

İNDÜKSİYON OCAKLARINDA ENERJİ DENKLİĞİ

ENERGY BALANCE IN THE INDUCTION FURNACES

Nilan Dağlı¹, Uğur Cengiz¹

¹Bilecik Demir Çelik San. Tic. A.Ş, Türkiye

Anahtar Kelimeler: enerji verimliliği, indüksiyon ocakları, sankey diyagramı, enerji kayıpları

Abstract

Energy Efficiency, as a definition; can be expressed as the use of less energy to produce the same or greater quantity of product. In addition to its environmental benefits, energy efficiency studies also improve the total efficiency of companies by increasing production and competition. The consumption of approximately 12% of the electrical energy produced in the world in the Iron and Steel sector reveals the magnitude of the energy used in this sector.

Iron and Steel industry has extremely high energy consumption values. Therefore, it is extremely important for steel producers to reduce energy costs, which constitute approximately 20-25% of total production costs.

Melting with induction furnaces, which is a kind of melting furnace, is a non-contact melting method used to heat metal parts at specified temperatures and times.

Features such as ease of inspection, high efficiency, low material losses and less environmental pollution compared to other melting furnaces make the use of induction furnaces advantageous.

In this study, the energy consumption values used in induction furnaces in Bilecik Demir Çelik A.Ş. were calculated and interpreted with the Sankey Diagram. The energy efficiency of the induction furnace was calculated as 58%, with the energy value of 358 kWh required to melt the steel scrap in induction furnaces. In addition, system losses, refractory and coil/cable cooling water losses, radiation losses and energy losses for slag were calculated, these determined data were compared with the values of different furnace manufacturers, and were brought to the literature by detailing.

Özet

Enerji Verimliliği tanım olarak; aynı ya da daha fazla miktarda ürün üretmek için daha az enerji kullanımı olarak ifade edilebilir. Enerji verimliliği çalışmaları çevreye olan faydalarının yanı sıra üretimi ve rekabeti artırarak şirketlerin toplam verimliliğini de iyileştirmektedir. Son yıllarda Dünya genelinde meydana gelen enerji krizi ile enerji verimliliği konusu tüm firmaların önceliği haline gelmiştir.

Dünyada üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %12'sinin Demir – Çelik sektöründe tüketilmesi, bu sektörde kullanılan enerjinin büyüklüğünü ortaya koymaktadır.

Demir - Çelik sanayi son derece yüksek enerji tüketim değerlerine sahiptir. Dolayısıyla toplam üretim maliyetlerinin yaklaşık %20-25'ini oluşturan enerji maliyetlerini düşürmek, çelik üreticileri için son derece önemli olmaktadır.

Bir tür ergitme fırını olan indüksiyon ocakları ile ergitme, metal parçaların belirtilen sıcaklık ve sürelerde ısıtmakta kullanılan temassız bir ergitme yöntemidir.

Denetim kolaylığı, yüksek verimliliği, madde kayıplarının düşük olması ve diğer ergitme fırınlarına göre daha az çevre kirliliği yaratması gibi özellikleri indüksiyon ocaklarının kullanımını avantajlı kılmaktadır.

Bu çalışmada, Bilecik Demir Çelik A.Ş'de indüksiyon ocaklarında kullanılan enerji tüketim değerleri hesaplanmış ve Sankey Diyagramı ile yorumlanmıştır. İndüksiyon ocaklarında çelik hurdasını ergitmek için gereken 358 kWh enerji değeri ile indüksiyon ocağının enerji verimi %58 olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında sistem kayıpları, refrakter ve bobin/kablo soğutma suyu kayıpları, radyasyon kayıpları ile cüruf için harcanan enerji kayıpları hesaplanmış, tespit edilen bu veriler farklı ocak üreticilerinin değerleriyle kıyaslanmış, detaylandırılarak literatüre kazandırılmıştır.

1.Giriş

Enerji tasarrufu kavramı, günlük hayatımızda olduğu kadar bu enerjinin çok büyük bir bölümünü kullanan endüstriyel tesislerde de hayati önem taşımaktadır. Enerji tasarrufu aynı işi daha az enerji kullanarak yapmaktır [1].

Birincil enerji kaynaklarının azalması ve enerjiye olan ihtiyacın artması insanları alternatif enerji kaynaklarına ve enerjiyi verimli kullanmaya yöneltmektedir. Artan enerji ihtiyacı, enerjiyi daha verimli kullanarak zararsız, ucuz ve kolay bir yol ile elde edilebilmektedir. Enerjinin verimli kullanımı, aynı miktardaki üretimin daha az enerji kullanılarak gerçekleştirilmesi olarak açıklanabilir. Bilindiği üzere ülkemiz enerjiye olan ihtiyacının çoğunu dışarıdan karşılamaktadır. Bu açıdan bakıldığında, sanayi sektöründe enerjinin verimli kullanılması önemli bir hal almaktadır. Sanayi sektöründe üretim kalitesi ve üretim miktarının düşmesine neden olmadan enerji tüketimini azaltarak verimlilik sağlanabilmektedir.

Sanayide enerji verimliliğini sağlamanın temeli, bilinçli ve etkili bir enerji yönetim programı geliştirmektir. Enerji yönetiminde en önemli kural enerjiyi üreten ve tüketen sistemlerin her zaman iyi durumda olmasını sağlamaktan geçer. Gerekli bakımlar ve iyileştirmeler yapılarak gereksinimler en iyi şekilde karşılanabilir. Başka bir tanımla Enerji Yönetimi Sistemi ürün kalitesinden güvenlikten veya çevresel tüm koşullardan feragat etmeksizin ve üretimi azaltmaksızın enerjinin daha verimli kullanımı doğrultusunda yapılandırılmış ve organize edilmiş disiplinli bir çalışmadır.

Enerji yönetim sisteminin başarılı olması için dört ana hedef bulunmaktadır [2].

Bunlar:

- Üretenin verimini artırmak (motor, kazan, kompresör, vb.),
- Tüketicinin kullanımını azaltmak,
- Yüksek güç tüketilen noktaları sürekli kontrol altında tutmak,
- Enerjiyi en ekonomik kullanmaktır.

Demir-Çelik endüstrisi enerjinin yoğun olarak kullanıldığı sektörlerden birisidir.

Dünyada üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %12'sinin Demir-Çelik sektöründe tüketilmesi, bu sektörde kullanılan enerjinin büyüklüğünü ortaya koymaktadır ve bu enerji miktarının düşürülmesi çelik üreticileri için son derece önemlidir.

Bilecik Demir Çelik'te (BDÇ) , ergitme ünitesi olarak indüksiyon ocakları kullanılmaktadır. İndüksiyonla ergitme, metal parçaların (şarj malzemesi) belirtilen

sıcaklık ve sürelerde ısıtmakta kullanılan temassız bir ısıtma ve ergitme yöntemidir.

Denetim ve yatırım kolaylığı, yüksek enerji verimliliği, yüksek elektrik iletim verimliliği, yüksek metalik malzeme verimliliği, tam otomatik üretime uygunluğu, göreceli düşük emisyon ve atık, çevre kirliliği yaratmaması gibi üstünlüklerinden dolayı indüksiyon ocakları son yıllarda demir – çelik sektöründe ilgi çekici hale gelmiştir.

1.2. Enerji verimliliği nedir?

Enerji verimliliği, tüketilen enerji miktarının, üretimdeki miktar ve kaliteyi düşürmeden, ekonomik kalkınmayı ve sosyal refahı engellemeden en aza indirilmesidir. Daha geniş anlamıyla enerji verimliliği, gaz, buhar, ısı, hava ve elektrikteki enerji kayıplarını önlemek, çeşitli atıkların geri kazanımı ve değerlendirilmesi veya ileri teknoloji ile üretimi düşürmeden enerji talebinin azaltılması, daha verimli enerji kaynakları, gelişmiş endüstriyel süreçler, enerji geri kazanımları gibi etkinliği artırıcı önlemlerin bütünüdür [3].

1.3. İndüksiyon ocakları çalışma prensibi

Bir iletken, içinden alternatif akım geçtiğinde civarında alternatif manyetik alan oluşturur. Aynı şekilde iletken bir malzeme alternatif manyetik alanın içine girdiğinde üzerinde bir akım akışı oluşur. Bu akım, dıştaki mevcut manyetik alanı yok edici yönde bir zıt manyetik alan uygular. Dışarıdaki manyetik alan malzemenin içine ilerlerken bu zıt manyetik alanı yok edici yönde bir zıt manyetik alan oluşturur. Zıt manyetik alanın şiddeti frekansın bir fonksiyonudur. Frekans arttıkça yüzeyde oluşan akım, zıt manyetik alan oluşturmada daha etkili olur. İndüksiyon bobini ve ocağın içerisindeki metal, İndüksiyon ocağının ergitme için gerekli en temel donanımını oluşturmaktadır. İndüksiyon bobininden geçirilen alternatif akım, sürekli yön değiştiren elektromanyetik değişken alanlar meydana getirir. Malzeme içerisinde oluşan bu endüktif elektrik alanları ise malzemenin öz direnci vasıtası ile ısı enerjisine dönüşür [4].

İndüksiyon ocaklarının içerisinde metal ve alaşımlarının ergitildiği bakır bobinlerin içerisinden geçen suyla soğutulan yüksek ısıya dayanıklı, refrakter malzemelerden oluşmuş bir hazne vardır ve bu hazneye ocak potası denir.

Ocak bobini, elektriksel kayıplardan meydana gelen ısıdan ve ergimiş banyonun konveksiyonla ısıtılmasından korumak için meydana gelen ısıyı dağıtmak üzere genellikle bir kapalı soğutma suyu devresiyle soğutulur. İndüksiyon ocaklarının kapalı devredeki soğutma-suyu

dolaşım miktarı ocak tipine, astarına, büyüklüğüne ve çalışılan güce göre değişmektedir.

Elektrik ile çalışan İndüksiyon ocaklarında özgül enerji tüketimini 600 kWh üzerine çıkararak çok sayıda kayıplar vardır. Bu kayıplar enerji tüketimini negatif yönde etkilemektedir. Yapılan çalışmada sistem kayıpları, refrakter ve bobin/kablo soğutma suyu kayıpları, radyasyon kayıpları ile cüruf için harcanan enerji kayıpları hesaplanmıştır.

2. Deneysel Çalışmalar:

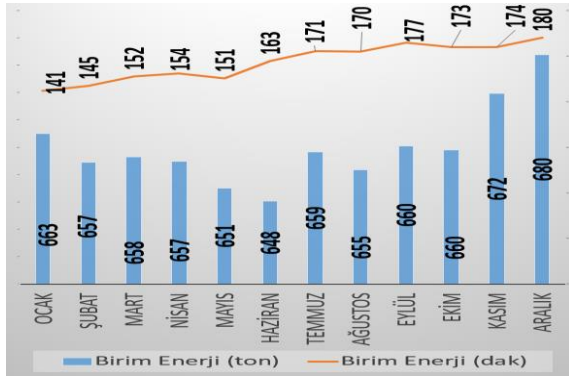
Bilecik Demir Çelik'te kullanılan İndüksiyon ocaklarında yapılan çalışmalarda 1 ton metalin 1600°C'ye çıkarmak için gereken ısı miktarı **358 kWh/ton** olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1. Fe'in belirli sıcaklıklardaki Cp değerleri

Fe Sıcaklık Aralığı	Cp _{Fe}
25-760 °C	4,18+5,92x10 ⁻³ T cal/mol
760-908 °C	9 cal/mol
908-1401 °C	1,84+4,66x10 ⁻³ T cal/mol
1401-1537 °C	10,5 cal/mol
1537-1600 °C	10 cal/mol

$$\Delta H_{Fe} = \int_{T_1}^{T_2} C_{p(Fe)} dt + \Delta H_{erg.} \quad (1)$$

$$\Delta H_{(Fe)} = 358 \text{ kWh/ton}$$



Şekil 1. İO 2021 yılı birim enerjileri (kwh/ton)

Şekil 1'de BDC İndüksiyon ocaklarında kullanılan ton başına birim enerjileri görülmektedir.

İndüksiyon ocaklarında kullanılan enerji miktarı ortalama olarak 624 kWh/ton'dur. İndüksiyon ocaklarında yapılan hesaplamalar sonucunda kullanılan 624 kWh/ton enerjinin 358 kWh/ton'u (%57,37) ertitme için kullanılan enerjidir.

Geriye kalan enerji miktarları ise ocağın çalışma şartlarında gerçekleşen kayıplardır.

Bu kayıplar:

- Tufalin reaksiyonu için harcanan enerji kayıpları,
- İletim kayıpları,
- Refrakter kayıpları,
- Soğutma suları bobin kayıpları,
- Radyasyon kayıpları,
- Cüruf için harcanan enerji,
- Oksitlenme reaksiyonları

2.1. Tufalin reaksiyonu için harcanan enerji kayıpları:

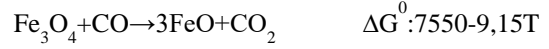
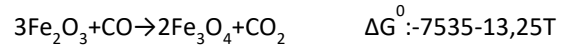
İndüksiyon ocaklarında şarj sırasında kullanılan tufal ergime sırasında

Hematit → Manyetit → Wüstit

(Fe₂O₃) (Fe₃O₄) (FeO)

(%1) (%4) (%95)

dönüşümleri yapmaktadır.



Tufalin metalik demire dönüşümleri sırasında oluşan reaksiyonun sıcaklığa bağlı serbest enerji değişimi (ΔG^0) -5705-0,55 T dir. 1600 °C de tufalin ergimesi için gereken ısı miktarının formülü:

$$\Delta G_{1600} = \Delta G^0 + RT \ln K. \quad (2)$$

$$\Delta G_{1600} = 111,8 \text{ kWh}$$

$$= 4 \text{ kWh/ton} (\%0,64)$$

2.2 İletim kayıpları:

İndüksiyon ocaklarında ertitme bobinlerden geçen alternatif akımla meydana gelir. Bobinlerden akım geçerken oluşan iletim kaybı formülü:

$$Q = 4I^2 \times R_{cu} \quad (3)$$

$$Q_{iletim} = 2892 \text{ kWh}$$

$$= 103,3 \text{ kWh/ton} (\%6)$$

2.3. Refrakter kayıpları:

$$Q_{\text{Refrakter}} = \frac{T_s - T_w}{R} \times 10^{-3} \quad (4)$$

(T_s : 1600 °C T_{duvar} : 45 °C T_{wtaban} : 140 °C Duvar astar kalınlığı: 0,415 m Taban astar kalınlığı: 0,80 m R: 0,01 Kw)

$$Q_{\text{cduvar}} = \frac{1600 - 45}{0,01 \times 0,415} \times 10^{-3} = 374$$

$$= 20,07 \text{ kWh/ton}$$

$$Q_{\text{ctaban}} = \frac{1600 - 140}{0,01 \times 0,80} \times 10^{-3} = 182 \text{ kW}$$

$$= 9,7 \text{ kWh/ton}$$

$$Q_{\text{ctoplam}} = 29,77 \text{ kWh/ton} \quad (\%5)$$

2.4. Soğutma suları bobin kayıpları:

Tablo2. Bobinlerden geçen su sıcaklıkları ve akış debileri

1.Bölüm Giriş Su Sıcaklığı	1.Bölüm Çıkış Su Sıcaklığı	1.Bölüm Akış (lt/dk)
37,2°C	47,2°C	2246
2.Bölüm Giriş Su Sıcaklığı	2.Bölüm Çıkış Su Sıcaklığı	2.Bölüm Akış (lt/dk)
37°C	43,1°C	2285

$$Q = m_{su} \times c_{psu} \times \Delta T_{su} \quad (5)$$

$$Q_1 = 2746 \text{ kWh}$$

$$Q_2 = 1536 \text{ kWh}$$

$$Q_{\text{Toplam}} = 152 \text{ kWh/ton} \quad (\%24)$$

2.5. Radyasyon kayıpları:

$$Q_{\text{radyasyon}} = (q_{\text{cüruf}} - q_{\text{hava}}) \quad (6)$$

$$Q_{\text{radyasyon}} = \sigma \times \epsilon_{\text{cüruf}} \times (T_{\text{cüruf}}^4 - T_{\text{hava}}^4) \quad (7)$$

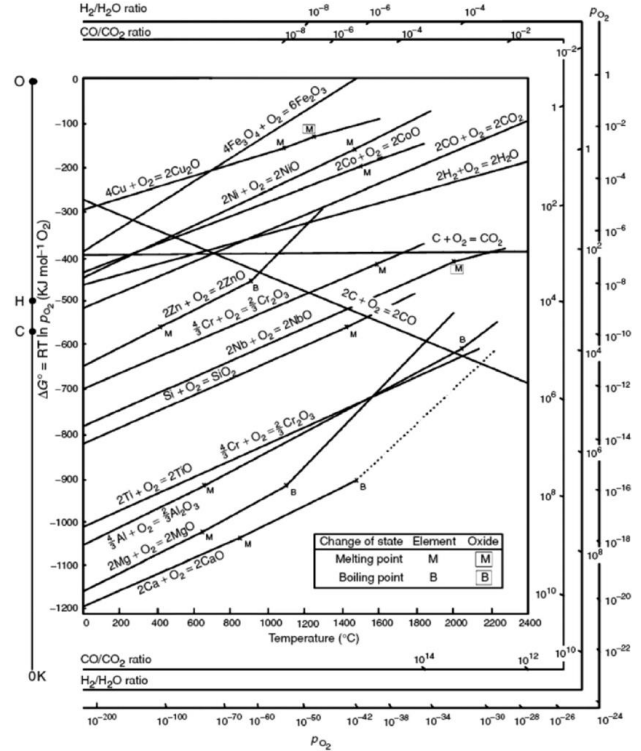
$$= 11,4 \text{ kWh/ton} \quad (\%2)$$

2.6. Cüruf için harcanan enerji:

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \quad (8)$$

$$= 17,57 \text{ kWh/ton} \quad (\%3)$$

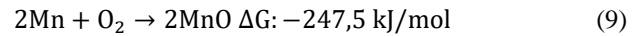
2.7. Oksitlenme reaksiyonları



Şekil 2. Oksitlenme reaksiyonları için ellingham diyagramı

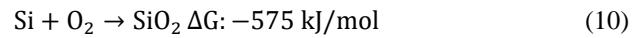
https://www.researchgate.net/figure/Ellingham-diagram-for-the-formation-of-oxides-based-on-their-standard-free-energy-of_fig2_313.886.183

Manganoksit



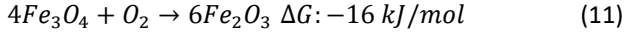
$$\Delta G = -13,4 \text{ kWh/ton} \quad (\%2)$$

Silika



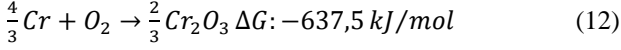
$$\Delta G = -30 \text{ kWh/ton} \quad (\%4)$$

Manyetit



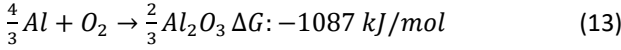
$$\Delta G = -0,02 \text{ kWh/ton} (\%0,003)$$

Kromoksit



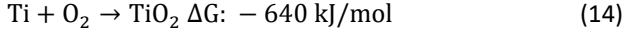
$$\Delta G = -1,07 \text{ kWh/ton} (\%0,1)$$

Alümina



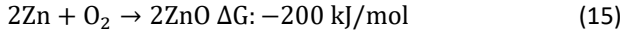
$$\Delta G = -30 \text{ kWh/ton} (\%4)$$

Titanyum



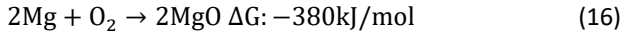
$$\Delta G = -1,3 \text{ kWh/ton} (\%0,2)$$

Çinko



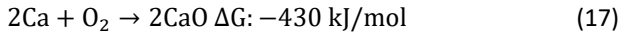
$$\Delta G = -0,02 \text{ kWh/ton} (\%0,003)$$

Magnezyumoksit



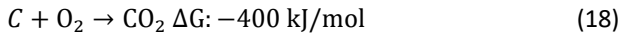
$$\Delta G = -1,6 \text{ kWh/ton} (\%0,2)$$

Kalsiyumoksit



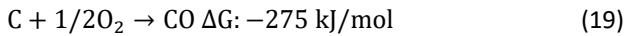
$$\Delta G = -2 \text{ kWh/ton} (\%0,3)$$

Karbondioksit



$$\Delta G = -5,6 \text{ kWh/ton} (\%0,9)$$

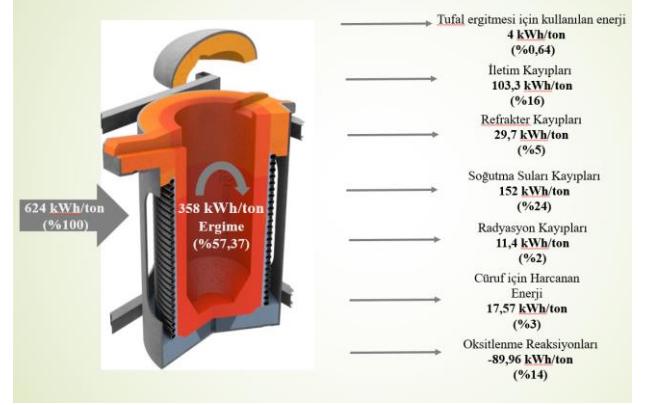
Karbonmonoksit



$$\Delta G = -3,9 \text{ kWh/ton} (\%0,7)$$

3.Sonuçlar ve Tartışma:

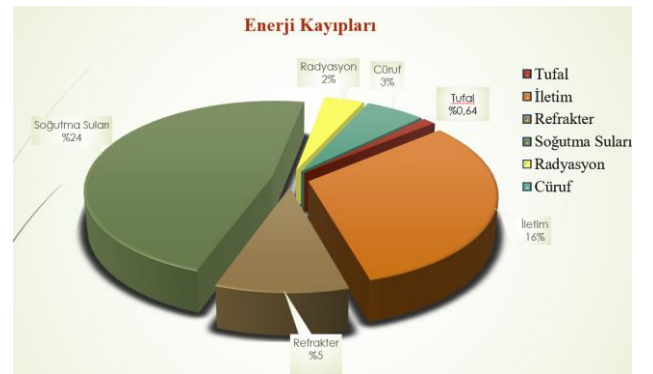
Yapılan hesaplamalar sonucunda bir döküm için ortalama kullandığımız 624 kWh/ton enerjinin sadece 358 kWh/ton'u ergitme için kullanılmaktadır. Bu da %57,37 verimliliği gösterir. Geriye kalan, ergitme için kullanılmayan enerji miktarı ise ocağın çalışması sırasında gerçekleşen kayıp oranlarıdır.



Şekil 3. BDC İ.O enerji denkleği Sankey diyagramı

Şekil 3'de verilen Sankey diyagramından da görüleceği gibi ocaklarda kullanılan enerjinin %57,37'si ergitme için kullanılırken, %0,64'ü tufalin ergitilmesinde, %16'sı iletimde (bobin kaybı), %5'i refrakterde, %24'ü bobin soğutma sularında, %2'si radyasyon ve %3'ü cüruf için kaybedilen enerjidir.

Ocaklarda hurda demirin ergitme sürecinde gerçekleşen ve görüldüğü gibi ekzotermik olan oksitlenme reaksiyonlarından açığa çıkan enerji miktarı ise 89,96 kWh/ton'dur.



Şekil 4. Enerji kayıpları

Şekil 4'de görüldüğü gibi BDC İndüksiyon Ocakları'nın enerji kayıplarının büyük çoğunluğunu %24'lük kısımla bobin soğutma suları oluşturmaktadır.

4.Sonuç:

Sonuç olarak Bilecik Demir Çelik A.Ş.' de indüksiyon ocaklarında kullanılan enerji tüketim değerlerinin hesaplanması yapılmış ve hesaplamalar sonunda ergitme için gereken ısı miktarı 358 kWh/ton ve verim %57,37 olarak tespit edilmiştir. Kullanılan özgül enerji miktarını 624 kWh üzerine çıkaran sistem kayıpları, refrakter ve bobin/kablo soğutma suyu kayıpları, radyasyon kayıpları ile cüruf için harcanan enerji kayıpları 228 kWh/ton olarak hesaplanmıştır ve bu da %36,6'lık kısmı oluşturmaktadır. Geriye kalan %6'lık kısım ise hesaplanamayan trafo kayıpları olarak belirlenmiştir. Tespit edilen bu veriler Tablo 3'de görüldüğü gibi farklı ocak üreticileri değerleri ve literatürdeki bilgilerle kıyaslanmış, detaylandırılarak literatüre kazandırılmıştır.

Tablo 3. Farklı ocak üreticileri değerleri ve BDÇ değerleri

	Birim Enerji kWh/ton	İletim Kayıpları	Bobin Kayıpları	Radyasyon Kayıpları	Cüruf	Verim	Verim (%)
X FIRMASI	683	38,5 (%5,7)	115,78 (%16,95)	11,95 (%1,75)	23,31 (%3,41)	467,41	68,44
LİTERATÜR	683,08	58,06 (%8,5)	109,29 (%16)	34,15 (%5)	21,56 (%3,16)	433,9	63,53
Y FIRMASI	683,08	35,18 (%5,15)	109,29 (%16)	136,62 (%20)	17,62 (%2,58)	358,26	52,46
BDÇ	624	103,3 (%16)	152 (%24)	11,4 (%2)	17,57 (%3)	358	57,37

<https://www.slideshare.net/NFTN/energy-efficient-melt-shop-operation>

Referanslar:

- [1]Prof. Dr. Mehmet Kanoğlu, Enerji Verimliliği Örnek Projeleri, Mart 2010, Gaziantep.
- [2]S. Ener Ruşen, M. Koç / BEÜ Fen Bilimleri Dergisi 8 (4), 1478-1488, 2019 1482
- [3]Enerji Verimliliği Derneği (ENVERDER), 2010:29.
- [4]Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi (MEGEP), Metalurji Alanı, “İndüksiyon Ocağı ” Ankara, 2006