

**YÜKSEK FIRINLARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

**2013
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Murat ODABAŞ

YÜKSEK FIRINLARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ

Murat ODABAŞ

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

KARABÜK

Ocak 2013

Murat ODABAŞ tarafından hazırlanan “YÜKSEK FIRINLARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Yusuf ÇAY

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 18/ 01/ 2013

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Doç. Dr. Hüseyin KURT (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Yusuf ÇAY (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Muhammet KAYFECİ (KBÜ)

İmzası

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

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

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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

Murat ODABAŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK FIRINLARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ

Murat ODABAŞ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Yusuf ÇAY

Ocak 2013, 62 sayfa

Bu çalışmada, ülkemizin kalkınmasında en önemli parametrelerden biri olan ve enerjiyi yoğun olarak tüketen entegre demir çelik tesislerindeki yüksek fırınlarda enerji tasarrufu olanakları araştırılmıştır. Yüksek fırınlarda kullanılan demir ve karbon esaslı malzemeler fiziksel ve kimyasal olarak incelenmiştir. Ayrıca enerji dengesi oluşturularak, enerji verimliliğini arttırıcı noktalar tespit edilmiştir. Kardemir’de üretilen ürünlerin enerji tüketiminde yüksek fırınlar % 58-60 ile ilk sırada yer aldığı görülmüştür. 1 ton sıvı ham demir için yaklaşık 440 kg kok tüketilmektedir. Ayrıca yüksek fırın enerji dengesi hesapları sonucunda kok tüketiminin 400 kg altına inebileceği görülmüş, teorik hesaplamalar ile gösterilmiştir. Sonuç olarak yapılan tedbirler ile toplam % 4,35 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Kardemir, yüksek fırın, enerji verimliliği, enerji tasarrufu.

Bilim Kodu : 914.1.233

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF ENERGY EFFICIENCY IN BLAST FURNACES

Murat ODABAŞ

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Yusuf ÇAY

January 2013, 62 pages

In this study, the energy-saving possibilities of blast furnaces in integrated iron steel plants where is one of the most important parameters on development of the country and instantly consume energy were investigated. Iron and carbon-based materials used in blast furnaces were analyzed physically and chemically. In addition, as creating energy balance, increase of the energy efficiency have been identified the points. Blast furnaces have observed the first place with 58-60% in the energy consumption of the products manufactured in Kardemir. 1 ton coke is consumed approximately 440 kg for liquid crude iron. In addition, as a result of blast furnace energy balance calculations coke consumption may land under 400 kg was seen and demonstrated by theoretical calculations. As a result, energy savings 4.35% of the total can be achieved by the measures.

Keywords : Kardemir, blast furnace, energy efficiency, energy-saving.

Science Code : 914.1.233

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada büyük pay sahibi olan ve daima olumlu yaklaőımları ile beni yönlendiren ve çalışmanın danıőmanlıęını yapan hocam Doç. Dr. Yusuf ÇAY'a, çalışmanın tüm aőamalarında, gerek bilgi ve gerekse manevi desteklerini esirgemeyen çalışmanın sistematik bir yapıyla yrtlp tamamlanmasına katkı sağlayan tez izleme komitesi jüri yesi hocalarıma, bu çalıőmayı yapma fırsatı veren Kardemir A.Ő Yüksek Fırınlr Müdürü Sn. Ahmet Aycan ile diğer mesai arkadaşlarıma, ayrıca her zaman manevi desteklerini hissettiğim sevgili eőim Dilek ve sevgili oğlum Metehan 'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	7
LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	7
BÖLÜM 3.	10
YÜKSEK FIRIN PROSESİ.....	10
3.1. YÜKSEK FIRIN PROSESİNİN GENEL TANIMI	10
3.2. YÜKSEK FIRINDA REAKSİYONLAR VE ERGİME.....	13
3.2.1. Ergime Sahası	15
3.2.2. Alt Bölge Reaksiyonları	15
3.2.2.1. Tüyer Seviyesi.....	15
3.2.2.2. Alt Bölgedeki Diğer Reaksiyonlar	16
3.2.3. Karbon alma Sahası	16
3.2.4. Redüksiyon Sahası.....	17
3.2.5. Orta Bölge Reaksiyonları	17
3.2.6. Isınma Sahası	18
3.2.7. Üst Bölge Reaksiyonları	18

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4.	19
ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE ENERJİ DENGESİ ANALİZLERİ.....	19
4.1. ENERJİ VERİMLİLİĞİ KONUSUNDA TEMEL KAVRAMLAR.....	19
4.1.1. Fiziksel Enerji Verimliliği Göstergesi (Spesifik Enerji Tüketimi).....	20
4.1.1.1. Entegre Demir Çelik Sektöründe Kullanılan Enerji Kaynakları.....	21
4.1.1.2. Entegre Demir Çelik Tesislerinde Proseslerin Verimlilik Tanımı..	21
4.1.2. Enerji Denge Analizleri ve Spesifik Enerji Tüketiminin Kontrol Edilmesindeki Önemi.....	25
4.1.2.1. Enerji Denkliğinin Tanımı	25
4.1.2.2. Enerji Değişimi	26
4.1.2.3. Kontrol Hacmi	26
4.1.2.4. Referans Sıcaklık	26
4.1.2.5. Spesifik Enerji Tüketiminin Kontrol Edilmesindeki Önemi	27
4.2. ENTEGRE DEMİR ÇELİK TESİSLERİ ENERJİ VERİMLİLİĞİ İZLEME MODELİ.....	27
4.3. ÖZGÜL ISILARIN HESAPLANMASI	31
BÖLÜM 5.	32
MATERYAL VE METOT	32
5.1. YÜKSEK FIRINLAR İÇİN ENERJİ DENGESİ.....	32
5.2. KARDEMİR 4 NO'LU YÜKSEK FIRINLARDA ENERJİ DENGESİ HESABI	34
5.3. YÜKSEK FIRINLAR' DA MEVCUT DURUMDA DEĞERLENDİRİLEN ENERJİ POTANSİYELİ	44
5.4. YÜKSEK FIRINLAR İÇİN ENERJİ TASARRUFU ÖNERİLERİ	45
5.4.1. Cüruf Enerjisinin Geri Kazanılması	45
5.4.2. Yüksek Fırın Gazı Duyulur Isısının Geri Kazanılması.....	49
5.4.3. Yüksek Fırın Prosesinde Enjeksiyon Kömür Oranının Arttırılması.....	52
5.4.3.1. Uygulama Hakkında Açıklamalar.....	52
5.4.3.2. Enerji Tasarrufu Hesaplamaları	54

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 6.	57
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Dünyada enerji üretimi.....	1
Şekil 1.2. İnsan kaynaklı global sera gazı emisyonları	2
Şekil 1.3. Küresel enerji tüketimi ve sektörlere göre dağılımı.....	3
Şekil 1.4. Kardemir yıllık enerji tüketimleri.	5
Şekil 1.5. Kardemir enerji tüketiminin ünitelere dağılımı.....	6
Şekil 3.1. Yüksek fırınların çalışma prosesi.....	13
Şekil 4.1. Enerji verimliliği gösterge piramidi	19
Şekil 4.2. Entegre bir demir çelik tesisinde proses akışı	24
Şekil 4.3. Enerji denklığı analizi	25
Şekil 5.1. 4 No’lu Yüksek Fırın enerji dengesi (Ekim 2012 değerlerine göre).....	37
Şekil 5.2. 4 No’lu Yüksek Fırın’da kazanılabilir enerji dengesi.....	43
Şekil 5.3. Enerji kazanımlı örnek bir granüle cüruf tesisi	45
Şekil 5.4. Prosesin basit akış şeması	46
Şekil 5.5. Granüle cüruf kanalı (Cüruf akışı yok)	46
Şekil 5.6. Granüle cüruf kanalı (Cüruf akışı var).....	47
Şekil 5.7. Granüle cüruf sahası.....	48
Şekil 5.8. Yüksek Fırınlar baca gazı (YFG) toplama sistemi ve ana toplayıcı boru	49
Şekil 5.9. Yüksek fırınlar baca gazı toz tutma sistemi	50
Şekil 5.10. Yüksek fırın baca gazı yıkayıcıları	51
Şekil 5.11. Tek lanslı üfleme borusu.....	53
Şekil 5.12. Tüyerden bakıldığında görünen görüntü.....	53
Şekil 5.13. Çift lanslı tüyerden bakıldığında görünen görüntü.	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Ünitelerin üretimleri ile enerji kalemi bazında enerji üretim ve tüketimleri ve tesis geneli toplam enerji tüketimleri.....	29
Çizelge 4.2. Gazların Fabrika içerisinde yer alan tesislerin spesifik enerji tüketimlerini ve toplam içindeki payları izleme tablosu.....	30
Çizelge 4.3. Gazların değişik sıcaklardaki özgül ısıları.....	31
Çizelge 5.1. Yüksek Fırınlar için enerji dengesi hesap modeli.....	32
Çizelge 5.2. Yüksek Fırınlar için özgül ısılar	33
Çizelge 5.3. 4 No'lu Yüksek Fırın işletme verileri	35
Çizelge 5.4. Yüksek Fırın Gazının 25 °C ve 172 °C deki özgül ısıları	36
Çizelge 5.5. Yüksek Fırın Gazı kimyasal bileşenleri ve yoğunluğu.....	37
Çizelge 5.6. 4 No'lu Yüksek Fırın enerji dengesi.....	42
Çizelge 6.1. Enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik planlanan çalışmalar.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

C	: Karbon
CH ₄	: Metan
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbondioksit
C _p	: Sabit basınçta özgül ısı
C ₂ H ₂	: Asetilen
C ₂ H ₄	: Etilen
C ₂ H ₆	: Etan
E	: Enerji
EJ	: Exajoule (10 ¹⁸ joule)
h	: Saat
H _{alt}	: Alt ısı değer
HY	: Hava-yakıt oranı
m	: Kütle
\dot{m}	: Debi
M	: Mol kütlesi
MTEP	: Milyon ton eşdeğer petrol
Mtoe	: Million ton oil equivalent
N	: Mol sayısı
\dot{Q}	: Isı transferi miktarı
TEP	: Ton eşdeğer petrol
ϕ	: Eşdeğerlik oranı
η	: Verim
%FH	: Fazla hava yüzdesi
ΔE	: Enerji değişimi

Alt İndisler:

bg	: Baca gazı
ç	: Çıkan
d	: Diğer
g	: Giren
h	: Hava
KH	: Kontrol hacmi
s	: Stokiyometrik
ss	: Soğutma suyu
y	: Yakıt
yh	: Yakma havası

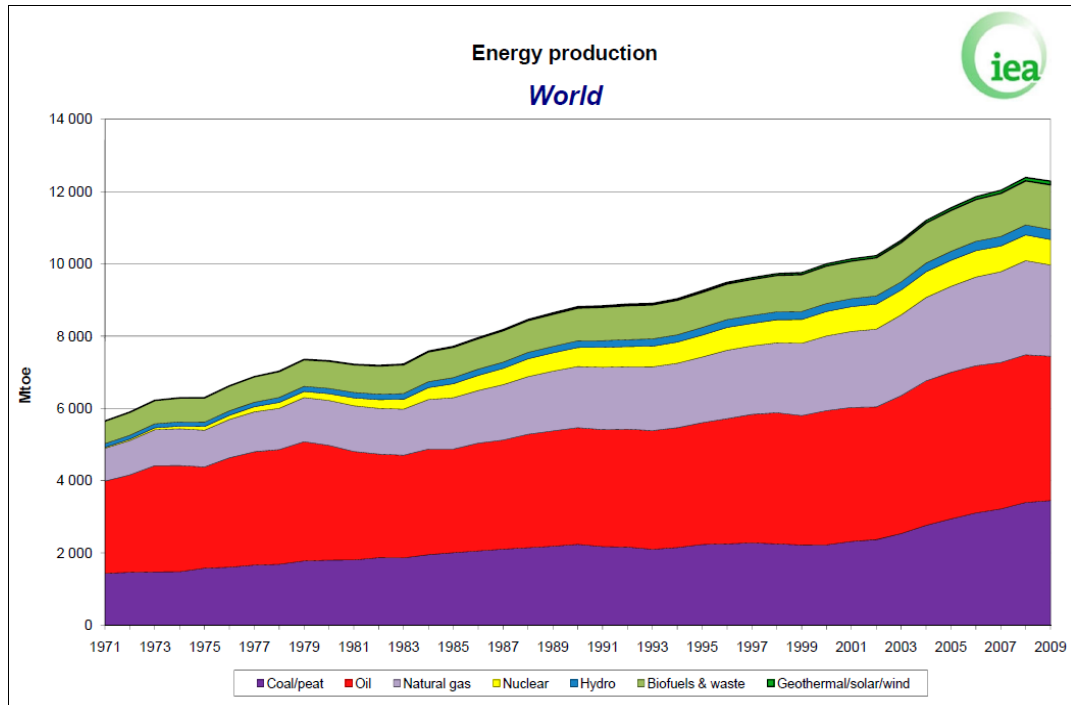
KISALTMALAR

AID	: Alt ısı değer
DRI	: Direct reduced iron
et al	: Ve diğerleri (Latince: Et alii)
FD	: Forced draft
ID	: Induced draft
IEA	: International Energy Agency
IISI	: International Iron and Steel Institute
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
ob	: Orijinal baz
PHAST	: Process Heating Assessment and Survey Tool
ÜİD	: Üst ısı değer
YFG	: Yüksek fırın gazı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Enerji, insanoğlunun temel ihtiyaçlarının karşılanması ve hayat standartlarının yükseltilmesinde birincil derecede bir gereksinim olarak kabul edilmektedir. Bununla beraber dünyadaki nüfus artışıyla birlikte, sanayileşmenin artması ve teknolojinin gelişmesi her geçen gün enerjiye olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir. Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi dünya enerji üretiminin önemli bir kısmı fosil kökenli yakıtlardan karşılanmaktadır.

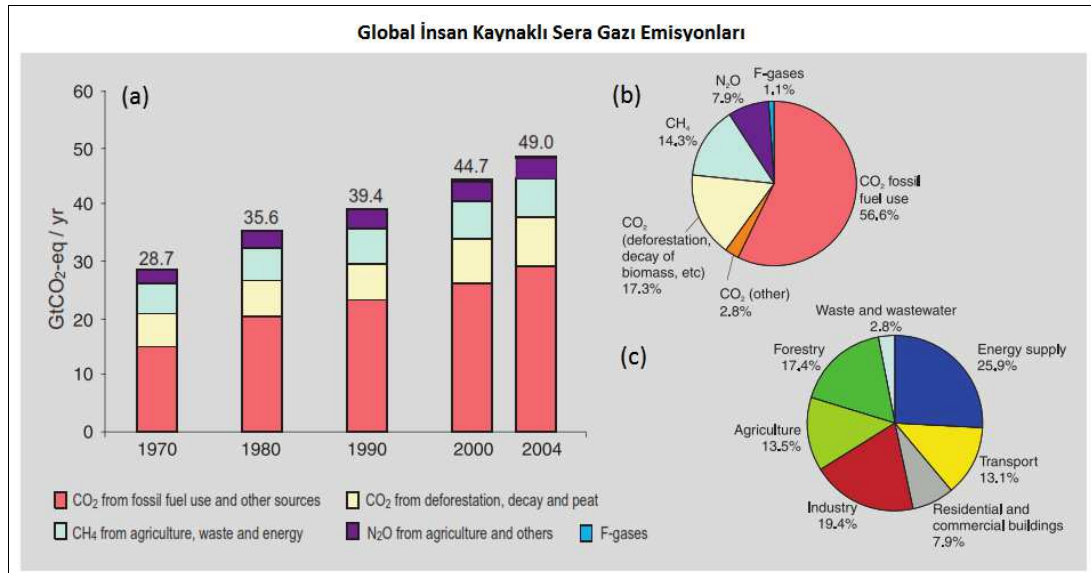


Şekil 1.1. Dünyada enerji üretimi (IEA, 2011).

Günümüzde fosil kökenli enerji kaynakları hazır olarak tüketilmekte ve enerji kullanımında önemli bir artış görülmektedir. Enerjinin kullanımı ile enerji kaynakları arasındaki ilişki, enerji maliyetlerinde dramatik bir artışa neden olmasına rağmen kaynakların uygun miktarda kullanımını gerektirmektedir (Terzi ve Baykal, 2011).

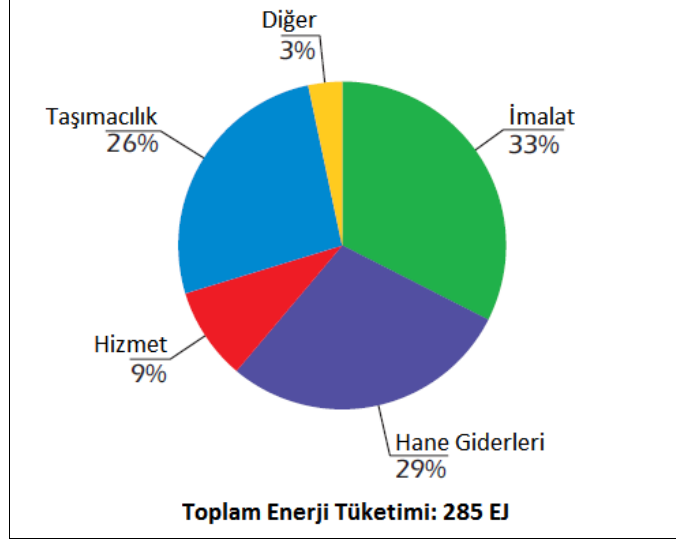
Enerji tüketiminin hızla artması, fosil kökenli yakıtların daha çok kullanılmasına ve atmosfere salınan karbondioksit (CO₂) miktarının artmasına neden olmakta; bunun sonucu oluşan sera etkisi ile iklim değişiklikleri kaçınılmaz hale gelmektedir (Tütünoğlu vd., 2011).

CO₂ en önemli insan kökenli sera gazıdır. Şekil 1.2' de görüldüğü gibi CO₂, 2004 yılındaki toplam insan kaynaklı sera gazı salınımlarının %77'sini oluşturmuş ve 1970 ile 2004 yılları arasında yıllık CO₂ salınımı %80 oranında 21Gt'dan 38Gt'a yükselmiştir. 1970 ile 2004 yılları arasında sera gazı salınımlarında en büyük artış enerji tedariki, taşımacılık ve sanayi sektörlerinden kaynaklanmıştır. Şekil 1.2' de insan kaynaklı global sera gazı emisyonları gösterilmiştir (IPCC, 2007).



Şekil 1.2. İnsan kaynaklı global sera gazı emisyonları.

1990 ve 2005 yılları arasında küresel boyutta toplam enerji tüketimi %23 oranında artmıştır. Şekil 1.3' te küresel enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı gösterilmiştir. 2005 yılında imalat sanayi %33' lük pay ile enerjiyi küresel olarak en çok tüketen sektör olmuştur (IEA, 2008).



Şekil 1.3. Küresel enerji tüketimi ve sektörlere göre dağılımı.

Tüm dünyada küresel ısınmadan kaynaklanan iklim değişikliği, enerji ve çevre güvenliği, bunun yanında enerjinin verimli ve yararlı kullanımı başlıkları önemli rol oynamaktadır. Yaşam kalitesinden ve üretimden ödün verilmeden enerji verimliliği ile enerji tasarrufu yapılabilmektedir. Tasarruf edilen enerji dönüştürülebilen, ucuz, yerli ve temiz bir enerji kaynağı olarak tanımlanmıştır (Terzi and Baykal, 2011).

Ülkemizde, sanayide %15, yerleşim yerlerinde %35 ve taşımacılık maliyetlerinde %15 enerji tasarruf potansiyeli mevcuttur. Bu potansiyeller; yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edebilecek enerjiden daha yüksektir. Eğer enerji verimliliğine doğru, kararlı ve başarılı adımlar atılabilirse ülkemizdeki enerji talebi 2020 yılında %20 oranında (45 MTEP) azalacaktır (Terzi and Baykal, 2011).

Demir-çelik sektörü yıllık yaklaşık 24 EJ (24×10^{18} J) enerji tüketimi ile en çok enerji tüketen sektörlerden birisidir ve dünyanın toplam enerji tüketiminin %5'ine karşılık gelmektedir (Xu and Cang, 2010).

Demir-çelik sektörü kömürü birincil indirgeyici madde olarak kullanmaktadır. Kömürün en büyük bileşeni olan karbon (C), süreç sonucunda çevreye CO₂ olarak bırakılır. Bu yüzden bu sektördeki enerji tüketimi CO₂ salınımına eşittir ve enerji verimliliğini artırmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır (Nogami et al., 2006).

Endüstriyel işletmeler açısından bakıldığında, verimliliği arttırıcı çalışmalar yakıttan tasarruf sağlamakla birlikte kaynakların verimli kullanımına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunurlar. Enerji verimliliğinin arttırılması, ısı kayıplarının meydana geldiği bölgelerin ve miktarlarının belirlenmesi ile mümkün olmaktadır (Tütünoğlu vd., 2011).

Demir Çelik Üreticileri Derneği'nden alınan 2000 yılı verilere göre entegre tesislerin, demir çelik sektörünün toplam enerji tüketiminin %88'ini yaptığı, hurda prosesli çalışan ark ocaklı tesislerin ise toplamdan aldıkları payın %12 mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Bu bulgulara göre, daha büyük miktarda enerji tasarruf potansiyelinin belirlenebilmesi açısından, yapılacak çalışmanın entegre tesislerde odaklanması kararlaştırılmıştır.

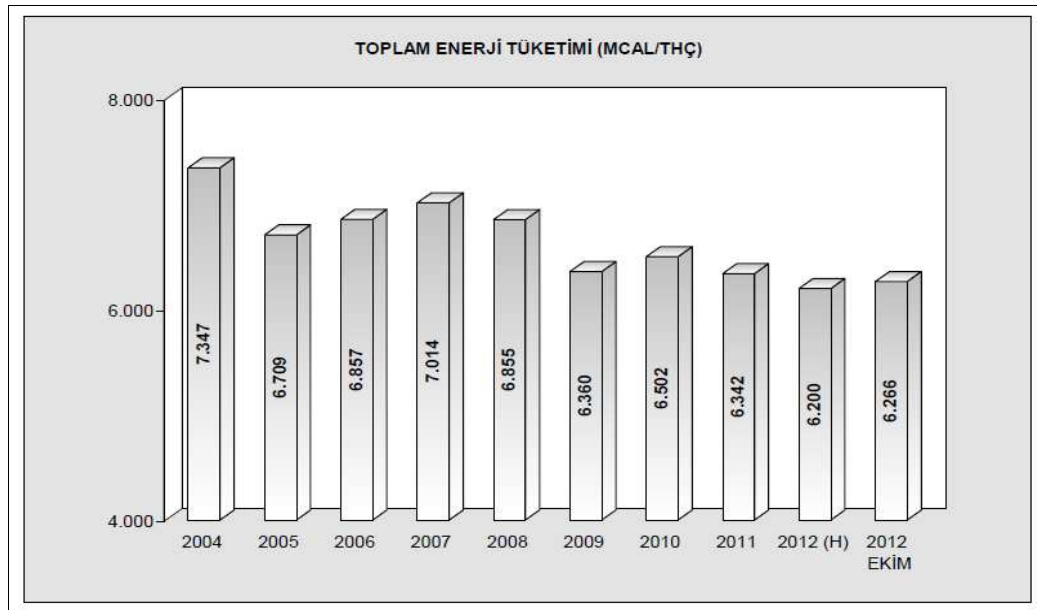
Endüstri dalları içerisinde entegre demir çelik tesislerinde, ortalama rakamlara göre 1 ton ham çelik başına tüketilen enerji 4.500 – 6.500 Mcal (18,8 – 25,1 GJ) arasında değişmektedir (IISI, 1998). Yoğun enerji tüketicisi konumundaki bu tesisler, yüksek enerji tüketim değerleri nispetinde aynı zamanda yüksek enerji tasarruf potansiyeline de sahiptirler. Üretim yapıları itibariyle birbirine benzer prosesler içerse de bu tesislerin üretim çeşitliliği, mamul grupları, teknoloji kullanımı vs. nedenlerden dolayı spesifik enerji tüketimlerinin birebir karşılaştırılması karmaşık bir yapıda olmaktadır. Genellikle karşılaştırmalar için kullanılan “Spesifik Enerji Tüketimi (SET)” çelik üretimi konusunda enerji verimliliğinin temel göstergesi olarak kabul edilmektedir (IISI, 1998). Spesifik Enerji Tüketimi, toplam enerji tüketiminin bir ton yarı mamul üretim başına oranı olarak bilinmekte ve tesisleri karşılaştırabilmek için ortak bir gösterge özelliği taşımaktadır.

Bu çalışmada ülkemizde bulunan üç adet entegre demir çelik tesisinden biri olan Karabük Demir Çelik Fabrikaları A.Ş. 'in ana ünitelerinden biri olan yüksek fırınlarda enerji dengesi oluşturulmuş, enerji verimliliği incelenmiş ve potansiyel enerji kazanımları ortaya çıkarılmış olup 2012 yılı verileri hesaplamalar için baz alınmıştır.

Bu tespitleri yaparken uluslar arası bazda Uluslar arası Demir Çelik Enstitüsü (IISI), ulusal bazda Elektrik İşleri Etüt İdaresi Ulusal Enerji Tasarrufu Merkezi (UETM) ve Japan International Cooperation Agency (JICA) tarafından önerilen, tüm dünyada sektör tarafından kullanılan spesifik enerji tüketim hesaplama metodu olan toplam enerji tüketiminin üretime olan oranından yararlanılmıştır.

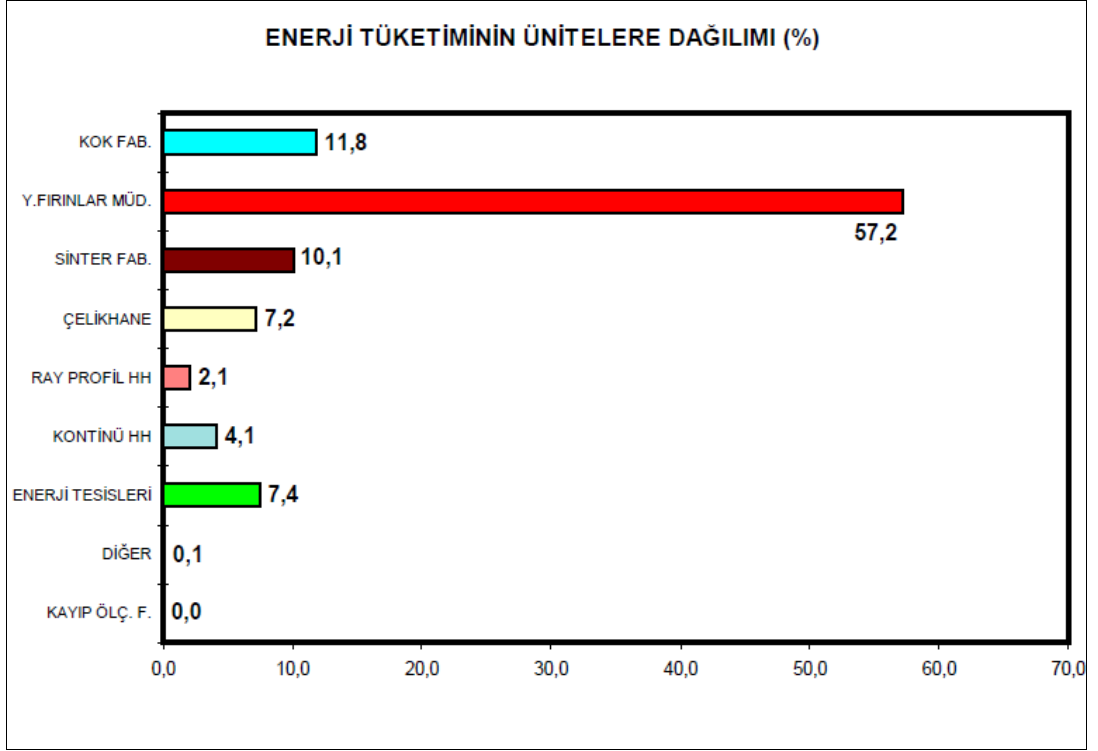
Çalışmada genelden özele doğru detaylandırılan spesifik enerji tüketimi ve denge analiz yöntemleri kullanılmıştır. Spesifik enerji tüketimi yöntemi ve enerji denge analizi yönetimi; bir prosese giren enerjinin prosesi ne şekilde terk ettiğini net olarak belirlemek üzere seçilmiştir. Burada varılmak istenen nokta, prosesi terk eden enerjilerden olası kayıpları tespit etmek ve potansiyel kazançların elde edilmesi için önerilerde bulunmaktır. Kullanılan yöntemler için; sürekli çalışma durumundaki demir çelik tesislerindeki dönemsel etkilerin en aza indirilebilmesi amacıyla, veriler ortalama olarak alınmış, özellikle detay analizlerde ton başına ya da üretim periyodu başına oluşan dengeler irdelenmiştir

Kardemir A.Ş de sipesifik enerji tüketimi 2012 ekim ayı itibariyle yıllık ortalama 6.266 Mcal/THÇ' dir. Şekil 1.4 Kardemir'de yıllara göre THÇ üretimi için gerekli enerji dağılımı görülmektedir.



Şekil 1.4. Kardemir yıllık enerji tüketimleri.

Yıllara göre dağılıma bakıldığında enerji tüketiminde belirgin düşüşler görülmektedir. Teknolojinin gelişmesi ve enerji kullanımını azaltacak yönde iyileştirmeler yapılması bunun en büyük sebeplerindedir.



Şekil 1.5. Kardemir enerji tüketiminin ünitelere dağılımı.

Endüstriyel tesislerde enerjiyi en yoğun kullanan ünite Şekil 1.5’ de görüldüğü gibi yüksek fırınlardır. Gerek enerji kayıplarının geri kazanımı gerekse proste yapılacak iyileştirmeler yüksek miktarda enerji tasarrufu ve maliyet düşümü elde edilecektir. Dünya literatürlerinde de en fazla yüksek fırınlarda enerji tasarrufu üzerine çalışılmakta ve teknoloji bu yönde ilerlemektedir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu çalışmaya benzer dünyada pek çok çalışma bulunmaktadır. Sözü geçen çalışmalar konunun önemini ve enerji verimliliğinin nedenli önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Worrell vd. (1999a), yaptıkları çalışmada; Amerika Birleşik Devletleri demir ve çelik sanayiinin geniş kapsamlı bir analizini yapmışlardır. Bu analizde maliyete etkileyen enerji tasarrufları ve CO₂ emisyonu azaltılma miktarları belirlenmiş ve bir enerji tasarrufu eğrisi oluşturulmuştur. Toplam maliyete etkileyen enerji tasarrufu potansiyeli 3,8 GJ/t olarak bulunmuştur. Bu potansiyel Amerika Birleşik Devletleri'nin 1994 yılı enerji kullanımının %18'ine, 1994 yılı CO₂ emisyonunun ise %19'una karşılık gelmektedir.

Monaghan vd. (2010), Wollongong Üniversitesi pirometalurjik grup tarafından yürütülen son deneysel çalışma yüksek fırının alt zonda kok davranışını anlamak üzerine odaklanmıştır. Bu çalışma temel ve uygulamalı öğeleri içermekle birlikte yüksek fırında kok kullanımını geliştirmek ve sera gazı emisyonlarının azaltılması hedeflenmiştir.

Dmitriev and Vitkina (2012), demir cevheri ve metalurjik kok özelliklerinin yüksek fırın ertitme verimine etkisini belirlemek için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu şu aşamalardan oluşur; demir cevheri ve metalurjik kokun laboratuvar testleri, matematiksel modeller kullanarak yüksek fırının ertitme verimliliği üzerine analitik çalışma, deneysel sanayi ve endüstriyel testler. Geliştirilen metalurjik hammadde özelliklerini değerlendirmek için geliştirilmiş kriterler elde etmek ve yüksek fırın

içinde doğrudan ve dolaylı yakma reaksiyonu üzerindeki etki mekanizmasını açıklamaya izin verir. Bu nedenle yüksek fırın ergitme teknolojisi geliştirmek için öneriler sağlar.

Zhou (2012), araştırmasıyla iyi gaz kullanımını sağlamak ve bir yüksek fırın içine gaz ve yük dağılımları optimize etmek için ileri CFD teknolojisi kullanılarak çelik üreticilerinin rekabet avantajı geliştirmeyi amaçlamıştır. A state-of-the-art 3-D CFD modeli verilen yük koşulları, yük dağılımı ve patlama parametreleri bir yüksek fırın içine gaz dağıtımını simule etmek için geliştirilmiştir. Kapsamlı 3 boyutlu CFD modeli gerçek bir yüksek fırın ölçüm verileri tarafından onaylanmıştır. Yüksek Fırın Baca Simülatörü (BFSS) adlı yazılım paketi fırının baca gazı akış sürecini simule etmek için geliştirilmiştir. Araştırma yüksek verimlilik, düşük enerji tüketimi ve gelişmiş çevre ile çelik endüstrisi için önemli fayda sağlamıştır.

Helle vd. (2011), birincil çelik üretimindeki yüksek enerji gereksinimleri bu sanayi sektörünü küresel karbondioksit emisyonunun başlıca sebeplerinden biri yapmıştır. Baca gazından CO₂ ayrıldıktan sonra yüksek fırının yanma bölgelerine geri dönüşümünün ekonomik fizibilite çalışmasını simulasyon ve optimizasyon yöntemleriyle yapmıştır. Çalışmasında bir yüksek fırın prosesinde havanın veya geri dönüştürülmüş baca gazının ön ısıtmasına dikkat edilmiştir. Sistem ekonomik fizibilite hakkında bilgi verir. Farklı CO₂ emisyon maliyetleri bazı merkezi değişkenler açısından doğrusal olmayan programlama ile optimize edilmiştir. Ayrıca CO₂' yi ayırma ve depolama ile sıcak gaz dönüşüm sürecinde zararlı emisyonların azaldığı görülmüştür.

Zhang vd. (2013), yüksek fırın üzerinde derinlemesine bir çalışma ile demir ergitme prosesine ve yardımcı malzemelerin operasyonel karakteristiklerinin çalışma özelliklerine dayalı kok oranını başlıca etkileyen faktörler bulunmuştur. Daha sonra, geniş kok hızı ve ana faktörler arasındaki ilişki haritası simüle edildi. Hedef olarak düşük kok oranı için demir çelik şirketinin gerçek üretim verileri kullanılarak en iyi kombinasyonunu bulmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak optimizasyon hesaplamasından sonra kok oranınının 35.85 kg azaltılabilir olacağını göstermiştir.

Anishchenko vd. (2012), yüksek fırın verimliliği ve yüksek fırın üretkenliği üzerindeki temel teknolojik parametrelerin etkilerini ilişkilendiren bir formül elde etmiştir. Formül, modern yüksek fırın özelliklerini dikkate almıştır. Bu formüle göre hesaplamalar deneysel veriler ile yapılmıştır.

Bu çalışmada Kardemir A.Ş.'nin Yüksek Fırınlarında enerji verimliliğine yönelik ölçümler alınmış, ölçüm sonuçları ve kuruluş verileri kullanılarak enerji dengesine yönelik hesaplamalar yapılmış, enerji tasarruf imkanları belirlenmiştir.

BÖLÜM 3

YÜKSEK FIRIN PROSESİ

3.1. YÜKSEK FIRIN PROSESİNİN GENEL TANIMI

Yüksek fırınlar genel enerji tüketimi içerisinde % 57,2'lik pay ile KARDEMİR'in en yoğun enerji tüketen tesisleridir. Aynı zamanda yüksek fırınlar entegre demir çelik tesislerinde üretim ve maliyetlerin oluştuğu proseslerin de kalbinde yer almaktadır. Birimsel enerji tüketim verimliliğinin yoğun olarak bulunduğu yüksek fırına uygulanan enerji denge analizinin yanı sıra tüm yüksek fırınlar genelini kapsayan tesise de enerji verimliliği analizi uygulanmıştır. Enerji dengesinde baz alınan birim, üretilen bir ton sıcak madendir. Dengeleme ile ilgili hesaplamalar ve tablolar aşağıda verilmiştir.

Entegre demir çelik tesislerinde yüksek fırınlar, demir cevherinin sıcak madene (pik demir) dönüştürüldüğü tesis olarak yer almaktadır. Yüksek fırınlarda pik demir üretiminin yanı sıra; cüruf, yüksek fırın gazı, baca tozu, yıkayıcı çamuru gibi yan ürünler de üretilmektedir.

Yüksek fırınlarda üretilen pikin örnek bir analizi aşağıdaki gibidir.

Fe	: % 94,0 – 96,0,
Si	: % 0,60 – 1,20,
Mn	: % 0,50 – 0,70,
C	: % 4,20 – 4,50,
P	: % 0,07 – 0,10.

Yüksek fırına şarj edilen malzemelerin içerisindeki demir (Fe) dışındaki diğer elementler (pik içerisinde çözünemeyenler) ve oksitler cürufu oluşturmaktadır. Cüruf

elde edilmiş şekline göre, granüle cüruf ve parça cüruf olmak üzere iki gruba ayrılır. Granüle cüruf çimento hammaddesi olarak, parça cüruf dolgu malzemesi olarak kullanılır. Kullanılan hammadde kalitesine ve çalışma şartlarına bağlı olarak 1 ton sıvı pik ile birlikte 200 – 300 kg arasında cüruf üretilir. Üretilen cürufun örnek analizi aşağıda verilmiştir,

FeO	: % 0,20 – 0,70,
SiO ₂	: % 36,0 – 38,0,
MnO	: % 0,70 – 1,50,
Al ₂ O ₃	: % 13,0 – 15,0,
CaO	: % 37,0 – 40,0,
MgO	: % 4,00 – 8,00,
S	: % 0,80 – 1,20,
Na ₂ O	: % 0,20 – 0,40,
K ₂ O	: % 0,50 – 1,00,
TiO ₂	: % 0,70 – 1,50.

Yüksek fırın içerisinde hammaddelerin ergimesi ve demirin oksitlerinden ayrışarak indirgenme işlemleri CO gazı ile elde edilir. İndirgenme ve parçalanma reaksiyonları sonrası açığa çıkan çeşitli gazlar fırın içerisinde belirli mertebelerde reaksiyona girerler. Bu reaksiyonlar sonrasında kullanılmayan gazlar yüksek fırını terk eder. Yüksek fırından ayrılırken beraberinde küçük boyutlu (toz) malzemeleri de fırından uzaklaştırır. Gaz içerisindeki bu malzemeler ayrıştırılıp temizlendikten sonra geriye kalan ürün, yüksek fırın gazı olarak adlandırılır ve fabrikanın çeşitli yerlerinde yakıt olarak kullanılır. Gaz içerisindeki toz ise, gazdan ayrışarak toz silosunda birikir ve baca tozu olarak adlandırılmaktadır. Baca Yüksek fırın gazının özellikleri aşağıda verilmiştir.

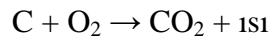
Sıcaklık	: 30 - 35 °C,
Basınç	: 75 gr/cm ² ,
CO	: % 20 – 22,
CO ₂	: % 20 – 22,
H ₂	: % 2,0 – 4,0.

Biriken baca tozunun analizi aşağıdaki gibidir;

Fe	: % 45 – 50,
C	: % 20 – 35,
SiO ₂	: % 5,0 – 8,0,
Al ₂ O ₃	: % 2,0 – 3,0,
CaO	: % 5,0 – 7,0,
MgO	: % 1,00 – 1,20,
S	: % 0,60 – 0,80,
Na ₂ O	: % 0,10 – 0,20,
K ₂ O	: % 0,50 – 0,80,
Zn	: % 0,05 – 0,07.

Cevher, pelet, sinter gibi demir kaynağı malzemeler ile akmak taşı, dolomit, kireç taşı, olivin gibi cüruf yapıcı malzemeler ve ısı kaynağı olan kok, fırının üst bölgesinden şarj edilirken; kömür, katran, fuel oil, doğal gaz gibi ısı kaynakları ise fırının alt bölgesinden verilir. Fırın üst bölgesinden şarj edilen malzemelerden sadece kok fırın alt bölgesine kadar katı ve akkor halinde iner. Diğer malzemeler belirli aşamalar geçirerek fırın alt bölgesine sıvı olarak iner.

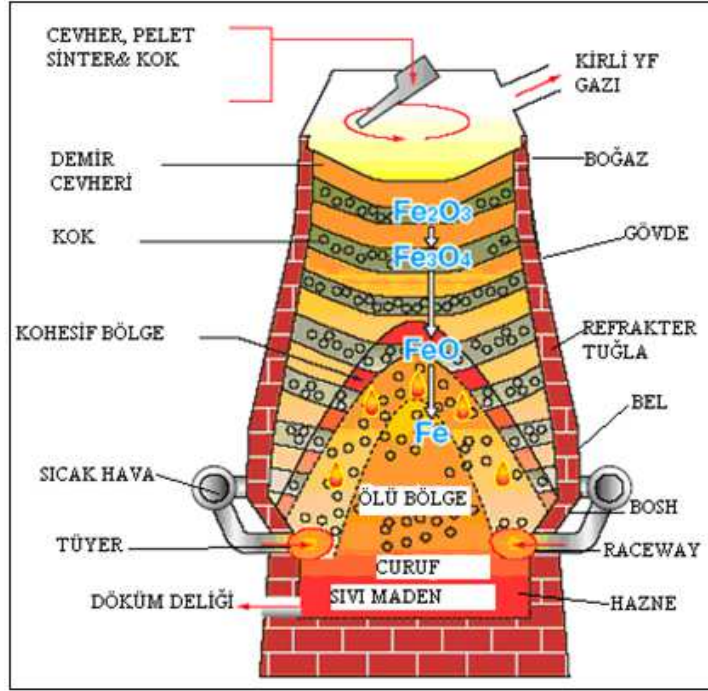
Yüksek fırın yanma havası üfleyicisi (Blower) tarafından üretilen ve yüksek fırın sobalarında ısıtılarak sıcaklığı 1000 - 1250 °C' a kadar yükseltlen hava, fırına tüyer (hava üfleme borusu) bölgesinden girer ve aşağıdaki reaksiyon meydana gelir:



Bu reaksiyondaki karbon, kok, kömür, katran, fuel oil, doğal gaz gibi ısı kaynaklarından sağlanırken; O₂ ısıtılmış blower havasından veya havaya karıştırılan saf oksijenden sağlanır.

şekil 3.1'de de görüleceği üzere oluşan sıcak gaz (2000 – 2250 °C) fırın alt bölgesinden üst bölgesine hareket ederken cevher, pelet, sinter gibi demir kaynağı malzemeler ile çeşitli aşamalarda reaksiyona girerek bu malzemelerin demir

içeriklerini diğer oksitlerden ayırmaktadır. Ayrılan demir ve birlikte çözünen diğer elementler, pik olarak adlandırılır ve sıvı halde fırın hazne bölgesinde birikir. Hammaddelerin içerisinde bulunan demir dışındaki diğer oksitler ise cüruf olarak adlandırılır. Cüruf hazne bölgesinde sıvı pikin üzerinde sıvı halde birikir.



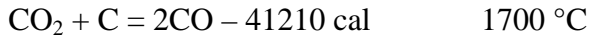
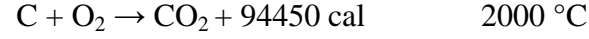
Şekil 3.1. Yüksek fırınların çalışma prosesi.

3.2. YÜKSEK FIRINLARDAKİ RAKSİYONLAR VE ERGİME

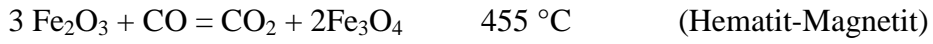
Yüksek fırına demir oksit halinde giren cevher, yüksek ısı karşısında oksijen ve demire ayrılarak oksijeni karbonla birleşip CO ve CO₂ gazı halinde yukarı yükselir. Demir de erimiş olarak altta toplanır. Yüksek fırında redüksiyonun tam olabilmesi, yani cevherdeki oksijenin tamamının ayrılabilmesi için, fırına gerekli olan miktardan fazla karbon ilave edilir. Bu şekilde arta kalan bir kısım karbon da erimiş haldeki madene karışır. Fırına alttan giren hava ve fırın içinde ayrılan gazlar yukarı yükseldikçe reaksiyon değiştiğinden, fırın içindeki reaksiyon sahalarını da alttan yukarı doğru ayırmak daha uygun olacaktır (Özgen, 1991).

Yüksek fırınlar ters akımlı bir prosestir. Katılar yukarıdan aşağıya inerken gazlar da aşağıdan yukarıya çıkar. Sıvı maden eldesi kısaca, demir oksitlerden Hematit

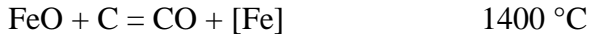
(Fe₂O₃), magnetit (Fe₃O₄) ve wüstit (FeO) seri reaksiyonlar sonucunda oksijenin uzaklaşmasıyla demirin yalnız kalmasıdır. Fırın içerisinde kok, tüylerden üflenen sıcak havanın oksijeni ile reaksiyona girerek demirli malzemeleri indirgeyen karbon monoksit gazını (CO) oluşturur. Oluşan CO demirli malzemeleri redüklemek için gereklidir.



(Boudoart reaksiyonu)



(İndirekt indirgeme reaksiyonu)



(Direkt indirgeme reaksiyonu)

Demir oksit saflaşma reaksiyonlarından geçer, ilk önce malzemelerin bünyesinde bulunan rutubet gider, bu işlem malzemelerin fırına şarj edildikten sonra fırın üst bölgelerinde fırını terk etmekte olan gazın sıcaklığı ile olur. Sıcaklığın 1000 °C'ı aştığı herhangi bir bölgede redüklenmemiş FeO mevcut ise, reaksiyon sonucu açığa çıkan CO₂ aşağıdaki reaksiyon gereği süratle karbon tarafından indirgenir.



Bu prosesten sonra malzemelerde yumuşama başlar, bu işlemde fırının orta bölgelerinde oluşur ve sıcak maden ve cüruf oluşmaya başlar. En son olarak sıvılaşan demir ve cüruf, koklar arasından süzülerek hazneye iner. Cüruf, fırın içerisindeki sıcaklıkta ergir. Fırının tabanında cüruf, kendinden daha yoğun olan sıvı demirin üzerinde yüzer. Fırının kenarında açılan oluklardan sıvı demir ve cüruf ayrı ayrı alınır (Aydın, 2005).

3.2.1. Ergime Sahası

Erimenin olduğu bu kısma, ergime sahası adı verilir. Fırındaki kok kömürü, tüyerlerden giren sıcak havanın oksijeni ile birleşerek bütün karbonu yakarak karbondioksit oluşturur. Biraz yükselen CO₂ gazı tekrar kızgın koka rastlayacağından onun karbonunu alıp karbonmonoksit haline geçer. Alttan yukarı yükselmeye çalışan bu karbonmonoksit gazı demir cevheri içindeki demir oksidin redüksiyonunu sağlar. Bu kısmın sıcaklığı ortalama 1700 °C' dir (Yeniçeri, 1993).

3.2.2. Alt Bölge Reaksiyonları

Alt bölge ve ergime bölgesi tüyer seviyesinden 3,5 metre yukarıya doğru uzanır. Bu bölgede erimiş malzemenin sıcaklığı 1400–1450 °C'ye ulaşır ve gaz sıcaklığı 800–1000 °C'ye kadar düşer. Kokun tüyerler önünde yanması sonucu, haznenin çevresinde (tüyer önlerinde) sürekli olarak hava boşlukları (Raceway) oluşur. Böylece yanan kokun boşalttığı hacim nedeni ile şarj malzemeleri aşağı doğru hareket eder. Yanma bölgesinin şekli ve boyutu düzgün gaz dağılımı ve şarj malzemelerinin inişi için önemlidir. Sıcak havanın kinetik enerjisine bağlı olarak Şekil 3.1'de gösterildiği gibi fırında üç ayrı sıcaklık bölgesi vardır. Alt ve üst sıcaklık bölgelerindeki toplam ısı ihtiyacı yükselen gazlardan sağlanır. Orta sıcaklık bölgesinde (800–1000 °C) çok az bir ısı transferi gerçekleşir ve bu bölgede sıcaklık yaklaşık sabittir. Bu bölgelerdeki reaksiyonlar aşağıda belirtilmiştir (Doğar, 2008)

3.2.2.1. Tüyer Seviyesi

Yanma bölgesi derinliği 1-2 metre civarındadır. Böylece gerçek aktif alan haznenin etrafında 1–2 metre derinliğinde bir daire oluşturur ve raceway olarak adlandırılır. Raceway'in önünde Deadman bölgesi olarak adlandırılan sıkı dolgulu kok sütunu vardır. Bu kok sütunu ya haznedeki sıvı pikin üstünde yüzer ya da ulaşabildiği kadarı ile haznenin tabanına ulaşır. Bir miktar cüruf ve demir, kok yığınındaki boşluklara girerler ve döküm açıldığı zaman buradan fırını terk ederler. Flaks ile karışmış demir harici oksit malzemeler fırının bel bölgesinde kısmen erimeye başlarlar. Burada 1200 °C'de birbirine karışmayan iki faz oluşmaya başlar. Daha sonra bu iki sıvı faz

birbirlerinden ayrılırlar. Başlangıçta, CaO içeren birincil curuf (bosh curufu) tüyer önündeki kokun yanması sonucu oluşan kok külü ile karışarak hazne curufunu oluştururlar. Bu curufun fırın dışına alınabilmesi için akışkan olması gerekmektedir. Uygun bir kompozisyonundaki curuf 1400 –1450 °C arasında sıvı fazdadır ve 1500 °C'deki akışkanlığı 10 poise olmalıdır. Bunun sonucunda curufun baziklik oranı $(\%CaO + \%MgO)/(\%SiO_2 + \%Al_2O_3) = 0,9-1,2$ dir. Curufun fırından rahatça tahliye edilebilmesi için için gerekli olan en düşük hazne sıcaklığı “Kritik hazne sıcaklığı” olarak adlandırılır ve 1500 –1550 °C arasındadır (Biswas, 1981).

3.2.2.2. Alt Bölgedeki Diğer Reaksiyonlar

- | | |
|--|---|
| 1. Kireçtaşının endotermik kalsinasyonu | $CaCO_3 = CaO + CO_2$ |
| 2. SiO ₂ 'nin direk endotermik indirgenmesi | $SiO_2 + 2C = Si + 2CO$ |
| 3. MnO'nun direk endotermik indirgenmesi | $Mn_2O + C = Mn + CO$ |
| 4. P ₂ O ₅ 'in direk endotermik indirgenmesi | $P_2O_5 + 5C = 2P + 5CO$ |
| 5. Kükürdün endotermik ayrışması | $FeS + CaO + C = CaS + Fe + CO$ |
| 6. Karbonun exotermik yanması | $C + O_2 (hava) = CO_2 + N_2$ |
| $\Delta G^0 = -94\,490 - 0,13T$ kal | |
| 7. CO ₂ 'nin endotermik indirgenmesi | $CO_2 + C = 2CO (>1000\ ^\circ C)$ |
| $\Delta G^0 = 39\,810 - 40,87T$ kal | |
| 8. Sıcak havadaki nemin endotermik indirgenmesi | $C + H_2O = CO + H_2 (>1000\ ^\circ C)$ |

3.2.3. Karbon Alma Sahası

Redüksiyon sahasında cevherin ayrışması ile oluşan demirin bir kısmı bu safhada aşağıdan yukarı yükselen CO gazı ile birleşerek $2CO + 3Fe = Fe_3C + CO_2$ demir karbür (Fe₃C) haline geçer ve birleşme denkleminde de görüldüğü gibi CO gazı ayrışır. Demirin karbon ile birleşmesinden dolayı bu sahaya da karbon alma sahası adı verilir. Karbon alma sahasının ortalama ısı derecesi 1200 °C' dir (Yeniçeri, 1993).

3.2.4. Redüksiyon Sahası

Yukarıdan aşağı ısınarak redüksiyon sahasına giren cevher, reaksiyona geçer. Isı derecesi 500–900 °C olan bu bölgedeki reaksiyonu şu denklemler ile ifade etmek mümkündür:

Redüksiyon sahasında cevherden CO vasıtası ile ayrılan demir, katı haldedir. Yukarıda bahsedildiği gibi, karbon alma sahasından geçip erime sahasına girdikten sonra oradaki yüksek ısı derecesi ile akar hale gelir. Yukarıdaki denklemde ayrılan CO₂ gazları, üst tabakadaki kömürlerin arasından geçerken tekrar C alarak, karbonmonoksit gazı haline geçer.

Fırına verilen kireçtaşı da bu sahanın ısısı ile yanmış kireç (CaO) ve CO₂ karbondioksit gazına ayrışır. Bununla birlikte cevherle beraber bulunan silis (SiO₂), bu sahada ayrılan demirle beraber o da serbest kalıp CaO ile birleşerek aşağı iner.

3.2.5. Orta Bölge Reaksiyonları

Gaz ve katı sıcaklıklarının hemen hemen eşit olduğu (800 – 1000 °C) orta bölgeye izotermal veya termal rezerv bölgesi denir. Çoğu dolaylı (indirek) reaksiyonlar bu bölgede olduğundan bu bölgeye indirek indirgeme bölgesi de denir. İyi çalışan bir fırında bu alan fırın hacminin %50-60'ını kapsar. Bu bölgenin genişliği çok önemlidir. Çünkü FeO mümkün olduğu kadar fazla indirek reaksiyon ile elde edilmelidir. Bu bölgenin başlangıcı, fırın içerisinde yüksek miktarda endotermik reaksiyonların başladığı yerlere, ısı transfer verimliliğine ve fırının farklı kesitlerindeki homojen gaz dağılımına bağlıdır. Bu bölgede gaz kompozisyonu çok az değişmekte ve hammadde ile gaz arasında çok az oksijen değişimi olmaktadır ve CO/CO₂ oranı 2,3'tür. Bu nedenle bu bölgedeki kok sarfiyatı oldukça azdır. Bu bölgede meydana gelen diğer bir önemli reaksiyon su gazı değişim reaksiyonudur;

Bu reaksiyon sonucu CO'dan daha aktif bir indirgeyici gaz olan hidrojen üretilir. Reaksiyona giren rutubet; demir oksitlerin hidrojen ile indirgenmesi sonucu

olaşabileceği gibi, sıcak hava, buhar ve/veya hidrokarbon enjeksiyonu ile birlikte de fırına girer.

3.2.6. Isınma Sahası

Isı derecesi 200–500 °C arasında olan bu sahada, aşağıdan sıcak halde yükselen CO, CO₂ ve havanın azot gazı ile ocağa doldurulan cevher, kömür ve katık malzeme ile birlikte ısınma devresi geçirir (Yeniçeri, 1993).

3.2.7. Üst Bölge Reaksiyonları

Fırın üst bölgesinde, diğer bir deyişle ön ısıtma veya hazırlama bölgesinde orta bölgeden yükselen gazın sıcaklığı süratli bir şekilde 800–1000 °C'den 150–250 °C'ye düşer. Şarj malzemelerinin sıcaklığı ise ortam sıcaklığından 800 °C'ye kadar yükselir. Bu bölgede meydana gelen önemli reaksiyonlar şunlardır;

1. Karbonatların (Kalsiyum hariç) parçalanmaları,
2. Şarj malzemelerinin nem ve hidratının buharlaştırılması,
3. Karbon birikmesi, $2CO = CO_2 + C$
4. Hematit ve magnetitin kısmi ya da bütünüyle oksitlerine indirgenmesi.

Şarj malzemelerinin fırın tepesinden tüyer seviyesine inmesi 6–8 saat sürer. Her üç bölgede şarjların ne kadar süre kaldıkları tam olarak hesaplanamaz. Oluşan gaz ise fırında 10 saniye gibi bir süre kalır (Yeniçeri, 1993).

BÖLÜM 4

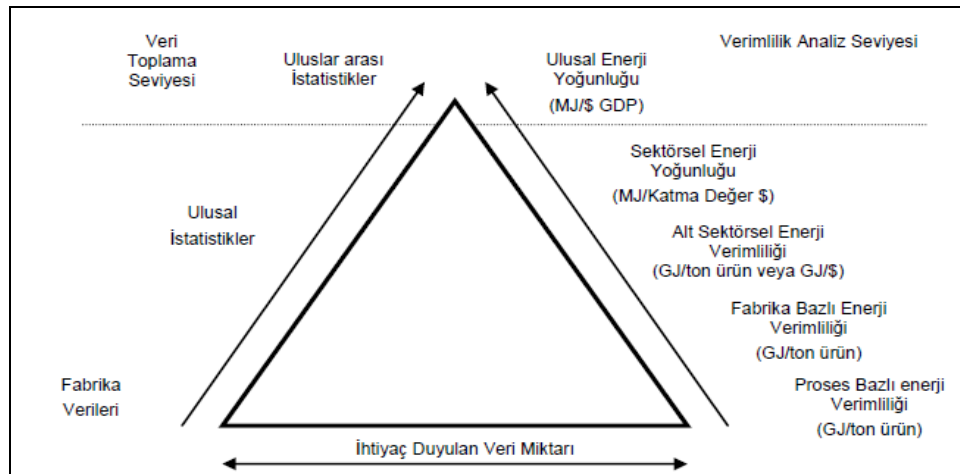
ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE ENERJİ DENGE ANALİZLERİ

4.1. ENERJİ VERİMLİLİĞİ KONUSUNDA TEMEL KAVRAMLAR

Endüstriyel her sektörde bulunan “Enerji Verimliliği” kavramı toplumsal seviyelerde belirlendiği gibi en alt sektörler kadar tanımları yapılabilmektedir. Bu tanımlar;

1. Ulusal Seviye,
2. Ana Sektörler Seviyesi (Üretim Endüstrisi, Konut, Hizmet ve Ulaşım),
3. Sektörler Seviyesi (Yiyecek Sektörü, Temel Metal Sektörü),
4. Alt Sektörler Seviyesi (Süt Ürünleri, Demir Çelik),
5. Alt Sektörler İçerisindeki Firmalar Seviyesi,

Bir üçgen piramit şeklinde gösterilebilecek enerji verimliliğinin toplumsal yayılımı ve analiz seviyeleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Buna göre proses bazında elde edilen veriler önce fabrika, daha sonra alt sektör ve sektör, son olarak da Ulusal enerji yoğunluğu olarak ülkelerin enerji stratejilerini belirlemelerinde rol oynamaktadır.



Şekil 4.1. Enerji verimliliği gösterge piramidi (Beer et al., 2001).

Enerji verimliliğinin değişik analiz seviyelerinde olmak üzere farklı seviyelerde göstergesi bulunmaktadır. Şekil 4.1'deki piramitte verilen, tabana doğru azalan seviyede göstergelerin analiz edilebilme değerleri artmakta ve bu analizi etkileyecek yapısal etkiler (farklı proses ve/veya sektörlerin bir arada bulunması gibi) daha da azalmaktadır. Bu şekilde piramitte alt seviyelere inildikçe enerji tüketimini belirleyen faktörlerin anlaşılması kolaylaşmaktadır. Piramidin tabanına (proses seviyesine) inildikçe, veri toplama işlemi daha detaylı ve zor olmakta, ancak elde edilecek analizin kalitesi ve analizden elde edilecek kazanç büyümektedir. Alt seviyelerde proseslere doğru yapılacak direkt sorgulamalar, amaçlanan spesifik analizlerin verimliliğini artıran önemli faktörlerden biridir.

4.1.1. Fiziksel Enerji Verimliliği Göstergesi (Spesifik Enerji Tüketimi)

Birim enerji tüketimi ve/veya enerji yoğunluğu olarak da bilinen fiziksel enerji verimliliği göstergesi “spesifik enerji tüketimi” olarak adlandırılmaktadır. Bu tanım fiziksel bir dönem içerisinde enerji tüketiminde insan aktivitelerini ölçme oranı olarak da verilebilmektedir. Enerji verimliliğinin (Spesifik Enerji Tüketimi - SET) net olarak açılımı ise aşağıdaki formülde verildiği gibi birim üretim başına yapılan enerji tüketimi olarak açıklanabilmektedir. Sonuç olarak enerji verimliliğinin geliştirilmesinde malzeme ve ürün kayıplarının da minimize edilmesi önemli rol oynamaktadır. SET'ini formüle edecek olursak;

$$\text{Spesifik Enerji Tüketimi} = \frac{\text{Toplam Enerji Tüketimi (Mcal)}}{\text{Toplam Üretim (Ton)}}$$

Bu tanımlamada ele alınan ilk faktör olan “Toplam Enerji Tüketimi” endüstrinin çeşitli dallarında kabul edilen enerji birimleri ile ilişkilendirilebilmektedir.

Tanımlamada yer alan bir diğer faktör “Toplam Üretim” miktarı sektörün ve elde edilen ürünün yapısına göre birimleri ifade edilir.

Fiziksel enerji verimliliğinin önemli bir avantajı, enerji verimliliği teknolojilerinden elde edilen kazançlar ve enerji tasarrufu ölçümlerinin etkinliğini doğrudan doğruya

spesifik enerji tüketiminin azaltılması biçiminde açıklayabilmektedir. Aynı zamanda bu gösterge, proseslerdeki aktivite seviyelerinin hangi boyutta birbirlerini etkilediğini ve bu aktivitelerden herhangi birinin birim maliyetleri ne ölçüde artırdığını da doğrudan ve kolayca vermektedir.

4.1.1.1. Entegre Demir Çelik Sektöründe Kullanılan Enerji Kaynakları

“Entegre Demir Çelik Sektörü”, cevhere dayalı üretim yapan ve 2012 yılı verilerine göre dünyadaki toplam çelik üretiminin %63’ünü oluşturan bir endüstri koludur (IISI, 2005). Entegre demir çelik üretiminin bir diğer alternatifi “Ark Ocaklı” tesislerde elektrik enerjisi kullanarak hurdayı çeliğe çevirme yöntemidir. Enerji tüketimi yönünden incelendiğinde cevher bazlı üretim yapan entegre demir çelik tesislerinin, hurda bazlı üretim yapan ark ocaklı tesislere oranla daha fazla miktar ve çeşitte enerji kullandığı görülmektedir. Buradan hareketle, yapılan çalışmadan elde edilecek sonuçların ve yapılacak önerilerin, Türkiye’nin enerji tüketiminden daha fazla pay alan diğer entegre tesisler için model olması amaçlanmıştır. Bu düşünce ile, entegreye göre çok daha düşük spesifik enerji tüketimiyle üretim yapan ark ocaklı tesisler bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

Ark ocaklı tesislerde ana enerji üretim kalemlerini elektrik ve oksijen oluştururken, entegre tesislerde kullanılan enerji kalemleri ve birincil enerji kullanılarak üretilen yardımcı enerji kaynakları şöyle sıralanabilir: Kömür, Kok, Elektrik, Fuel Oil, Doğal Gaz (DG), Yüksek Fırın Gazı (YFG), Kok Gazı (KG), Çelikhane Gazı (ÇG), Katran,

4.1.1.2. Entegre Demir Çelik Tesislerinde Proseslerin Verimlilik Tanımları

Entegre bir demir çelik tesisinde fabrika genelinde yapılan işleri gösteren bir akış şeması Şekil 4.2’de sunulmuştur. Buradan görüleceği üzere entegre tesiste önce cevherden demir üretilmekte, döküm tesislerinden sonra haddeleme prosesleri ile kullanıma sunulabilir üretim yapılmaktadır. Tüm bu kapsamlı üretim prosesleri tesislerin entegrelik özelliklerinden dolayı mamul üretimi, enerji ve malzeme tüketimleri açısından birbirlerine doğrudan doğruya bağlıdır. Bu bağlılık sonucu aynı entegre tesis içinde bulunan tüm hatların yaptıkları işler sonucu oluşan enerji

parametrelerinin aynı tesisin başlangıç yada bir başka tesisin tetikleyici parametresi olduğu çoğu zaman gözlenmektedir. Bu da tesislerin verimlilik analizlerinin yapılması aşamasında hat bazlı değerlendirmelerin yanında tesis geneli bütünsel değerlendirmenin de bir ihtiyaç olduğunun önemli bir kanıtıdır.

Yukarıda genel verimlilik tanımlamasında açıklandığı gibi enerji verimliliği, bir ton üretim başına yapılan enerji tüketimi olarak ifade edilmektedir. Bu ifade sayısal olarak ise, enerji tüketimi için Mcal/ton; enerji maliyeti yönünden ise TL (USD)/ton olarak gösterilmektedir. Entegre tesislerde ton üretim miktarı olarak, tesislerin yarı mamul çıktısı olan ham çelik, sıcak bobin veya nihai mamul ürünü olan soğuk bobin üretimi alınmaktadır.

Temel anlamda, entegre bir tesisin tümünün enerji verimliliği, içerisinde onu oluşturan tüm tesislerin kısmi enerji verimliliklerinin toplamıdır. Tesislerin kısmi bazda enerji verimliliklerinden söz edilirken ise temel alınan ölçüt, sadece o tesisin kendi üretimi için yaptığı enerji kullanımınıdır. Aşağıda temel bir tesis bazında yapılabilecek enerji verimliliği hesabı örneği verilmiştir.

Üretim (A)

Tüketilen Enerji (B)

Kazanılan Enerji (C)

Net Enerji (D)

Spesifik Enerji (E)

a : Tüketilen enerjinin kalorifik değeri (kcal/kg, m³, kWh),

b : Kazanılan enerjinin kalorifik değeri (kcal/kg, m³, kWh) alındığında,

Hesaplama için kullanılacak eşitlikler:

Tüketilen Net Enerji Miktarı : $D = Bxa - Cxb$

$$\text{Spesifik Enerji Tüketimi} \quad E = \frac{(Bxa - Cxb)}{A} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}, m, m^2} \right)$$

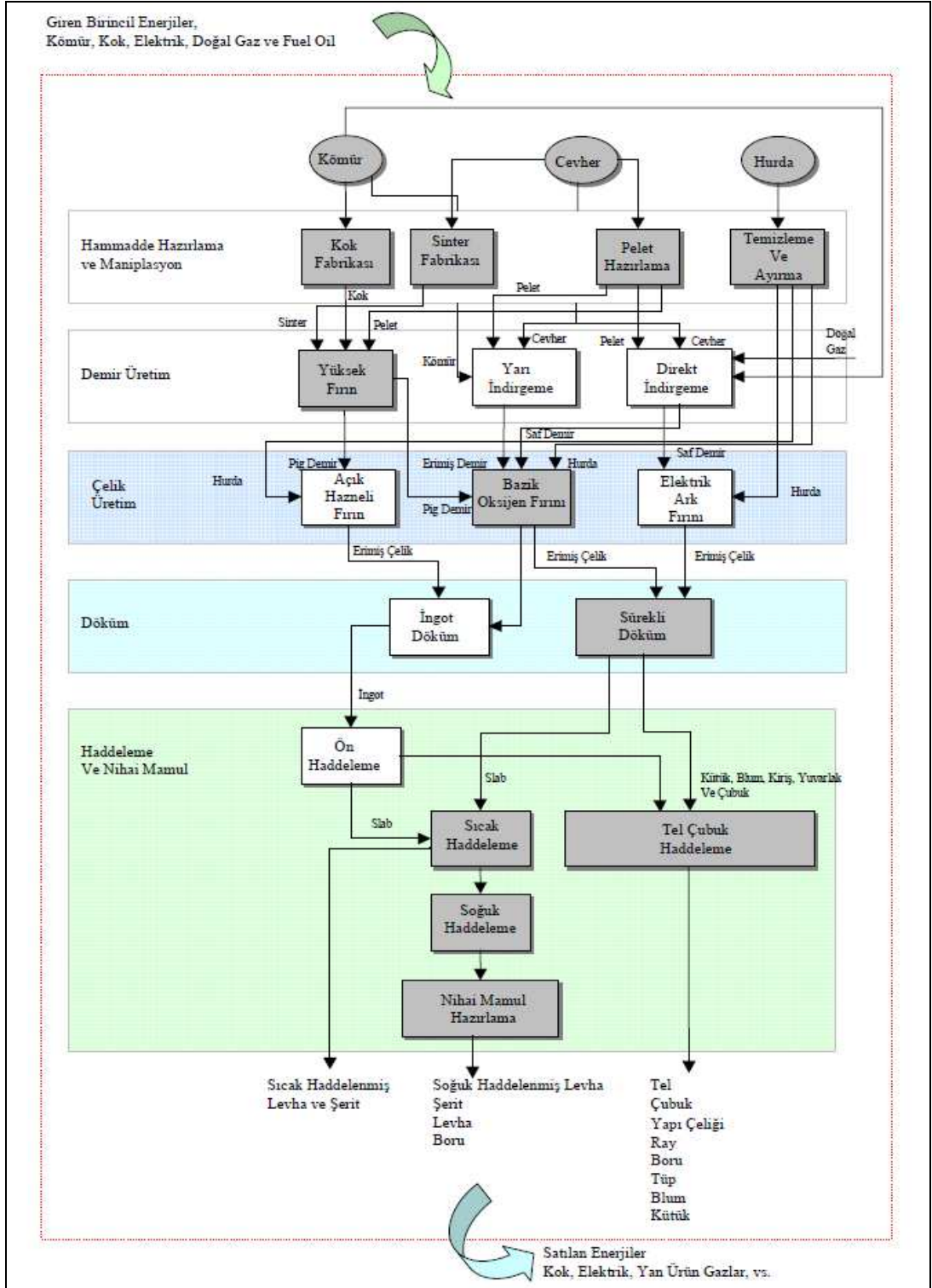
Spesifik Enerji Kalemi Tüketim $E = \frac{D}{A} \left(\frac{Nm^3, Sm^3, kg, kWh}{ton, kg, m, m^2} \right)$ olacaktır.

Entegre bir demir çelik tesisinde enerji verimlilik göstergesi olan spesifik enerji tüketiminin hesaplanmasında, üç değişik proses tanımlamak mümkündür. Aşağıda ayrıntıları verilen bu üç ayrı proses, kendi yapıları gereği, temel olarak aynı ölçütleri kullanmaktadır.

Şekil 4.2.'de entegre bir demir çelik tesisi için farklı proseslerden oluşan genel bir akış şeması verilmiştir. Entegre çelik üretim süreci hammadde hazırlama ve maniplasyon, demir üretim, çelik üretim, döküm ve haddeleme ana proseslerinden oluşmaktadır. Entegre tesislerin günümüzde en çok kullanılan iki süreci yüksek fırın teknolojisi ile demir cevherinden sıcak maden, akabinde bazik oksijen fırınları ile çelik üretme ve ark ocaklı tesislerde hurdadan çelik üretmektir.

Demir üretim sürecindeki yarı indirgeme ve direkt indirgeme teknolojileri yeni geliştirilen teknolojiler olmakla beraber, çelik endüstrisinde pratik uygulama sayılarının artması için 2020'li yıllar ön görülmektedir.

Çelik üretim aşamasında ise, açık hazneli fırınlar sektörü bazik oksijen fırınların getirdiği üretim verimliliğindeki artışlar paralelinde terk edilen bir teknoloji konumuna gelmiştir. Çelik üretim aşamasının önümüzdeki dönemde ark ocaklı tesislerin, gerek çevresel faktörler (daha fazla enerji tüketimi nedeniyle sera gazı emisyonlarının yüksekliği) ve gerekse kaliteli demir cevherinin yeryüzünde keşfedilmiş rezervler ile sınırlı olması sonucu bazik oksijen fırınlı tesislere göre daha fazla tercih edilen bir proses olacağını göstermektedir.



Şekil 4.2. Entegre bir demir çelik tesisinde proses akışı.

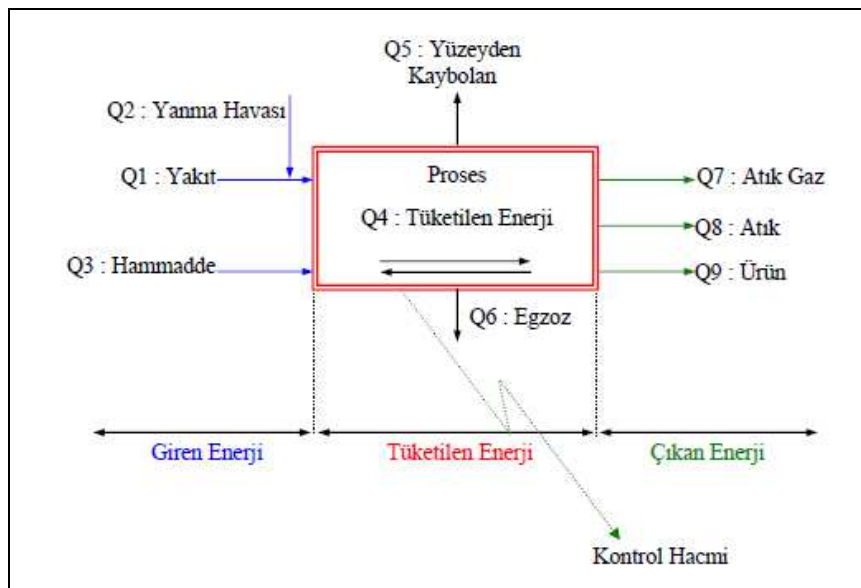
4.1.2. Enerji Denge Analizleri ve Spesifik Enerji Tüketiminin Kontrol Edilmesinde Önemi

4.1.2.1. Enerji Denkliğinin Tanımı

Yukarıdaki bölümlerde tanımlanan spesifik enerji tüketim değerinin kontrol edilmesinde ve iyileştirilmesinde enerji denge analizi temel araç olarak kullanılmaktadır. Böylece tesislere giren ve çıkan enerjilerden yararlanılabilecek yönler belirlenebilmektedir.

Enerji denkliği analizi, en basit anlamda giren ve çıkan enerji kaynaklarının belirlenip birbirine eşitlenmesidir. Şekil 4.3’da enerji denkliği analizinin temel fonksiyonu verilmiştir;

Şekil 4.3’ de belirtildiği gibi denge koşullarında giren enerjinin tamamı kaynağı belli olmak üzere proses dışına çıkmıştır. Burada proses dışına çıkan enerjilerin belirlenmesinden sonra, bu enerjilerin ne kadarının kullanılabilir enerjiye dönüşebileceği saptanabilmektedir. Yapılan saptama ile prosesi terk eden enerjileri belirlemesinin yanı sıra bu enerjilerin içerisinde kayıp olarak ortama çıkanların kazanılması ve tesisin enerji verimliliğinin artırılması mümkündür.



Şekil 4.3. Enerji denkliği analizi (YEGM, 1997).

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 \quad (\text{Denge Koşullarında})$$

4.1.2.2. Enerji Değişimi

Enerji denkliği, enerjilerin bir sistem içerisinde birbirlerine dönüşümleri ile ilgilenmekten çok, enerji girdisini belirleyen, bir sistemden çıkan miktarların bağlı dağılımlarını gösterir. Bununla birlikte, bir sistem içerisinde enerjinin ne kadar verimli kullanıldığına görülebilmesi için, sistem içindeki enerji dönüşümlerine de bakılması önem kazanmaktadır (YEGM, 1997).

4.1.2.3. Kontrol Hacmi

İçinden enerji akışlarının oluştuğu sınırlar tarafından çevrelenmiş bir sistem “Kontrol Hacmi” olarak tanımlanmaktadır. Enerji denkliği, yukarıda da belirtildiği gibi, bu ölçülmesi veya hesaplanması gereken sınırlardan oluşan enerji akış miktarlarıyla ilgilidir. Bunlar, sistemi çalıştıran yönetimce olabildiğince kontrol altında tutulması ve miktarları bilinmesi gereken enerji akışlarıdır (YEGM, 1997).

Enerji denkleğinin gerçeğı yansıtmaması ve bir anlam taşıyabilmesi için, kontrol hacmi içerisinde bulunan sistemin, sabit denge koşullarında çalıştırılıyor olması gerekir. Ancak sabit denge koşullarında, kontrol hacmine giren toplam enerji miktarı, bu hacimden çıkan toplam enerji miktarına eşit olacaktır (YEGM, 1997).

Eğer denge koşulları sağlanmazsa, giren enerji, çıkan enerjiye eşit olmayacağından enerji denkleğinde bir hata oluşması kaçınılmazdır. Enerji denkleğindeki önemli hataların ortak nedeni, yukarıda da belirtildiği gibi, sistemin sabit denge koşullarından sapması durumudur (YEGM, 1997).

4.1.2.4. Referans Sıcaklık

Enerji denkleğinin yapılabilmesi için, duyulabilir ısıların dayandırıldığı bir temel sıcaklığın belirlenmesi gereklidir. 0°C sıcaklık, bir temel değer olarak kabul edilmekle birlikte, genel bir eğilim olarak, kolaylık sağlanması amacıyla, bulunulan

ortam ve ölçümlerin yapıldığı zamana bağlı olarak, ortam sıcaklığı seçilmelidir. (YEGM, 1997).

4.1.2.5. Spesifik Enerji Tüketiminin Kontrol Edilmesindeki Önemi

Enerji Denkliği'nin amacı, normal sabit çalışma koşullarında (denge şartlarında) bir sisteme verilen enerji (sistemde tüketilen enerji) miktarı ile sistemden çıkan enerji miktarı arasında denkliğin denetlenmesidir. Bu analizin kullanılması aşağıdaki konuların gerçekleştirilmesine olanak vermektedir. Bunlar;

1. Gerçekten kullanılan veya tüketilen enerji miktarının hesaplanması,
2. Tesis verimliliğinin, performansının düzenli olarak izlenmesi,
3. Malzeme, tesis ve proses konularında yapılabilecek değişikliklerin, enerji tüketimine etkilerinin değerlendirilmesi,
4. Enerji tüketimini azaltmak amacıyla yapılabilecek iyileştirme çalışmaları planında öncelik verilmesi gereken yerlerin tespit edilmesi,
5. Tesislerin modifikasyonlarında veri sağlanması,
6. Mümkün olan en düşük enerji tüketimi ile maksimum üretimin sağlanması gibi prosesin temel amacının gerçekleştirilmesidir (YEGM, 1997).

Spesifik enerji tüketiminin azaltılması ise ancak, denklik analizi yapılmış bir proseste belirlenen kaçak enerji noktalarında yapılacak iyileştirme çalışmasıyla mümkün olabilecektir.

4.2. ENTEGRE DEMİR ÇELİK TESİSLERİ ENERJİ ERİMLİLİĞİ İZLEME MODELİ

Entegre tesisler, çelik üretimini, genellikle demir cevherinden yapan ve cevherin çeliğe dönüştüğü süreçte birçok farklı üretim ünitesinin eşgüdüm içerisinde çalışmasıyla sonuç elde eden fabrikalardır. Fabrikanın özelliklerine bağlı olarak doğrudan üretim proseslerinin yanı sıra, elektrik, buhar, oksijen, su, kireç, vs. üretimleri yapan birçok yardımcı tesis de bu entegre üretim döngüsü içerisinde yer alabilmektedir.

Yukarıdaki bölümlerde verilen enerji verimliliği ve enerji verimliliğini arttırmak için kullanılacak enerji verimliliği denge analizlerinden önce, enerji dengelerinin tek bir yöntemle toplanarak gösterilmesi önemlidir. Çünkü tüm üretim ve üretime yardımcı ünitelerin, tesisin toplam enerji tüketimi içerisinde aldığı payların bilinmesi ve bu ünitelerin tükettiği enerji toplamının benzer şirketlerle karşılaştırma yapılabilmesi için tek bir değer üzerinden ifade edilebilmesi ancak böyle bir yaklaşımla sağlanmaktadır.

Oluşturulmak istenen modelde, entegre tesislerin üretim sürecine uygun olarak cevherin fabrikaya girişinden, sırasıyla, demir üretim, çelik üretim, haddeleme ve nihai mamul üretim ile yardımcı tesislerin tek bir tabloda yer almaları sağlanmaktadır. Böylece yapılan genel enerji tüketimi her bir tesisin, şirketin yarı mamul üretimindeki payına oranlanabilmektedir.

Çizelge 4.1’de üretim hatlarının üretimlerinin ve enerji tüketimlerinin günlük, haftalık, aylık ve yıllık verilerle gösterilebileceği biçim model tablo şeklinde verilmektedir. Bu tabloda alınan enerji tüketim verileri ile üretim verileri her bir ünitenin karşısına işlenmekte, ünitelerin entegre tesis dizilimleri içerisindeki enerji haritası oluşturulmaktadır. Aynı zamanda tüketilen her bir enerji kaleminin tek bir enerji birimi cinsinden ifade edilebilmesi için kalorifik değerler tabloda gösterilerek kullanılmaktadır. Çizelge 4.2’de ise her bir üniteye her bir enerji kaleminin üretime oranı esas alınarak, birim üretim başına yapılan bu tüketimler ilgili enerjinin kalorifik değerleri ile çarpılmakta ve homojen bir enerji değeri elde edilmektedir. Bölüm 4.1.1.2’de verilen ünite enerji tüketim yapısına göre, enerji kazanımı olan prosesler için de aynı işlem yapılarak net enerji tüketimi bulunmaktadır.

Son olarak, ünitelerin toplam enerji tüketimleri kendi üretimleri yerine şirketin genelini temsil eden yarı mamule (ton ham çelik) oranlandıklarında, toplam enerji tüketiminden aldıkları pay spesifik olarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.1. Ünitelerin üretimleri ile enerji kalemi bazında enerji üretim ve tüketimleri ve tesis geneli toplam enerji tüketimleri.

YIL/AY TOPLAM TABLOSU		ENERJİ TÜKETİMİ (I)							ENERJİ TÜKETİMİ (II)								
		Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Toplam I	Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Toplam II	G.Toplam I-II	Spesifik Tüketimler
Kaloriler (kcal/kg,kcal/Nm3,kcal/kWh)		KG	Nm ³	Sm ³	kWh	Nm ³	m ³	*10 ⁶ Mcal	KG	Nm ³	Sm ³	kWh	Nm ³	m ³	*10 ⁶ Mcal	*10 ⁶ Mcal	Mcal/THÇ
THÇ: Ton Ham Çelik; TÜ: Ton Ürün		*1000	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000		*1000	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000			
Üniteler	Üretim (Ton)																
DÜB	Ünite 1																
	Ünite 2																
	Ünite 3																
ÇÜB	Ünite 4																
	Ünite 5																
	Ünite 6																
Ham Çelik Üretim Top.																	
SİC	Ünite 7																
	Ünite 8																
	Ünite 9																
SOG	Ünite 10																
	Ünite 11																
	Ünite 12																
YRI	Ünite 13																
	Ünite 14																
	Ünite 15																
Diğer Hatlar	THÇ																
Kayıp+Ölç. Farkı	THÇ																
TOPLAM I	THÇ	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0				
Stok ve Satılan	THÇ																
TOPLAM II	THÇ	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0				

Çizelge 4.2. Fabrika içerisinde yer alan tesislerin spesifik enerji tüketimlerini ve toplam içindeki payları izleme tablosu.

YIL/AY TOPLAM TABLOSU			ENERJİ TÜKETİMİ (I)							ENERJİ TÜKETİMİ (II)							G.Toplam I-II	Spesifik Tüketimler
			Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Toplam I	Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Enerji	Enerji		
Kaloriler (kcal/kg,kcal/Nm3,kcal/kWh)		Birim	KG	Nm ³	Sm ³	kWh	Nm ³	m ³	*10 ⁶ Mcal	KG	Nm ³	Sm ³	kWh	Nm ³	m ³	*10 ⁶ Mcal	*10 ⁶ Mcal	Mcal/THÇ
THÇ: Ton Ham Çelik; TÜ: Ton Ürün			Üniteler	Üretim (Ton)	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000	*1000
DÜB	Ünite 1	Birim Tük.																
		Mcal/TÜ																
		Mcal/THÇ																
DÜB	Ünite 2	Birim Tük.																
		Mcal/TÜ																
		Mcal/THÇ																
ÇÜB	Ünite3	Birim Tük.																
		Mcal/TÜ																
		Mcal/THÇ																
ÇÜB	Ünite 4	Birim Tük.																
		Mcal/TÜ																
		Mcal/THÇ																
Ham Çelik Üretim Top.																		
SİC	Ünite 5	Birim Tük.																
		Mcal/TÜ																
		Mcal/THÇ																
SİC	Ünite 6	Birim Tük.																
		Mcal/TÜ																
		Mcal/THÇ																
YRI	Ünite 7	Birim Tük.																
		Mcal/TÜ																
		Mcal/THÇ																
Diğer Hatlar		Birim Tük.																
Kayıp+Ölç. Farkı		Mcal/TÜ																
		Mcal/THÇ																
TOPLAM I		THÇ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stok ve Satılan		THÇ																
TOPLAM II		THÇ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Enerji tüketimlerinin tek bir Birim cinsinden ve üretilen Birim ürün başına değeri

Enerji kazanımlarının tek bir Birim cinsinden ve Üretilen birim ürün başına değeri

Ünitenin Genel Tüketim İçerisinde Aldığı Pay

Net Enerji Tüketimi

Enerji tüketimlerinin tek bir Birim cinsinden ve üretilen Birim başına değeri

4.3. ÖZGÜL ISILARIN HESAPLANMASI

Enerji denge analizlerinde girdi ve çıktıkların taşıdıkları ısıların hesaplanmasında, giren ve çıkan kalemlere ait özgül ısılar çeşitli kaynaklardan yararlanılarak bulunmuştur. Gordon et al. özellikle gazlara ait değişik sıcaklıklardaki özgül ısıları hesaplamış tablolar halinde yayınlamıştır (Gordan and Richard, 1985). Çizelge 4.3’de verilen referans gazlara bağlı olarak, baca gazı ve yanma havası gibi farklı gaz kompozisyonlarına ait gazların özgül ısıları hesaplanmıştır. Hesaplarda Perry’nin hesaplamış olduğu diğer kalemlerin özgül ısı değerleri kullanılmıştır (Perry, 1963).

Çizelge 4.3. Gazların değişik sıcaklıklardaki özgül ısıları (Gordan and Richard, 1985).

Gaz		Aralık (Kelvin)	Maks. Hata %
N ₂	$\hat{C}_{po} = 39,060 - 512,79\theta^{-1,5} + 1072,7\theta^{-2} - 820,40\theta^{-3}$	300–3.500	0,43
O ₂	$\hat{C}_{po} = 37,432 - 0,020 102\theta^{-1,5} + 178,57\theta^{1,5} - 236,88\theta^{-2}$	300–3.500	0,30
H ₂	$\hat{C}_{po} = 56,505 - 702,74\theta^{0,75} + 1165,0\theta^{-1} - 560,70\theta^{-1,5}$	300–3.500	0,60
CO	$\hat{C}_{po} = 69,145 - 0,704 63\theta^{-0,75} + 200,77\theta^{-0,5} - 176,76\theta^{-0,75}$	300–3.500	0,42
OH	$\hat{C}_{po} = 81,546 - 59,350\theta^{-0,25} + 17,329\theta^{-0,75} - 4,266\theta$	300–3.500	0,43
NO	$\hat{C}_{po} = 59,283 - 1,7096\theta^{0,5} + 70,613\theta^{-0,5} - 74,889\theta^{-1,5}$	300–3.500	0,34
H ₂ O	$\hat{C}_{po} = 143,05 - 183,54\theta^{0,25} + 82,751\theta^{-0,5} - 3,6989\theta$	300–3.500	0,43
CO ₂	$\hat{C}_{po} = -3,7357 - 30,529\theta^{0,5} + 4,1034\theta - 0,024 198\theta^2$	300–3.500	0,19
NO ₂	$\hat{C}_{po} = 46,045 - 216,10\theta^{0,5} + 363,66\theta^{-0,75} - 232,55\theta^{-2}$	300–3.500	0,26
CH ₄	$\hat{C}_{po} = -672,87 - 439,74\theta^{0,25} + 24,875\theta^{0,75} - 323,88\theta^{-0,5}$	300–2.000	0,15
C ₂ H ₄	$\hat{C}_{po} = -95,395 - 123,15\theta^{0,5} + 35,641\theta^{0,75} - 182,77\theta^{-3}$	300–2.000	0,07
C ₂ H ₆	$\hat{C}_{po} = 6,895 - 17,26\theta - 0,6402\theta^2 + 0,007 28\theta^{-3}$	300–1.500	0,83
C ₃ H ₆	$\hat{C}_{po} = -4,042 + 30,46\theta - 1,571\theta^2 + 0,031 71\theta^{-3}$	300–1.500	0,40
C ₄ H ₁₀	$\hat{C}_{po} = 3,954 + 37,12\theta - 1,833\theta^2 + 0,034 98\theta^{-3}$	300–1.500	0,54

BÖLÜM 5

MATERYAL VE METOT

5.1. YÜKSEK FIRINLAR İÇİN ENERJİ DENGESİ

Yüksek fırınlar denge analizinde giren-çıkan dengesinin oluşturulması birbiriyle paralellik gösteren farklı teorilerle açıklanabilmektedir. Bu teorilerden en geçerli olanı, proses sınırlarının belirlendiği bir kontrol hacmine giren ve çıkan enerji denliğinin oluşturulması felsefesine dayanmaktadır. Kardemir yüksek fırınlarına uygulanan model seçiminde Binran'ın yapmış modellemelerden yararlanılmıştır (Binran, 1980). Çizelge 5.1 verilen ve yüksek fırın için de seçilerek uygulanan model aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5.1. Yüksek fırınlar için enerji dengesi hesap modeli (Binran, 1980).

Maddeler		Heaplama		
Giren Enerji	1) Kokun yanmasıyla	Kok	Kalorifik Değer	(kcal/kg)
	2) Yanma havasının duyulur ısısı	Yanma Havası	Özgül Isısı	(kcal/Nm ³ K)
	3) Yanma havası içindeki nemin duyulur ısısı	Yanma Havasındaki H ₂ O	Özgül Isısı	(kcal/kgK)
	4) Curuf üretim ısısı	Curuf	140	(kcal/kg-curuf)
Çıkan Enerji	5) Fe deoksidasyonu	Fe ₂ O ₂	1.777	(kcal/kg-Fe)
		Fe ₃ O ₄	1.585	(kcal/kg-Fe)
		FeO	1.151	(kcal/kg-Fe)
	6) Si deoksidasyonu	Si	6.750	(kcal/kg-Si)
	7) Mn deoksidasyonu	Mn	1.652	(kcal/kg-Mn)
	8) P deoksidasyonu	P	5.966	(kcal/kg-P)
	9) SM duyulur ısısı	Sıvı Maden	Entalpi	(kcal/kgSM)
	10) Curufun duyulur ısısı	Curuf	Entalpi	(kcal/kg-curuf)
	11) Baca gazının duyulur ısısı	YFG	Özgül Isı	(kcal/Nm ³)
	12) Yanma havasındaki nemin atılması	Yanma havasındaki H ₂ O	3.183	(kcal/kg- H ₂ O)
	13) Baca gazı ve Baca tozunun gizli ısısı	YFG	Kalorifik Değer	Nm ³ /TSM
		Baca Tozu	8.100	(kcal/kg-C)
	14) SM içindeki C	Sıcak Maden (SM)	8.100	(kcal/kg-C)
	Toplam			

18 maddede giren ve çıkan tüm enerjileri gösteren modelde demirin indirgenme reaksiyonları sırasında oluşan ısı giderleri, diğer kayıplar hesaplandıktan sonra geriye kalan toplam ısıdan hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalarda alınan aylık ortalamalar, aritmetik ortalama olarak seçilmiş, ay bazlı yapılan bu analizde sorunlu çalışılan günlere ait parametrelerin tüm ayın değerlerini etkilemesi bu şekilde önlenmeye çalışılmıştır. Yapılan analiz, aylık ortalama değerlerden oluşturulan model ışığında konu yüksek fırınların çalışma sistematüğini aydınlatan bir çalışma olarak kabul edilmiştir.

Ekim 2012 ayına ait veriler veri toplanılan zaman periyodu içerisinde en stabil çalıştığı zamanlar olarak belirlenmiş ve hesaplamalarda baz alınmıştır. Diğer yandan aynı kaynaktan alınan hesaplamalarda kullanılan spesifik değerler için baz alınan değerler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Yüksek Fırınlar için curuf, sıvı maden, hava, O₂,CO, CO₂, N₂, H₂, CH₄, H₂O özgül ısıları (Binran, 1980).

Sıcaklık (°C)	Entalpi kcal/kg	Özgül Isılar										
		kcal/kg°C				kcal/Nm ³ °C						
		Curuf	Sıcak Maden		Hava	O ₂	CO	CO ₂	N ₂	H ₂	CH ₄	H ₂ O
		3.5%C	4.5%C									
0	0		0,234	0,235	0,310	0,312	0,311	0,387	0,311	0,306	0,366	0,341
100	19	0,185	0,232	0,233	0,311	0,315	0,312	0,412	0,311	0,307	0,403	0,344
200	40	0,198	0,230	0,231	0,312	0,320	0,313	0,432	0,312	0,309	0,425	0,348
300	60	0,210	0,228	0,229	0,315	0,325	0,315	0,450	0,313	0,309	0,454	0,352
400	81	0,219	0,226	0,227	0,318	0,330	0,318	0,466	0,316	0,310	0,483	0,357
500	105	0,226	0,224	0,225	0,321	0,334	0,321	0,480	0,319	0,311	0,511	0,363
600	129	0,231	0,222	0,223	0,324	0,339	0,325	0,493	0,321	0,312	0,541	0,369
700	152	0,235	0,220	0,221	0,328	0,343	0,329	0,504	0,325	0,313	0,567	0,375
800	177	0,238	0,218	0,219	0,331	0,347	0,332	0,515	0,329	0,314	0,593	0,381
900	202	0,242	0,216	0,217	0,334	0,351	0,335	0,523	0,331	0,316	0,618	0,387
1.000	228	0,245	0,214	0,215	0,338	0,354	0,338	0,532	0,334	0,317	0,641	0,393
1.100	256	0,249	0,212	0,213	0,340	0,356	0,341	0,540	0,338	0,319	0,664	0,400
1.200	293	0,255	0,210	0,211	0,343	0,359	0,344	0,547	0,340	0,321	0,684	0,406
1.300	336	0,260	0,208	0,209	0,345	0,362	0,346	0,553	0,342	0,323		0,411
1.400	400	0,288	0,206	0,207	0,348	0,364	0,348	0,559	0,345	0,325		0,418
1.500		0,279	0,204	0,205	0,350	0,366	0,351	0,565	0,347	0,326		0,482
1.600		0,271	0,202	0,203	0,353	0,368	0,353	0,570	0,350	0,328		0,488
1.700		0,262			0,354	0,370	0,355	0,570	0,351	0,330		0,493
1.800					0,356	0,372	0,357	0,579	0,353	0,332		0,498
1.900					0,358	0,374	0,358	0,583	0,354	0,334		0,502
2.000					0,359	0,376	0,360	0,587	0,356	0,336		0,506

5.2. KARDEMİR 4 NO'LU YÜKSEK FIRINDA ENERJİ DENGESİ HESABI

Yüksek fırınlarda 1 ton sıcak maden üretmek için harcanan enerji miktarı, yüksek fırınların enerji verimliliği olarak adlandırılmaktadır. Sıcak maden üretim prosesi içinde en çok enerjinin tüketildiği yer yüksek fırınlardır. Kardemir'de yer alan, enerji açısından tüketim büyüklüğü ve teknolojiyle önemli tesis olan Yüksek Fırın 4'in teknik özellikleri aşağıda verilmektedir.

Devreye Giriş Tarihi :2008,

Üretim Kapasitesi : 1.500 TSM/gün,

Hazne Çapı : 5,4 m,

Çalışma Hacmi : 450 m³,

Hava Miktarı (maks.) : 1.100 Nm³/dak,

Hava Sıcaklığı : 1.150 °C.

Yüksek Fırın 4'e yapılacak denge analizleri için Ekim 2012 ayındaki işletme verileri toplanarak kaydedilmiş, günlük değişimlerin denge üzerindeki etkisini en aza indirebilmek için aylık ortalamalar alınmıştır. Toplanan işletme verilerinden analizde kullanılan aylık ortalama değerler Çizelge 5.3'de verilmiştir. Fırınlarda kullanılan enerjiler ise aylık toplam kullanım miktarlarının üretilen sıcak madene oranlanmasıyla bulunmuştur.

Yüksek Fırın Gazının bileşiminde yer alan gazların spesifik ısıları Çizelge 5.4. de verilmiştir (Gordan and Richard, 1985). Bu değerler yüksek fırın gazının kimyasal bileşimiyle ilişkilendirilerek spesifik ısılar hesaplanmıştır

Çizelge 5.3. 4 No'lu Yüksek fırın işletme verileri.

GÜNLER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Sıcak Maden Üretimi (ton)	1230	1.332	1.296	1.152	1.260	1.307	1.337	437	1.237	1.310	1.228	1.312	1.064	1.042	1.180	969
Hava Miktarı (Nm ³ /dak)	962	994	991	870	967	1.003	1.001	855	963	972	918	976	808	819	892	861
Hava Sıcaklığı (°C)	1.048	1.050	1.038	1.059	1.072	1.077	1.134	1.066	1.070	1.076	1.070	1.078	1.074	1.079	1.090	1.079
Baca Gazı Sıcaklığı (°C)	201	195	202	194	202	213	198	226	190	163	162	168	169	189	181	177
Hava Rutubeti (gr/Nm ³)	18,70	17,01	21,53	21,07	29,67	27,75	25,58	29,50	32,95	22,37	22,16	20,63	19,03	23,43	18,46	17,89
Analizler %																
Maden Sıcaklığı (°C)	1.451	1.448	1.446	1.438	1.418	1.443	1.433	1.431	1.456	1.458	1.455	1.448	1.441	1.454	1.425	1.435
Curuf Hacmi (kg/TSM)	338	330	334	330	310	323	337	319	319	321	340	338	333	319	331	348
C (%)	4,05	3,96	3,93	3,82	3,93	3,96	3,94	4,07	4,11	3,95	4,03	3,85	4,02	4,05	3,91	3,94
Si (%)	0,49	0,42	0,42	0,44	0,37	0,42	0,46	0,66	0,68	0,47	0,46	0,37	0,39	0,47	0,37	0,46
Mn(%)	0,95	0,88	0,88	0,87	0,70	0,80	0,70	0,80	0,77	0,70	0,72	0,72	0,71	0,77	0,64	0,73
P(%)	0,072	0,066	0,069	0,066	0,061	0,066	0,090	0,100	0,091	0,088	0,086	0,091	0,091	0,092	0,090	0,093
GÜNLER	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	ORT
Sıcak Maden Üretimi (ton)	1.261	1.329	1.354	1.375	1.321	1.183	1.236	987	1.224	1.280	1.258	1.201	1.202	1.249	1.092	1.201
Hava Miktarı Nm ³ /dak	969	965	1.026	1.029	1.007	898	961	914	975	988	931	895	905	952	819	938
Hava Sıcaklığı (°C)	1.074	1.072	1.081	1.067	1.070	1.091	1.086	1.069	1.080	1.029	1.076	1.043	1.062	1.046	1.049	1.070
Baca Gazı Sıcaklığı (°C)	187	162	183	166	176	176	174	125	152	161	115	148	131	132	101	172
Hava Rutubeti (gr/Nm ³)	18,33	17,65	18,46	19,00	19,34	18,15	19,27	19,55	21,59	21,34	23,85	22,07	25,89	25,93	27,57	22,12
Analizler %																
Maden Sıcaklığı (°C)	1.462	1.452	1.473	1.461	1.454	1.427	1.453	1.436	1.454	1.469	1.429	1.463	1.449	1.449	1.408	1.446
Curuf Hacmi (kg/TSM)	338	348	366	328	316	318	326	316	320	311	313	296	316	329	332	227
C (%)	3,92	3,84	4,07	3,95	3,97	3,87	3,99	4,18	3,97	4,03	3,97	4,04	4,07	4,11	3,80	3,98
Si (%)	0,53	0,42	0,62	0,51	0,45	0,45	0,52	0,41	0,53	0,55	0,31	0,62	0,46	0,44	0,23	0,46
Mn(%)	0,77	0,69	0,89	0,81	0,78	0,69	0,78	0,78	0,70	0,84	0,69	0,88	0,83	0,80	0,61	0,77
P(%)	0,093	0,092	0,093	0,091	0,096	0,093	0,092	0,082	0,068	0,071	0,067	0,066	0,069	0,069	0,065	0,081

Çizelge 5.4. Yüksek Fırın Gazının 25 °C ve 172 °C deki özgül ısıları.

YÜKSEK FIRIN GAZININ ÖZGÜL ISISI								
			Cp (kJ / kgK)	Cp (kJ / kgK)	Cp (kcal / kmolK)	% Vol	kg/kmol	kcal/kmolK
GAZ BİLEŞENLERİ	N ₂	28	1,0413	0,2487	6,9626	0,4980	13,9440	3,4674
	CO	28	1,0417	0,2487	6,965	0,2380	6,6640	1,6577
	CO ₂	44	0,8396	0,2005	8,8222	0,2180	9,5920	1,9232
	H ₂	2	14,1931	3,3893	6,7786	0,0380	0,0760	0,2576
	CH ₄	16	2,2502	0,5373	8,5975	0,0080	0,1280	0,0688
SIC. K	298	2,9800				1,0000	30,4040	7,3747
SIC. °C	25					Cp=	0,2430	kcal/kgK
YÜKSEK FIRIN GAZININ ÖZGÜL ISISI								
			Cp (kJ / kgK)	Cp (kJ / kgK)	Cp (kcal / kmolK)	% Vol	kg/kmol	kcal/kmolK
GAZ BİLEŞENLERİ	N ₂	28	1,0466	0,2499	6,9979	0,4980	13,9440	3,4850
	CO	28	1,0549	0,2519	7,0533	0,2380	6,6640	1,6787
	CO ₂	44	0,9797	0,234	10,294	0,2180	9,5920	2,2441
	H ₂	2	14,4873	3,4596	6,9191	0,0380	0,0760	0,2629
	CH ₄	16	2,7145	0,6482	10,3715	0,0080	0,1280	0,0830
SIC. K	452	4,5200				1,0000	30,4040	7,7536
SIC. °C	172					Cp=	0,2550	kcal/kgK

Ekim ayı verileri şöyledir;

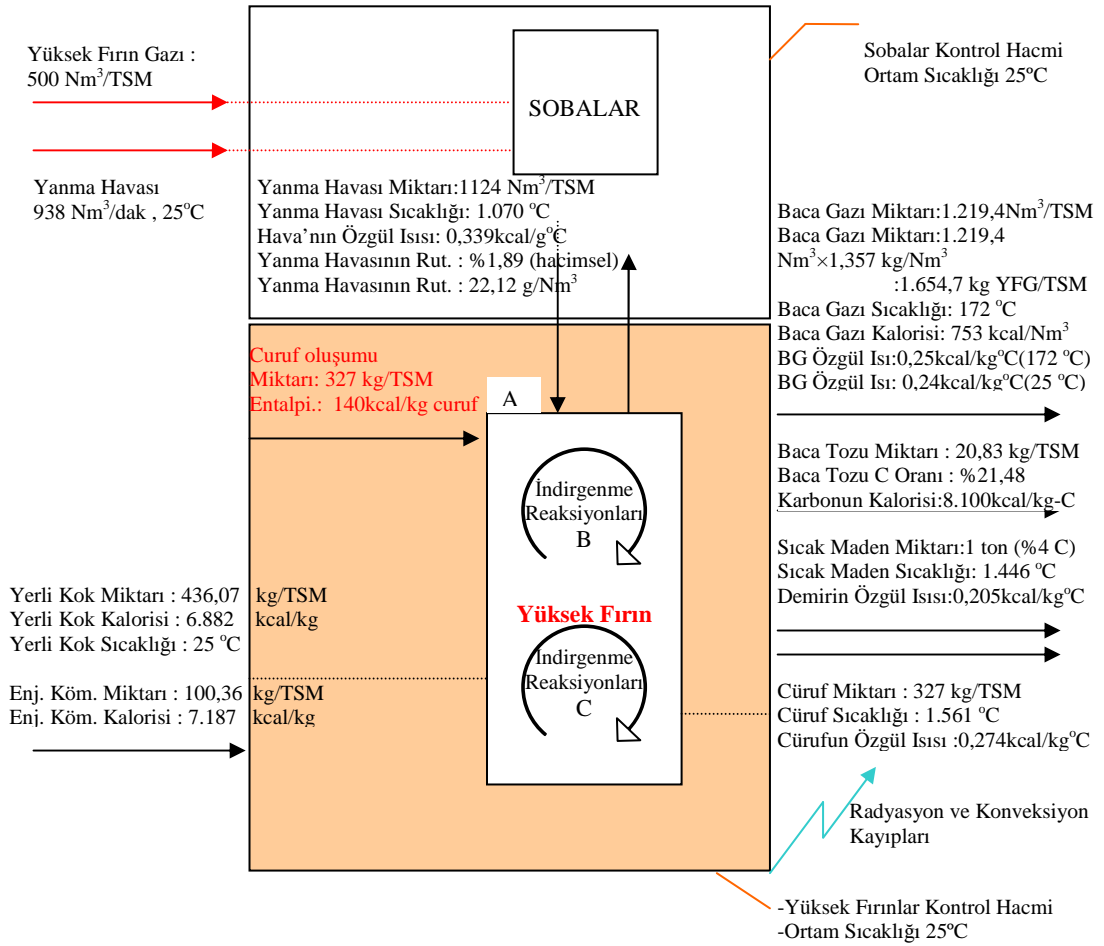
4 No'lu Yüksek Fırın sıcak maden üretimi : 37.205 Ton Sıvı Maden (TSM),
 Kullanılan kok miktarı : 16.223 ton → 436,07 kg/TSM,
 Üretim koku kalorisi : 6.882 kcal/kg,
 Kullanılan enjeksiyon kömürü miktarı : 3.733,0 ton → 100,36 kg/TSM,
 Enjeksiyon kömürü kalorisi : 7.187 kcal/kg,
 Üretilen yüksek fırın gazı miktarı : 45.367.777 Nm³ → 1.219,4 Nm³/TSM,
 Yüksek fırın gazı kalorisi : 753 kcal/Nm³.

Fırında üretilen ortalama yüksek fırın gazıyla ilgili yapılan analizler sonucu; gazın bileşimi ve bu bileşimlerden yola çıkılarak yoğunluğu, kalorifik değeri hesaplanarak Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Yüksek fırın gazı kimyasal bileşenleri ve yoğunluğu.

Atom Ağırlığı		YFG Hacimsel		YFG Kütleli	Kalorifik Değeri kcal/Nm ³
28	N ₂	0,498	0,498 x 28/22,4	0,623	
28	CO	0,238	0,238 x 28/22,4	0,298	
44	CO ₂	0,218	0,218 x 44/22,4	0,428	
2	H ₂	0,038	0,038 x 2/22,4	0,003	
16	CH ₄	0,008	0,008 x 16/22,4	0,006	
Toplam		1,000	YFG Yoğunluğu	1,357 kg/Nm ³	753

Toplanan tüm bu verilerle oluşturulan enerji dengesi verileri birlikte Şekil 5.1'de özetlenmiştir.



Şekil 5.1. 4 No'lu Yüksek Fırın enerji dengesi (Ekim 2012 değerlerine göre).

Enerji Girdisi

Yüksek fırınlara esas yakıt olarak giren kok ve enjeksiyon kömürünü müteakip yapılan toplam enerji girdisi hesaplamaları aşağıda verilmiştir.

A. Kokun yanmasıyla üretilen enerji

Kok miktarı :	436,07 kg/TSM (Şekil 5.1.)
Kokun kalorisi :	6.882 kcal/kg (Şekil 5.1.)
Kokun yanmasıyla üretilen enerji :	436,07 kg/TSM × 6.882 kcal/kg, <u>3.001.033 kcal/TSM.</u>

B. Enjeksiyon kömürünün yanmasıyla üretilen enerji

Enjeksiyon kömürü miktarı :	100,36 kg/TSM (Şekil 5.1),
Enjeksiyon kömürü kalorisi :	7.187 kcal/kg (Şekil 5.1),
Enj. kömürünün yanmasıyla üretilen enerji:	100,36 kg/TSM × 7.187 kcal/kg, <u>721.287 kcal/TSM.</u>

C. Yanma havasıyla giren enerji

Yanma havası miktarı :	1.124 Nm ³ /TSM (Şekil 5.1),
Yanma havası sıcaklığı :	1.070 °C (Şekil 5.1),
Yanma havasının özgül ısısı :	0,3394 kcal/Nm ³ °C (1.070 °C de, Tablo 5.2), 0,3103 kcal/Nm ³ °C (25 °C de, Tablo 5.2),

$Q = m \times c \times \Delta T$ formülünü kullanılarak,

Yanma havasıyla giren enerji :	1.124 Nm ³ /TSM × (0,3394 kcal/Nm ³ °C × 1.070°C – 0,3103 kcal/Nm ³ °C × 25°C), <u>399.470 kcal/TSM.</u>
--------------------------------	---

D. Yanma havasının içerisindeki nem ile giren enerji

Yanma havası içindeki nem oranı : %1,89 (Şekil 5.1),

Yanma havası içindeki nem miktarı : $1.124 \text{ Nm}^3/\text{TSM} \times 0,0189 = 21,24 \text{ Nm}^3/\text{TSM}$,

Su buharının özgül ısısı : $0,3979 \text{ kcal}/\text{Nm}^3\text{°C}$ (1070 °C’de, Tablo 5.2),

$0,3418 \text{ kcal}/\text{Nm}^3\text{°C}$ (25 °C’de, Tablo 5.2),

Nem ile gelen enerji : $21,24 \text{ Nm}^3/\text{TSM} \times (0,3979 \text{ kcal}/\text{Nm}^3\text{°C} \times 1.070\text{°C} -$
 $0,3418 \text{ kcal}/\text{Nm}^3\text{°C} \times 25\text{°C})$,

8.861 kcal/TSM.

E. Cüruf için üretilen enerji

Cüruf miktarı : $327 \text{ kg}/\text{TSM}$ (Şekil 5.1),

Cürufun kalorifik değeri: $140 \text{ kcal}/\text{kg-cüruf}$ (Tablo 5.1),

Cüruf üretiminde ortaya çıkan ısı : $327 \text{ kg}/\text{TSM} \times 140\text{kcal}/\text{kg}$,

45.780 kcal/TSM.

Giren Toplam Enerjiler;

$$\begin{aligned} Q_{GT} &= A + B + C + D + E \\ &= 3.001.033 + 721.287 + 399.470 + 8.861 + 45.780 \\ &= \underline{3.876.432 \text{ kcal}/\text{TSM}} \end{aligned}$$

Enerji Çıktısı

A.(Fe) Demirin deoksidasyon ısısı ve diğerleri

Fe_2O_3 , Fe_3O_4 ve FeO 'nun indirgenme reaksiyonları sırasında ihtiyaç duyulan ısı bu kapsamda proses gereği harcanan ısı olarak kabul edilmektedir. Burada harcanan enerji toplam enerji dengesinde kalan kısım içerisinde kabul edilmiştir.

B. Sıcak maden içerisindeki Si'nin enerjisi

Sıcak maden içindeki Si miktarı : %0,46 → 4,6 kg/TSM (Tablo 5.3),
Si'nin kalorifik değeri : 6.750 kcal/kg-Si (Tablo 5.1),
4,6 kg/TSM × 6.750 kcal/kg,
31.050 kcal/TSM.

C. Sıcak maden içerisindeki Mn'nin enerjisi

Sıcak maden içindeki Mn miktarı : %0,77 → 7,7 kg/TSM (Tablo 5.3),
Mn'nin kalorifik değeri : 1.652 kcal/kg-Mn (Tablo 5.1),
7,7 kg/TSM × 1.652 kcal/kg,
12.720 kcal/TSM.

D. Sıcak maden içerisindeki P'nin enerjisi

Sıcak maden içindeki P miktarı : %0,081 → 0,81 kg/TSM (Tablo 5.3),
P'nin kalorifik değeri : 5.966 kcal/kg-P (Tablo 5.1),
0,81 kg/TSM × 5.966 kcal/kg,
4.832 kcal/TSM.

E. Sıvı maden ile çıkan enerji

Sıcak maden miktarı : 1 ton = 1000 kg,
Sıcak madenin özgül ısısı : 0,2055 kcal/kg°C (1.446 °C, %4C, Tablo 5.2),
0,2340 kcal/kg°C (25 °C, %4 C, Tablo 5.2),
Sıvı maden ile çıkan enerji : 1000kg × [(1446×0,2055)-(25×0,2340)],
291.303 kcal/TSM.

F. Yüksek Fırın cürufu ile çıkan enerji

Cüruf miktarı : 327 kg/TSM (Tablo 5.3),
Cürufun özgül ısısı : 0,2741 kcal/kg°C (1561 °C, Tablo 5.2),

Cüruf ile çıkan enerji : $0,185 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ (25 °C, Tablo 5.2),
 $327 \times [(1561 \times 0,2741) - (25 \times 0,185)],$
138.401 kcal/TSM.

G. Yüksek Fırın Gazı ile çıkan enerji

Yüksek Fırın Gazı miktarı : 1.654,7 kg YFG/TSM (Şekil 5.2),
Yüksek Fırın Gazının özgül ısısı : $0,255 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ (179 °C, Tablo 5.4),
 $0,243 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ (25 °C, Tablo 5.4),
Yüksek Fırın Gazı ile çıkan enerji : $1.654,7 \times [(179 \times 0,255) - (25 \times 0,243)],$
65.476 kcal/TSM.

H. Yanma havasını kurutmak için tüketilen enerji

Yanma havası içerisindeki nem miktarı : $22,12 \text{ g/Nm}^3$ (Tablo 5.3),
Yanma havası miktarı : $1.124 \text{ Nm}^3/\text{TSM}$ (Şekil 5.2),
 $1.124 \text{ Nm}^3/\text{TSM} \times 22,12 \text{ g/Nm}^3,$
 $24,862 \text{ kg/TSM},$
Kalorifik değer : $3.183 \text{ kcal/kg H}_2\text{O}$ (Tablo 5.1),
Nem için tüketilen enerji: $24,862 \text{ kg/TSM} \times 3.183 \text{ kcal/ kg H}_2\text{O},$
79.135 kcal/TSM.

I. Sıvı maden içerisindeki C ile çıkan enerji

Sıcak maden içerisindeki karbon oranı : $\%3,98 \rightarrow 39,8 \text{ kg/TSM}$ (Tablo 5.3),
Karbonun kalorifik değeri : 8.100 kcal/kg-C (Tablo 5.1),
Sıcak maden içindeki C ile çıkan enerji : $39,8 \text{ kg/TSM} \times 8.100 \text{ kcal/kg-C},$
322.380 kcal/TSM.

İ. Yüksek Fırın Gazının taşıdığı gizli ısı ile çıkan enerji

Üretilen Yüksek Fırın Gazı miktarı : $1.219,4 \text{ Nm}^3/\text{TSM}$ (Şekil 5.2),
Yüksek Fırın Gazının kalorifik değeri : 753 kcal/Nm^3 (Tablo 5.1),

Yüksek Fırın Gazının gizli ısısı : $1.219,4 \text{ Nm}^3/\text{TSM} \times 753 \text{ kcal/Nm}^3$,
918.208 kcal/TSM.

J.Baca tozunun gizli ısısı (Baca tozu içerisindeki C)

Üretilen baca tozu miktarı : 775 ton/ay \rightarrow 20,83 kg/TSM (Şekil 5.2),
Baca tozu içerisindeki C oranı : %21,48 (Şekil 3.2),
 $8.100 \text{ kcal/kg-C} \times 20,83 \text{ kg} \times 0,2148$,
36.241 kcal/TSM.

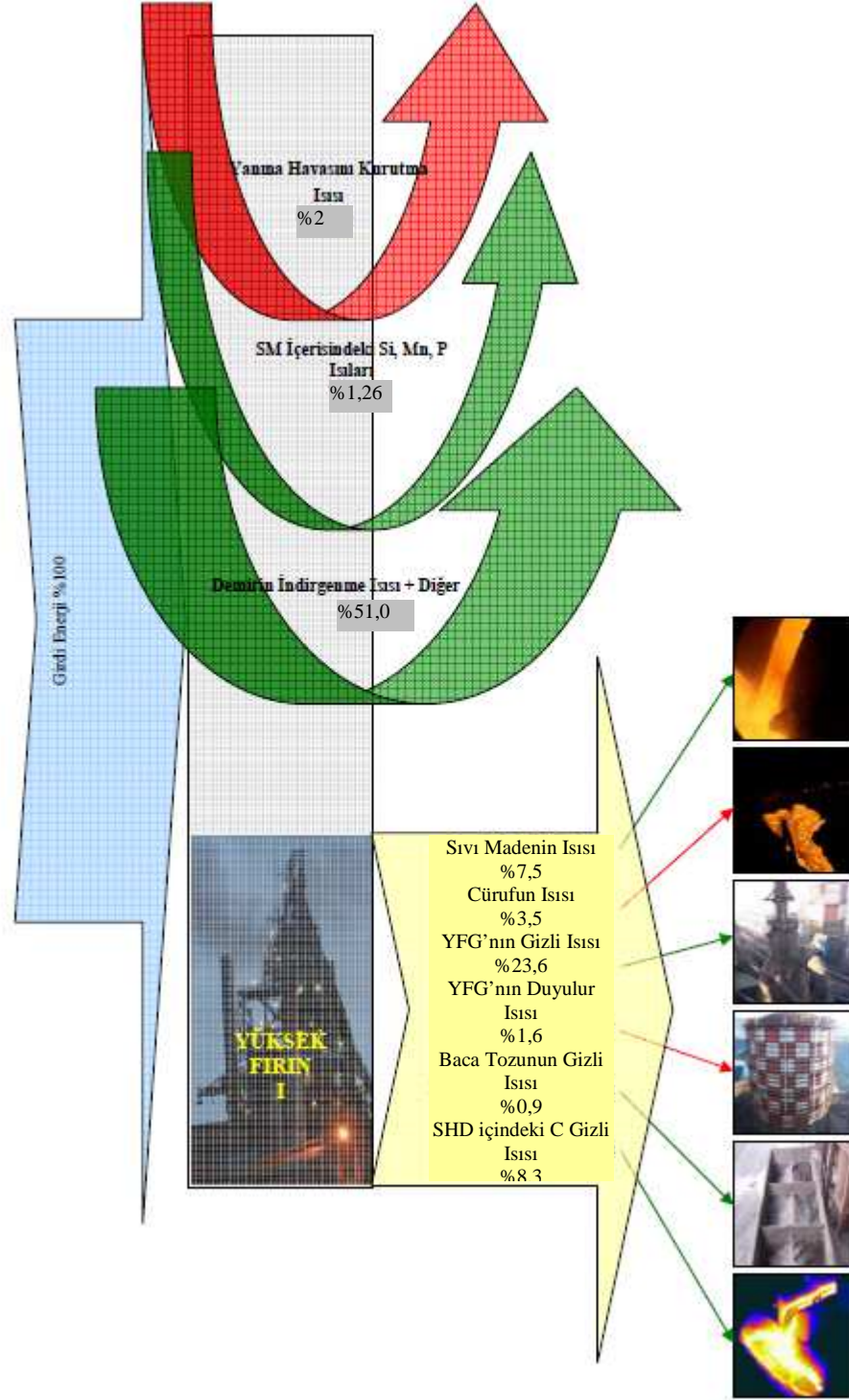
Çıkan Toplam Enerjiler,

$$\begin{aligned} Q_{\text{ÇT}} &= A + B + C + D + E + F + G + H + I + \dot{I} + J, \\ &= 1.976.686 + 31.050 + 12.720 + 4.832 + 291.303 + 138.401 \\ &\quad + 65.476 + 79.135 + 322.380 + 918.208 + 36.241 \\ &= \underline{3.876.432 \text{ kcal/TSM}} \text{ dir.} \end{aligned}$$

Çizelge 5.6. 4 No'lu Yüksek Fırın enerji dengesi.

Giren Enerji (3.876.432 kcal/TSM)	kcal	%
Kokun yanmasıyla prosese giren	3.001.033	77,4
Enjeksiyon kömürünün yanmasıyla giren	721.287	18,6
Yanma havasının duyulur ısısı	399.470	10,3
Curuf üretimi esnasında oluşan enerji	45.780	1,2
Yanma havası içindeki nemin duyulur ısısı	8.861	0,2
Çıkan Enerji (3.876.432 kcal/TSM)	kcal	%
Demirin indirgenme ısıları+diğer	1.976.686	51,0
Baca gazının (YFG) taşıdığı gizli ısı	918.208	23,6
Sıvı maden içindeki karbonun gizli ısısı	322.380	8,3
Sıcak madenin duyulur ısısı	291.303	7,5
Curufun duyulur ısısı	138.401	3,5
Yanma havasını kurutmak için gerekli ısı	79.135	2,0
Yüksek fırın gazının duyulur ısısı	65.476	1,6
Baca tozunun gizli ısısı	36.241	0,9
Sıcak maden içerisindeki Si' nin ısısı	31.050	0,8
Sıcak maden içerisindeki Mn' nin ısısı	12.720	0,3
Sıcak maden içerisindeki P' nin ısısı	4.832	0,1

Bu hesaplamalara göre Yüksek Fırın 4'e giren ve çıkan enerjiler bir dengeye getirilerek Çizelge 5.6'de ve Şekil 5.1'de özetlenerek verilmiştir.



Şekil.5.2. 4 No'lu Yüksek Fırında kazanılabilir enerji dengesi.

5.3. YÜKSEK FIRINLAR' DA MEVCUT DURUMDA DEĞERLENDİRİLEN ENERJİ POTANSİYELİ

4 No'lu Yüksek Fırın için uygulanan denge analizinde fırının 3.876.432 kcal/TSM enerji tüketmekte olup çıkan enerjiler içerisinde; özellikle yüksek fırın gazının duyulur ısısı, yanma havasını kurutmak için gerekli ısı, baca gazının taşıdığı gizli ısı ve baca tozunun gizli ısısının yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, hali hazırda değerlendirilen ve değerlendirilmesi muhtemel olan enerji kalemleri her iki fırın için de ortak olarak tespit edilmiştir.

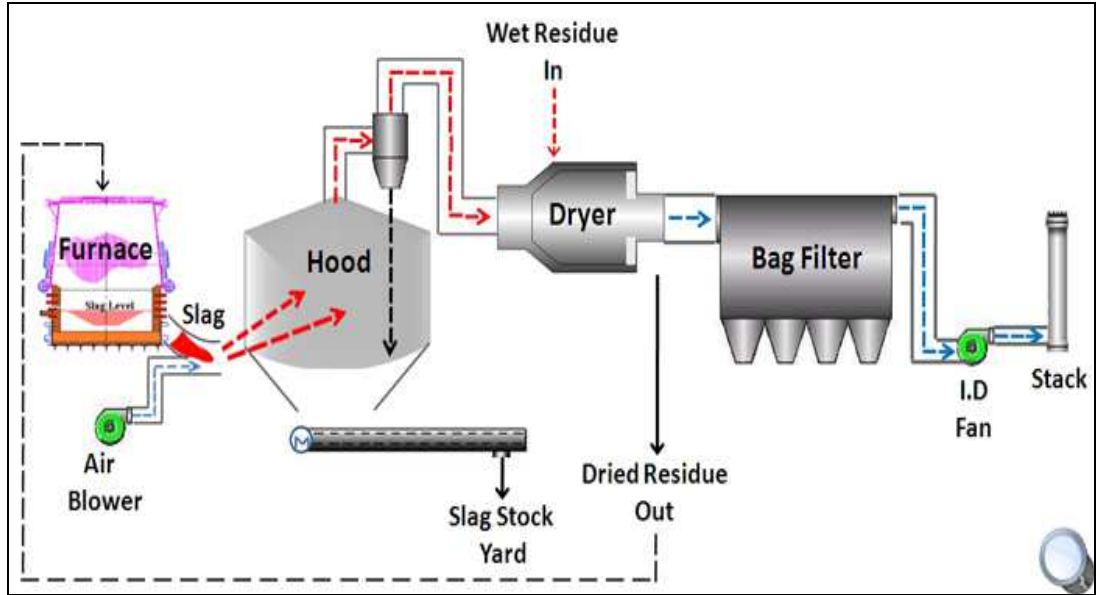
Demirin indirgenme ısısı, proses esnasında gereksinim duyulan enerji ile karbon kaynağı olarak kullanılması gerekli enerji olarak tanımlanmaktadır. Sıcak madenin içerisindeki Si, Mn ve P ve sıcak madenin duyulur ısıları ise, yüksek fırınlarda üretilip çeliğe dönüştürülmek üzere çelikhaneye gönderilen sıcak madenin, çelik üretim prosesinde gereksinim duyduğu enerji olarak, çelikhane değerlendirilmektedir. Baca gazının (yüksek fırın gazı) taşıdığı gizli ısı -bu gazın yüksek fırın gaz deposunda toplanması ve ardından yüksek fırınlar sobalarında, kok fabrikasında ve kuvvet santralinde birincil yakıt ikamesi olarak kullanılması nedeniyle- tekrar değerlendirilen bir enerji olarak kabul edilmektedir. Entegre tesisler, genel olarak, 750-850 kcal/Nm³ kalorifik değere sahip bu gazı, kendi tesislerinde kullandıkları gibi yaptıkları özel anlaşmalarla, tesise yakın enerji üretme tesislerine de satabilmektedirler.

Baca tozunun gizli ısısı, baca tozunun sinter fabrikasında hammadde olarak değerlendirilmesi ve içerisindeki karbonun sinter fırınında yanarak sisteme enerji vermesi nedeniyle değerlendirilen bir enerji olarak kabul edilmektedir. Sıcak madenin içerisindeki karbonun taşıdığı gizli ısı, demirin çeliğe dönüştüğü çelikhane tesislerinde, proses sonucu oluşan çelikhane gazı bünyesine geçmektedir. 1.500 – 2.000 kcal/Nm³ mertebesinde olan çelikhane gazı ise, yüksek fırın gazı gibi entegre tesislerin birincil yakıt gereksinimini karşılamak üzere değerlendirilmektedir

5.4. YÜKSEK FIRINLAR İÇİN ENERJİ TASARRUFU ÖNERİLERİ

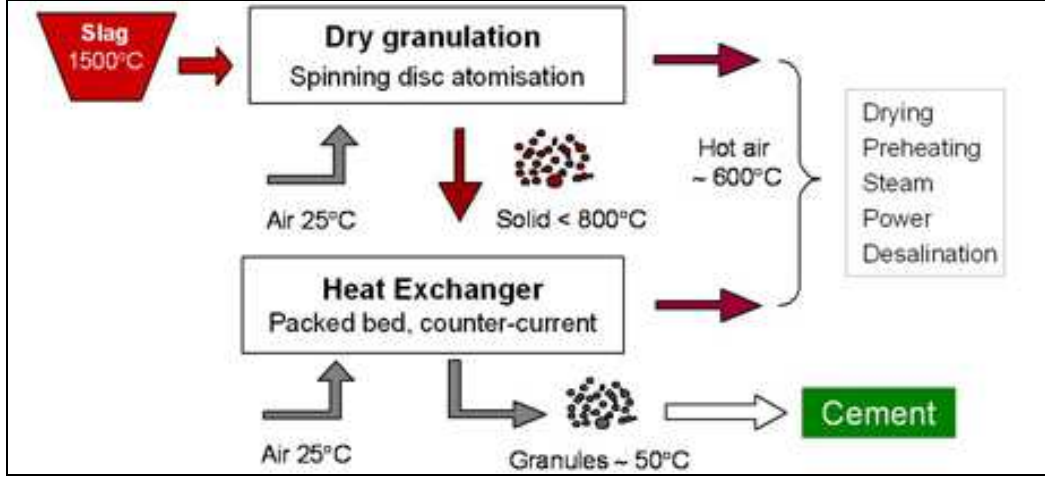
5.4.1. Cüruf Enerjisinin Geri Kazanılması

Kazanılabilir enerjiler olarak görülen cürufun ve baca gazının (yüksek fırın gazı) duyulur ısıları yüksek fırından çıkan enerjinin 4. Fırında %5,3 lik kısmını oluşturmaktadır. Yüksek fırın cürufunun duyulur ısısından yararlanılması ile ilgili yaygın örnekler bulunmamakla birlikte Şekil 5.3'te verilen tipte tesisler ile enerji kazanımı mümkündür.



Şekil 5.3. Enerji kazanımlı örnek bir granüle cüruf tesisi.

Temel prensip yaş yerine kuru prosesle granüle cüruf oluşturmaktır. Bu prosese ilgili diğer örnekler Şekil 5.4'te verilmektedir.



Şekil 5.4. Prosesin basit akış şeması.

Proses, esas olarak, Şekil 5.5’de boş olarak görülen cüruf kanalında, Şekil 5.6’de görüldüğü gibi eriyik haldeki cürufun enerjisini sıcak havaya vermesi ile buhar üretilmesi esasına dayanmaktadır.



Şekil 5.5. Granüle cüruf kanalı (Cüruf akışı yok).



Şekil 5.6. Granüle cüruf kanalı (Cüruf akışı var).

Granüle cüruf oluşturulurken elde edilen bu enerjinin Kardemir Yüksek Fırınları için potansiyel getirisi aşağıda verilmiştir.

Yüksek fırın cürufu ile çıkan enerji :	138.401,09 kcal/TSM,
Yıllık sıcak maden üretimi :	450.000 ton,
Yıllık cürufu ile atılan enerji (ortalama) :	$138.401,09 \text{ kcal/TSM} \times 450.000 \text{ ton/yıl}$, 62.280.450.000 kcal/yıl,

Bu enerjiden %40 verimle kullanılabilir enerji elde edilebileceği kabul edildiğinde;

$$62.280.450.000 \text{ kcal/yıl} \times 0,40,$$
$$24.912.180.000 \text{ kcal/yıl},$$

kullanılabilir enerji tasarruf edilebilir.

Doğal gazın kalorisi :	8.250 kcal/Sm ³ ,
İhtiyaç duyulacak doğal gaz enerjisi :	$24.912.180.000 \text{ kcal} / 8.250 \text{ kcal/Sm}^3$, 3.019.658 Sm ³ /yıl' dır.

Doğal gazın birim fiyatı :	0,353 USD/Sm ³ (2012),
Kazanımın parasal karşılığı :	<u>1.065.939 USD/yıl</u> ' dır.
TEP olarak elde edilecek tasarruf :	24.912.180.000 kcal / 10.000 kcal/kg, <u>2.491 TEP/yıl</u> ' dır.
Tahmini CO ₂ azaltımı :	<u>6.092 ton/yıl CO₂</u> ' dır. 1 Sm ³ Doğal Gaz yandığında, 2,018 kg CO ₂ açığa çıkılmaktadır.

Şekil 5.7'de verilen granüle cüruf, çimento sektörü için çok önemli bir hammaddedir ve yüksek fırın prosesinin yan ürünü olarak üretilmektedir. Şekil 5.4'de verilen, cüruftan kazanılabilecek enerji potansiyelini sağlayacak olan örnek tesis için, pratikte uygulaması bulunan herhangi bir tesise rastlanılmadığından kuruluş maliyeti hakkında bilgi edinilememiştir.



Şekil 5.7. Granüle cüruf sahası.

5.4.2. Yüksek Fırın Gazı Duyulur Isısının Geri Kazanılması

Yüksek Fırınlar enerji dengesine göre Yüksek Fırın 4'den 65.476,46 kcal/TSM, kazanılma potansiyeli olan yüksek fırın gazının duyulur ısısından yararlanabilmek, gaz soğutucu ve yıkama sistemlerinden önce kurulacak bir ısı değiştiricisi tesisine mümkün olabilecektir.

şekil 5.8'da verilen boru ile Yüksek Fırından çıkan, yüksek fırın gazının duyulur ısısı, yüksek fırın cürufuna göre düşüktür (100 °C – 180 °C). Ancak ortaya çıkan yıllık yaklaşık 550 milyon Nm³ gaz miktarının büyüklüğü, düşük sıcaklığa rağmen kazanılabilir enerji potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.



şekil 5.8. Yüksek Fırınlar baca gazı (YFG) toplama sistemi ve ana toplayıcı boru.

Bacadan çıkan gaz, şekil 5.9'da verilen toz tutucuya yönelmekte devamında ise şekil 5.10'de verilen yıkayıcılarda gaz sıcaklığından ve ihtiva ettiği tozdan arındırılarak sisteme gönderilmektedir.

Bu miktarda yüksek fırın gazı duyulur ısısından yararlanılarak geri kazanılabilecek enerji değerlendirilerek sıcak su üretimi yapılırsa, aynı enerjiyi birincil bir yakıt kullanarak elde etmek için harcanabilecek paradan elde edilebilecek kazanç şöyledir;

YF baca gazıyla çıkan enerji :	65.476,46 kcal/TSM (duyulur Isı),
Yıllık sıcak maden üretimi :	450.000 ton,
Yıllık YFG atılan enerji (ortalama) :	65.476,46 kcal/TSM \times 450.000 ton/yıl, 29.464.200.000 kcal/yıl'dır.



Şekil 5.9. Yüksek fırınlar baca gazı toz tutma sistemi.



Şekil 5.10. Yüksek fırın baca gazı yıkayıcıları.

Bu enerjiden %40 verimle kullanılabilir enerji elde edilebileceği kabul edildiğinde;

$$29.464.200.000 \text{ kcal/yıl} \times 0,40,$$

$$11.785.680.000 \text{ kcal/yıl},$$

kullanılabilir enerji tasarruf edilebilir.

TEP olarak elde edilecek tasarruf : $11.785.680.000 \text{ kcal} / 10.000.000 \text{ kcal/kg}$,
1.178 TEP/yıl' dır.

Tahmini CO₂ azaltımı : 2.870 ton/yıl CO₂' dır. 1 Sm³ Doğal Gaz
yandığında, 2,018 kg CO₂ açığa çıkmaktadır

Yüksek fırın gazının duyulur ısıyla geri kazanılabilecek bu enerjiyi, birincil enerji kaynaklarını kullanarak elde etmek için 504.284 USD/yıl bir yakıt maliyeti gerekecektir. Böyle bir potansiyel görülmekle beraber bu potansiyelden

yararlanılarak üretilebilecek -buhar veya sıcak su gibi- kullanılabilir ısı kaynaklarının da ihtiyaç ve kullanım analizlerinin yapılması gerekmektedir.

5.4.3. Yüksek Fırın Prosesinde Enjeksiyon Kömür Oranının Arttırılması

Metalurjik kok yüksek fırınlarda demir cevherinin ergitilmesi için kullanılan önemli bir hammaddedir. Yüksek fırınlarda Pülverize Kömür Enjeksiyonu (PCI) ise, kullanılmakta olan metalurjik kokun optimum seviyeye kadar azaltılmasıyla beraber yerine daha düşük maliyetli olan pülverize kömürün ikame edilerek yakıt tasarrufunun sağlanması amacıyla yapılmaktadır (Kardemir A.Ş., 2012).

Yüksek fırına pülverize kömür enjeksiyonunun yararları şunlardır:

1. Metalurjik kok ile yer değiştirerek, kok oranını ve yüksek fırın sıvı ham demir üretiminin verimini artırır ve maliyetini büyük oranda azaltır.
2. Yüksek fırının hava sıcaklığının arttırılabilmesi ve oksijen zenginleşmesine yararlı koşullar oluşturur.
3. Sadece metalurjik kok arzını azaltmakla kalmaz, kok kömürü üretimi için tüketilmek zorunda olan enerji miktarını da azaltır.

Bu çalışma ile 2011 yılında her bir fırın için 72kg/TSM olan pülverize kömür enjeksiyon miktarı 24 kg/TSM artırılarak 96kg/TSM'e çıkarılmıştır. Yine 2011 yılında 474kg/TSM olan metalurjik kok tüketimi 34kg/TSM azaltılarak 440kg/TSM'e düşürülmüştür. Bu durumda hem yüksek fırınlarda enerji tasarrufu ve mali tasarruf yapılmış, hem de kok üretimindeki azalmadan kaynaklanan enerji tasarrufu ve CO₂ emisyonunda azalma sağlanmıştır. Yapılan enerji tasarrufu miktarı 4.246 TEP, mali tasarruf miktarı 4.282.524 TL ve CO₂ emisyonundaki azalma miktarı ise 6.705 ton olmuştur (Kardemir A.Ş., 2012).

5.4.3.1 Uygulama Hakkında Açıklamalar

Yüksek fırınlara pülverize kömür enjeksiyonu, tüyerlerin üfleme borusunun yan tarafına monte edilmiş olan pülverize kömür lansından yapılmaktadır. Uygulama

öncesinde 4 nolu yüksek fırınlarda pülverize kömür enjeksiyonu yüksek fırın tüyerlerinin üfleme borularının tek tarafında bulunan lans ile yapılıyordu (Şekil 5.11). Bu durumda ancak 72 kg/TSM pülverize kömür verimli bir şekilde yakılabiliyordu (Kardemir A.Ş, 2012).



Şekil 5.11. Tek lanslı üfleme borusu.

Yakılan pülverize kömürün tüyerlerden bakıldığında görünen görüntüsü Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Burada üfleme borusunun içerisindeki tek lans ve lansın ucunda yapılan pülverize kömür enjeksiyonu ve yanma alanı görülebilmektedir.



Şekil 5.12. Tüyerden bakıldığında görünen görüntü.

Yüksek fırına pülverize kömür enjeksiyonunun artırılabilmesi için çift lanslı üfleme boru sistemine geçilerek daha verimli yanma sağlandığı görülmüştür. Uygulama sonrasında yakılan pülverize kömürün tüyerlerden bakıldığında görünen görüntüsü Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Burada üfleme borusunun içerisindeki çift lans ve lansların ucunda yapılan pülverize kömür enjeksiyonu ve yanma alanları görülebilmektedir. Yapılan uygulama ile pülverize kömür yanma yüzey alanı genişletilmiştir (Kardemir A.Ş, 2012).



Şekil 5.13. Çift lanslı tüyerden bakıldığında görünen görüntü.

5.4.3.2 Enerji Tasarrufu Hesaplamaları

Yakıttan yapılan enerji tasarrufu:

Uygulama öncesi yüksek fırınlar ortalama metalurjik kok ve pülverize kömür tüketimleri:

Metalurjik kok tüketimi : 474 kg/TSM

2011 yılı pülverize kömür tüketimi : 72 kg/TSM

Uygulama öncesi yüksek fırınlar ton sıcak maden başına enerji tüketimleri:

Enerji tüketimi = Tüketilen yakıt miktarı X yakıtın alt ısı değeri

474 kg.metalurjik kok/TSM x 6.782 kcal/kg = 3.214.668 kcal/ TSM

$$72 \text{ kg.pülverize kömür/TSM} \times 7.396 \text{ kcal/kg} = 532.512 \text{ kcal/ TSM}$$
$$\text{Toplam enerji tüketimi} = \underline{3.747.180 \text{ kcal/ TSM}}$$

Uygulama sonrasındaki yüksek fırınlar ortalama metalurjik kok ve pülverize kömür tüketimleri:

$$\text{Metalurjik kok tüketimi} : 440 \text{ kg/TSM}$$

$$\text{Pülverize kömür tüketimi} : 96 \text{ kg/TSM}$$

Uygulama sonrası yüksek fırınlar ton sıcak maden başına enerji tüketimleri:

Enerji tüketimi = Tüketilen yakıt miktarı X yakıtın alt ısıl değeri

$$440 \text{ kg metalurjik kok/TSM} \times 6.782 \text{ kcal/kg} = 2.984.080 \text{ kcal/ TSM}$$

$$96 \text{ kg pülverize kömür/TSM} \times 7.396 \text{ kcal/kg} = 710.016 \text{ kcal/ TSM}$$

$$\text{Toplam enerji tüketimi} = \underline{3.694.096 \text{ kcal/ TSM}}$$

Tasarruf miktarı = Uygulama önceki toplam enerji tüketimi – uygulama sonrası toplam enerji tüketimi

$$\text{Tasarruf miktarı} = 3.747.180 \text{ kcal/TSM} - 3.694.016 \text{ kcal/TSM} = \underline{53.084 \text{ kcal/ TSM}}$$

(% 1,4 enerji tasarrufu)

Bu çalışmanın yapıldığı fırınlardaki yıllık sıvı maden üretimi: 800.000 ton

Yakıttan yapılan toplam tasarruf miktarı = Tasarruf miktarı x sıvı maden üretimi

$$\text{Yakıttan yapılan toplam tasarruf miktarı} = 53.084 \text{ kcal/ TSM} \times 800.000 \text{ TSM /yıl}$$

$$= 42.467.200.000 \text{ kcal/yıl}$$

$$= \underline{4.246 \text{ TEP/yıl}}$$

Toplam enerji tasarrufunun parasal değeri:

Enerji tasarrufunun kok karşılığı = Enerji tasarrufu / Kokun alt ısıl değeri

Toplam enerji tasarrufunun metalurjik kok karşılığı

$$= 42.467.200.000 \text{ kcal} / 6.782 \text{ kcal/kg}$$
$$= \underline{6.261.751 \text{ kg} = 6.261 \text{ ton}}$$

Tasarrufun parasal değeri = Tasarrufun metalurjik kok karşılığı x metalurjik kok maliyeti

$$\text{Tasarrufun parasal değeri} = 6.261 \text{ ton} \times 684 \text{ TL/ton} = \underline{4.282.524 \text{ TL}}$$

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek fırında kullanılan demir esaslı malzemeler ve karbon esaslı yakıtlar fiziksel ve kimyasal olarak incelenmiştir. Enerji balansı yapılmış ve enerji verimliliğini arttırıcı kriterler belirlenmiştir. Enerji verimliliğini arttırmak ve enerji geri kazanımı için açık noktaların çok fazla olduğu belirlenmiştir. Bunlardan enerji geri kazanımı olarak cüruf ısısının geri kazanımı ve baca gazı sıcaklığı geri kazanımı belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Ayrıca yüksek fırın prosesinde yanma verimini arttıracak çalışmalar da büyük miktarda enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu çalışmada pülverize kömürün yanma verimi arttırılmış ve kok yakıt tüketiminde tasarruf sağlanmıştır. Spesifik enerji tüketiminde yani 1 ton SHD için harcanan enerjide %1,4 tasarruf sağlanmış oldu. Bu değer çok düşük görülmesine karşın yapılan hesaplamalarda yıllık 4.246 TEP 'e denk gelmektedir.

Çizelge 6.1. Enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik planlanan çalışmalar.

Projeler	Tahmini Enerji Tasarruf Oranı (%)	Tahmini Finansman İhtiyacı (USD)	Geri Kazanım Süresi
Yüksek Fırın Kok Oranının Azaltılması	0,90	300.000	10gün
Yüksek Fırın Yakma Havasının Oksijenle Zenginleştirilmesi	0,40	350.000	27gün
Soba Bacasına Konulacak Ekonomizer ile Soba Yakma Havasının Ön Isıtılması	0,80	800.000	30gün
Şarj Malzemelerinin Dağılımının Kontrolü	0,45	400.000	25gün
Curuf Isısının Geri Kazanımı	0,15	250.000	76gün
Top Gaz Recovery Turbine (TRT) uygulaması	0,85	10.000.000	1yıl
Soba Üfleme - Bekleme - ;Isıtma Adımlarının İyileştirilmesi	0,40	650.000	50gün
Yüksek Fırın Kontrol Sisteminin İyileştirilmesi	0,15	350.000	72gün
Yüksek Fırına İlave Yakıt Enjeksiyonu	0,15	300.000	62gün
Yüksek Fırın Blower Havasından Rutubet Giderme	0,10	300.000	3ay

Enerji dengesini kurduğumuz yüksek fırınlarda hangi noktalarda enerji tasarrufu yapılacağı örneklerle ele alınmış ve diğer enerji tasarrufu kalemleri aşağıda çizelge 6.1' de verilmiştir

Enerji verimliliğini arttırmak için ise prosesin ana kalemi olan kok oranının düşürülmesi ön plana çıkmaktadır. Fırın prosesinde CO' in Demirin indirgenmesi için ne kadar gerekli olduğunu bilinmektedir. Enerjinin tümü CO oluşturmak için harcanıyor ve fırını terk eden gazda yaklaşık %20 oranında CO ölçülmektedir. Bu şu anlama gelir; fazla üretilmiş CO gazı yani fazla enerji fırını terk etmektedir. CO içeren yüksek fırın gazı CO sayesinde %40' ı sobaları ısıtmak için kullanılmaktadır. %60'lık kısmındaki CO ayrıştırılıp fırına tekrar verilirse enerji verimliliği artacaktır.

KAYNAKLAR

Anishchenko, S. A., Fedorenko, D. Y. and Kravchenko, V. P., “Influence of technological parameters on blast-furnace productivity”, *Steel in Translation, Allerton Press*, Ukraine, 41: 4-9 (2012).

Aydın, Ö., “Yüksek fırın işletmeciliğinde optimizasyon”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 18-22 (2005).

Beer J., Phylipsen D. and Bates J. “Economic evaluation of carbon dioxide and nitrous oxide emission reductions in industry in the EU”, Contribution to a study for DG Environment, *European Commission by Ecofys Energy and Environment*, AEA Technology Environment and National Technical University of Athens, 1-158 (2001).

Binran T., “Japanese Steel Making Handbook, 3rd Edition”, *Iron and Steel Institute of Japan*, Nippon Tekko Kyokai 1-6: 1-80 (1980).

Biswas, A. K., “Principles of Iron Makes Blast Furnace” *Cootha-publishing Hause*, Brisbane, Australia, 1-511 (1981).

Dmitriev, A. N., Vitkina, G. Yu. and Chesnokov Yu. A., “Methodical basis of investigation of influence of the iron ore materials and coke metallurgical characteristics on the blast furnace smelting efficiency”, *Trans Tech Publications*, Switzerland, 602-604: 365-375 (2012).

Doğar M. T., “İskenderun Demir Çelik Fabrikası A.Ş. de kalite kontrol uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 7-16 (2008).

Ertem M. E., “Avrupa birliğine üyelik sürecinde entegre demir çelik tesislerinde enerji verimliliği ve yönetimi”, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 100-136 (2006).

Ertem M. E., “Entegre demir çelik tesislerinde enerji tasarrufu potansiyeli”, *1. Demir Çelik Sempozyumu*, Kdz. Ereğli, 3-5 (2001).

Gordon J. V. W. and Richard E. S., “Fundamentals of Classical Thermodynamics 3rd Edition”, *John Wiley & Sons Inc.*, Canada, 25-84 (1985).

Helle, H., Helle, M. and Saxén, H., “Nonlinear optimization of steel production using traditional and novel blast furnace operation strategies”, *Elsevier Ltd.*, Lyon, 66: 6470-6481 (2011).

Intergovernmental Panel on Climate Change, “Fourth assessment report, climate change 2007: Synthesis Report”, *IPCC AR4*, Switzerland, 36 (2007).

International Iron and Steel Institute, “Energy Use in the Steel Industry”, *IISI*, Brussels, 12-64 (1998).

Internet: International Energy Agency, “Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency”, http://www.iea.org/papers/2008/indicators_2008.pdf (2008).

Internet: International Energy Agency, “Energy Statistics”, http://www.iea.org/stats/pdf_graphs/29PROD.pdf (2011).

Kardemir A.Ş., “Kardemir öneri sistemi No:1018, ”*Kardemir A.Ş.*, Karabük (2012).

Monaghan, B. J., Chapman, M., Nightingale, S.A., Mathieson, J. G. and Nightingale, R., “Some comments on the study of metallurgical coke and its use in the iron blast furnace: understanding process fundamentals through laboratory studies”, *High Temperature Processing Symposium*, Melbourne, Australia: Swinburne University of Technology, 41-42 (2010).

Nogami, H., Yagi, J., Kitamura, S. and Austin, P. R., “Analysis on material and energy balances of ironmaking systems on blast furnace operations with metallic charging, top gas recycling and natural gas injection”, *ISIJ International*, 46 (12): 1759-1766 (2006).

Özgen, O., “Yüksek Fırın Prosesi”, *Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş. Eğitim Müdürlüğü Yayınları*, Ereğli, 1-14, 433-445 (1991).

Perry J. H., “Chemical Engineers Handbook, 4th Edition”, *Kogakusha Company Ltd*, Tokyo, 26 (1963).

Terzi, Ü. K. and Baykal, R., “Efficient and effective use of energy: a case study of Tofas”, *Environmental Research, Engineering and Management*, 1 (55): 29-33 (2011).

Tütünoğlu, Y., Güven, A. ve Öztürk, İ. T., “Cam temperleme fırınında enerji analizi”, *III. Enerji Verimliliği Kongresi*, Kocaeli, 153-166 (2011).

Worrell, E., Martin, N. and Price, L., “Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the U.S. iron and steel sector”, *LBNL Report 41724*, USA, 30 (1999).

Worrell, E., Martin, N. and Price, L., “Energy efficiency opportunities in electric arc steelmaking”, *LBNL Report 42775*, USA, 31 (1999).

Xu, C. and Cang, D., “A brief overview of low CO₂ emission technologies for iron and steel making”, *International Journal of Iron and Steel Research*, 17 (3): 1-7 (2010).

Yeniçeri, M., “Yüksek Fırın İşletmeciliğinde Demir Cevheri”, *Türkiye Demir ve Çelik İşletmeleri Eğitim Yayınları*, Ankara, 2-66 (1993).

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, “Sanayide Enerji Yönetimi Esasları”, *YEGM*, Ankara 1-4: 1-412 (1997).

Zhang, H., Feng, Z. H. and Wang, Y. H., “Optimization research of the comprehensive coke rate of blast furnace based on the operational characteristic of auxiliary materials”, *Trans Tech Publications*, Switzerland 260:261: 3-9 (2013).

Zhou, C., “Minimization of blast furnace fuel rate by optimizing burden and gas distribution”, *Purdue University - Calument Department of Mechanical Engineering Hammond*, United States, 3 (2012).

ÖZGEÇMİŞ

Murat ODABAŞ 1979 yılında ORDU’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Ordu Anadolu Öğretmen Lisesi’nden mezun oldu. 1998 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2003 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2004 yılında KARDEMİR’de Mühendis olarak göreve başladı. 2006 yılında Anadolu Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Bölümünden mezun oldu. 2009 yılında yılında başlamış olduğum Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD öğrenimine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Ergenekon Mah.
Ergenekon Cad. Kübana Loj. 42/4
Merkez / KARABÜK

Tel : (505) 817 80 55

E-posta : muratodbs@gmail.com

