

ELEKTRİK ARK FIRININDA FİZİKSEL EKSERJİ POTANSİYELİNİN VE VERİMİNİN ELDE EDİLMESİ

Ünal ÇAMDALI^a, Murat TUNÇ^b

^a Türkiye Kalkınma Bankası, Necatibey Cad., No:98, Bakanlıklar, 06100 ANKARA e-mail: u-camdali@tkb.com.tr

^b Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik Fak., 26 Ağustos Yerleşimi, Kayışdağı cad., 81120 Kayışdağı, İSTANBUL e-mail: tuncmu@yeditepe.edu.tr

Alınış : 05.08.2003

Kabul ediliş : 08.10.2003

Özet: Ekserji analizi bir sistemdeki enerji kaynaklarının ve kayıplarının tanımlanması konusunda oldukça faydalı olmaktadır. Bu çalışmada, alaşımli sıvı çelik üretiminde Türkiye’de önemli bir yere sahip olan bir tesiste kullanılan elektrik ark fırınında ekserji analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Ekserji analizi, Elektrik ark fırını, Sıvı çelik.

Obtaining of Physical Exergy Potential and Exergy Efficiency in an Electric Arc Furnace

Abstract: Exergy analysis helps to identify potentials of energy and causes of energy losses in a system. In this study exergy analysis has been undertaken for an electric arc furnace in an important alloyed steel producer in Turkey and the results of the study have been tabulated.

Key words: Exergy analysis, Electric arc furnace, Liquid steel.

Semboller

Ξ : Ekserji (kcal)	Alt indis
Ψ : Ekserji verimi (kcal/kcal)	b : Birleşenler
ε : Özgül ekserji (kcal/kg)	ç : Çıkış
β : Özgül ekserji fonksiyonu (kcal/kg)	fiz : Fiziksel
c_p : Sabit basınçtaki özgül ısı (kcal/kmol.K)	g : Giriş
Ξ^{fiz} : Fiziksel ekserji (kcal)	i : i. bileşen
$\Xi^{g,c}$: Akış (giriş/çıkış) ekserjisi (kcal)	kay : Kayıp
Ξ^l : Tersinmezlik nedeniyle kayıp ekserji (kcal)	kb : Kontrol bölgesi (kontrol hacmi veya kütlesi)
$\Xi^{kimreak}$: Kimyasal reaksiyon ekserjisi (kcal)	kim : Kimyasal
Ξ^Q : Isının ekserjisi (kcal)	kin : Kinetik
Ξ^W : Işın ekserjisi (kcal)	pot : Potansiyel
C_0 : Akışın hızı (m/s)	s : Sistem
g, \bar{g} : Özgül gibbs fonksiyonu (kcal/kg, kcal/kmol)	top : Toplam
g_F : Yerçekimi ivmesi (m/s^2)	0 : Çevre koşullarındaki özellik (P_0, T_0 koşullarındaki)
h : Özgül entalpi (kcal/kg)	00 : Ölü hal (P_{00}, T_0 halindeki çevresel maddenin hali)
Q : Isı (kcal)	1/2 : Giriş/Çıkış
S_{urt} : Entropi üretimi (kcal/K)	
T : Sıcaklık (K)	
W : İş (kcal)	
Z_0 : Yükseklik (m)	

Giriş

Enerjiyi kullanma açısından, demir-çelik sektörü enerji yoğun sektör olarak tanımlanmaktadır. Zira dünyada üretilen toplam enerjinin yaklaşık %12 sinin bu sektörde kullanıldığı ifade edilmektedir. Kaldı ki elektrik ark fırınlarına dayalı çelik üretimi bu sektör içerisinde birim üretim başına en fazla enerji harcayan üretim biçimi olarak ortaya konmaktadır (Bisio, Rubatto ve Martini 2000; Çamdalı, Tunç ve Karakas, 2000). Ekserji, belirli koşullardaki bir sistemin tersinir hal değişimi sonucunda çevrenin bulunduğu hale getirilmesi

sonucunda elde edilebilecek maksimum iş miktarıdır (Kotas, 1985; Çengel ve Boles, 1989). Ancak, gerçek hal değişimlerinde tersinmezliklerden dolayı toplam entropi artarken; toplam ekserji azalmaktadır. Bununla birlikte, 1940'larda M.I.T. Müh. Fakültesinde ortaya atılan ve ekserji kavramına eşdeğer olan *kullanılabilirlik (availability)* kavramı da; değişik enerji kaynakları kullanarak değişik ürünler üreten süreçlerde, enerjinin verimli kullanımı açısından değerlendirilebilmesi için önemli bir metot olarak ortaya konmuştur (Çengel ve Boles, 1989). Bu bakımdan, Ekserji (kullanılabilirlik, işgenlik) bilançosu ekserji kayıplarının kaynağının tanımlanmasında faydalı olmaktadır. Ekserji bilançosu, yapılan bir ekserji analizinin doğruluğunun kontrolü için de yararlı bir araçtır (Göğüş ve Çamdalı, 2001). Bu çalışmada, sıvı çelik üretiminde kullanılan 55 Ton/Dök. kapasiteli elektrik ark fırınında bilgisayar programı yardımıyla ekserji analizi yapılmış, analiz sonucunda elde edilen bulgular yorumlanmıştır. Literatürde çelik endüstrisinde enerji analizi yapan çalışmalara epeyce rastlanılsa da, ark fırınları için detaylı çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu bakımdan bu çalışmada bir anlamda böyle bir açığın kapılması amaç edinilmiştir.

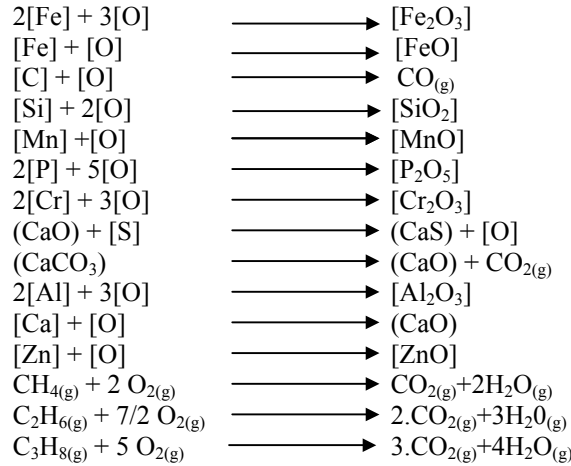
ÇELİK ÜRETİM İŞLEMİ

Genel olarak ark fırınlarında çelik üretim prosesi :

- Hurdanın şarjı
- Ergitme
- Oksidasyon
- Redüksiyon
- Alaşımlama
- Deoksidasyon
- Döküm alma
- Ocağın hazırlanması

şeklinde gerçekleşir. Yukarıda ifade edilen proses dahilinde yüksek sıcaklıklarda elementler ve/veya bileşikler arasında değişik hızlarda bir çok kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir (George Healy, ve David McBride, 1982; Schroeder, 1990). Bu reaksiyonların bazıları aşağıda standart reaksiyonlar şeklinde verilmiştir.

Ark Fırınında Meydana Gelen Temel Bazı Reaksiyonlar:



[]: Metal veya alaşım içerisinde, (): curuf içerisinde gerçekleşen reaksiyon.

ENERJİ TÜRLERİNİN EKSERJİLERİ

İşin Ekserjisi: Kapalı bir sistemin bir işlem sonucunda çevresi üzerine yaptığı iş W olsun. Bu işin $P_0 \Delta V$ kısmı atmosfer üzerine yapılacağından; işin ekserji değeri (1) eşitliği şeklinde yazılır

$$\Xi^W = W - P_0 \Delta V \quad (1)$$

Isının Ekserjisi: T sıcaklığındaki kontrol bölgesiyle olan bir etkileşimde kontrol bölgesine olan ısı transferinin ekserjisi:

$$\Xi^Q = Q_{kb} \cdot (1 - T_0 / T) \quad (2)$$

şeklinde tanımlanır.

Madde Akışının Ekserjisi

Kararlı bir madde akışının ekserjisi, dört forma ayrılır. Bunlar:

1. Kinetik ekserji
2. Potansiyel ekserji
3. Fiziksel ekserji
4. Kimyasal ekserjidir.

Kinetik ve potansiyel enerji düzenli formda olduğundan tamamıyla işe çevrilebilir. Dolayısıyla kinetik ve potansiyel ekserji yüksek kaliteli enerji olarak, buna karşın fiziksel ve kimyasal ekserji de daha düşük kaliteli enerji olarak tanımlanır (Kotas, 1985).

Madde akışı için toplam özgül ekserji, birim kütle için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\epsilon_{top} = \epsilon_{kin} + \epsilon_{pot} + \epsilon_{fiz} + \epsilon_{kim} \quad (3)$$

Çevreye ait referanslar kullanılarak kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal ekserji bileşenleri bir i bileşeni için aşağıdaki eşitlikler yardımıyla verilebilir.

$$\epsilon_{kin} = C_i v^2 / 2 \quad (4)$$

$$\epsilon_{pot} = g_i Z_{i0} \quad (5)$$

$$\epsilon_{fiz} = (h_{i1} - T_0 s_{i1}) - (h_{i0} - T_0 s_{i0}) \quad (6)$$

Kimyasal ekserji de tersinir olarak gerçekleştirilen bir sistemden elde edilen maksimum iştir. Bu prosesin ilk hali P_0 ve T_0 ile tanımlanan çevre halidir ve sistemin son hali de T_0 ve P_{i00} ile tanımlanan ölü haldir. P_{i00} söz konusu referans maddenin atmosferik ortamdaki kısmi basıncıdır. Mükemmel bir gaz mol başına kimyasal ekserji:

$$\epsilon_{kim} = \sum_i (\mu_{i0} - \mu_{i00}) \quad (7)$$

$$\mu_{i0} = g_i(P_0, T_0) + RT_0 \ln(P_{i0}/P_0) \quad (7a)$$

$$\mu_{i00} = g_i(P_0, T_0) + RT_0 \ln(P_{i00}/P_0) \quad (7b)$$

$$g_i(P_0, T_0) = h_{i0} - T_0 s_{i0} \quad (7c)$$

(7a) ve (7b) eşitliklerinde:

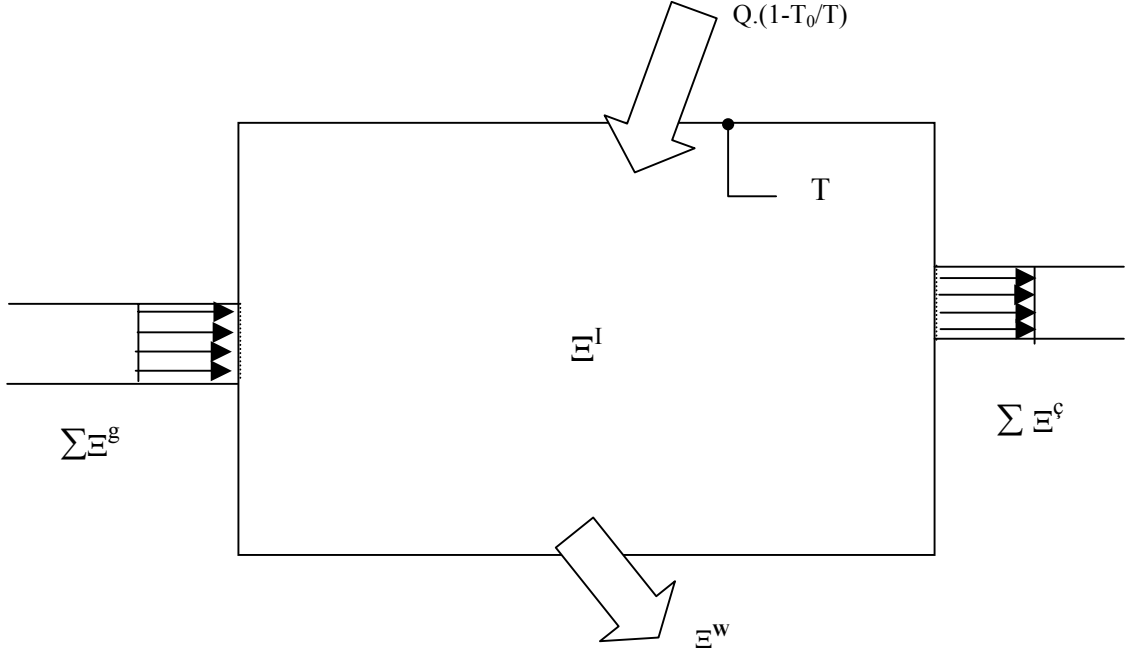
P_{i0} : i. bileşenin kısmi basıncı; P_{i00} : i. bileşenin çevredeki kısmi basıncıdır.

BİR SİSTEMİN GENEL EKSERJİ DENGESİ

Şekil 1' de verilen açık bir sistemin ekserji dengesini aşağıdaki (8) eşitliği şeklinde yazmak mümkündür.

$$\Delta \Xi^s = \sum \Xi^g - \sum \Xi^c - \Xi^W + Q \cdot (1 - T_0 / T) - \Xi^I \quad (8)$$

Bu eşitlik ekserjinin tersinmezlikler nedeniyle azaldığını göstermektedir.

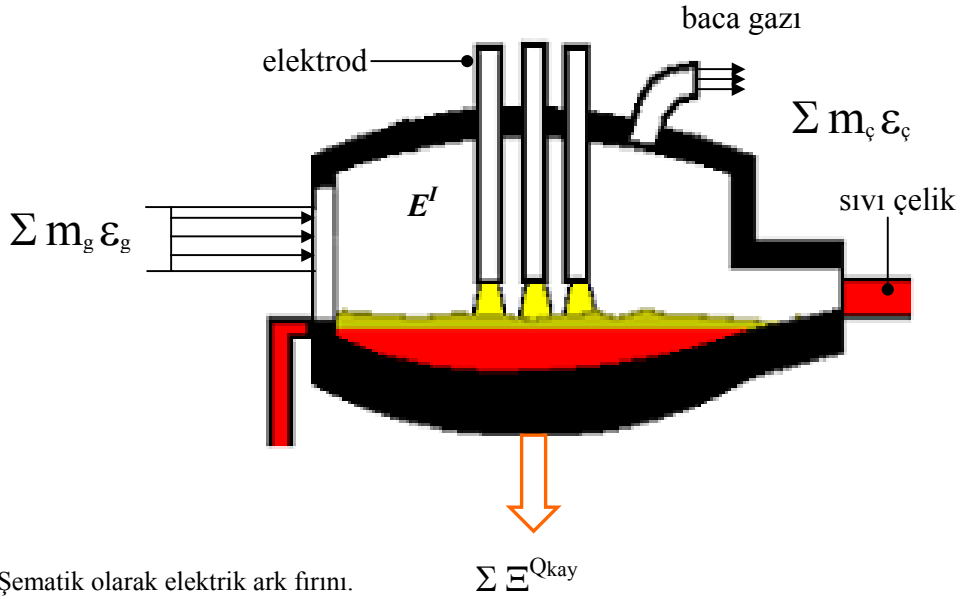


Şekil 1. Bir sistemin genel ekserji dengesi.

Elektrik Ark Fırını Uygulaması

Eşitlik (8) Şekil 2'de şematik olarak gösterilen elektrik ark fırınına uygulandığında, (9) eşitliği elde edilir. Bu eşitlik elde edilirken aşağıdaki kabuller yapılmıştır (Çamdalı, 1998):

1. Elektrik ark fırını sürekli akışlı sürekli açık sistem (SASA) kabul edilmiştir.
2. Baca gazları mükemmel gaz karışımı olarak ele alınmıştır.



Şekil 2. Şematik olarak elektrik ark fırını.

$$\sum m_g \epsilon_g = \sum m_c \epsilon_c + \sum \Xi^Q + \Xi^I \quad (9)$$

Yukarıdaki ifadeler i. bileşen için :

$$\epsilon_{g/c} = (h_i - h_{i0}) - T_0 (s_i - s_{i0}) \quad (10)$$

$$h_i - h_{i0} = \int_{298}^T c_p dT \quad (11)$$

$$s_i - s_{i0} = \int_{298}^T (c_p / T) dT \quad (12)$$

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 \quad (13)$$

$$\Xi^Q = Q_{kay} (1 - T_0 / T) \quad (14)$$

$$\Xi^I = \int_1^2 T_0 dS_{üirt} \quad (15)$$

(13) eşitliğine göre tanımlanan bazı maddelere ait a, b ve c katsayıları ile sabit basınçtaki özgül ısınma ısıları Tablo 1'de verilmiştir (Kubaschewski, Evans ve Alcock, 1989).

Tablo 1. Bazı maddelere ait sabit basınçtaki özgül ısınma ısıları ile bunların a, b ve c sabitleri (Kubaschewski, Evans ve Alcock, 1989).

Madde	a	b	c	$\bar{c}_p = a + b.T + c.T^2$ (kcal/kmol .K)
Fe	4.18	5.92×10^{-3}	0	$4.18 + 5.92 \times 10^{-3} T$
C	4.1	1.02×10^{-3}	-2.1×10^5	$4.1 + 1.02 \times 10^{-3} T - 2.1 \times 10^5 T^2$
<Si>	5.72	0.59×10^{-3}	-0.99×10^5	$5.72 + 0.59 \times 10^{-3} T - 0.99 \times 10^5 T^2$ ($298 < T < MP$)
{Si}	6.12	-	-	6.12 ($MP < T < 1873$)
FeO	12.38	1.62×10^{-3}	-0.38×10^5	$12.38 + 1.62 \times 10^{-3} T - 0.38 \times 10^5 T^2$
<Fe2O3> _α	23.5	18.6×10^{-3}	-3.55×10^5	$23.5 + 18.6 \times 10^{-3} T - 3.55 \times 10^5 T^2$ ($298 < T < 950$)
<Fe2O3> _β	36	-	-	36 ($950 < T < 1050$)
<Fe2O3> _δ	31.7	1.76×10^{-3}	-	$31.7 + 1.76 \times 10^{-3} T$ ($1050 < T < 1873$)

◊ : katı fazı; {} : sıvı fazı; <>_α : α-fazı; <>_β : β-fazı; <>_δ : δ-fazı; MP : ergime noktası

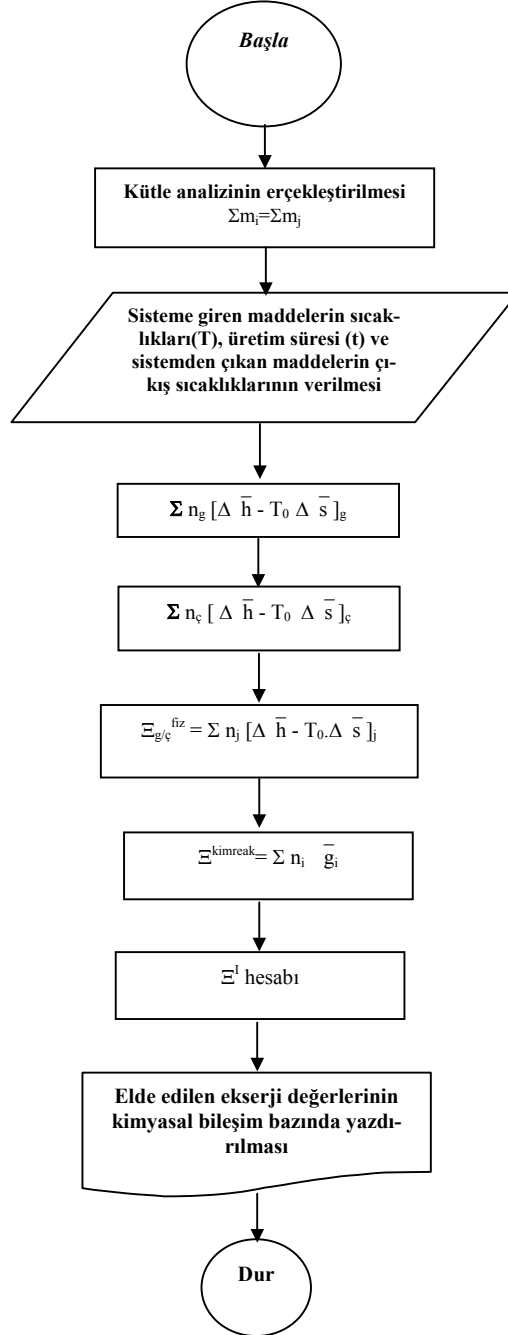
EKSERJİ VERİMİ

Ekserji analizine göre verim, işlem esnasındaki ekserji kayıplarının ölçüsü olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla ekserji veriminin matematiksel ifadesini aşağıdaki (16) eşitliği şeklinde yazmak mümkündür.

$$\psi = \sum m_c \epsilon_c / \sum m_g \epsilon_g \quad (16)$$

EKSERJİ ANALİZİNİN BİLGİSAYAR ÇÖZÜMLEMESİ

Elektrik ark fırını için ekserji analizi, Şekil 3'de akış diyagramı verilen ve Q-Basic dilinde yazılan programa göre gerçekleştirilmiştir. Programın çalıştırılması sonucunda elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 2-6'da verilmiştir



Şekil 3. Ekserji analizi yapan bilgisayar programının özet akış diyagramı.

Ekserji Analizinin Sayısal Sonuçları

Tablo 2. Elektrik ark fırınına giren maddelerin kimyasal bileşim bazında ekserji değerleri.

1. Hurda Şarjı (500 K)		3. Hurda Şarjı (500 K)	
Kimyasal Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)	Kimyasal Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)
Fe (*)	185384	Fe	71259
C (**)	3499	C	1345
Si (***)	1149	Si	442
Mn(****)	1318	Mn	507
P	126	P	48
S	199	S	77
Cr	809	Cr	311
Ni	233	Ni	90
Mo	84	Mo	32
Cu	303	Cu	116
Toplam	193104	Toplam	74227
<i>Soğutma Suyu (303 K)</i>			
Kimyasal Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)		
H ₂ O	25443		
Toplam	25443		

Not: Hesaplamalarda bileşenlere ait sadece fiziksel ekserji göz önüne alınmıştır. Bazı bileşenlerin fiziksel ekserjilerinin hesabı aşağıda verilmiştir.

$$(*) : \Xi^{Fe} = n_{FeH1M} \cdot [\Delta \bar{h}_{Fe} - 298 T_0 \Delta \bar{s}_{Fe}]$$

$$(**) : \Xi^C = n_{CH1M} \cdot [\Delta \bar{h}_C - 298 T_0 \Delta \bar{s}_C]$$

$$(***) : \Xi^{Si} = n_{SiH1M} \cdot [\Delta \bar{h}_{Si} - 298 T_0 \Delta \bar{s}_{Si}]$$

$$(****) : \Xi^{Mn} = n_{MnH1M} \cdot [\Delta \bar{h}_{Mn} - 298 T_0 \Delta \bar{s}_{Mn}]$$

Burada :

- n_{FeH1M} : Fe'in 1. hurda şarjı içerisindeki mol miktarı
 n_{CH1M} : C' nun 1. hurda şarjı içerisindeki mol miktarı
 n_{SiH1M} : Si'un 1. hurda şarjı içerisindeki mol miktarı
 n_{MnH1M} : Mn'in 1. hurda şarjı içerisindeki mol miktarı

Tablo 3. Kimyasal reaksiyon ekserjileri.

Tozda Meydana Gelen Reaksiyonların Ekserjileri		Curufta Meydana Gelen Reaksiyonların Ekserjileri	
Reaksiyon Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)	Reaksiyon Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)
Fe ₂ O ₃	623975	CaO	830
CaO	30	SiO ₂	1897975
MnO	65475	FeO	760758
Cr ₂ O ₃	5345	MnO	589114
ZnO	761	Fe ₂ O ₃	344262
Toplam	695586	P ₂ O ₅	101331
Baca Gazında Meydana Gelen Reaksiyonların Ekserjileri		Al ₂ O ₃	551667
		Cr ₂ O ₃	35771
Reaksiyon Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)	Toplam	4281708
CO	3226025		
CO ₂	1169134		
CH ₄	116352		
C ₂ H ₆	303		
C ₃ H ₈	70		
Toplam	4511884		

Tablo 4. Ark fırınında meydana gelen endotermik reaksiyonlar için gerekli ekserji.

Endotermik Reaksiyonlar	
Kimyasal Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)
CaCO ₃	316480
CaS	7068
Toplam	323548

Tablo 5. Elektrik ark fırınında çıkan maddelerin Kimyasal Bileşim Bazında ekserji değerleri.

Sıvı Çelik (1873 K)		Toz (1673 K)	
Kimyasal Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)	Kimyasal Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)
Fe	12864094	Fe ₂ O ₃	100297
C	24286	CaO	10200
Si	16280	MnO	8039
Mn	49123	Al ₂ O ₃	17350
P	2313	Cr ₂ O ₃	5190
S	8687	SiO ₂	6324
Cr	14187	C	8474
Ni	14419	ZnO	101
Mo	3256	Toplam	155975
Cu	17825		
Toplam	13014470		
Curuf (1873 K)		Curuf Artığı (1873 K)	
Kimyasal Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)	Kimyasal Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)
CaO	339373	Fe	69224
SiO ₂	182136	C	131
FeO	177283	Si	88
MnO	87818	Mn	264
Fe ₂ O ₃	62914	P	12
P ₂ O ₅	18806	S	47
Al ₂ O ₃	68080	Cr	76
Cr ₂ O ₃	41859	Ni	78
CaS	2517	Mo	18
MgO	23	Cu	96
Toplam	980809	Toplam	70034
Baca Gazı (1673 K)		Soğutma Suyu (311 K)	
Kimyasal Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)	Kimyasal Bileşimi	Ekserji Değeri (kcal)
CO	665814	H ₂ O	169017
CO ₂	321203	Toplam	169017
H ₂ O	185293		
N ₂	517		
Toplam	1172826		

Tablo 6. Sistemin ekserji dengesi.

Sisteme Giren Ekserji		Sistemden Çıkan Ekserji	
Sisteme Giren Maddeler	Ekserji Değeri (kcal)	Sistemden Çıkan Maddeler	Ekserji Değeri (kcal)
1. Hurda Şarjı	193104	Sıvı Çelik	13014470
2. Hurda Şarjı	0	Toz	155975
3. Hurda Şarjı	74227	Curuf	980809
Kok	0	Curuf Artığı	70034
Curuf Yapıcılar	0	Baca Gazı	1172826
Deoksidasyon Maddeleri	0	Soğutma Suyu	169017
Elektrod	0	Endotermik Reaksiyon	323548
Doğal Gaz	0	Kayıp Ekserji	12745731
Oksijen	0	Toplam	28632410
Soğutma Suyu	25443		
Elektrik Enerjisi	18850458		
Kimyasal Reaksiyonlar	9489178		
Toplam	28632410		

Ekserji Verimi:

$$\psi = \frac{\sum m_c \epsilon_c}{\sum m_g \epsilon_g} = (1 - 12745731/28632410) = 0.55$$

$$\% \psi = \% 55$$

Sonuç

Bu çalışmada, fırın içerisindeki kayıp ekserjinin toplam ekserji içerisindeki oranı % 45 olarak elde edilmiştir (Tablo 6). Bu oran, sıvı çelikten sonra sistemden değişik yollarla çıkan maddelerin ekserjilerinden daha büyüktür. Elde edilen söz konusu değer literatürde verilen değerlere yakındır (Bisio, 1993). Ekserji kaybı kimyasal reaksiyonlardan ve ısı transferi gibi değişik nedenlerden kaynaklanmaktadır.

Baca gazının ekserjisinden daha etkin olarak yararlanmak için yeni önlemlerin alınması; maliyetlerin azaltılmasında etkili olacaktır.

Bir dökümde yaklaşık 600 Ton olarak kullanılan soğutma suyu, 8 °C sıcaklık farkı ile fırını terk etmektedir. Termodinamiğin birinci yasası açısından değerlendirildiğinde; soğutma suyu önemli bir miktarda fırından enerji taşımaktadır (Çamdalı, 1999). Ancak, ekserji analizi açısından su ancak toplam ekserjinin % 0.6'sını fırından taşımaktadır. Dolayısıyla soğutma suyunun ekserjisinin oldukça düşük değerde olduğu görülmektedir. Bu bakımdan sistemi soğutmak için kullanılan suyun enerji tasarrufu açısından da seçiminin isabetli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Çeliğin çıkış sıcaklığının kontrol edilmesi ile daha az enerji harcayarak aynı üretimi yapmak mümkün olacaktır.

İstenilen bileşimdeki çeliğin üretiminde ciddi bir rol oynayan kimyasal reaksiyonların önemli miktarda ekserji değerine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Üreticinin üretime başlamadan önce reaksiyon enerjilerini de dikkate alması; enerji maliyetlerinin düşürülmesinde etkili olacaktır.

Ark fırınında birinci yasaya göre hesap edilen enerji verimi % 96 olmasına rağmen (Çamdalı, 1998); ikinci kanun analizine göre elde edilen ekserji verimi % 55 elde edilmiştir.

Kaynaklar

- 1 BISIO G. Exergy Method For Efficient Energy Resource Use in The Steel Industry, Energy 18, 971-985, 1993.
- 2 BISIO G, RUBATTO G, MARTINI R. Heat transfer, Energy Saving and Pollution Control in UHP Electric Arc Furnaces, Energy 25, 1047-1066, 2000.
- 3 ÇAMDALI Ü. Elektrik Ark Fırını Yöntemi İle Çelik Üreten Bir Tesiste Termodinamiğin İkinci Kanununun Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Mart 1998.
- 4 ÇAMDALI Ü. Elektrik Ark Fırınında Gerçekleştirilen Sıvı Çelik Üretimi İçin Enerji Analizi, Mühendis ve Makina, Sayı 473, Sayfa 29-33, 1999.
- 5 ÇAMDALI Ü, TUNÇ M, KARAKAS A. Second Law Analysis of Thermodynamics in The Electric Arc Furnace at A Steel Producing Company, Energy Conversion and Management, 44: 961-973, 2003.
- 6 ÇENGEL YA, BOLES MA. Thermodynamics: An Engineering Approach, McGraw Hill Book Company, 1989.
- 7 GEORGE Healy W, DAVID MCBRIDE L, BOF Steel Making, Iron and Steel Society of AIME, 1982.
- 8 GÖĞÜŞ Y, ÇAMDALI Ü. Çevre Koşulları Değişen Bir Kontrol Hacminin Ekserji Bilançosu Ve Bazı Uygulamalar, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi Cilt 21, No. 1, 33-41, 2001.
- 9 KOTAS TJ. The Exergy Method of Thermal Plants Analysis, Butterworths, London, 1985.
- 10 KUBASCHEWSKI O, EVANS EL, ALCOCK CB. Metallurgical Thermo-Chemistry, Pergamon Press, 1989.
- 11 SCHROEDER DL. Use of Energies in Electric Furnace Steelmaking Shops, New York, John Wiley & Sons Inc., 1990.