

ENDÜSTRİYEL TAV FIRINLARINDA ENERJİ TASARRUFU VE EMİSYON AZALTIM FIRSATLARI

Muharrem EYİDOĞAN*, **Durmuş KAYA****, **Şükrü DURSUN****, **Osman TAYLAN****

*Karabük Üniversitesi Enerji ve Çevre Teknolojileri Birimi, Karabük

**Department of Industrial Engineering, College of Engineering, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

muhamrem_eyidogan@hotmail.com, durmuskaya@hotmail.com, sdursun@selcuk.edu.tr,
otaylan@kau.edu.sa

(Geliş/Received: 23.12.2013; Kabul/Accepted: 11.09.2014)

ÖZET

Bu çalışmada, bir sanayi kuruluşunun LNG (sıvılaştırılmış doğalgaz) yakıtlı haddehane tav fırınında enerji verimliliği çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda fırın işletme koşullarında çalışırken sıcaklık, basınç, hız ve yanma gazı ölçümleri yapılmış, ölçüm verileri kullanılarak kütle ve enerji dengesi kurulmuştur. Yapılan hesaplamalarda; fırın genel verimi %52,76 olarak bulunmuştur. Başlıca verim kayıpları; fırının yüksek hava fazlalık katsayısıyla çalıştırılması, reküperatör ısı transfer yüzey alanının yetersiz kalması ve fırın yüzeyi ısı kayıpları olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Haddehane tav fırını, reküperatör, enerji verimliliği, enerji tasarrufu, atık ısı geri kazanımı, emisyon azaltımı

ENERGY SAVING AND EMISSION REDUCTION OPPORTUNITIES IN AN INDUSTRIAL ANNEALING FURNACES

ABSTRACT

In this study, "energy efficiency" study has been performed for a LNG (Liquefied Natural Gas) fuel annealing furnace. Within this frame, temperature, pressure, velocity, and gas analysis measurements have been made and energy and mass balances have been formed. From the measured data, the furnace total efficiency was calculated as 52.76%. The main efficiency losses: operating furnace at high air excessiveness coefficient, inadequacy of air preheater heater (recuperator) heat transfer surface area and surface thermal losses.

Author keywords: Annealing furnace, recuperator, energy efficiency, energy saving, waste heat recovery, emission reduction

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerjinin verimli kullanımı, tüm dünyada üzerinde önemle durulan konulardan biridir. Enerji üretimi ve kullanımının, hava kirliliği, sera gazı etkisi ve ekosisteme etkileri gibi birçok çevresel etkisi vardır [1]. Uluslararası enerji ajansının raporuna göre enerji üretiminden kaynaklanacak CO₂ emisyonunun 2030 yılında, 2005 yılına göre %49 artacağı ve birçok ülkenin orta ve uzun vadede yüksek enerji fiyatı ile karşı karşıya kalacağı ifade edilmiştir [2]. Endüstriyel işletmeler açısından bakıldığında, verimliliği artırıcı çalışmalar yakıttan tasarruf sağlamakta, kaynakların

verimli kullanımına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır [3, 4].

Demir-çelik sektörü yıllık yaklaşık 24 EJ (24x10¹⁸ J) enerji tüketimi ile en çok enerji tüketen sektörlerden birisidir ve bu tüketim dünyanın toplam enerji tüketiminin %5'ine karşılık gelmektedir [5]. Sektörün Üretim maliyetleri içerisinde %27-33'lük pay ile en büyük dilimi alan enerji maliyetleri, ürün maliyetlerinin düşürülmesinde hedef alınan birincil kaynak olmaktadır. Fırınlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan tavlama fırınları, endüstriyel işletmelerde gerek yakıt tüketimi açısından gerekse

bacadan atılan yanma gazlarının oluşturduğu kirlilik açısından mümkün olduğunca verimli çalıştırılması gereken sistemlerdir.

Fırınlarda enerji verimliliğine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Ertem ve ark. [6] yaptıkları çalışmada Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları'nın 3 nolu yassı kütük fırınında kullanılan özgül enerjinin iyileştirilmesi potansiyelini incelemişlerdir. Prosesteki kayıp enerjinin hesaplanması için bir enerji girişi ve çıkışı modeli oluşturmuşlar ve yassı kütük fırınının enerji verimliliğini %64,26 olarak hesaplamışlardır. Yapılan çalışmada enerji tasarrufu potansiyeli olarak fırına şarj edilen kütüklerin sıcak şarj edilmesi ve reküperatörden sonra atılan baca gazı ısısının geri kazanılmasını belirlemişlerdir. Baca gazının enerji potansiyelini 81.590 kcal/TEP olarak hesaplamışlardır. Ertem ve ark. [7] yaptıkları çalışmada endüstriyel tav fırınlarında enerji kaybının görüldüğü başlıca kısımları incelemiş, enerji verimlilik analizi yapmış, ısı verimi bulmuş ve kayıpları tespit etmişlerdir. Giren enerji ile ürüne aktarılan enerji arasındaki farkın hangi tür kayıplar olduğu ve miktarları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda ısı verim %38,3 olarak bulunmuştur. Kayıplar ise %31,6 ile baca gazı kayıpları, %10,4 ile yüzey kayıpları, %13 ile açıklık kayıpları ve %6,7 ile diğer kayıplar olarak belirlenmiştir. Si ve ark. [8] yaptıkları çalışmada Kanada, Manitoba'da bulunan bir çelik fabrikasının enerji verimliliğini değerlendirmiş ve atık ısı geri kazanımının olabirliğini analiz etmişlerdir. Proses ısıtma değerlendirmesi ve gözden geçirme aracı (PHAST) ile yapılan çalışmada tav fırını verimi %60 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada baca gazı kayıpları toplam enerji kayıplarının %29,5'i ile tav fırınındaki en büyük enerji kaybını oluşturmuştur. Çalışma sonucunda enerji verimliliğinin artırılması için kütüklerin 315°C'ye ön ısıtılması gerektiği belirtilmiştir. Chen ve ark. [9] yaptıkları çalışmada bir sıcak haddehanenin tav fırınlarının performansını ve enerji tüketimini hem sayısal tahminler hem de pratik ölçümler ile analiz etmişlerdir. Sayısal tahminlerde fırınların artan üretim hızının yakıtı daha verimli olarak kullandığını göstermiştir. Pratik çalışma ise fırın içerisindeki ısının %80'inin yakıtın yanması, %15,7'sinin ise sıcak baca gazı ile sağlandığını göstermiştir. Ayrıca pratik ölçümler ısı geri kazanımı bölgesindeki ısı değişimi ve ısı geri kazanımı verimlerinin sırasıyla %86,66 ve %47,76 olduğunu göstermiştir. Manatura ve Tangtrakul [10] yaptıkları çalışmada reküperatör ile birleştirilmiş rejeneratif burner'lerin (yakıcıların) kullanıldığı bir tav fırınında enerji kullanımını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada tav fırınının özgül enerji tüketimi 1.042 MJ/t olarak bulunmuş ve fırın verimi %80,1 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada enerji tasarruf oranı sadece reküperatör kullanılan tav fırınları ile karşılaştırıldığında %43,4 olarak bulunmuş ve rejeneratif burner ile önemli bir verim değeri elde edilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda [6-10] tav fırınlarında enerji verimleri işletme verileri kullanılarak hesaplanmalar yapılmış ve tasarruf imkânları belirlemişlerdir. Ancak çalışmalar sahada yapılan detaylı enerji verimliliği ölçüm ve etütlerine dayanmamıştır. Bu çalışmada ise bir sanayi kuruluşunun LNG ile çalışan tav fırınında enerji verimliliğine yönelik detaylı ölçümler yapılmış, ölçüm sonuçları ve firmadan alınan verileri kullanarak kütle ve enerji dengesine yönelik hesaplamalar yapılmış, enerji tasarruf imkânları ve boyutları geri ödeme süreleriyle birlikte belirlenmiştir.

2. ÖLÇÜM YÖNTEMİ VE ÖLÇÜM CİHAZLARI (MEASUREMENT METHOD AND DEVICES)

Tav fırınlarının ısı veriminin hesaplanmasında direkt ve dolaylı yöntem olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır; Direkt yöntemde ısı verim, malzemenin aldığı ısının, kullanılan yakıt ısısına bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Bu yöntemde aşağıdaki ölçümler gerçekleştirilmelidir;

- Fırına giren ve çıkan kütük miktarları,
- Kütüğün fırına giriş ve çıkış sıcaklığı,
- Yakıt besleme miktarı,
- Yakıtın alt ısı değeri.

Bu ölçümler doğrultusunda ısı verim ifadesi genel olarak şu şekilde verilebilir:

$$\eta = \frac{m_k c_{p2} T_2 - m_k c_{p1} T_1}{BHu} \quad (1)$$

Dolaylı yöntemde ise ısı verim, fırın kayıplarının çıkarılması ile hesaplanabilmektedir.

$$\eta = 1 - \sum Z \quad (2)$$

Bu kayıplar; baca gazı kayıpları, açıklık kayıpları, tufal kayıpları, duvar kayıpları, soğutma suyu kayıpları ve diğer hesaplanmayan kayıplardır [11].

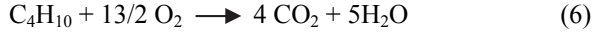
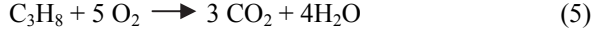
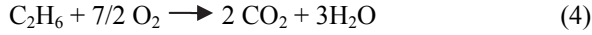
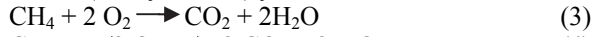
Dolaylı yöntemle ısı verim hesaplanırken aşağıdaki ölçümler gerçekleştirilmeli ve sonuç verileri göz önüne alınmalıdır:

- Fırına giren ve çıkan kütük miktarları,
- Fırına giren ve çıkan kütük sıcaklıkları,
- Yakıt besleme miktarı,
- Yakıtın alt ısı değeri ve elementel analizi,
- Baca gazı analizi (baca gazında sıcaklık, hız, basınç ve gaz ölçümleri),
- Yakma havası sıcaklığı,
- Fırın sıcaklığı,
- Fırın dış cidar sıcaklıkları,
- Reküperatör öncesi ve sonrası egzoz gazı sıcaklığı,
- Reküperatör öncesi ve sonrası oksijen oranı,
- Soğutma suyu debisi,
- Soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları.

Fırında; fırın girişi ve çıkışı ile reküperatör girişi ve çıkışı arasında kütle ve enerji dengesinin kurulabilmesi için akışlara ait hız, basınç, sıcaklık ve yanma gazı ölçümleri yapılmış, ayrıca sistem üzerindeki mevcut kalibrasyonlu sayaçlardan değerler okunmuştur. Ölçülen değerler ile mevcut sayaçlardan alınan değerler kütle ve enerji dengelerinin kurulmasında kullanılmıştır. Fırının çalışma sistemi Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir.

Fırında yakıt olarak kullanılan LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz) debileri SCADA ekranından alınmıştır. LNG’nin içeriği kullanılarak yanma ürünlerinin bileşenleri ve debileri hesap edilmiştir. Hesap edilen teorik değerler, fırın çıkışı ve baca çıkışında yapılan gaz analizi, basınç, hız ve sıcaklık ölçümleriyle de karşılaştırılmış ve doğrulukları kontrol edilmiştir. Yakıt içeriğine göre teorik hava miktarı belirlenirken aşağıdaki denklemler (3-6) kullanılmıştır.

Teorik (stokiyometrik) yakma hava miktarı hesabı



Baca gazı, fırın çıkışı egzoz gazı ve reküperatör çıkışı egzoz gazı analizleri için elektrokimyasal detektör yöntemi ile çalışan TESTO 350S ve TESTO 350XL marka gaz analiz cihazları kullanılmıştır. TESTO 445 marka cihaz ile baca gazı hız ve basınç değerleri ölçülmüş ve baca gazı debileri hesaplanmıştır. Baca gazı debilerinin ölçümünden sonra, baca çıkışı O_2 yüzdesi ve fırın çıkışı O_2 yüzdelere dayanarak

fırın yanma gazı debisi hesaplanmıştır. Sisteme beslenen kütük ve oluşan tufal miktarı bilgileri ise işletmeden alınmıştır. Ayrıca bunlara ait giriş ve çıkış sıcaklık değerleri sıcaklık ölçüm cihazlarıyla belirlenmiştir.

3. ÖLÇÜM VE HESAP SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF MEASUREMENT AND CALCULATION RESULTS)

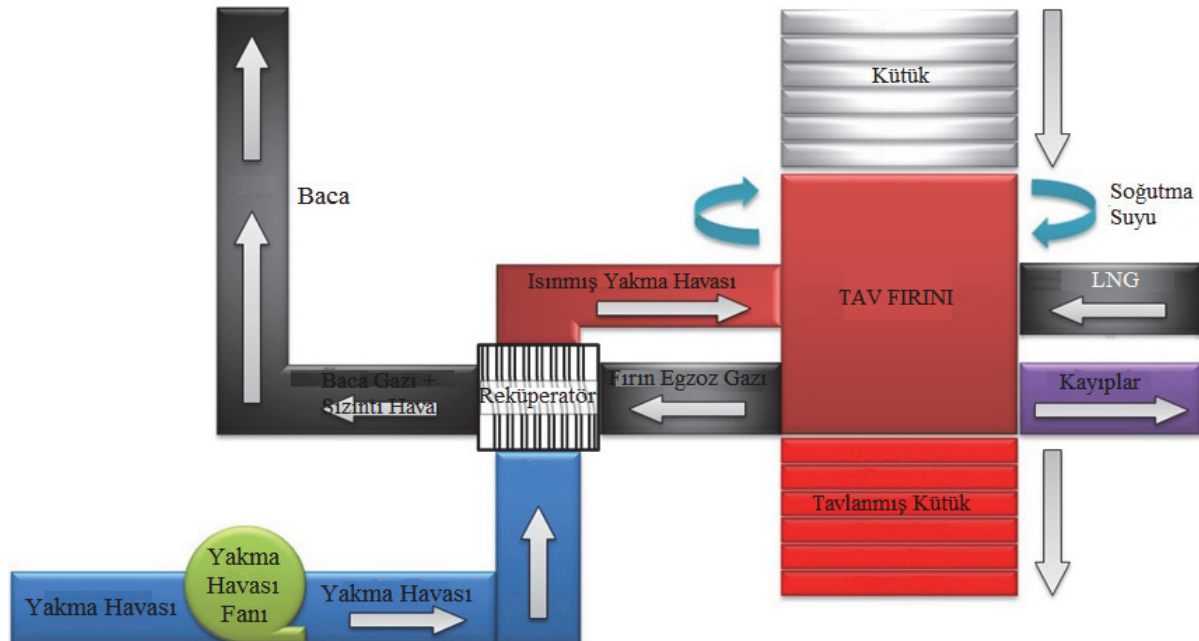
3.1. Ölçüm Sonuçları (Measurement Results)

Haddehane tav fırını reküperatör öncesi ve sonrası oksijen oranı ve egzoz gazı sıcaklığı ölçüm değerleri ile yakıt debileri Tablo 1’de verilmiştir. Fırına beslenen LNG analiz değerleri Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 1. Tav fırını reküperatör öncesi ve sonrası ölçüm değerleri ve yakıt debileri (The measurement and fuel flow rate values before and after the recuperator in the annealing furnace)

Haddehane Tav Fırını		
	O_2 (%)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
Reküperatör Öncesi	8,64	587
Reküperatör Sonrası	8,64	458
LNG (Nm^3/h)	506	

Yakıt miktarı, fırın yanma gazı oksijen yüzdesi ve yakıtın elementel analizleri kullanılarak yanma gazı analizleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Teorik yakma havası ve yanma ürünlerini tespit etmek için 3-6 nolu denklemlerden yararlanılmıştır.



Şekil 1. Tav fırını çalışma ve ölçüm sisteminin şematik gösterimi (Schematic representation of the annealing furnace operation and measurement systems)

Tablo 2. Tav fırını LNG analizi, yanma ürünleri ve debileri (LNG analysis, combustion products and combustion gas flow rates of the annealing furnace)

Yakıt			Yanma Ürünleri (Nm ³ /h)					
Yakıt Analizi	% (ob)	Stok. O ₂	CO ₂	N ₂	Argon	H ₂ O	O ₂	Diğer
CH ₄	94,9	960	482	3.579	43	1.044	0	0
C ₂ H ₆	3,1	55	31	205	2	52	0	0
C ₃ H ₈	1,0	25	15	94	1	22	0	0
C ₄ H ₁₀	0,3	10	6	37	0	8	0	0
CO ₂	0,5	0	0	0	0	0	0	0
N ₂	0,2	0	3	0	0	0	0	0
Fazla hava (Nm³/h)			1	3,123	37	73	838	0
Gaz Bileşimi % (ob)			5,55	72,57	0,86	12,38	8,64	0,0

Tablo 2'nin bileşenleri kullanılarak toplam stokiometrik yanma gazı, teorik yakma havası, fazla hava, teorik toplam yanma havası, fırın çıkış gazı debileri, fazla hava oranı hesaplanmış ve Tablo 3'de verilmiştir. Hesaplanan debiler, ayrıca baca çıkışında ölçülerek doğruluğu sağlanmıştır.

Tablo 3. Tav fırını toplam yakma havası ve fırın yanma gazı debileri (Total combustion air and combustion gas flow rates of the annealing furnace)

Sistemin Toplam Yakma Havası ve Fırın Yanma Gazı Debileri	
Teorik Yakma Havası (Nm ³ /h)	5.106
Teorik Fırın Çıkışı Gaz Debisi (Nm ³ /h)	5.626
Fazla Hava Miktarı (Nm ³ /h)	4.073
Toplam Fırın Çıkışı Gaz Debisi (Nm ³ /h)	9.699
Fırına Giren Hava (Nm ³ /h)	9.179
Fazla Hava Oranı (%)	79,77

3.2. Tav Fırını Verimi (The Annealing Furnace Efficiency)

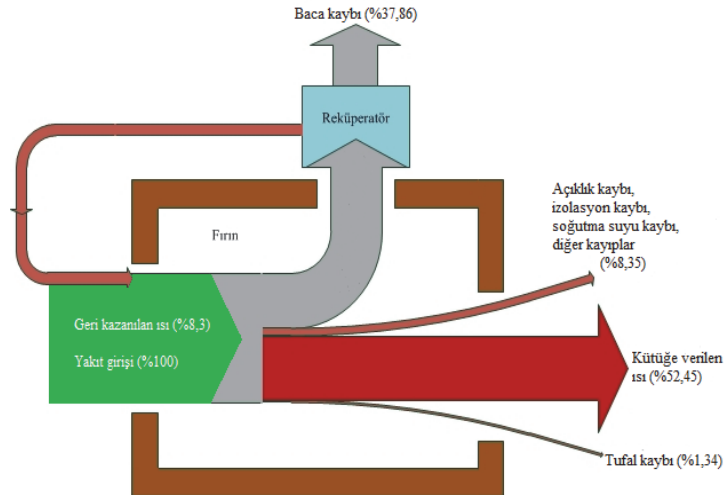
Tav fırını verimi; kütüğün kütleli debisi, kütüğe verilen ısı miktarı ve toplam yakıt ısısı kullanılarak Denklem 1 ile verilen formülle hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Haddehane tav fırını verimi (The annealing furnace efficiency)

Tav Fırını Verimi	
Yakıtın Alt Isıl Değeri (kcal/Nm ³)	8.414
Kütük debisi (m _b , kg/h)	13.900
Kütüğe verilen ısı Q _s (kcal/h)	2.276.820
Tufalda kalan ısı (kcal/h)	28.523
Kütükte kalan net ısı Q _s (kcal/h)	2.248.297
Toplam yakıt ısısı Q _y (kcal/h)	4.257.484
Genel verim (% , Q_s/Q_y) %	52,81

3.3. Sistemin Enerji ve Kütle Denklikleri (Energy and Mass Balances of System)

Ölçülen değerler kullanılarak fırın ve reküperatör için enerji-kütle denklikleri kurulmuş ve sonuçlar sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir. Tav fırını toplam enerji ve kütle denkliği ise Tablo 7'de sunulmuştur. Tav fırını ve reküperatör enerji dengeleri kullanılarak mevcut durumun Sankey diyagramı oluşturulmuş ve Şekil 2'de verilmiştir. Sankey diyagramından da görüleceği gibi fırına verilen enerjinin %52,45'i kütüklere aktarılmakta, %8,35'i açıklık, izolasyon kaybı, soğutma suyu kaybı, diğer kayıplar olarak atılmaktadır. Bacadan yanma gazı ile kaybedilen ısının %8,3'ü reküperatör ile geri kazanılmaktadır.

**Şekil 2.** Tav fırını toplam enerji denkliği Sankey diyagramı (Sankey diagram of the annealing furnace total energy balance)

Tablo 5. Haddehane tav fırını enerji ve kütle denklığı (Energy and mass balance of the annealing furnace)

Sistemin Toplam Enerji ve Kütle Denklığı					
Girişler	Debi (Nm³/h)	Sıcaklık (°C)	Cp (kcal/Nm³K)	Q (kcal/h)	%
LNG (Yakma Isısı)	506		8.414	4.257.484	90,54
LNG (Duyulur Isı)	506	18	0,43	3.916	0,08
Fırına Giren Yakma Havası	9.179	142	0,32	412.284	8,77
Kütük	13.900*	18***	0,11**	28.523	0,61
Toplam				4.702.207	
Çıkışlar	Debi (Nm³/h)	Sıcaklık (°C)	Cp (kcal/Nm³K)	Q (kcal/h)	%
Kütük	13.553*	1.050	0,16**	2.276.820	48,42
Fırın Çıkış Gazı	9.699	587	0,38	2.163.449	46,01
Tufal Kaybı (%2,5 ölçülen)	348*	1.050	0,16**	58.380	1,24
Diğer Kayıplar (Açıklık kaybı, duvar kaybı, vb.)				203.559	4,33
Toplam				4.702.207	

Tablo 6. Tav fırını reküperatörü enerji ve kütle denklığı (Energy and mass balance of the annealing furnace recuperator)

Reküperatör Enerji ve Kütle Denklığı					
Girişler	Debi (Nm³/h)	Sıcaklık (°C)	Cp (kcal/Nm³K)	Q (kcal/h)	%
Fırın Çıkış Gazı	9.699	587	0,38	2.163.449	97,69
Rekütüratöre Giren Yakma Havası	9.179	18*	0,31	51.253	2,31
Reküperatördeki Sızıntı Hava	0	18*	0,31	0	0,00
Toplam				2.214.702	
Çıkışlar	Debi (Nm³/h)	Sıcaklık (°C)	Cp (kcal/Nm³K)	Q (kcal/h)	%
Baca Gazı	9.699	458	0,37	1.643.585	74,21
Fırın Yakma Havası	9.179	142	0,32	412.284	18,62
Diğer Kayıplar				158.833	7,17
Toplam				2.214.702	

Tablo 7. Tav fırını toplam enerji ve kütle denklığı (Total energy and mass balance of the annealing furnace)

Fırın Enerji ve Kütle Denklığı						
Girişler	Debi (Nm ³ /h)	Oksijen (%)	Sıcaklık (°C)	Cp (kcal/Nm ³ K)	Q (kcal/h)	%
LNG (Yakma Isısı)	506			8,414	4.257.484	98,07
LNG (Duyulur Isı)	506		18	0,43	3.916	0,09
Fırına Giren Yakma Hava	9.179	21%	18	0,31	51.253	1,18
Kütük	13.900*		18	0,11**	28.523	0,66
Rekuperatördeki Sızıntı Hava	0		18	0,31	0	0,00
Soğutma Suyu	0		0	1	0	0,00
Toplam					4.341.177	
Çıkışlar	Debi (Nm ³ /h)	Oksijen (%)	Sıcaklık (°C)	Cp (kcal/Nm ³ K)	Q (kcal/h)	%
Kütük	13.553		1.050	0,16	2.276.820	52,45
Baca Gazı	9.699	8,64	458	0,37	1.643.585	37,86
Rekuperatördeki Sızıntı Hava	0		458	0,37	0	0,00
Tufal Kaybı (%2,5)	348		1.050	0,16	58.380	1,34
Soğutma Suyu	0		18	1	0	0,00
Diğer Kayıplar (Açıklık kaybı, duvar kaybı, rekuperatör yüzey kaybı vb.)					362.392	8,35
Toplam					4.341.177	100

* kg/h, **Kcal/kg°C

4.ENERJİ TASARRUF POTANSİYELLERİ VE YATIRIMLAR (POTENTIAL ENERGY CONSERVATION OPPORTUNITIES AND INVESTMENT)

4.1. Potansiyel Tasarruf Alanları (Potential Energy Conservation Opportunities)

4.1.1. Fazla Havanın Azaltılması (Reduction of Excess Air)

Tav fırınında yapılan ölçümlerde fırının; fırın dizayn değeri olan optimum (%10) hava fazlalık katsayısının üzerinde çalıştığı tespit edilmiştir. Fırın çıkışı (rekuperatör öncesi) yapılan gaz analizinde, fırının optimum hava fazlalık katsayısının üzerinde çalışmasına rağmen baca gazı analiz sonuçlarında yüksek miktarda karbon monoksit (330~480 ppm) çıktığı da görülmüştür.

Bu durumun nedeni; fırın iç basıncının atmosfer basıncından düşük olması nedeniyle fırına dışardan hava girmesidir. Rekuperatör sonrası (baca hattına) damper konularak fırın iç basıncı atmosfer basıncını üzerine çıkartılabilir (fırın içi efektif basınç: 0,5 mmSS'ye çıkarılarak bu problem çözülebilir).

Fırına dışarıdan hava girmeyeceği için fırın optimuma yakın hava-yakıt oranıyla çalıştırılabilir. Hava fazlalık katsayısının optimum değerine çekilmesi durumunda yapılacak enerji tasarrufu miktarı Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Tav fırınında fazla havanın azaltılması ile yapılacak tasarruf miktarı (Potential energy savings by reducing excess air in the annealing furnace)

Fazla Havanın Azaltılması ile Yapılacak Tasarruf Miktarı	
Fazla hava debisi (Nm ³ /h)	4.073
Fazla hava oranı (%)	79,77
Hedef fazla hava oranı (%)	10
Cp (kcal/Nm ³ K)	0,34
Havadaki azalma (Nm ³ /h)	3.563
Hava giriş sıcaklığı (°C)	18
Baca gazı sıcaklığı (°C)	458
Enerji tasarrufu (Kcal/h)	533.132
Fırın yıllık çalışma süresi (h)	2.300
Yıllık enerji tasarrufu (Kcal)	1.226.203.188
Tasarrufun LNG karşılığı (Nm ³ /h)	63,36

4.1.2. Yüksek Kapasiteli Yeni Bir Reküperatör Kullanımı (Using a New Recuperator Which Has More Heat Transfer Area)

Mevcut reküperatörün ısı transfer yüzey alanı yetersiz olduğu için baca gazı ısısının çok büyük bir bölümü fırın yakma havasına (taze havaya) aktarılamamaktadır. Baca gazı sıcaklığı “yoğuşma” sıcaklığı olarak belirlenen sınırın (110-120 °C) altına düşürülmeden bacadan atılan bu enerji, yüksek verimli bir reküperatör ile fırına tekrar kazandırılabilir [12, 13]. Fırının fazla hava miktarı düşürüldüğünde baca gazı debisi azalacak ve baca gazı sıcaklığı daha da yükselecektir. Bu durum göz önünde bulundurularak baca gazı debi ve sıcaklığına uygun (yeterli ısı transfer yüzey alanına sahip) reküperatör kullanımı gerekmektedir. Reküperatör uygulamalarında baca gazı sıcaklığının düşürülmesinde karşılaşılan problemlerden biri yakma havası sıcaklığı arttığında yakma havasının özgül hacminin artması sonucu burnerden gönderilen havanın kütesel debisinin azalmasıdır. Çalışma yapılan tav fırınında bulunan burner’lerin katalog değerleri incelendiğinde yakma havası sıcaklığının 550°C’ye kadar yükseltilmesine izin verildiği görülmüştür. Dolayısıyla burner üzerinde ayar yapılarak, yakma havasının hacimsel debisinin artırılması sağlanacaktır. Burner’de yapılacak bu ayarlama ile yakma havası sıcaklığı 550°C’ye kadar yükseltilebilecektir. Yüksek kapasiteli yeni bir reküperatör kullanımıyla yapılacak enerji tasarrufu miktarı Tablo 9’da verilmiştir.

4.1.3. Tufal Kaybının Önlenmesi (Reducing Descaling)

Çelik, haddeleme sıcaklığına kadar ısıtıldığında oksijenin metal yüzeyi ile reaksiyona girmesi sonucu

tufal meydana geldiği bilinmektedir. Meydana gelen tufal miktarı: fırındaki hava fazlalık katsayısına, ısıtma süresine, ısıtılan çeliğin kalitesine, fırın atmosferine, ısıtma aparatlarının tip ve kullanım şekillerine bağlı olduğu belirtilmektedir [14-16]. Tav fırını çıkışı (reküperatör öncesi) yapılan gaz analizinde, fırına gönderilen yakma havası miktarının gereğinden fazla olduğu tespit edilmiştir. Yakma havası miktarı gereğinden fazla olduğunda, fırın sıcaklığı düşmekte ve hava fazlalığından dolayı tavlancak malzemede tufal oluşup malzeme kaybı meydana gelmektedir. Ölçümler sonucunda Tav Fırınında tufal kaybı ortalama %2,5’dir. Yapılan araştırmalarda bu değerler ortalama %1,8-2’ye çekilebileceği anlaşılmıştır.

4.1.4. Fırın yüzey kayıpları (Furnace Surface Heat Losses)

Çalışma kapsamında fırın yüzey kayıplarının tespitine yönelik olarak fırın yüzeyi termal kamera ile taranmış, eksik ve zayıf izolasyonlar tespit edilmiştir. İzolasyon kayıplarından kaynaklanan ısı kayıplarının toplamdaki payının düşük olduğu varsayımı ile yüzey kayıplarına yönelik hesaplama yapılmamıştır.

4.1.5. Toplam Tasarruf Miktarı (Total Saving Amount)

Yukarıda belirtilen tasarruf potansiyellerinin değerlendirilmesi durumunda yapılacak toplam enerji tasarrufu ve bu tasarrufun mali karşılığı Tablo 10’da verilmiştir.

Tav fırını için belirtilen potansiyel tasarruf alanlarının uygulanması ile CO₂ salınımindaki azalma Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 9. Mevcut tav fırını reküperatörünün yüksek kapasiteli bir reküperatör ile değiştirilmesi durumunda yapılacak tasarruf miktarı (Potential energy savings by changing the current recuperator with a high-capacity recuperator)

Yüksek Kapasiteli Reküperatör ile Yapılacak Tasarruf Miktarı	
Mevcut reküperatör çıkışı baca gazı sıcaklığı (°C)	458
Yeni imal edilecek reküperatör çıkışı baca gazı sıcaklığı (°C)	180
Reküperatör çıkışı gazı debisi (Nm ³ /h)	6.136
Cp (kcal/Nm ³ K)	0,35
Enerji tasarrufu (Kcal/h)	704.446
Fırın yıllık çalışma süresi (h)	2.300
Tasarrufun LNG karşılığı (Nm ³ /h)	83,72

Tablo 10. Tav fırını toplam tasarruf miktarı (Total amount of savings of the annealing furnace)

Tasarrufun Adı	Enerji (Kcal/h)	Tasarrufun LNG Karşılığı (Nm ³ /h)	Yıllık Mali Değeri (USD)
Fazla havanın azaltılması	533.132	63,36	80.154
Mevcut reküperatörün yüksek verimli (yüksek kapasiteli) bir reküperatörle değiştirilmesi	704.446	83,72	105.910
TOPLAM	1.237.578	147,08	186.063

Tablo 11. Tasarruf alanlarının uygulanması ile CO₂ salınımindaki azalma (Reduction in CO₂ emissions by the application of saving areas)

Tasarrufun Adı	Tasarruf Miktarı (kcal/h)	Tasarrufun LNG Eşdeğeri (Nm ³ /h)	CO ₂ Salınımindaki Azalma (kg/h)	CO ₂ Salınımindaki Azalma (Yıllık, kg)
Fazla Havanın Azaltılması	533.132	63,36	127	292.100
Mevcut reküperatörün yüksek verimli (yüksek kapasiteli) bir reküperatörle değiştirilmesi	704.446	83,72	168	386.400
TOPLAM	1.237.578	147,08	295	678.500

4.1.6. Yatırımlar ve Geri Ödeme Süreleri (Investment and Payback Period)

Yukarıda hesaplanan potansiyel tasarruf alanlarından “fazla havanın azaltılması” ve “yüksek verimli reküperatörün imal edilmesi” ile yapılacak olan tasarruf miktarları için yatırım miktarları ve geri ödeme süreleri Tablo 12’de verilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bir sanayi kuruluşun ait tav fırınında, fırın verimliliği ve tasarruf potansiyellerinin belirlenmesine yönelik ölçümler alınmıştır. Ölçümlerden elde edilen verilerden yola çıkarak kütle ve enerji denklikleri oluşturulmuştur. Fırında tespit edilen enerji tasarruf potansiyelleri; fırınların yüksek hava fazlalık katsayılarında çalıştırılması (fırına yarı mamul girişi ve çıkışı kapaklarından hava girmesi), reküperatörün ısı transfer yüzey alanının yetersiz kalması olarak belirlenmiştir.

Fırının optimum hava-yakıt oranıyla çalıştırılması için fırına brülörler dışından giren havanın girişinin engellenmesi gerekmektedir. Buna yönelik fırın baca hattına damper konularak, fırının atmosfer basıncından daha yüksek bir basınçta (0,5 mmSS) tutulması sağlanmalıdır. Fazla havanın azaltılması için gerekli yatırım miktarı 10.000 \$ ve amortisman süresi 1,3 aydır.

Fırın çıkışında baca gazı sıcaklığının düşürülmesi için ısı transfer yüzey alanı daha fazla olan yeni bir reküperatöre ihtiyaç duyulmaktadır. Böylelikle baca gazı sıcaklığı 458 °C’den 120 °C’ye düşürülerek yıllık 150.910 \$ tasarruf elde edilebilecektir. Yüksek ısı

transfer alanına sahip reküperatör yatırımının amortisman süresi yaklaşık 4,6 aydır.

Fırına giren fazla hava miktarı azaltıldığında mevcut durumda %2,5 olan tufal kaybı %1,8~2 mertebelerine indirilebilecektir. Enerji tasarrufuna yönelik fırına uygulanacak önlemlerle yılda 678.500 kg CO₂ emisyon salımı önlenecektir.

SEMBOLLER DİZİNİ (NOMENCLATURE)

B : yakıt debisi [Nm³/h],
 c_{pi} : tavlama öncesi kütüğün özgül ısısı [Kcal/kg°C],
 c_{p2} : tavlama sonrası kütüğün özgül ısısı [Kcal/kg°C],
 H_u : yakıtın alt ısı değeri [Kcal/Nm³],
 m_k : tavlama sonrası kütüğün kütleli debisi [kg/h],
 T_1 : tavlama öncesi kütüğün sıcaklığı [°C],
 T_2 : tavlama sonrası kütüğün sıcaklığı [°C],
 Z : fırından çıkan [%] ısı kayıpları,

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

LNG Sıvılaştırılmış doğalgaz
 PHAST Proses ısıtma değerlendirilmesi ve gözden geçirme aracı
 TEP Ton eşdeğer petrol

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- McAllister, S., Chen, J. ve Fernandez-Pello, A. C., “Thermodynamics of Combustion”, **Fundamentals of Combustion Processes**, 1st Edition, Springer, USA, 18-20, 2011.
- IEA, “Global Energy Trends”, **World Energy Outlook 2007 Edition**, International Energy

Tablo 12. Tav fırını için gerekli yatırımlar ve geri ödeme süreleri (Necessary investments and payback period for the annealing furnace)

Tasarrufun Adı	Yapılacak Olan Yatırım	Yatırımın Maliyeti (USD)	Tasarruf Miktarı (USD)	Yatırımın Geri Ödeme Süresi
Fazla Havanın azaltılması	Tav fırını çıkışı oksijen ölçme sistemi	10.000	95.151	1,3 ay
Mevcut reküperatörün yüksek verimli (yüksek kapasiteli) bir reküperatörle değiştirilmesi	Yüksek verimli bir reküperatör imali	55.000	142.180	4,6 ay

- Agency, 73-75, 2007.
3. Terzi, U.K. ve Baykal, R., "Efficient and effective use of energy: a case study of Tofas", **Environmental Research, Engineering and Management**, Cilt 1, No 55, 29-33, 2011.
 4. Simsek, B., Simsek, E.H. ve Altunok, T., "Empirical and Statistical Modeling of Heat Loss from Surface of a Cement Rotary Kiln System", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 28, No 1, 59-66, 2013.
 5. Xu, C. ve Cang, D., "A Brief Overview of Low CO₂ Emission Technologies for Iron and Steel Making", **Journal of Iran and Steel Research, International**, Cilt 17, No 3, 1-7, 2010.
 6. Ertem, M.E., Sen, S., Akar, G., Pamukçu, C. ve Gurgun, S., "Energy Balance Analysis and Energy Saving Opportunities for Erdemir Slab Furnace #3", **Energy Sources, Part A**, Cilt 32, No 11, 979-994, 2010.
 7. Ertem, G., Çelik, B. ve Yeşilyurt, S., "Endüstriyel Tav Fırınlarında Isı Denkliği Hesaplamaları ve Enerji Verimliliğinin Belirlenmesi", **IV. Ege Enerji Sempozyumu**, İzmir, 1-8, 21-23 Mayıs 2008.
 8. Si, M., Thompson, S. ve Calder, K., "Energy Efficiency Assessment by Process Heating Assessment and Survey Tool (PHAST) and Feasibility Analysis of Waste Heat Recovery in the Reheat Furnace at a Steel Company", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 15, No 6, 2904-2908, 2011.
 9. Chen, W.H., Chung, Y.C. ve Liu, J.L., "Analysis on Energy Consumption and Performance of Reheating Furnaces in a Hot Strip Mill", **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Cilt 32, No 5, 695-706, 2005.
 10. Manatura, K. ve Tangtrakul, M., "A Study of Specific Energy Consumption in Reheating Furnace Using Regenerative Burners Combined with Recuperator", **Silpakorn University Science and Technology Journal**, Cilt 4, No 2, 7-13, 2010.
 11. Kaya, D. ve Eyidoğan, M., "Energy Conservation Opportunities in an Industrial Boiler System", **J. Energy Engineering**, Cilt 136, No 1, 18-25, 2010.
 12. Kaya, D. ve Güngör, C., "Sanayide Enerji Tasarruf Potansiyeli-I", **Mühendis ve Makina**, Cilt 514, No 20-30, 2002.
 13. Kaya, D. ve Güngör, C., "Sanayide Enerji Tasarruf Potansiyeli-II", **Mühendis ve Makina**, Cilt 515, No 1, 36-44, 2002.
 14. Trinks, W., Mawhinney, M. H., Shannon, R. A., Reed, R. J., ve Garvey, J. R., "Industrial Furnaces", 6th Edition, **John Wiley and Sons, Inc.**, USA, 2004.
 15. Mullinger, P. ve Jenkins, B., "Industrial and Process Furnaces", **Butterworth-Heinemann**, UK, 2008.
 16. Topbaş, M. A., "Endüstri Fırınları", Cilt 2, **Damla Matbaacılık**, İstanbul, 1992.

