin en fazla hissedildiği bölge olan yüksek sıcaklık bölgesi olarak da bilinen bosh bölgesi refrakter sıcaklıkları izlenmiştir.

Kömür enjeksiyonunun fırın duvarındaki ısı yüküne etkisinin incelenmesi için;

- Kömür enjeksiyon oranı artırılırken, kok oranı azaltılmış,
- Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktarı, hava rutubeti, alev sıcaklığı) fırın iç ısı potansiyeli dikkate alınarak değiştirilmiş,
- Fırın gövde soğutma suyu debisi sabit tutulmuştur.

3.3.6 Kömür Enjeksiyonunun Baca Tozu Üzerine Etkisinin İncelenmesi

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

Kömür enjeksiyonunun baca tozu üzerine etkisinin incelenmesi için;

- Kömür enjeksiyon oranı artırılırken, kok oranı azaltılmış,

- Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktarı, hava rutubeti, alev sıcaklığı) fırın iç ısı potansiyeli dikkate alınarak değiştirilmiştir.

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

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

3.3.7. Kömür Enjeksiyonunun Kok Oranının Azaltılması Üzerine Etkisinin İncelenmesi

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

Kömür enjeksiyonun kok oranın azaltılması üzerine etkisinin incelenmesi için;

a) Demirli hammadde şarj miktarları, kimyasal ve fiziksel özellikleri sabit;
- Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktarı, hava rutubeti, alev sıcaklığı) fırın ısı potansiyeli dikkate alınarak değiştirilmiş,
- Kok, şarj miktarı azaltılmıştır.

b) Kok miktarı, kimyasal ve fiziksel özellikleri sabit;
- Fırın proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam oksijen miktarı, hava rutubeti, alev sıcaklığı) fırın ısı potansiyeli dikkate alınarak değiştirilmiş,
- Demirli hammadde (sinter, pelet), şarj miktarı artırılmıştır.

3.3.8. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Gövde Basınçları Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Fırına enjekte edilen kömür miktarının değişimine paralel olarak, fırın gövde basınçlarındaki değişimler takip edildi.

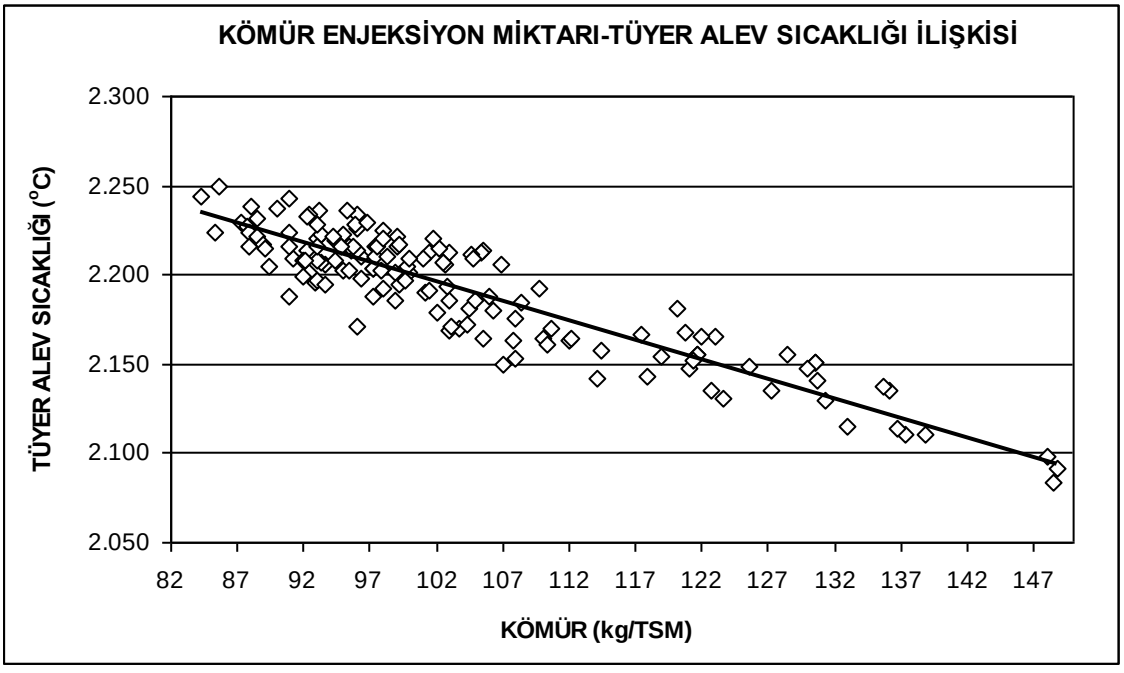
Kömür enjeksiyonunun fırın gövde basınçları üzerine etkisinin incelenmesi için;

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

4. DENEYSEL SONUÇLAR ve İRDELEME

Bu bölümde, pulverize kömürün yüksek fırın prosesine etkilerinin incelenmesi amacıyla, Erdemir 1. yüksek fırınındaki kullanımı esnasında yüksek fırın proses şartlarına olan etkileri incelenmiş, yapılan deney ve gözlem sonuçları ortaya konulmuştur. Daha önce de bahsedildiği gibi, yüksek fırın prosesinin çok etkileşimli, karmaşık bir proses olması ve bunun yanında prosesin her noktasının somut olarak ölçülememesinden dolayı elde edilen sonuçları tamamen formulüze etmekten ziyade, prosese olan etkiler ve eğilimler ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar yüksek fırın fiziksel özellikleri, hammadde kalitesi, kullanılan kontrol ve teknolojik sistemlere göre de değişiklik gösterebilir. Fakat, genel eğilim ve etkilerin ortaya konulması açısından yapılan deney ve çalışmalar dünya yüksek fırınlarında elde edilen sonuçlarla benzer olmuştur.

4.1. Kömür Enjeksiyonunun Alev Sıcaklığı Üzerine Etkisi



Şekil 4.1. Kömür enjeksiyon miktarının alev sıcaklığı üzerine etkisi

Şekil 4.1'de, Erdemir 1.Yüksek Fırınında yapılan deneme sırasında kömür enjeksiyon miktarı ile alev sıcaklığı arasındaki ilişki görülmektedir. Deneyi yaparken tek başına kömür enjeksiyonun alev sıcaklığı üzerine etkisinin incelenmesi hedeflendiğinden, diğer proses parametreleri (hava sıcaklığı, toplam girdi oksijen miktarı, sıcak hava rutubeti, girdi hammadde miktarları) sabit tutulmuş ve kömür enjeksiyon miktarı kademeli olarak artırılmıştır.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, kömür enjeksiyon miktarı 82 kg/TSM seviyesinden 147 kg/TSM seviyesine doğru artırılırken alev sıcaklığı da 2225^{o}C civarından 2100^{o}C civarına düşmüştür.

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

Yukarıdaki ifadelerden de anlaşılacağı gibi ilave yakıt olarak kullanılan pulverize kömür artırılırken alev sıcaklığının da kontrol altına alınması gerekir. Kömür enjeksiyonu yapan yüksek fırınlarda ideal alev sıcaklığı aralığı 2100^{o}C-2200^{o}C aralığındadır. Bu değer, fırının proses şartlarına ve fırın karekteristiklerine göre değişim gösterebilir.

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

Pulverize kömürün alev sıcaklığını düşürme etkisi şu şekilde avantaja dönüştürülür. Kömür enjeksiyon miktarı artırılıken alev sıcaklığı düşer. Alev sıcaklığının düşmesini engellemek için, üflenen toplam oksijen miktarı, üflenen havanın sıcaklığı artırılır ve sıcak hava rutubeti düşürülür. Bu durumda, raceway'deki oksijen konsantrasyonu ve kömürün yanma reaksiyonu hızı artar. Kömürün raceway'deki reaksiyonları gereğince oksijen miktarının artması daha fazla CO üretilmesi (4.3) anlamına gelir. CO'in artması

ise demir cevheri olarak kullanılan hematitin (Fe_2O_3) redüksiyonunun artması anlamına gelir (4.4).

$C+O_2 \rightarrow CO_2$ (4.1)

$C+CO_2 \rightarrow 2CO$ (4.2)

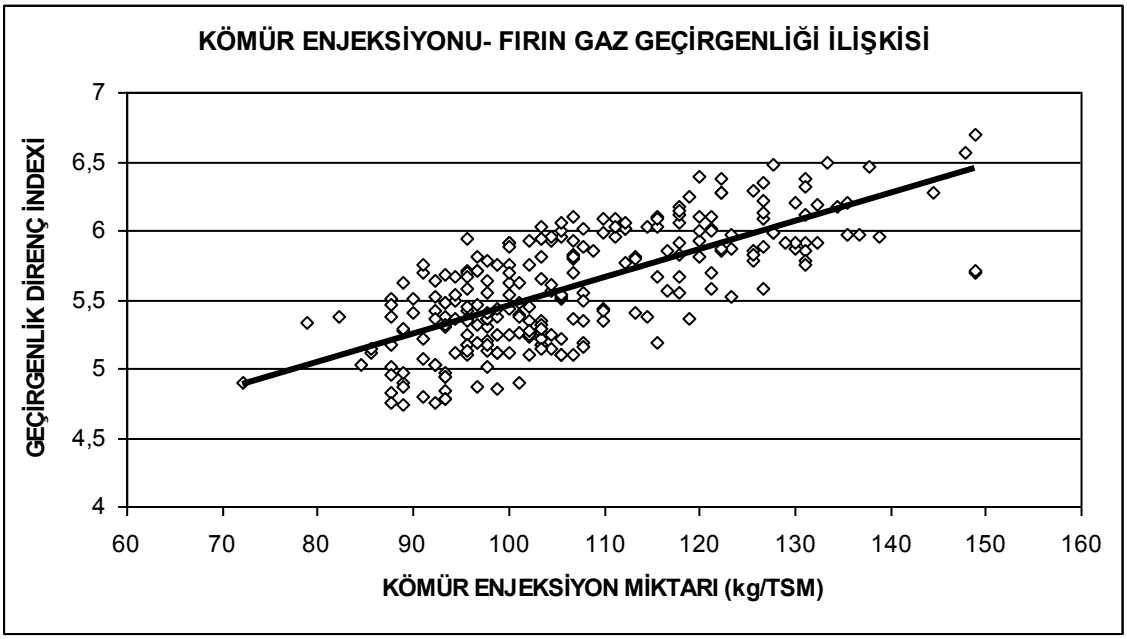
$C+1/2 \rightarrow CO$ (4.3)

$Fe_2O_3+3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2$ (4.4)

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

Sonuç olarak; Kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile birlikte tüyer alev sıcaklığı düşer. Alev sıcaklığındaki bu düşüş, üflenen havanın oksijeninin ve sıcaklığının artırılmasına, hava rutubetinin 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.

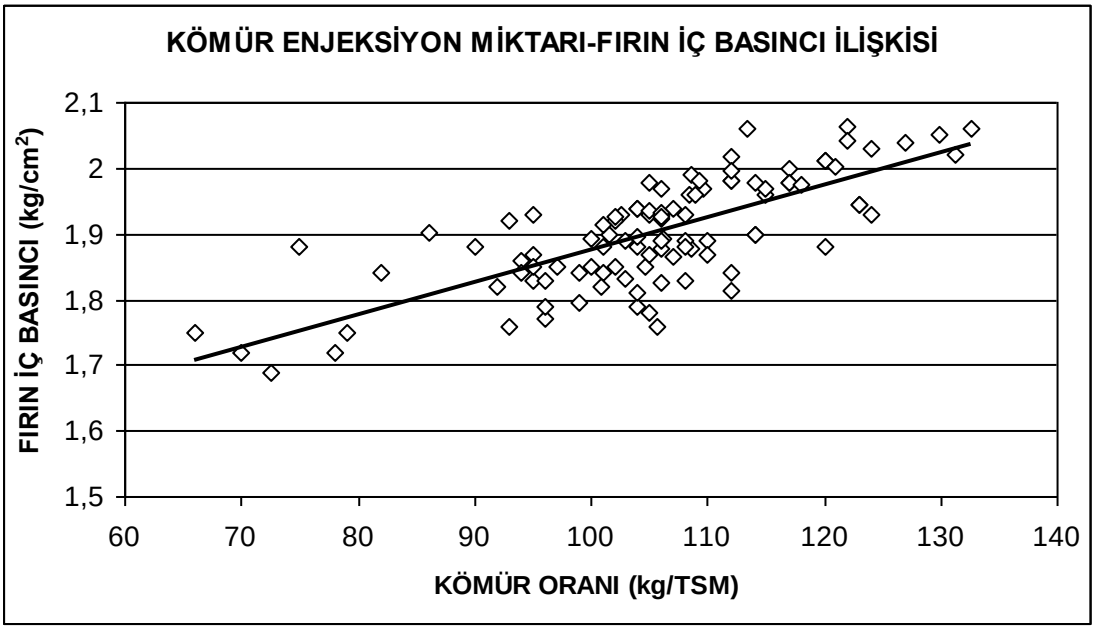
4.2. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Gaz Geçirgenliği Üzerine Etkisi



Şekil 4.2. Kömür enjeksiyonunun fırın gaz geçirgenliği üzerine etkisi

Şekil 4.2'de kömür enjeksiyon miktarı ile fırın geçirgenlik direnci arasındaki ilişki görülmektedir. Bu çalışmada, tüm proses parametreleri sabit tutularak kömür enjeksiyon miktarı 68 kg/TSM seviyesinden kademeli olarak 148 kg/TSM seviyesine kadar artırılmış ve proses üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Aynı zamanda, şekil 4.3'te de görüldüğü gibi enjeksiyon miktarı tek başına artırılırken fırın iç basıncında yükselme görülmüştür. Fırına giren hava ve oksijen miktarı artırılmadan, proseste hiçbir sorunun olmadığı bir durumda, kömür enjeksiyonu artışı ile fırın iç basıncının yükselmesi, fırın gaz geçirgenliğinin bozulduğu anlamına gelir.

Fırın gaz geçirgenliğini artırmak bir başka ifade ile gaz geçirgenlik direncini azaltmak için, geçici olarak, fırın gaz geçirgenliği düzelene kadar, kömür enjeksiyon miktarının, üflenen hava ve oksijen miktarının azaltılması gerekir. Bu ise yakıt oranının artması ve fırın verimliliğinin düşmesi anlamına gelir.



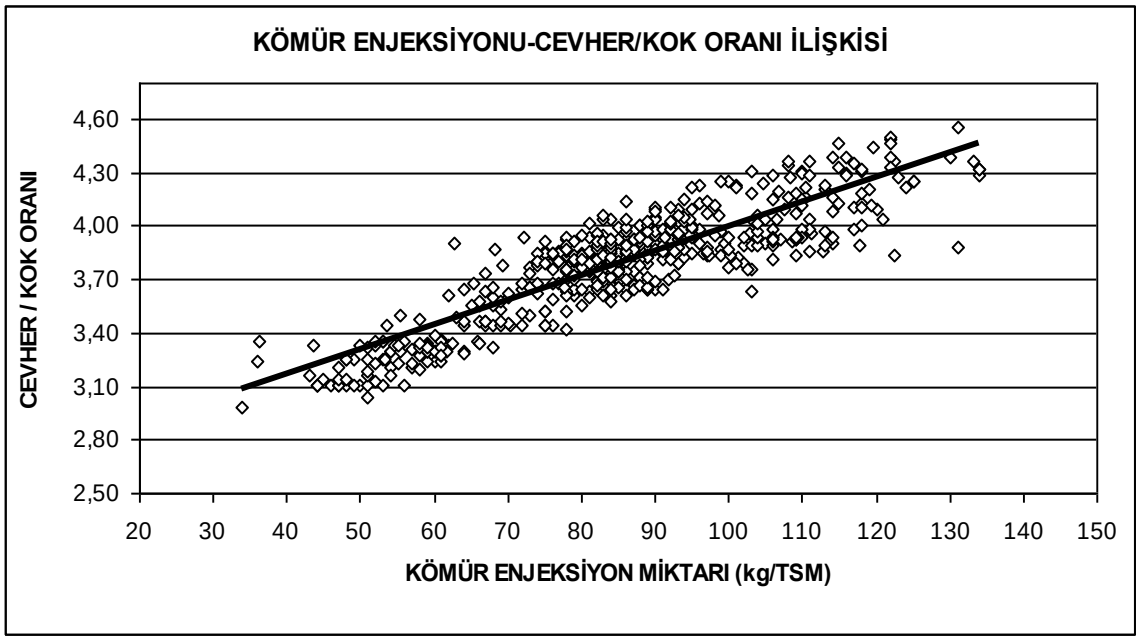
Şekil 4.3. Kömür enjeksiyon miktarının fırın iç basıncına etkisi

Görüldüğü gibi, tek başına kömür enjeksiyonunu artırmak çözüm değildir. Enjeksiyon miktarı artırılırken enjeksiyonun yan etkileri ortadan kaldırılmalı yada mimimize edilmelidir. Kömür enjeksiyonu ile çalışırken hammadde kalitesinin değişmeden fırın geçirgenliğinin bozulmasının iki nedeni vardır.

Bunlardan birincisi, kömürün yanma şartlarının tam olarak sağlanamamasıdır. Raceway'de yanma fırsatı bulamayan kömür partikülleri deadman kokuna ve fırın içine doğru yönlenir. Deadman kok yapısına geçen kömür tozları, deadman geçirgenliğinin ve aktivitesinin bozulmasına neden olur. Fırın içine yönlenen kömür tozları ise fırın gaz geçirgenliğinin zayıflamasına neden olur ve yanmamış kömür tozlarının bir kısmı yüksek fırın gazı yada curuf ile fırını terkeder, bir kısmı ise fırın içerisinde direkt redüksiyonlarla harcanır. Fırını terkeden ve direkt redüksiyonlarla harcanan kömür tozları yakıt oranının artmasına, enjekte edilen kömürden faydalanılamamasına neden olur. Bu durumda yapılması gereken, daha önceki bölümde de anlatıldığı gibi kömürün yanma veriminin artırılmasıdır.

Kömür enjeksiyonu ile çalışılırken fırın geçirgenliğinin bozulmasının ikinci nedeni ise, fırın içerisinde kok oranın azaltılmış olmasıdır. Şekil 4.4'te de görüldüğü gibi kömür enjeksiyonu kullanımı esnasında cevher/kok oranı artar. Fırında gaz geçirgenliğini sağlayan en önemli faktörün kok miktarı olduğu düşünülecek olursa, kok oranının azaltılması, cevher/kok oranın artmasına neden olur ve fırın gaz geçirgenlik direncini artırır.

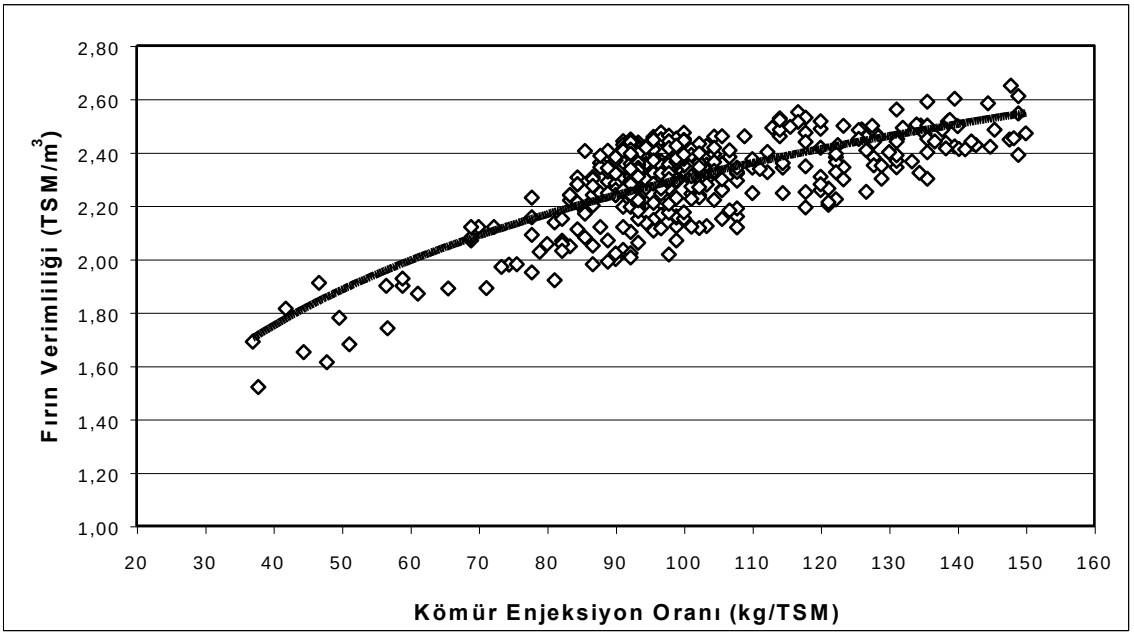
Kömür enjeksiyonu kullanırken kok oranının azaltılması fırın geçirgenliği açısından bir handikaptır. Fakat bu handikap, merkezi kok şarjı yapılması, fırın içi şarj dağılımının kontrol altına alınması, hammadde özelliklerinin iyileştirilmesi ve hepsinden önemlisi kömür yanma veriminin artırılması ile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



Şekil 4.4. Kömür enjeksiyon miktarının cevher/kok oranına etkisi

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

4.3. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Verimliliği Üzerine Etkisi



Şekil 4.5. Kömür enjeksiyon miktarının fırın verimliliği üzerine etkisi

Daha önceki gözlemlerden de anlaşıldığı gibi, kömür enjeksiyonunu tek başına artırmak bir anlam ifade etmemektedir. Çünkü, kömür enjeksiyonunun diğer tüm enjeksiyon türlerinde olduğu gibi yüksek fırın prosesine olumlu ve olumsuz etkileri vardır. Kullanım esnasında kömür enjeksiyonundan, fırındaki olumsuz etkilerinin giderilmesi ölçüsünde yararlanılabilir.

Şekil 4.5'te kömür enjeksiyon miktarının fırın verimliliği üzerine etkisi görülmektedir. Bu gözlem yapılırken, sağlıklı değerlendirme yapabilmek ve kömür enjeksiyonunun fırın verimliliğine etkisini net olarak görebilmek açısından fırın duruş şartları öncesi ve sonrası, hammadde kalitesinin üretimi kötü yönde etkilediği durumlar gözardı edilmiş normal proses şartları baz alınmıştır.

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

Deney sırasında, normal proses şartlarında, enjeksiyon miktarı kademeli olarak artırıldı ve yüksek fırın üretimindeki değişimler izlendi. Sonuçta, enjeksiyon miktarı

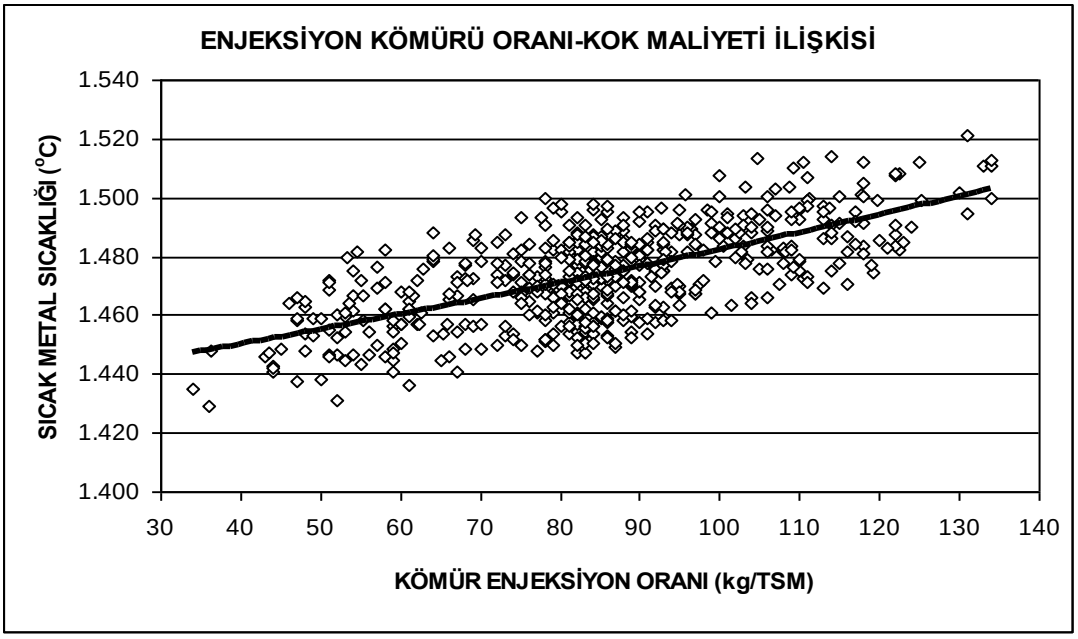
artışı ile yüksek fırın üretiminin dolayısıyla fırın verimliliğinin belirli bir değere kadar arttığı gözlendi.

Daha önce de anlatıldığı gibi kömürün yanması sonucu oluşan redükleyici gaz miktarındaki artış, kokun yerine daha az hacim kaplayan pulverize kömürün kullanılması ve fırın faydalı hacminin artırılması sonucunda yüksek fırın üretiminde artış sağlanmıştır.

Kömür enjeksiyonu, fırın verimliliğini belirli bir değerden sonra artırmaz, proseste oluşturacağı negatif etkilerle azaltıcı yönde eğilim gösterir. Şekil 4.5, dikkatli incelenecek olursa kömür enjeksiyonun verimlilik üzerinde 100 kg/TSM'ye kadar göstermiş olduğu olumlu etki 100 kg/TSM'den sonra giderek azalmaya başlamıştır. Kömür enjeksiyonunda optimizasyon çok önemlidir. Limitler çok iyi tespit edilirse maksimum fayda sağlanabilir.

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

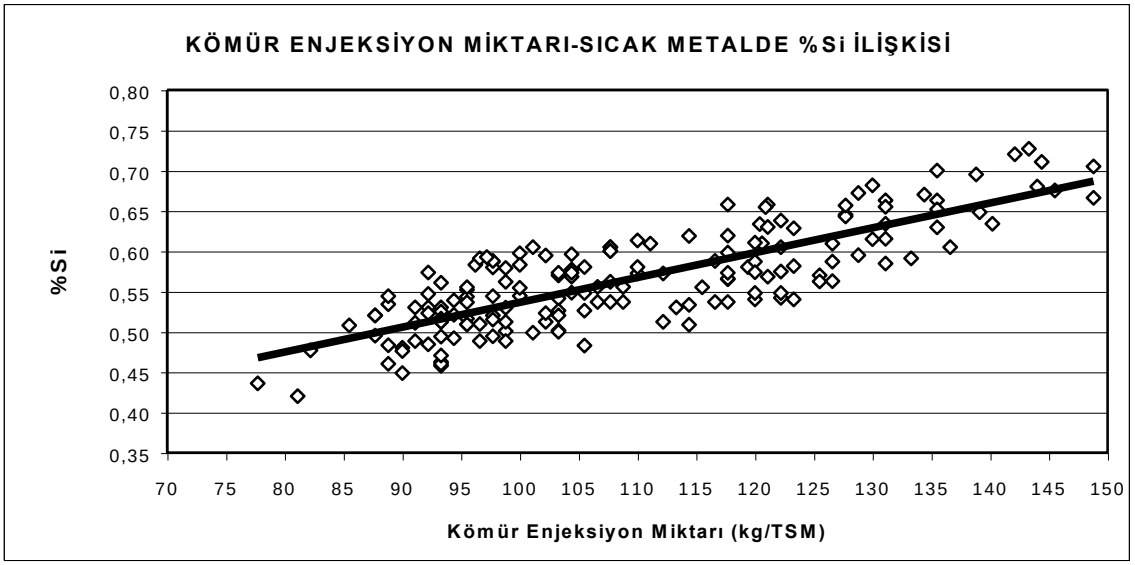
4.4. Kömür Enjeksiyonunun Sıcak Metal Kalitesi Üzerine Etkisi



Şekil 4.6. Kömür enjeksiyon miktarının sıcak metal sıcaklığı üzerine etkisi

Yapılan bu denemede, kömür enjeksiyon miktarının artırılmasının sıcak metal kalitesi üzerine etkileri incelenmiştir. Sıcak metal kalitesi için 3 önemli parametre baz alınmıştır. Bunlar sıcak metaldeki kükürt miktarı, silis miktarı ve sıcak metal sıcaklığıdır. Bu amaçla, hammadde girdi kalitesi sabit tutularak, kömür enjeksiyon miktarı 78 kg/TSM seviyesinden 148 kg/TSM seviyesine kadar kademeli olarak artırılmış ve sıcak metal kalitesindeki değişimler gözlenmiştir.

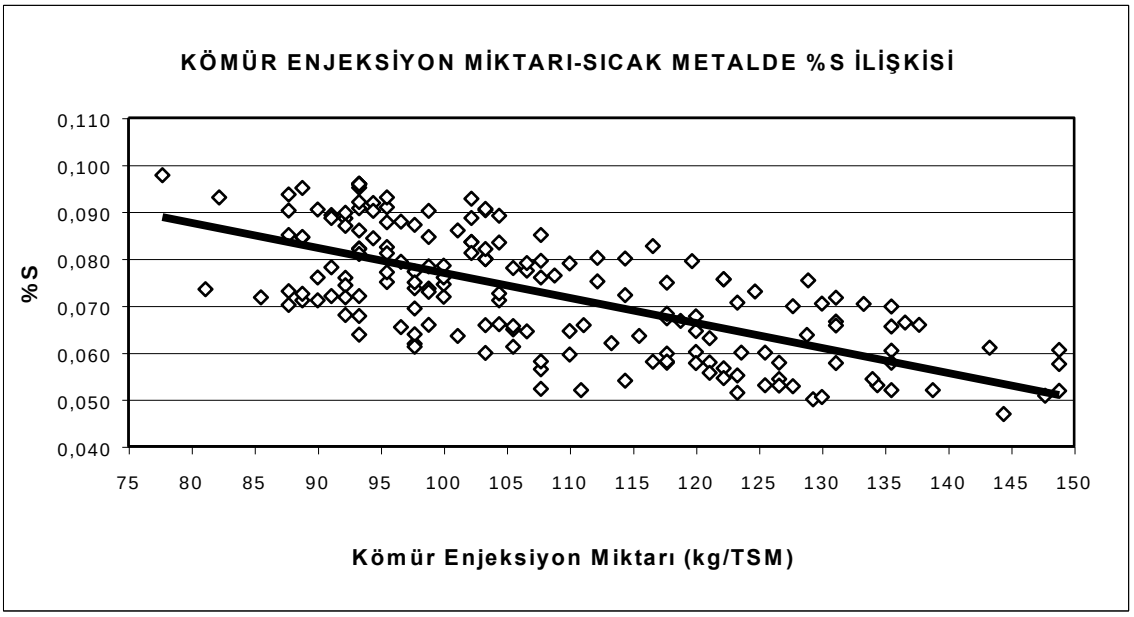
Yapılan gözlemler sonucunda, Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile birlikte sıcak metal sıcaklığı artmıştır. Bunun sebebi, koka göre reaktivitesi daha yüksek olan pulverize kömürün, yanma veriminin elverişli olduğu şartlarda, doğrudan yüksek sıcaklık bölgesine enjekte edilerek, fırın termal kapasitesini artırması şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 4.7. Kömür enjeksiyonunun sıcak metaldeki %Si üzerine etkisi

Şekil 4.7'de enjeksiyon miktarındaki artışa paralel olarak sıcak metaldeki silis miktarının arttığı görülmektedir. Bu deney yapılırken, hammadde girdilerinde değişim yapılmamıştır. Bu durumda, sıcak metalde silis miktarının artmasının sebebi; ergime bölgesinde ve haznedeki yüksek ısı potansiyelinin etkisiyle curuf yapısında bulunan $SİO_2$'nin, yüksek sıcaklıktaki deadman kokunun gözenekleri arasından süzülürken, kokun karbonu ile reaksiyona girmesi ve SiO_2'nin redüklenerek (4.5) silise ayrışması ve sıcak metaldeki %Si miktarının artması şeklinde ifade edilebilir.

$SiO_2+C \rightarrow Si+CO_2$ (4.5)

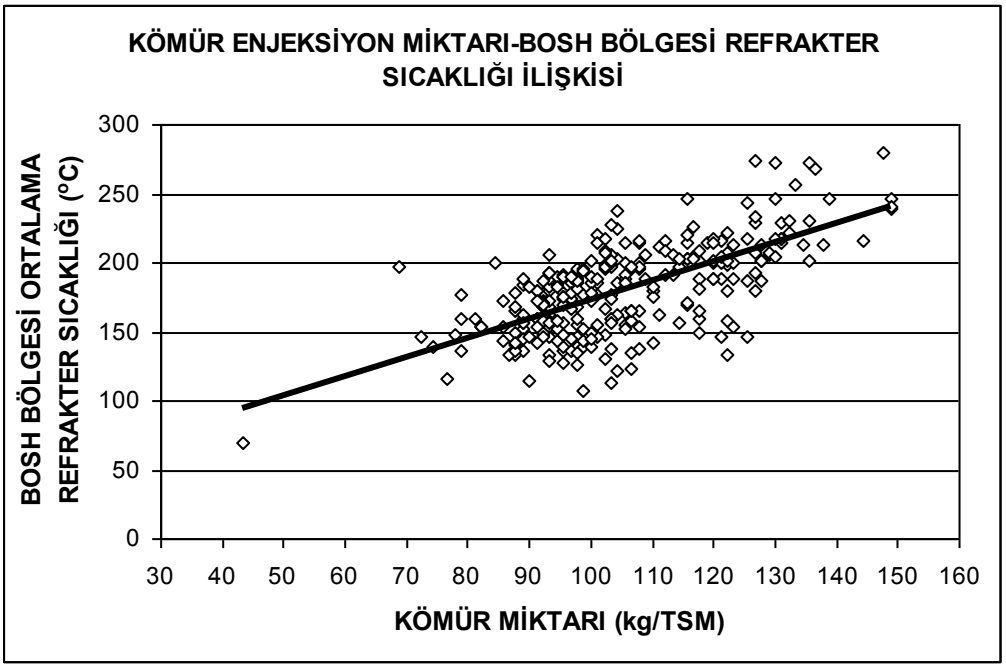


Şekil 4.8. Kömür enjeksiyon miktarının sıcak metaldeki %S üzerine etkisi

Sıcak metal kükürt içeriğinin düşmesinin nedeni, kok yerine kükürt içeriği daha düşük enjeksiyon kömürü kullanmak ve kükürt girdisinin azalmasının sağlanması ve yüksek ısı potansiyelinin oluştuğu şartlarda curuf viscositesinin azalması daha fazla kükürtün curufa geçmesi şeklinde ifade edilebilir.

Sonuç olarak; Kömür enjeksiyon miktarı artırılırken proses şartları uygun biçimde ayarlanırsa sıcak metal kalitesi de artar.

4.5. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Duvarındaki Isı Yükü Üzerine Etkisi



Şekil 4.9. Kömür enjeksiyon miktarının fırın duvarındaki ısı yüküne etkisi

Kömür enjeksiyon miktarının fırın duvarındaki ısı yüküne olan etkisini incelemek için, fırının ısı potansiyelinin en yüksek olduğu tüyerlerin hemen üzerinde bulunan bosh bölgesi refrakter sıcaklıkları takip edilmiştir. Yapılan deneyler sırasında, kömür enjeksiyon miktarı artırılırken bosh bölgesi ortalama refrakter sıcaklığında artış görülmüştür.

Kömür enjeksiyonu yapılırken tüyerler önünde bulunan raceway balonu fırın duvarı yönünde kayar. Tüyer hızının çok düşük olması raceway balonunun fırın duvarı yönünde kaymasına neden olan etkenlerden biridir. Ayrıca, fırın merkezinde bulunan deadman kokunun geçirgenliğinin bozulması ve raceway gazlarını geriye yansıtarak, raceway balonunun fırın duvarı yönünde kaymasına neden olur. Deadman kokunun geçirgenliğinin bozulması, raceway'de yanma fırsatı bulamayan kömür tozlarının deadman geçirgenliğini düşürmesi, deadman'in yenilenmesine fırsat verecek merkezi kok şarjının yapılmaması ve gerekli kok kalitesinin sağlanmamış olmasından kaynaklanır. Kömür enjeksiyon miktarının artışı, yanma reaksiyonun dolayısıyla

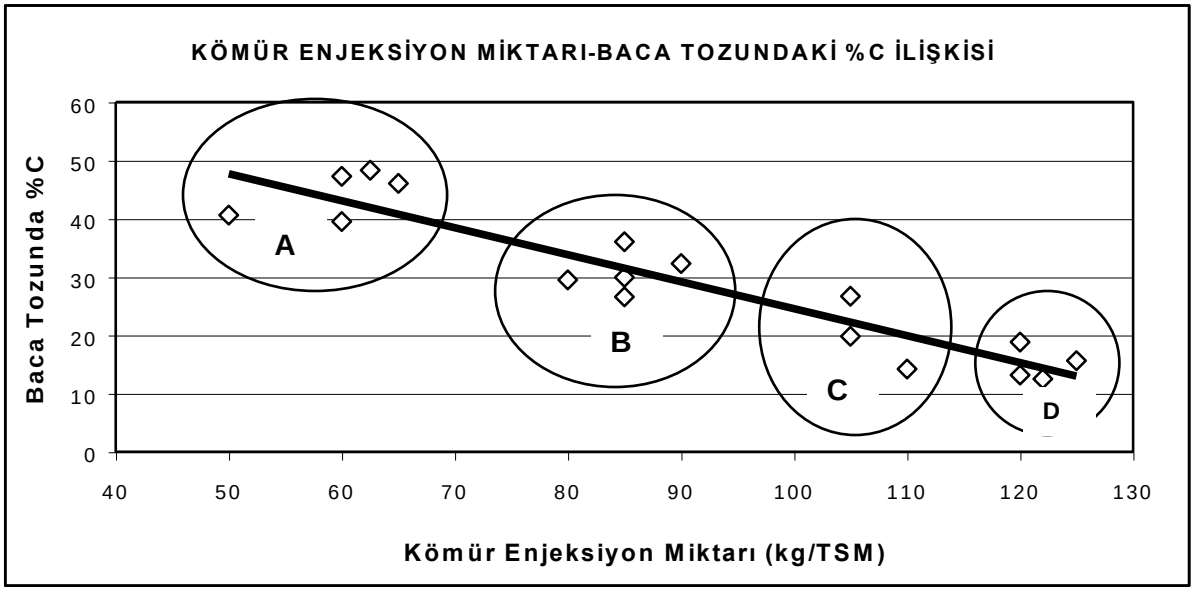
maksimum sıcaklık bölgesinin tüyere yakın bölgeye kaymasına neden olur ve fırın refrakteri üzerindeki ısı yükünü artırır.

Tüyer hızının yüksek olması da raceway'de kömürün yanma şansını düşürdüğü ve yanmamış kömür tozlarını yüksek hızla deadman yapısına taşıdığı için deadman ve fırın gaz geçirgenliğinin bozulması ve ısı yükünün fırın duvarı yönüne kaymasına neden olur. Deneysel çalışmalar sırasında tüyer hızı 268-280 m/sn civarlarında idi.

Raceway balonunun fırın duvarı yönünde kaymasının bir fonksiyonu olarak, fırın gövde refrakterinin ısı kapasitesi artar. Bu durumun ise iki önemli dezavanvantajı vardır. Bunlardan birincisi; fırın içerisindeki reaksiyonlarda ergitme amaçlı olarak kullanılması gereken ısının, fırın gövde refrakteri üzerinde kaybolması ve bu ısıdan faydalanılamamasıdır. İkinci dezavantajı ise yüksek ısı kapasitesi ve hıza sahip yanmamış kömür tozlarının fırın refrakterinin aşınmasına sebep olmasıdır. Fırın refrakterindeki aşınmanın miktarına bağlı olarak, fırın gövde sacının kızarması, delinmesi, hatta prosesin durmasına kadar gidecek olumsuz şartlarla karşı karşıya kalınabilir.

Sonuç olarak; Gerekli proses şartları sağlanmaz ise kömür enjeksiyon miktarı artırılırken fırın gövde refrakterindeki ısı yükü artar.

4.6. Kömür Enjeksiyonunun Baca Tozu Üzerine Etkisi



Şekil 4.10. Kömür enjeksiyonunun baca tozu içerisindeki karbon miktarına etkisi

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

Kömür enjeksiyonunun yüksek fırın baca tozuna etkisini incelemek ve yanma verimini artırıcı çalışmaların etkilerini gözlemlemek için mevcut optimum kömür oranının elde edildiği şartlarda baca tozundan numuneler alındı ve karbon içeriği takip edildi.

Şekil 4.10'da, A, B, C, D olarak 4 farklı durum da alınan numuneler için kömür enjeksiyon oranı ile baca tozunda karbon miktarı ilişkisi görülmektedir.

A numuneleri; Kömür enjeksiyon lans sisteminde hiçbir iyileştirmenin yapılmadığı şartlarda alınmıştır.

B numuneleri; Enjeksiyon lans boylarının kısaltılarak, enjeksiyon noktası-tüyer ucu mesafesinin 2 mm'den 250 mm'ye çıkarıldığı şartlarda alınmıştır.

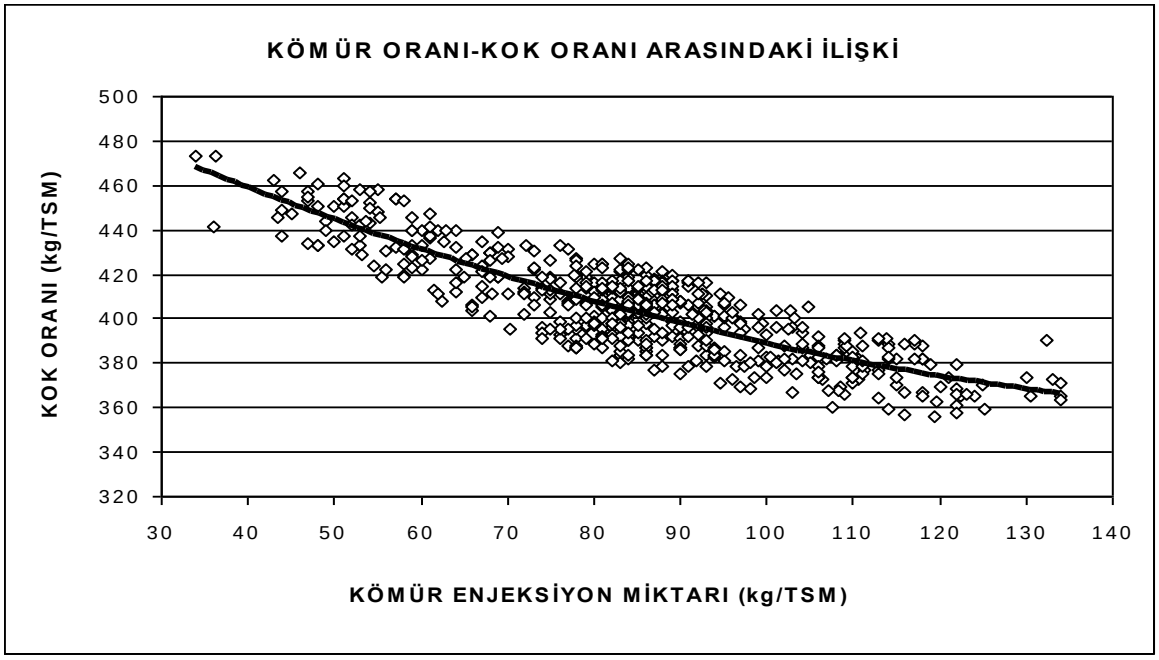
C numuneleri; Enjeksiyon lans soğutma havalarının tamamen kesilmesinden sonra alınmıştır.

D numuneleri;Tüm tüyerlerden çift lans enjeksiyon sistemine geçildikten sonra alınmıştır.

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, Erdemir 1. yüksek fırında yapılan enjeksiyon lans sisteminde yapılan iyileştirmeler yanma verimini artırıcı etki göstermiştir.

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

4.7. Kömür Enjeksiyonunun Kok Oranının Azaltılması Üzerine Etkisi



Şekil 4.11. Kömür enjeksiyon miktarının kok miktarının azaltılması üzerine etkisi

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

Şekil 4.11'de Erdemir 1. yüksek fırınında yapılan araştırmalarda, kömür enjeksiyon miktarı kok oranı ilişkisi görülmektedir. Kömür enjeksiyon miktarı artırılırken, fırın ısı potansiyelindeki değişimler gözlenmiş ve bu değişimler dikkate alınarak proses parametreleri ayarlanmıştır. Kömür enjeksiyon miktarını artırırken kok miktarını azaltmak için öncelikle, enjekte edilen kömürün prosese etkisi gözlenir. Enjeksiyon, fırın proses şartlarını bozmuyor ve fırın ısı potansiyelini artırıcı yönde etki gösteriyor ise enjeksiyon miktarı artırılarak, kok oranı azaltılır.

Fırının ısı potansiyelinin yükseldiğini gösteren bazı önemli kriterler;

-Sıcak metal sıcaklığının artması,

-Sıcak metalde %Si miktarının artması,

-Sıcak metalde %S miktarının düşmesi,

-Curuf akışkanlığının artması,

-Curufta %FeO yüksek ise azalması,

-Curufta %MnO'de kısmi bir azalma görülmesi,

-Curufta SiO_2'de kısmi bir azalma görülmesi,

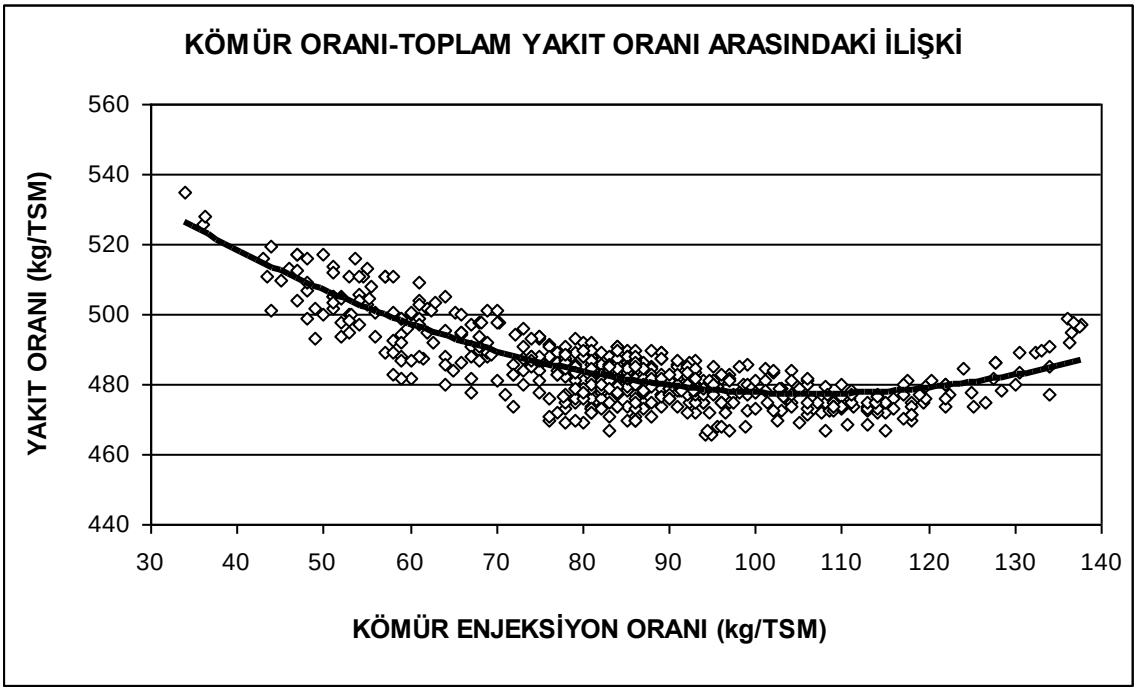
-Gaz kullanım veriminin artması (gaz kullanım verimi; fırını terkeden artık gazlar içerisindeki $CO_2/(CO_2+CO$ oranı)

Kömür enjeksiyonu artırıldıktan sonra yada artırılırken, kok oranının azaltılabilmesi için yukarıdaki kriterlerin bir yada birkaçının gözlenmesi gerekir. Aksi takdirde, enjekte edilen kömür, fırın ısı potansiyelini artırıcı etki göstermemiş ve kömür yanmasi için elverişli şartlar oluşmamış demektir. Bu durumda ısrar edilerek kömür enjeksiyonun daha da artırılması, fırın geçirgenliğinin bozulmasına ve fırın iç ısı potansiyelinin

kaybedilerek proses şartlarının kötüleşmesine yol açabilir. Bu nedenle, enjekte edilen kömürün yanma veriminin düşük olduğu anlaşıldığında, kömür enjeksiyonunun artırılmasında ısrar edilmemeli, hatta proses şartları değerlendirilerek enjeksiyon miktarı azaltılmalıdır.

Kok oranından kasıt, 1 ton sıcak metal üretimi başına tüketilen kok miktarıdır. Dolayısıyla kok oranı, şarjdaki kok miktarını azaltarak yada şarjdaki demirli malzeme miktarını artırarak sağlanabilir.

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



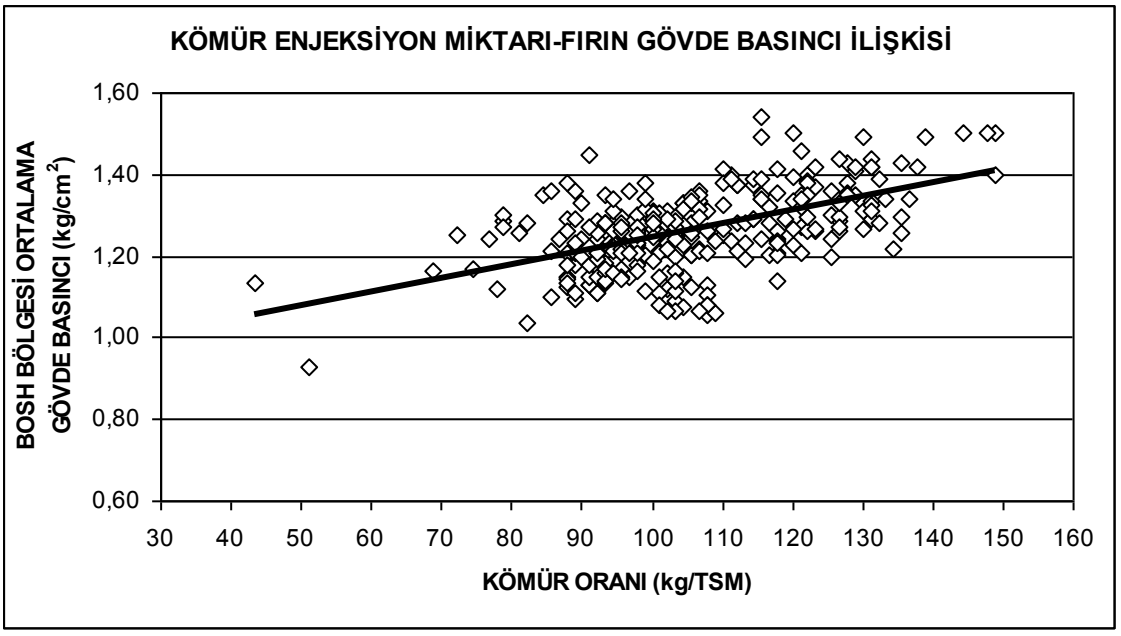
Şekil 4.12. Kömür enjeksiyon miktarının toplam yakıt oranının azaltılması üzerine etkisi

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

Şekil 4.12'de Erdemir 1. yüksek fırınında kömür enjeksiyon miktarına bağlı olarak toplam yakıt oranı değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, kömür enjeksiyon oranı 110 kg/TSM'ye kadar artırılırken, kok oranının azaltılmasının etkisiyle toplam yakıt oranında da düşüş gözlenmiştir. Bu aynı zamanda kömürün yanma şartlarının iyi olduğunun ve verimli yakılabildiğinin bir göstergesidir. Fakat, 110 kg/TSM enjeksiyon seviyesinden sonra kömür oranının artışı ile birlikte toplam yakıt oranı da artmaya başlamıştır. Bu durum ise kömür yanma veriminin düştüğünün ve ilave bir iyileştirme yapılmadığı sürece kömür enjeksiyonunu artırmanın toplam yakıt oranını artıracağının bir göstergesidir.

Sonuç olarak; Gerekli yanma şartları sağlanıp, proses şartları iyi analiz edilerek kömür enjeksiyon miktarı artırıldığında fırına şarj edilen kok oranı ve toplam yakıt oranı düşer. Kömür enjeksiyon oranının artırılması ile belirli bir limit değerden sonra toplam yakıt oranı artmaya başlar. Toplam yakıt oranın artmaya başladığı limit değer optimum kömür enjeksiyon oranıdır ve yanma verimini artırıcı ilave bir iyileştirme çalışması yapılmadığı sürece optimum kömür enjeksiyon seviyesinin üzerine çıkılmamalıdır. Yapılan araştırma ve gözlemler sonucunda, Erdemir 1.yüksek fırınında mevcut şartlarda verimli bir şekilde yakılabilecek maksimum kömür oranının 110 kg/TSM olduğu sonucuna varılmıştır. Kömür enjeksiyon sistemi veya yüksek fırın proses şartlarında ilave bir iyileştirme yapılmadan 110 kg/TSM enjeksiyon miktarının üzerine çıkılması toplam yakıt oranını artırır, fırın proses şartlarını olumsuz yönde etkiler.

4.8. Kömür Enjeksiyonunun Fırın Gövde Basınçları Üzerine Etkisi



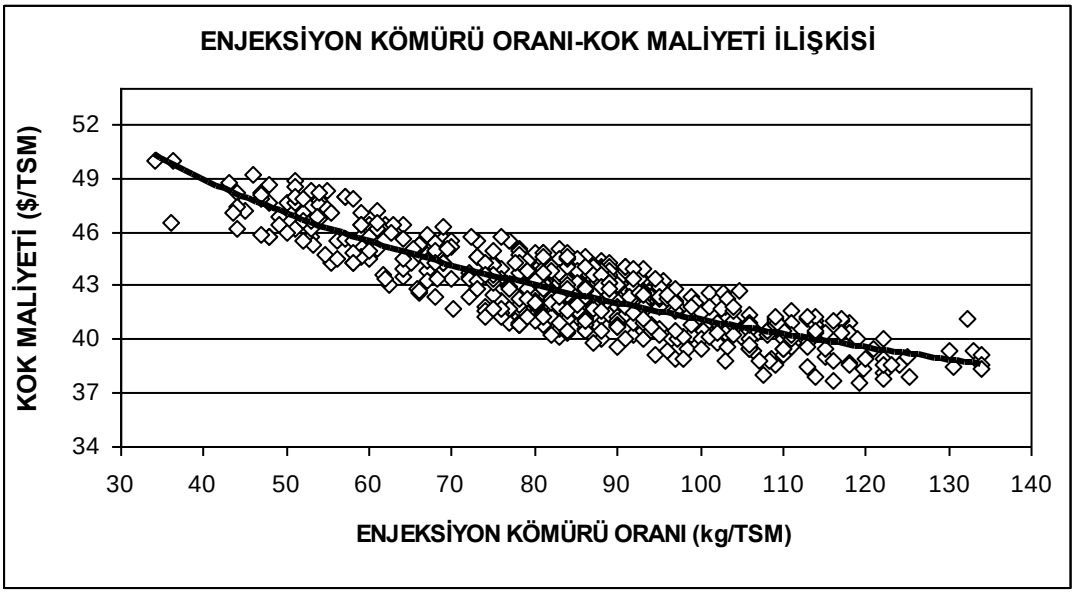
Şekil 4.13. Kömür enjeksiyon miktarının fırın gövde basınçları üzerine etkisi

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, kömür enjeksiyon miktarının artışı ile fırın geçirgenliği zayıflar ve fırın iç basıncında yükselme gözlenir. Bu noktadan hareketle yapılan deney sonucunda, Şekil 4.13'de görüldüğü gibi kömür enjeksiyon miktarı artırılarak fırının gövde basıncı üzerine etkisi incelendi. Bu amaçla, fırının en kritik ve yüksek ısı yükünün bulunduğu tüyerlerin hemen üzerindeki bosh bölgesi basınçları takip edildi.

Kömür enjeksiyon miktarının artışı ile birlikte bosh bölgesi gövde basınçlarında yükselme gözlendi. Bu yükselmenin sebebinin tamamen enjeksiyona bağlanması doğru değildir. Fakat, kömür enjeksiyonu yapılan şartlarda proses parametreleri de buna bağlı olarak değiştirildiğinden fırın gövde basıncında artış gözlenir. Gövde basınçlarının normal limitlerinden fazla artması yada lokal artışlar göstermesi fırın içi şarj hareketini ve proses şartlarını bozar. Fırın gövde basınçlarındaki artış, fırın içi şarj dağılımının ayarlanması, fırın merkezi geçirgenliğinin artırılması ve enjeksiyon miktarının geçici olarak düşürülmesi ile kontrol altına alınabilir.

Sonuç olarak; Kömür enjeksiyon miktarının artırılması fırın gövde basınçlarını artırır.

4.9. Kömür Enjeksiyonunun Yakıt Maliyeti Üzerine Etkisi

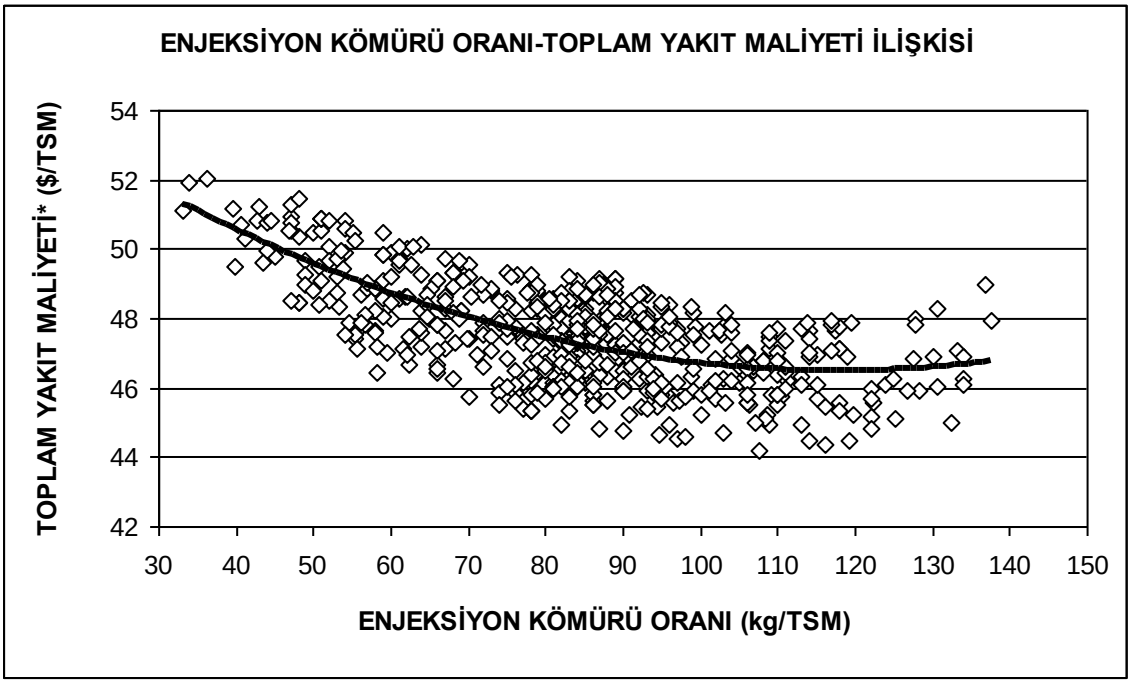


Şekil 4.14. Kömür enjeksiyonunun kok maliyeti üzerine etkisi

Şekil 4.14'te kömür enjeksiyon miktarının kok maliyeti üzerine etkisi görülmektedir. Kömür enjeksiyonu kullanılmasının en önemli nedeni kok oranını düşürerek maliyet tasarrufu sağlanmasıdır. Yüksek fırında yakıt olarak sıcak metal üretiminin yaklaşık yarısı kadar kok kullanıldığı düşünüldüğünde, kok oranının düşürülmesinin maliyetlerde önemli bir düşüş sağlayacağı aşikardır.

Şekil 4.14 'te 2001 yılında Erdemir 1. yüksek fırında enjeksiyon miktarının artırılması ile kok maliyetinde elde edilen düşüş görülmektedir. Bu düşüşte en büyük etken, enjeksiyon sisteminde yapılan iyileştirmeler ve kömür yanma şartlarının iyileştirilmesi olmuştur.

Şekil 4.15'te ise kömür enjeksiyonun toplam yakıt maliyeti üzerine etkisi görülmektedir. Kok oranının azaltılmasının kömür enjeksiyonu ile telafi edildiği düşünülecek olursa, kömürün maliyeti kokun maliyetinden daha düşük olduğu için toplam yakıt maliyeti de düşer.



Şekil 4.15. Kömür enjeksiyonun toplam yakıt maliyeti üzerine etkisi

Sonuç olarak; Kömür enjeksiyonu kullanılırken gerekli yanma şartları sağlanır ve enjeksiyonun yüksek fırın prosesine etkileri kontrol altına alınırsa yakıt maliyetinde düşüş sağlanır.

5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1) Pulverize kömürün yüksek fırına enjeksiyonundaki temel amaç, kullanılmakta olan kok miktarını azaltarak, azaltılan kok'un yerine maliyeti daha düşük olan pulverize kömür kullanmaktır.

2) Kömür enjeksiyon miktarını artırmak hedef değildir. Hedef, kömür enjeksiyon miktarını artırırken proses şartlarını bozmayacak limitlere kadar kok oranını azaltmaktır. Yapılan çalışmalar sonucunda, Erdemir 1. yüksek fırında mevcut işletme şartlarında verimli bir şekilde yapılabilecek maksimum kömür enjeksiyon oranı 110 kg/TSM olarak bulunmuştur.

3) Kömür enjeksiyonunun yüksek fırın prosesine olumlu ve olumsuz etkileri vardır. Kömür enjeksiyonundan olumsuz etkilerinin giderilmesi ölçüsünde yararlanılabilir. Enjeksiyon miktarı artırılırken, enjeksiyonun yan etkileri ortadan kaldırılmalı yada mimimize edilmelidir.

4) Tüm proses parametrelerinin efektif olarak kullanılması, kömür yanma veriminin sağlanması, hammadde kalitesinin artırılması durumunda kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile kok oranı düşer.

5) Kömür enjeksiyonu artırılarak kok oranının düşürülebileceği bir minimum limit değer vardır. Kokun normal proses şartlarında düşürülebilecek minimum değeri yakalandığında hiçbir ilave iyileştirme yapılmadan kömür enjeksiyon oranı artırılırsa toplam yakıt oranı artar, fırın geçirgenliği bozulur. Kömür enjeksiyonunda optimizasyon çok önemlidir. Limitler çok iyi tespit edilirse maksimum fayda sağlanır.

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

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

8) Kömür enjeksiyon oranının artmasıyla birlikte, fırın içi kok boyutunda düşme görülmekte ve fırının alt bölgelerinde gaz geçirgenliği düşmektedir. Kömür enjeksiyonunun kullanıldığı şartlarda kok kalitesi artırılarak, kokun azaltılmasından kaynaklanan dezavantajların önüne geçilebilir. Kömür enjeksiyonu yapılan şartlarda, kok stabilitesinin 60'dan büyük, kok reaktivite indeksinin (CRI) 35'ten büyük olması ve ortalama tane boyutunun ise 50 mm'nin üzerinde olması gerekir.

9) Yüksek kömür enjeksiyon oranı ile çalışılırken, sinter kırılganlık indeksinin (RDI) %40'ın altında olması, sinter indirgenebilirlik indeksinin (RI) %65'in üzerinde olması gerekir.

10) Kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile sıcak metal üretimi, dolayısıyla fırın verimliliği artar.

11) Kömür enjeksiyonu efektif olarak kullanılarak sıcak metal kalitesi artırılır.

12) Kömür enjeksiyon miktarının artırılması ile birlikte tüyer alev sıcaklığı düşer. Üflenen havanın oksijen oranı ve sıcaklığı artırılarak, rutubeti düşürülerek optimum alev sıcaklığı elde edilir.

13) Kararlı bir yüksek fırın prosesinin ve sıcak metal kalitesinin sağlanabilmesi için alev sıcaklığının mümkün olduğu kadar sabit olması, dalgalanmaması ve belirli bir optimum seviyede olması gerekir. Kömür enjeksiyonu yapılan şartlarda tüyer önü teorik alev sıcaklığı $2100^{o}C$-$2150^{o}C$ civarında olmalıdır.

14) Oksijen zenginleştirme, kömürün yanma verimini artıran en önemli faktörlerden biridir. Kömür enjeksiyon oranının artışı ile beraber oksijen zenginleştirme de artırılırsa raceway derinliği artar. Raceway'de kömür tanecikleri ile oksijen reaksiyonunun mümkün olduğu kadar hızlı gerçekleşmesi ve üflenen hava oksijen oranının yüksek olması gerekir.

15) Sıcak hava sıcaklığının artırılması, kömürün yanma reaksiyonunu hızlandırdığı ve tüyer önündeki soğutma etkisini karşıladığı için kömür yanma verimini artırır.

16) Kömürün kül ve rutubetinin düşük olması, kömür yanma verimini artırır.

17) Yüksek kömür yanma veriminin sağlanabilmesi için, enjekte edilen kömürün en az %80'inin 200 mesh'in (80 mikron) altında olması gerekir.

18) Yüksek uçuculu kömürlerin yanma reaksiyon hızı, düşük uçuculu kömürlere göre daha yüksektir. Bu durum kömürün verimli bir şekilde yakılarak, yüksek oranda enjeksiyon yapılmasına imkan sağlar.

19) Pulverize kömürün raceway'de kalma süresi yaklaşık 20 msn'dir. Enjekte edilen kömürün raceway'i terketmeden önce yanması gerekir.

20) Raceway'in dışına çıkan yanmamış kömür tozlarının bir kısmı deadman kok yapısına geçer, bir kısmı yüksek fırın gaz akışı ile yada curuf ile fırını terkeder, bir kısmı ise fırın içerisinde direkt redüksiyonlarla harcanır.

21) Pulverize kömür enjeksiyonunun artışı ile birlikte ortam oksijen konsantrasyonu düşer ve buna bağlı olarak kömürün yanabilirliği de düşer. Kömür enjeksiyon seviyesinin düşük olduğu şartlarda, pulverize kömür tamamen raceway'de yanar. Raceway koşullarındaki kokun karbonunun oksijenle yanmasından önce kömürün karbonunun yanması gerekir.

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

23) Yüksek türbülanslı geometrik lans kullanıldığı durumda, yanma verimi geleneksel lans kullanılan duruma göre yaklaşık %10 artar.

24) Geleneksel tek lans sistemi yerine, eksantrik çift lans sistemi kullanıldığında kömür yanma verimi yaklaşık %25 artar.

25) Enjeksiyon lans ucu ile tüyer burnu arasındaki mesafe artırıldıkça kömür yanma verimi artar. Kömürün verimli bir şekilde yakılabilmesi için enjeksiyon lans ucu-tüyer burnu mesafesinin en az 250 mm. olması gerekir.

26) Oxy-coal enjeksiyon lansı kullanımı, kömürün raceway'de yanma oranının artırılması ve raceway dışına çıkabilecek yanmamış kömür tozlarının azaltılması üzerinde oldukça etkili bir metotdur. Oxy-coal enjeksiyon lans kullanarak, yüksek kömür enjeksiyon oranlarında kuş boynunun genişleyerek, deadman ve fırın içi gaz geçirgenliğinin bozulmasının önüne geçilebilir.

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

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

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

30) Yüksek kömür enjeksiyon oranlarında tüyer seviyesindeki ortalama kok boyutunda CO_2 hücumunun da etkisiyle büyük bir düşüş görülür.

31) Tüyer hızının yüksek olması, yumuşama-ergime bölgesinin üst bölgelere kaymasına ve kömür yanma veriminin, deadman ve fırın gaz geçirgenliğinin düşmesine neden olur.

32) Kömür enjeksiyonu, proses şartlarında oluşan olumsuzluklara ani müdahale şansı tanır ve proses kolaylığı sağlar.

33) Yüksek fırın duruşları esnasında fırının iç termal ısısını kaybetmesi ve duruşun uzaması ihtimali göz önüne alınarak duruştan 8-10 saat önce enjeksiyon oranı düşürülmelidir. Özellikle, 24 saati geçecek duruşlardan 6-8 saat önce enjeksiyon tamamen sıfırlanmalıdır.

34) Alev sıcaklığı normal proses şartlarında mümkün olduğu kadar sabit tutulmalı, dalgalanmasına müsaade edilmemelidir. Alev sıcaklığının sürekli dalgalanması yumuşama – ergime bölgesinin (kohesiv bölge) şeklinin bozulmasına ve kararsız bir fırın prosesine neden olur.

35) Kömür enjeksiyonu yapılırken, fırın gövde basınçları enjeksiyonsuz şartlara göre artar. Kömür yanma veriminin artırılması ve fırın içi şarj dağılımının düzenlenmesi ile bu etki azaltılır.

36) Kömür enjeksiyonu yapılırken proses parametreleri kontrol altına alınır ve elverişli yanma şartları sağlanırsa kok oranının düşmesinin etkisiyle yakıt maliyetinde önemli ölçüde düşüş sağlanır.

KAYNAKLAR

[1] **A.POOS, N.PONGIS,** 1990, Potentials and Problems of High Coal Injection Rates, Centre de Recherches Metallurgiques, Liege, Belgium

[2] **K.PETERS, M.PETERS, B.KORTHAS, K.MULHEIMS, K.KREIBICH,**1989, Limits of Coal Injection, Thyssen Stahl AG

[3] **K.ISHII,** 2000, Advanced Pulverized Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation, Research Group of PC Combustion in Blast Furnace, Ironmaking 54th Committee

[4] **N.S.HUR, B.R.CHO, H.H.KIM,** 1996, High Coal Injection Rates Into High Productivity Blast Furnaces, Posco, Korea

[5] **O.CHARON, G.PARADO,** 1986, Study of Coal Combustion Under Blast Furnace Tuyere Conditions, Proceedings European Ironmaking Congress, Vol.3

[6] **T.SUZUKI, L.D. SMOOT, T.H. FLETCHER, P.J. SMITH,** 1986, Combustion Science and Technology

[7] **S.GATHERGOOD,** 1989, Coal Injection Into the Blast Furnace, British Steel Technical Update

[8] **K.H. PETERS, W.KOWALSKI, B.KORTHAS, K.KREIBICH,** 1989, Experience with High Coal Injection Rates at the Blast Furnaces

[9] **T.UENAKA,** 1985, Pulverized Coal Injection in a Blast Furnace, ISS-AIME, Vol. 44

[10] **W.KOEN, R.B.VOGEL, H.L. TOXOPEUS, G.A. FLIERMAN,** 1985, Injection of Coal into the Hoogovens Blast Furnaces

[11] **M.HATANO, K.KURITA, T.TANAKA,** 1981, Blast Furnace Hearth and Raceway, Australasian İnst. of Mining and Metallurgy

[12] **G.HANNIKER, R.B.RANDS,** 1987, Granular Coal Injection of BRITISH STEEL, First European Dry Fine Coal Conf.

[13] **KIMITSU, OITA, NAGOYA,** 1989, High Injection Rates of Pulverized Coal into Blast Furnaces, Nippon Steel Corparation

[14] **Y.DELASSAT**, **M.PICARD, G.PRADO, H.ALEBOYER, O.SIMON,** March 1990, The 9th . PTD Conference AIME

[15] **K.TAMURA, M.SUGATA, K.YAMAGUCHI,** 1989, Analysis of Combustion Behavior of Pulverized Coal Inside Tuyeres and in Raceway through Off-line Model Experiments

[16] **B.SNOWDON,** 1994, Blast Furnace Coal Injection Systems for High Rate, Coal Injection Symposium, Merillville, Indiana

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

[18] **R.B.RANDS,** 1983, New Developments in Blast Furnace Coal Injection, Association of Iron and Steel Engineers Convention, Pittsburg

[19] **R.R.MALDONADO,** 1985, Operating Experience with Injection of Granular Coal to Blast Furnaces at Scunthorpe Works, ATS Conference, Paris

[20] **KOBE STEEL LTD,** 1991, Blast Furnace Operation with High Coal Injection Rate

[21] **D.C.BROUWER,** 1992, Coal Injection Driven to the Limits

[22] **C.S.STOLWIJK,** 1988, Five Years Of Coal Injection at Hoogovens, Lulea

[23] **J.DERRYCKE,** 1988, Coal Injection at Sidmar

[24] **K.TAMURA, H.UENO, K.YAMAGUCHI, M.SUGATA, S.AMANO,** 1990, Proceedings of the 6th IISC, Vol. 2

[25] **Y.YAMAGATA, R.İTO, K.SHIBATA, T.GOTO, T.YABATA, I.MIZUGUCHI,** 1996, High Rate of Pulverized Coal Injection at Kakogawa Blast Furnaces, Kobe Steel

[26] **L.ULVELING,** 1994, Injection of Pulverized Coal Into The Tuyers Of a Blast Furnace Using a Static Distributor, Coal Injection Symposium, Merrillville, Indiana

[27] **M.CALCAGNI, E.SALVATORE, F.EICHINGER, M.RAFI,** 1994, Blast Furnace Operation at Very High Coal Injection Rate at Ilva Taranto, Coal Injection Symposium, Merrillville, Indiana

[28] **Y.YAMAGATA, R.İTO, K.SHIBATA, T.GOTO, T.YABATA, I.MIZUGUCHI,** 1996, Development of High Rate Pulverized Coal Injection Technology at Kimitsu Works

[29] **K.TAMURA, M.SUGATA, K.YAMAGUCHI,**1989, Analysis of Combustion Behavior of Pulverized Coal Inside Tuyeres and in Raceway through Off-line Model Experiments

[30] **KANJI TAKEDA, F.C. LOCKWOOD, 1997,** Integrated Mathematical Model Of Pulverized Coal in a Blast Furnace, ISIJ International, Vol. 37

[31] **A.G.S. STEEGHS, E.E. SCHOONE, H.L.TOXOPEUS,** 1998, High Coal Injection Rates Into The Blast Furnaces of Hoogovens Ijmuıden, Netherlands

[32] **D.HEGUI, X.WANREN,** 1998, Influence of Macerals on Combustibility of Pulverized Coal into Blast Furnaces, China

[33] **K.YAMAGUCHI, H.UENO, K.YAMURA,**1992, Maximum Injection Rate of Pulverized Coal into Blast Furnace Through Tuyeres with ConsideratiInfluence of Macerals on Combustibility of Pulverized Coal into Blast Furnaces, China

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

[35] **M.TATEOKA,**1993, Development of Pulverized Coal Injection into Blast Furnaces in Japan, Nippon Steel

[36] **S.BORTZ, G.FLAMENT,**1983, Experiments on Pulverized Coal Combustion Under Conditions Simulating Blast Furnace Envirements, Ironmaking and Steelmaking, 10

[37] **R.R.WİLMERS, R.M.POULTNEY,**1992, Coke in the Blast Furnace, Cokemaking International, 4

[38] **H.AKBULUT,**1997, Yüksek Sıcaklık Özellikleri Bakımından Yüksek Fırında Sinter Kalitesinin Kontrolü, ERDEMİR

[39] **ERDEMIR,** 2000, 2001, 2002, 1. Yüksek Fırın Çalışma Raporları

[40] **Y.KAÇAR,** 2001, Pulverize Kömür Enjeksiyonunun Yüksek Fırın Prosesine Etkisi, 1. Ulusal Demir Çelik Sempozyumu, Kdz. Ereğli

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Kdz. Ereğli'de dünyaya geldi. Kdz. Ereğli'de, Çiğdemli Köyü İlkokulu, Atatürk Ortaokulu ve Teknik Lisesi Elektronik bölümünü bitirdi. 1991 yılında kazandığı İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji Mühendisliği Bölümü'nde 1 yıl İngilizce hazırlık okudu. 1997 yılında Metalurji Mühendisi unvanını alarak mezun oldu. 1998 yılında 3 aylık bir süre KARDEMİR Yüksek Fırınlar Müdürlüğü'nde İşletme Mühendisi olarak çalıştı. 1998 Ekim'den itibaren yaklaşık 4 yıl ERDEMİR Yüksek Fırınlar Müdürlüğü'nde İşletme Mühendisi olarak görev yaptı. 2002 Ağustos'tan itibaren ERDEMİR Kalite Kontrol Müdürlüğünde Kalite Kontrol Mühendisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk sahibidir.