

# ENDÜSTRİYEL TAV FIRINLARINDA ISI DENKLİĞİ HESAPLAMALARI VE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN BELİRLENMESİ

*Gökay Ertem\*, Berrin Çelik\*\* Ve Serhat Yeşilyurt\**

*\*Sabancı Üniversitesi, İstanbul*

*\*\*Borusan Mannesmann Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul*

*gokaye@su.sabanciuniv.edu, bcelik@borusan.com, syesilyurt@sabanciuniv.edu*

## ÖZET

Enerji verimliliğinde artış sağlanması endüstriyel sistemlerdeki ısı kayıplarının yerlerinin ve miktarlarının belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Fırınlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan tavlama fırınları, endüstriyel işletmelerde gerek yakıt tüketimi açısından gerekse çevreye verdiği atık gazların oluşturduğu kirlilik açısından mümkün olduğunca verimli çalıştırılması gereken sistemlerdir.

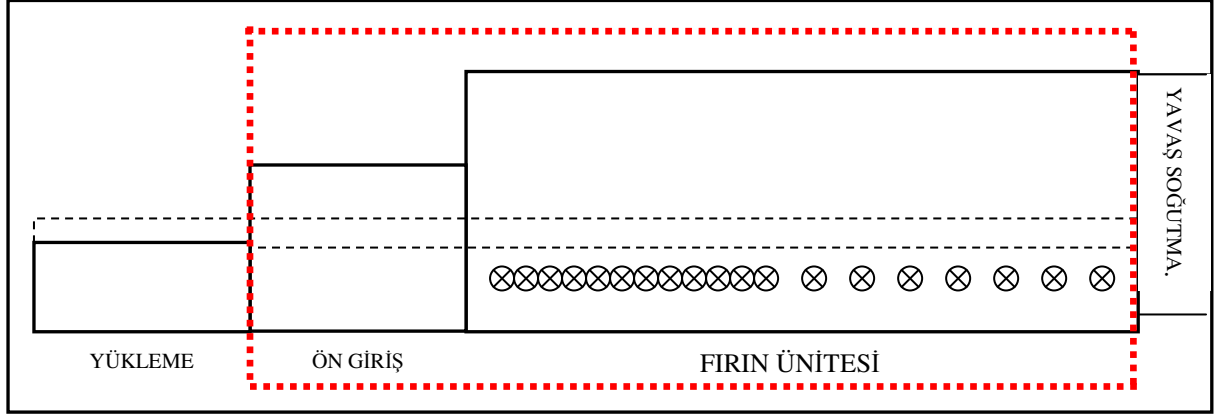
Bu çalışmada, endüstriyel tav fırınlarında enerji kaybının görüldüğü başlıca kısımlar incelenmiş; enerji verimlilik analizi yapılmış, termal verim bulunarak fırının enerji akışını gösteren Sankey diyagramı oluşturulmuştur. Baca gazı bileşenleri yüzdesel olarak belirlenmiş, bu bilgilerden hareketle baca gazından olan kayıp tespit edilmiştir. Fırının konveksiyon ve radyasyon yüzeyleri ile yüzey sıcaklıkları tespit edilerek yüzey kayıpları belirlenmiştir. Tavlanan malzemeye aktarılan enerji bulunmuş; birim zamanda tüketilen yakıt ve de tavlanan ürün miktarı da belirlenerek buradan toplam yakıt tüketimi giren enerji olarak elde edilmiştir. Giren enerji ile ürüne aktarılan enerji arasındaki farkın hangi tür kayıplar olduğu ve miktarları Sankey diyagramında gösterilmiştir. Analiz sonunda fırındaki kayıpların azaltılmasına yönelik görüş ve önerilere yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler: Tav fırını, Enerji verimliliği, Sankey**

## 1. GİRİŞ

Enerjinin verimli kullanımı, gerek ülkemizde gerekse dünyada üzerinde önemle durulan konulardan biridir. Endüstriyel işletmeler açısından bakıldığında, verimliliği artırıcı çalışmalar yakıttan tasarruf sağlar, kaynakların verimli kullanımına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunurlar. Enerji verimliliğinin artırılması, ısı kayıplarının yerlerinin ve miktarlarının belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Fırınlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan tavlama fırınları, endüstriyel işletmelerde gerek yakıt tüketimi açısından gerekse çevreye verdiği atık gazların oluşturduğu kirlilik açısından mümkün olduğunca verimli çalıştırılması gereken sistemlerdir.

Bu çalışmada ölçümlerin yapıldığı tav fırınında sistem sınırları girişteki yükleme tablasının bitimi ve fırın bölümünden sonraki yavaş soğutma ünitesinin başlangıcı olarak belirlenmiştir. Fırına ilişkin taslak görünüm Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Tav fırını taslak görünümü ve sistem sınırları

Bu sistemde giren enerji yakıt enerjisi, çıkan enerjiler ise malzemeye aktarılan enerji, baca gazı ile dışarıya atılan enerji, yüzeyden kaybolan enerji ve de yükleme açıklığından kaybolan enerji olarak tespit edilmiştir. Fırın brülörlerine verilen hava brülörlerle bütünleşik reküperatörler ile ön ısıtmaya uğramakta fakat bu ön ısıtma ile ısı geri kazanımı sistem sınırları içerisinde gerçekleştiğinden giren enerji olarak alınmamaktadır [1]. Analiz esnasında referans sıcaklığı ortam sıcaklığı olarak belirlenmiştir.

## 2. TEORİK MODEL

Yakıtın yanmasıyla sisteme giren enerji aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Q_1 = F \times H \quad (2.1)$$

Burada  $F$ , bir ton borunun tavlabilmesi için gerekli yakıt enerjisi miktarıdır ve birimi [ $\text{Nm}^3/\text{h}/1$  ton boru] olarak alınmıştır.  $H$  ise doğalgazın alt ısıl değeri olup birimi [ $\text{kJ}/\text{Nm}^3$ ]tür. 2.1 ifadesi sadece doğalgazın yanmasından çıkan enerjiyi belirler. Yakıt herhangi bir ön ısıtma yapılmadan ortam sıcaklığında sisteme girdiğinden yakıtın ısıtılmasından kaynaklanan ikinci bir enerji girişi bulunmamaktadır. Yanma havası da fırın ünitesi için fiziksel anlamda girdi olarak değerlendirilen bir büyüklüktür, fakat sistemdeki brülörlere ortam sıcaklığında verildiğinden giren enerji olarak değeri sıfırdır.

Fırının boruya aktardığı enerjinin ton başına değeri denklem 2.2.'de verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$Q_2 = m_{boru} \times c_{boru} \times (T_c - T_g) \quad (2.2)$$

Burada  $m_{boru}$ , boru kütlesi olup,  $c_{boru}$  değeri tavlanan karbon çelik boruların özgül ısısı,  $t_g$  borunun giriş sıcaklığı,  $t_c$  de borunun fırın çıkışında tavlandıktan sonra sahip olduğu sıcaklıktır.

Borunun çıkış sıcaklığı, fırın ünitesi kapalı bir sistem olarak tasarlandığından ve çıkış ünitesi doğrudan soğutma ünitesi ile bağlantılı olduğundan ölçülemez, fırın içinde borunun taşıyıcılar üzerinde ilerleyerek ısınması hareketli bir ısı transferi problemi olarak ele alınarak *lumped-heat-capacity* hesap yöntemi kullanılarak teorik olarak belirlenmiştir [2]. Bu yöntemin kullanılabilmesi için bir takım kabuller yapılmıştır. İlk olarak, borudaki sıcaklık değişiminin sadece zamana bağlı olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım boruların ısı transferine gösterdiği iç direncin, boru yüzeyi ve fırın arasındaki sınır düzlemin gösterdiği dirence oranla ihmal edilecek kadar küçük olduğu varsayımına dayandırılmıştır. Bu kabuller sonucu, ısıl değişim sadece zamana bağlı olarak boru dış yüzeyi ve fırının iç yüzeyleri arasında gerçekleşmektedir. Karbon çelik boruların ısıl iletkenlikleri yüksek olduğundan, borunun tümü için sıcaklık dağılımı hesaplanmamış, boru sıcaklığı her yerde aynı olarak

alınmıştır. Enerji korunumu gereği, boru sıcaklığını zamana bağlı olarak değiştiren enerji daima yüzeyden gelmektedir ve buna göre boru yüzeyindeki ısı akışı ( $Q_{\text{cev}}$ ), borunun iç ısı enerjisindeki değişime ( $Q_{\text{boru}}$ ) eşit olmaktadır.

$$Q_{\text{boru}} = -Q_{\text{cev}} \quad (2.3)$$

Isı akışı ile boruya aktarılan enerji konveksiyon yoluyla gerçekleştiğinde, aşağıdaki 2.4 nolu eşitlik geçerlidir:

$$mc \frac{dT}{dt} = -hA_s(T - T_{\infty}) \quad (2.4)$$

Burada verilen  $h$  konveksiyonel ısı transfer katsayısı,  $m_{\text{boru}}$  kütle,  $c_{\text{boru}}$  özgül ısı,  $T$  boru sıcaklığı,  $T_{\infty}$  fırın içi sıcaklığı,  $A_s$  de ısı transferinin gerçekleştiği yüzeydir.

Öte yandan tavlama fırınlarının çalışma koşullarında olduğu gibi, yüksek sıcaklıklarda radyasyon yolu ile ısı transferi konveksiyona göre daha etkindir. Fırın içinde radyasyon yoluyla boru yüzeyine taşınan ısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$mc \frac{dT}{dt} = -\sigma A_s \varepsilon (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (2.5)$$

Bu eşitlikte  $\sigma$  Stefan-Boltzman sabiti,  $\varepsilon$  yüzey yayılım katsayısı,  $A_s$  boru dış yüzey alanıdır. Borunun kütlesini boyutlarını kullanarak hesaplırsak aşağıdaki ifadeyi elde ederiz:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{D_{\text{out}} \sigma \varepsilon}{D_{\text{av}} \delta \rho c_p} (T^4 - T_{\text{env}}^4) \quad (2.6)$$

Burada  $D_{\text{out}}$  boru dış çapı,  $D_{\text{av}}$  ortalama kesit çapı,  $\rho$  borunun özgül ağırlığı ve  $\delta$  de tavlanan boruların uzunluğudur

Baca gazı yoluyla sistemden atılan enerji  $Q_3$ , kuru baca gazında ( $Q_{3d}$ ) ve baca gazındaki su buharında ( $Q_{3w}$ ) taşınan enerji olmak üzere iki şekilde gruplanabilir:

$$Q_3 = Q_{3d} + Q_{3w} \quad (2.7)$$

Kuru baca gazında taşınan  $Q_{3d}$  enerjisi tüketilen yakıt ( $F$ ), baca gazı hacimsel debisi ( $G'$ ) ve baca gazının ortam sıcaklığının üzerindeki sıcaklığına bağlı olarak belirlenen özgül ısısı kullanılarak ifade edilir.

$$Q_{3d} = F \times G' \times (c_{p1} \times T_1 - c_{p0} \times T_0) \quad (2.8)$$

Gerçek baca gazı hacimsel debisi  $G'$ , teorik kuru baca gazı hacimsel debisi  $G_0'$ , hava oranı  $m$  ve miktarı  $A_0$  cinsinden ifade edilir. Burada  $G'$ ,  $G_0'$  ve  $A_0$  değerleri [ $\text{Nm}^3/\text{s}/\text{Nm}^3$  yakıt] birimiyle ifade edilmektedir.

$$G' = G_0' + A_0 \times (m - 1) \quad (2.9)$$

Baca gazındaki su buharında taşınan enerjinin belirlenmesinde kuru baca gazındaki metodolojiye benzer şekilde bu sefer su buharı miktarı kullanılarak işlem yapılmıştır.

$$Q_{3w} = F \times (G_{wf} + G_{wa}) \times (c_{p1} \times T_1 - c_{p0} \times T_0) \quad (2.10)$$

Denklem 2.10'da görüldüğü gibi, su buharında taşınan enerji tüketilen yakıtta, su buharı miktarına ( $G_{wf}+G_{wa}$ ) ve baca gazı sıcaklığında hesaplanan özgül ısıya bağlıdır. Su buharı miktarı belirlenirken, sadece yanma havasındaki miktar  $G_{wa}$  değerlendirilmemiş, bu miktara yakıtın yanması sonucu açığa çıkan su buharı  $G_{wf}$  da eklenerek hesaplama yapılmıştır. Yanma havasındaki su buharı  $G_{wa}$  aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$G_{wa} = 1,611 \times Z \times m \times A_0 \quad (2.11)$$

Denklem 2.11'e göre belirlenirken, hava oranı  $m$  ile birlikte birim hava başına düşen buhar miktarından, bir başka deyişle mutlak nemden ( $Z$ ) yararlanır. Mutlak nem, havadaki bağıl nem oranına ve doymuş buhar basıncına bağlı olarak değiştiğinden basınç değerleri kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabildiği gibi literatürdeki mutlak nem belirlemeye ilişkin diyagramlardan da yararlanmak mümkündür [3].

$$Z = 0,622 \times \frac{f \times P_s}{(P_a \times 100) - (f \times P_s)} \quad (2.12)$$

Fırın dış yüzeyleri, tav fırınlarının iç bölge sıcaklıkları  $1000^\circ\text{C}$  civarında olduğundan, yalıtım malzemelerinin ve tuğlaların yapısına bağlı olarak Tablo 2'de gösterildiği gibi ortam sıcaklığına oranla çok daha yüksek sıcaklık değerlerindedir. Bu durum fırın yüzeylerinden konveksiyon ve radyasyon yoluyla ısı kaybına yol açmaktadır.

$$Q_4 = (Q_r + Q_c) \times A \quad (2.13)$$

Radyasyon yoluyla oluşan kayıp yüzeyin yayınım katsayısıyla ve yüzey sıcaklığıyla ilintilidir [4]. Tav fırınlarının yüzeylerinden meydana gelen kayıp enerji birim alan başına değerlendirildiğinde aşağıdaki gibidir:

$$Q_r = \varepsilon \times \sigma \times [(273 + T_y)^4 - (273 + T_0)^4] \quad (2.14)$$

Bu ifadede  $\varepsilon$  yüzey yayınım katsayısı,  $\sigma$  Stefan-Boltzman sabiti,  $T_y$  yüzey sıcaklığıdır. Konveksiyon yoluyla meydana gelen ısı kaybına bakıldığında, kayıp enerji sadece yüzey sıcaklığı ile değil aynı zamanda fırın geometrisi ve konveksiyon yönü göz önünde tutularak 5,22 olarak seçilen bir  $B_y$  parametresi ile modellenmiştir [4]:

$$Q_c = B_y \times (T_y - T_o)^{1,25} \quad (2.15)$$

Fırınlarda görülen ısı kayıplarından biri de malzemeyi fırın iç bölgesine ulaştırmak için yükleme bölümünün bitiminde oluşturulan giriş açıklığından radyasyon yoluyla meydana gelen kayıptır. Bu kayıp sadece açıklığın boyutlarına değil aynı zamanda fırın yüzeyinin yayınımına bağlıdır.

$$Q_5 = R \times A_g \times a_r \times \varepsilon \quad (2.16)$$

Bu ifadede  $A_g$  giriş açıklığı olup,  $\varepsilon$  yayınım katsayısı,  $a_r$  radyasyon parametresi ve  $R$  de birim zamanda birim alandan yayılan radyasyon miktarıdır.

Enerji verimlilik analizi, giren ve çıkan enerjiler arasındaki fark toplam ısı enerjisine kıyasla ihmal edilebilecek seviyelerde tutularak sonlandırılmalıdır. Bu farkın düşük oluşu, sistemde yeri ve miktarı

belirlenemeyen ısı kayıplarının olmadığı, analizin enerji denkleğini başarıyla oluşturduğu anlamına gelmektedir. Enerji verimlilik analizi için oluşturulan bu model, bir tav fırını üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak, fırının ısı veriminin belirlenmesine olanak tanımıştır.

$$\eta_{\text{direkt}} = \frac{\text{Boruya aktarılan enerji (Q}_2\text{)}}{\text{Yakıt enerjisi (Q}_1\text{)}} \times 100 \quad (2.17)$$

Doğrudan verim tanımı kullanılarak fırının ısı verimi bulunabildiği gibi ısı denkleği başarıyla oluşturulduğunda dolaylı olarak da ısı verimi belirlemek mümkündür. [5] Dolaylı verim bağıntısı denklem 2.18'deki gibidir.

$$\eta_{\text{indirekt}} = \frac{\text{Yakıt enerjisi (Q}_1\text{)} - \text{Kayıplar(Q}_3 + \text{Q}_4 + \text{Q}_5) \times \text{Süre}}{\text{Yakıt enerjisi (Q}_1\text{)}} \times 100 \quad (2.18)$$

### 3. MODELDEN ÇIKAN SONUÇLAR

Modelin uygulanabilmesi, gerekli büyüklüklerin ölçme ve değerlendirme süreci sonucunda elde edilmesi ve ilgili yerlerde kullanılması sonucu mümkün olmuştur. Baca gazı analizörü kullanılarak fırın bünyesindeki 38 brülörde baca gazı sıcaklığı, CO, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> bileşenleri ölçülmüştür. Yanmanın gerçekleştiği brülörlerden elde edilen verilerin ortalaması alınarak baca gazı analizi tamamlanmıştır. Analiz sonuçları Tablo 1'de gösterildiği gibidir.

Aktif brülör sayısı	25
Sıcaklık [°C]	637
O <sub>2</sub> [%]	4,8
CO <sub>2</sub> [%]	8,9
CO [%]	0,9

**Tablo 1.** Baca gazı analiz sonuçları

Baca gazı analiz sonuçlarından O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve CO yüzdeleri, azot yüzdesi N<sub>2</sub>'nin bulunmasında kullanılmış, bulunan azot oranı ile birlikte denklem 3.2'deki gibi hava oranı m elde edilmiştir.

$$N_2 = 100 - (CO_2 + O_2 + CO) \quad (3.1)$$

$$m = \frac{1}{1 - 3,76 \frac{O_2}{N_2}} \quad (3.2)$$

Hava oranı denklem 2.9'da gerçek baca gazı hacmi hesabında, denklem 2.11'de de yanma havasındaki su buharının bulunmasında kullanılmıştır. Baca gazı analizi sonucu bulunan baca gazı sıcaklığı ise denklem 2.8 ve 2.10'da verilen baca gazı kayıplarında t<sub>1</sub> değeri olarak kullanılmıştır.

Yüzey kayıplarının bulunması için her fırın yüzeyinin sıcaklığına ve ebatlarına ihtiyaç vardır. Bu sıcaklıklar, temasla ölçüm yapan, bu amaca uygun yüzey algılayıcılarına sahip termometrelerle ölçülmüş olup her yüzeye ilişkin ölçüm sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Brülörlere olan yakınlığa bağlı olarak farklı noktalarda farklı sıcaklık değerlerine ulaşıldığından pek çok noktadan alınan ölçümlerin ortalaması o yüzeye ilişkin sıcaklık değeri olarak kabul edilmiştir.

Yüzey	Alan [m <sup>2</sup> ]	Ort. Yüzey Sıcaklığı [°C]	Ortam Sıcaklığı [°C]
Yan yüzey A	43,84	111,00	17,4
Yan yüzey B	43,84	101,00	17,4
Üst yüzey	38,36	60,00	17,4
Ön cephe	1,97	68,80	17,4

**Tablo 2.** Fırın yüzeyi analiz sonuçları

Fırın yüzey analizi sonucunda bulunan ortalama yüzey sıcaklıkları denklem 2.14 ve 2.15'te kullanılarak radyasyon ve konveksiyon yoluyla oluşmuş yüzey kayıpları belirlenmiştir.

Havadaki bağıl nem ve ortam sıcaklığı, bağıl nem ölçüm cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Yakıt sayacından bir saat süreyle belli zaman aralıklarında alınan bilgilerden yakıt tüketimi elde edilmiş, yine bir saatte tavlanan boru miktarı da bulunarak birim kütle başına tüketilen yakıt 32,4 Nm<sup>3</sup>/ton boru olarak hesaplanmıştır. Tüm sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Ortam sıcaklığı [°C]	17,4
Bağıl nem oranı [%]	37
Doğalgaz tüketimi [Nm <sup>3</sup> /h]	85
Tavlanan boru miktarı [kg/h]	2625
Ton başına yakıt tüketimi [Nm <sup>3</sup> /kg]	32,4

**Tablo 3.** Fırına ilişkin ölçüm sonuçları

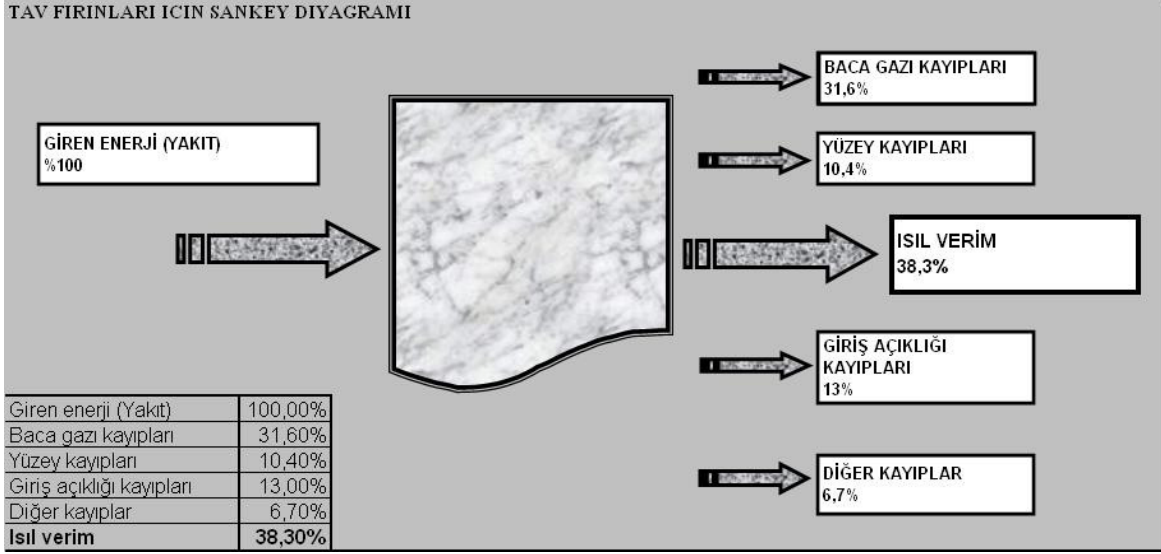
Yakıt tüketim miktarı F, Tablo 3'teki gibi bulunarak gerek yakıt enerjisinin hesaplandığı 2.1 nolu denklemde gerekse baca gazı kayıplarının belirlendiği 2.8 ve 2.10 nolu denklemlerde kullanılmıştır.

Tablolarda ve şekillerde verilen tüm ölçüm sonuçlarının tasarlanan modelde değerlendirilmesi sonucu giren enerji, boruya aktarılan enerji ve de sistemde tüketilen enerji kayıpları net olarak belirlenmiştir. Isı enerjilerinin türlerine göre miktarları Tablo 4'te sunulmuştur.

Tür	Miktar [kJ/h]
Yakıt enerjisi	1162136,6
Malzemeye aktarılan enerji	445704
Baca gazı kayıpları	367510,62
Yüzey kayıpları	120843,41
Giriş açıklığı kaybı	150630,48
Diğer kayıplar	77448

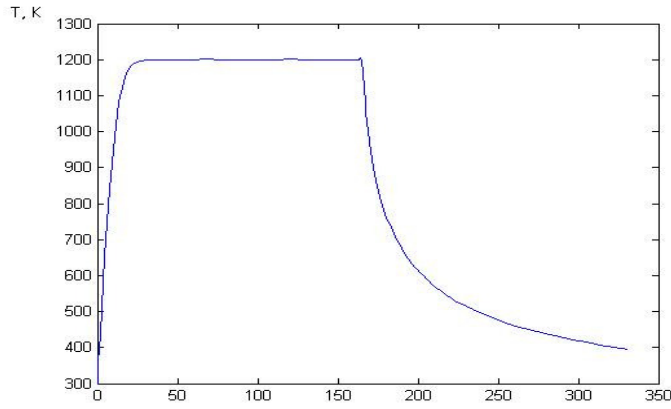
**Tablo 4.** Modelden çıkan ısı enerjileri

Sonuç olarak, endüstriyel tav fırınları için yapılan enerji verimlilik analizi sonucunda fırının enerji denklığı %6,7'lik bir hata oranıyla gerçekleştirilmiş, fırının termal verimi doğrudan verim yöntemiyle 38,3% olarak bulunmuştur. Isı kayıplarının türleri tanıtılmış ve belirlenmeleri için gerekli olan ölçümler yapılarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Enerji denklığı ve termal verime ilişkin sonuçlar Şekil 3.1'deki Sankey enerji diyagramında sunulmuştur.



Şekil 3.1. Sonuçlara ilişkin Sankey diyagramı

Fiziksel ölçümü çok yüksek ölçüm maliyeti sebebiyle yapılamamış, ancak *lumped-heat-capacity* yöntemiyle belirlenmiş olan boru sıcaklığının fırın içindeki değişimi Şekil 3.2’de verilmiştir. Denklem 2.6’nın MATLAB© programında çözümü ile elde edilen Şekil 3.2’deki sıcaklık değişimi hesaplanırken fırın uzunluğu 13,8m, fırın genişliği 4m, boru hızı 0,05 m/s, boru dış çapı 0,022m, ortalama kesit çapı Dav 0,02135m, karbon çelik borunun özkütlesi 7850 kg/m<sup>3</sup>, özgül ısısı 650 J/kg°C olarak alınmıştır.



Şekil 3.2. Boru sıcaklığının fırın içinde değişimi

Bu çalışmada tav fırınının enerji verimlilik analizi yapılmış, kayıpların azaltılmasına ilişkin çözüm yolları tartışılarak olası iyileştirmelerin nerelerde ve ne şekilde olabileceği üzerinde durulmuş fırınlarda enerji yönetiminin gelişmesinde katkıda bulunulmaya çalışılmıştır.

#### 4. TARTIŞMA

Tav fırınlarının genelde ısıl verimleri 35-45% arasındadır. Verimlilik analizi yapılan fırında da bu durum doğrulanmıştır, verim %38.3 olarak bulunmuştur Kayıplar en çok baca gazından olmaktadır, bunun nedeni tav fırınlarının işlevleri gereği çok yüksek sıcaklıklarda ısıtma yapması, bunun için brülörlerde gerçekleşen yanma sonucunda sistemden dışarıya atılan gazın yüksek sıcaklıkta olmasıdır. 650°C civarında olan baca gazı enerjisi baca gazı debisi çok düşük olmamak kaydıyla muhtelif ekonomizer ve eşanjör uygulamaları ile ortam ısıtmasında, sistem girdilerinin ön ısıtmasında, kızgın su

buharı ihtiyacının karşılanmasında ya da sıcak su üretiminde kullanılabilir. Reküperasyon adı verilen uygulama bazı brülör tiplerinde brülöre entegre olarak yer almakta, yanma havası sisteme ortam sıcaklığında verilse de sistem içerisinde ön ısıtması sağlanmaktadır [5].

Enerji dengesinin verim artırıcı yönde iyileştirilmesi mümkündür. Yüzey kayıplarının azaltılması için fırın iç yüzeyinin yalıtımı artırılarak bu sayede fırın yüzeyinden gerçekleşen radyasyon ve konveksiyon kayıplarının önüne geçilebilir. Dış yüzeyden yapılacak bir yalıtım fırının dışarıya atması gereken ısıyı atamamasından dolayı iç kabin sıcaklığını olması gereken değerin üzerine çıkarır, bu durum malzeme kalitesinin düşmesine ve iç yalıtımın aşınmasına sebebiyet verir. Baca gazı bileşenlerinin değerleri tamamen brülör verimi ile ilintilidir. Tav fırınlarında kullanılan brülörlerin verimleri 60-90% arasında değişmektedir. Üretici firmaya göre, CO oranı sıfır mertebelerinde, O<sub>2</sub> değeri 3-5% mertebelerinde, CO<sub>2</sub> değeri ise 8-12% değerlerinde olmalıdır [6]. Fırının brülörlerinden alınan ortalama değer bu aralıkta yer alsa da tek tek her brülör için karşılaştırma yapılarak verimsiz çalışan brülörler tespit edilebilmektedir. Giriş açıklığından oluşan kayıp ise, sisteme malzeme sürekli giriş yapmadığından yükleme bitiminde otomatik olarak kapanan, yükleme başlarken de boru dış çapına göre minimum seviyede açılan otomatik kapı montajı ile tamamen giderilmese de azaltılabilir.

## 5. SONUÇ

Çalışma sonucunda, yüksek yakıt tüketimleri sebebiyle endüstride çok ciddi maliyetlere yol açan tav fırınlarının verimli çalıştırılabilmeleri için gereken enerji verimlilik analizi ve ısı denkliği hesaplamaları başarıyla yürütülmüş, bu fırınlardaki enerji akışının kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. Kyoto Protokolü imzalanır ve karbon vergisi uygulaması yürürlüğe girerse, bu vergiler yakıt ve elektrik tüketimlerine göre belirleneceğinden enerji sektöründe yapılan bu tarz verimlilik çalışmaları daha da önem kazanacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Energy Report, World Energy Council Turkish National Committee, Ankara, 1998.
- [2] Incropera, F.P., De Witt, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Fifth edition, J.Willey and Sons, New York, 2002.
- [3] Elektrik İşleri Etüt İdaresi, *Enerji Yöneticiliği Eğitim Notları*, Ankara, 2006.
- [4] Hepbasli, A., Gunerhan, H., Ulgen, K., "Enerji Yönetim Sisteminin Altın Anahtarları: Enerji Denkliği ve Enerji Tasarrufu Etüdü, V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi.
- [5] *Waste Heat Reduction and Recovery for Improving Furnace Efficiency, Productivity and Emissions Performance*, US Department of Energy, Washington DC.
- [6] Laepple, K., *Sottri Furnace Specifications*, Waermeprozestechnik, Germany, 2008.