

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DOĞAL GAZLI VE ELEKTRİKLİ CAM TEMPERLEME
FIRINLARININ ENERJİ ANALİZİ VE KARŞILAŞTIRILMASI**

AHMET ÖZÇELİK

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOĞAL GAZLI ve ELEKTRİKLİ CAM TEMPERLEME
FIRINLARININ ENERJİ ANALİZİ ve KARŞILAŞTIRILMASI

AHMET ÖZÇELİK

Prof.Dr. İlhan Tekin ÖZTÜRK
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Hakan DEMİR
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv.

Prof.Dr. Hasan KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.


.....


.....


.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 01.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Türkiye’de ilk defa bu çalışmada, cam endüstrisinde çalışmakta olan doğal gazlı ve elektrikli iki fırının enerji tüketimleri üzerinden bir kıyaslama yapılmıştır. Bu konuda yatırım ve iyileştirme yapmak isteyen işletmelere kılavuz niteliği taşıyan bir çalışma olduğu için çok mutluyum.

Bana bu konuda çalışma fırsatı veren; başta danışman hocam Prof. Dr. İlhan Tekin ÖZTÜRK’e, yardımlarını esirgemeyen hocam Prof. Dr. Hasan KARABAY’a çok teşekkür ediyorum.

Kocaeli Makine Mühendisleri Odası Şube Müdürü, Makine Yüksek Mühendisi Alparslan GÜVEN’e çok teşekkür ediyorum.

Bu çalışma için işletmenin kapılarını bize açan Endüstri Mühendisi Hikmet Bora BARKAN’a, üretim sorumlusu Veysel MEN’e teşekkürlerimi sunarım.

Tezle ilgili çalışmaları yapmak için zamanlarından çaldığım evlatlarım: Sena Görkem, Cansu Begüm, Yağmur Melis, Kağan Efe’ye ve bana destek olan sevgili eşim Seher’e teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştirip büyütürken hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan anneme ve rahmetli babama sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Haziran – 2019

Ahmet ÖZÇELİK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
GİRİŞ	1
1. TEMPERLEME VE TEMPERLEME PROSESİNİN TANIMI.....	7
2. ENDÜSTRİYEL FIRINLARIN ANALİZİNDE KULLANILAN BAĞINTILAR.....	10
2.1. Kütleinin Korunumu	10
2.2. Enerjinin Korunumu	12
3. DOĞAL GAZLI CAM TEMPERLEME FIRINININ VE ÖLÇÜM CİHAZLARININ ÖZELLİKLERİ, FIRINDA YAPILAN ÖLÇÜMLER, HESAPLAR	19
3.1. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırınının Özellikleri.....	19
3.2. Ölçüm Cihazlarının Özellikleri	21
3.3. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırını İçin Nominal Kapasitede Yapılan Ölçümler ve Birim Zamandaki Enerji Dengesi	21
3.4. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırını için Nominal Kapasitede Yapılan Hesaplar	25
3.4.1. Doğal gazlı cam temperleme fırınında nominal kapasitede yanma denklemleri, stokiyometrik hava ihtiyacı ve baca gazlarının hesabı	25
3.4.2. Doğal gazlı cam temperleme fırınında nominal kapasitede enerji akışlarının hesabı	30
3.4.3. Doğal gazlı cam temperleme fırınında nominal kapasitede verim ve enerji maliyeti hesaplaması	31
3.5. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırınında Temperlenen Farklı Boyutlardaki Camlardan Alınan Ölçümler ve Fırın Verimleri	33
3.6. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırınında Farklı Cam Kalınlıklarında, Maksimum Kapasitelerde Yapılan Ölçümler ve Hesaplar	35
3.6.1. Doğal gazlı cam temperleme fırınında farklı cam kalınlıklarında, maksimum kapasitelerde enerji akışları ve verim değerleri	36
3.6.2. Doğal gazlı cam temperleme fırınında farklı cam kalınlıklarında, maksimum kapasitelerde enerji maliyetleri.....	39
3.7. Doğal Gazlı Sanayi Fırınlarında Reküperatör Kullanarak Enerji Tasarrufu Sağlama Yöntemleri	39
3.7.1. Kapalı alevli reküperatif brülörler	41
3.7.2. Açık alevli reküperatif brülörler	42
3.7.3. Merkezi reküperatörlü ısıtma fırınları.....	43
3.7.4. Rejeneratif yakma fırınları.....	44

3.8. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırınına Nominal Kapasitede İyileştirme Yöntemleri Uygulanması Durumunda Yapılan Hesaplar	46
3.8.1. İyileştirme-1: Doğal gazlı cam temperleme fırınında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması durumu için enerji akışlarının hesabı	47
3.8.2. İyileştirme-1: Doğal gazlı cam temperleme fırınında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması durumu için verim ve enerji maliyetinin hesabı.....	48
3.8.3. İyileştirme-2: Doğal gazlı cam temperleme fırınında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması ve fırın yalıtımının iyileştirilmesi durumu için enerji akışlarının hesabı	49
3.8.4. İyileştirme2: Doğal gazlı cam temperleme fırınında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması ve fırın yalıtımının iyileştirilmesi durumu için verim ve enerji maliyeti hesaplaması.....	50
4. ELEKTRİKLİ CAM TEMPERLEME FIRINININ ÖZELLİKLERİ, FIRINDA YAPILAN ÖLÇÜMLER, HESAPLAR.....	53
4.1. Elektrikli Cam Temperleme Fırını İçin Nominal Kapasitede Yapılan Ölçümler ve Birim Zamandaki Enerji Dengesi	54
4.2. Elektrikli Cam Temperleme Fırını için Nominal Kapasitede Yapılan Hesaplar	58
4.2.1. Elektrikli cam temperleme fırınında nominal kapasitede enerji akışlarının hesabı	58
4.2.2. Elektrikli cam temperleme fırınında nominal kapasitede verim ve maliyet hesapları	59
4.3. Elektrikli Cam Temperleme Fırınında Farklı Cam Kalınlıklarında, Maksimum Kapasitelerde Yapılan Ölçümler ve Hesaplar	60
4.3.1. Elektrikli cam temperleme fırınında farklı cam kalınlıklarında, maksimum kapasitelerde enerji akışları ve verim değerleri	61
4.3.2. Elektrikli cam temperleme fırınında farklı cam kalınlıklarında, maksimum kapasitelerde enerji maliyetleri	64
4.4. Elektrikli Cam Temperleme Fırınına Nominal Kapasitede, İyileştirme Yöntemi Uygulanması Durumunda Yapılan Hesaplar	64
4.4.1. Elektrikli cam temperleme fırınında fırın yalıtımının iyileştirilmesi önerisi için enerji akışlarının hesabı	65
4.4.2. Elektrikli cam temperleme fırınında fırın yalıtımının iyileştirilmesi önerisi için verim ve enerji maliyetinin hesaplanması.....	66
5. DOĞAL GAZLI VE ELEKTRİKLİ CAM TEMPERLEME FIRINLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	67
5.1. Doğal Gazlı ve Elektrikli Fırınların Nominal Kapasitede Enerji Akışları, Verimleri ve Mevcut Durum ile İyileştirme Önerileri Sonrası Durum İçin Verimlerinin ve Enerji Maliyetlerinin Karşılaştırılması	67
5.2. Doğal Gazlı ve Elektrikli Fırınların Enerji Akışlarının Nominal ve Maksimum Kapasitelerde Sankey Diyagramı Üzerinden Karşılaştırılması	69
5.3. Doğal Gazlı ve Elektrikli Fırınların Nominal Kapasitede Termal Kamera Görüntülerinin Karşılaştırılması	71

5.4. Doğal Gazlı ve Elektrikli Fırınlarn Maksimum Kapasitelerdeki Temperleme Maliyetlerinin Karşılaştırılması	75
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	77
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	85
KIŞISEL YAYIN VE ESERLER	87
ÖZGEÇMİŞ	88



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Camların, fırın içerisine temperleme işlemi için yönlendirilmesi.....	7
Şekil 1.2.	Temperli, kırılmış bir cam örneği	8
Şekil 2.1.	Kütle akışı için sistem örneği	10
Şekil 2.2.	Kapalı bir sistemin şematik gösterimi	12
Şekil 2.3.	Açık bir sistemin şematik gösterimi	13
Şekil 2.4.	Katı bir cismin, çevresindeki sıcak bir akışkan ile ısıtılması	16
Şekil 3.1.	Doğal gazlı cam temperleme fırınının genel görünümü	19
Şekil 3.2.	Doğal gazlı cam temperleme fırınında homojenizasyon fanlarının görünümü	20
Şekil 3.3.	Doğal gazlı temperleme fırınında kütle ve enerji akışlarının şematik gösterimi	24
Şekil 3.4.	Doğal gazlı fırının farklı cam yükleri için fırın verimlerinin eğilimi ve fırınların kapasite aralığı	34
Şekil 3.5.	Doğal gazlı cam temperleme fırınının farklı cam tipi ve kalınlıkları için maksimum kapasitelerdeki verimleri	38
Şekil 3.6.	Isıl işlem fırını enerji diyagramı ve reküperatörlü ısıl işlem fırını enerji diyagramı	40
Şekil 3.7.	Rekuperatif brülörde endirekt yanma	42
Şekil 3.8.	Kendinden reküperatörlü brülörün çalışması	42
Şekil 3.9.	Merkezi reküperatörlü ve rekuperatif brülörlü fırınların şematik gösterimi	43
Şekil 3.10.	Rejeneratif yakma sistemi	45
Şekil 3.11.	Rejeneratif yakma sisteminin şematik gösterimi	45
Şekil 3.12.	Rejeneratif yakma sisteminin petek gövde ısı depolama kanalı	46
Şekil 4.1.	Elektrikli cam temperleme fırınının genel görünümü	53
Şekil 4.2.	Elektrikli cam temperleme fırınının cam soğutma bölümü görünümü	54
Şekil 4.3.	Elektrikli cam temperleme fırını için kütle ve enerji akışlarının şematik gösterimi	55
Şekil 4.4.	Elektrikli fırının, enerji analizörü ile ölçülen elektrik tüketimi	57
Şekil 4.5.	Elektrikli cam temperleme fırınının farklı cam kalınlıkları için maksimum kapasitelerdeki verimleri	63
Şekil 5.1.	Doğal gazlı fırının nominal kapasitedeki sankey diyagramı	69
Şekil 5.2.	Elektrikli fırının nominal kapasitedeki sankey diyagramı	69
Şekil 5.3.	Doğal gazlı fırının maksimum kapasitedeki sankey diyagramı	70
Şekil 5.4.	Elektrikli fırının maksimum kapasitedeki sankey diyagramı	70
Şekil 5.5.	Doğal gazlı fırın ön giriş bölgesi termal kamera görüntüsü	71
Şekil 5.6.	Elektrikli fırın ön giriş bölgesi termal kamera görüntüsü	71
Şekil 5.7.	Doğal gazlı fırının yan duvar bölgesi termal kamera görüntüsü	72
Şekil 5.8.	Elektrikli fırının yan duvar bölgesi termal kamera görüntüsü	72

Şekil 5.9.	Doğal gazlı fırının homojenizasyon fanları yan duvar bölgesi termal kamera görüntüsü	73
Şekil 5.10.	Elektrikli fırının yan duvar bölgesi termal kamera görüntüsü	73
Şekil 5.11.	Doğal gazlı fırının konveyör dış bölgesi termal kamera görüntüsü	74
Şekil 5.12.	Elektrikli fırının konveyör dış bölgesi termal kamera görüntüsü	74
Şekil 5.13.	Doğal gazlı ve elektrikli fırının maksimum kapasitelerdeki enerji maliyetleri	76



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Ölçüm cihazlarının özellikleri ve kalibrasyon bilgileri	21
Tablo 3.2. Doğal gazlı fırının ortam sıcaklığı, bağıl nem, doğal gaz hat basıncı ve doğal gaz tüketimi ölçüm sonuçları	22
Tablo 3.3. Doğal gazlı fırının elektrik tüketimi ölçüm sonuçları.....	22
Tablo 3.4. Doğal gazlı fırının baca gazı analizi ve ölçüm sonuçları	22
Tablo 3.5. Doğal gazlı fırının yüzey alanları ve ortalama yüzey sıcaklıkları	23
Tablo 3.6. Doğal gazlı fırının soğutma grubu ölçüm sonuçları	23
Tablo 3.7. Doğal gazlı fırında temperlenen cam için alınan ölçümler.....	23
Tablo 3.8. Türkiye’de kullanılan doğal gazın bileşenleri.....	26
Tablo 3.9. Doğal gazlı temperleme fırınında nominal kapasitede enerji akışları.....	31
Tablo 3.10. Doğal gazlı fırında üretim esnasında, farklı boyutlardaki camlardan alınan ölçümler ve fırın verimleri.....	33
Tablo 3.11. Doğal gazlı temperleme fırınında farklı tip ve kalınlıklarda, maksimum boyutlardaki camlar temperlenirken alınan ölçümler	35
Tablo 3.12. Doğal gazlı temperleme fırınında farklı tip ve kalınlıklarda, maksimum boyutlardaki camların kütle akışları.....	36
Tablo 3.13. Doğal gazlı temperleme fırınında farklı tip ve kalınlıklarda, maksimum boyutlardaki camları temperlemek için giren enerji akışları.....	37
Tablo 3.14. Doğal gazlı temperleme fırınında farklı tip ve kalınlıklarda, maksimum boyutlardaki camları temperlemek için çıkan enerji akışları ve verimler	37
Tablo 3.15. Doğal gazlı temperleme fırınında farklı cam tipi ve kalınlıklarda, maksimum fırın kapasitelerinde enerji maliyetleri	39
Tablo 3.16. Doğal gazlı cam temperleme fırınında nominal kapasitede, iyileştirme önerileri sonrası, enerji akışları.....	52
Tablo 4.1. Elektrikli fırının ortam sıcaklığı, bağıl nem ve elektrik tüketimi ölçüm sonuçları	55
Tablo 4.2. Elektrikli fırının yüzey alanları ve ortalama yüzey sıcaklıkları.....	56
Tablo 4.3. Elektrikli fırında temperlenen cam için alınan ölçümler	56
Tablo 4.4. Elektrikli temperleme fırınında nominal kapasitede enerji akışları.....	59
Tablo 4.5. Elektrikli temperleme fırınında maksimum kapasitelerde, farklı kalınlıklardaki camlar için alınan ölçümler	61
Tablo 4.6. Elektrikli temperleme fırınında maksimum kapasitelerde, farklı kalınlıklardaki camları temperlemek için kütle akışları	61

Tablo 4.7. Elektrikli temperleme fırınında maksimum kapasitelerde, farklı kalınlıklardaki camları temperlemek için giren, çıkan enerji akışları ve verimler	62
Tablo 4.8. Elektrikli temperleme fırınında farklı cam kalınlıklarında, maksimum kapasitelerde enerji maliyeti	64
Tablo 4.9. Elektrikli temperleme fırınında nominal kapasitede, İyileştirme önerisi sonrası enerji akışları	65
Tablo 5.1. Doğal gazlı fırının nominal kapasitede enerji akışları, verim ve enerji maliyeti	67
Tablo 5.2. Elektrikli fırının nominal kapasitede enerji akışları, verim ve enerji maliyeti	68
Tablo 5.3. Doğal gazlı ve elektrikli fırının nominal kapasitede mevcut durum ve iyileştirme önerileri sonrası durumlar için verimleri ve enerji maliyetleri	68



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C	:Özgül ısı, (kJ/kg K)
E	:Enerji, (kJ)
Ek	:Kinetik enerji, (kJ)
Ep	:Potansiyel Enerji, (kJ)
g	:Yer çekimi ivmesi, (m/s ²)
h	:Özgül entalpi, (J/mol)
Hu	:Yakıtın ısı enerjisi, (kJ/Nm ³)
m	:Kütle, (kg)
\dot{m}	:Kütlesel debi, (kg/h)
M	:Mol kütlesi, (kg)
\dot{m}_{ss}	:Soğutma suyu debisi, (kg/s)
N	:Mol sayısı, (kmol)
\dot{N}	:Bir saatteki mol sayısı, (kmol/h)
n	:Mol sayısı, (mol)
P	:Basınç, (Pa)
\dot{Q}	:Birim zamandaki ısı enerjisi, (kJ/h)
R	:Gaz sabiti, (kJ/(kg.K))
\bar{R}	:Evrensel gaz sabiti, (kJ/(kmol.K))
t	:Zaman, (s)
U	:İç enerji, (kJ)
u	:Isı taşınım katsayısı
V	:Hız, (m/s), Hacim, (m ³)
v	:Özgül hacim, (m ³ /kg)
W	:İş, (kJ)
\dot{W}	:Birim zamanda yapılan iş, (kW)
z	:Yükseklik, (m)
α	:Yakıtın bir molekülündeki karbon atomu sayısı
β	:Yakıtın bir molekülündeki hidrojen atomu sayısı
γ	:Yakıtın bir molekülündeki oksijen atomu sayısı
ε	:Yüzey ışıyım yayma katsayısı
σ	:Stefan – Boltzmann sabiti, (5.6697x10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)
ρ	:Yoğunluk, (kg/m ³)
η	:Verim, (%)
Σ	:Toplam
η_1	:Birinci iyileştirme sonrası verim, (%)
η_2	:İkinci iyileştirme sonrası verim, (%)

Kısaltmalar

bg	:Baca gazı
bg,bü	:Bütan gazı için, baca gazı
bg,dg	:Doğal gaz için baca gazı

bg,et	:Etan gazı için baca gazı
bg,me	:Metan gazı için baca gazı
bg,pr	:Propan gazı için, baca gazı
c	:Cam
c,ç	:Çıkan cam
c,g	:Giren cam
ç	:Çıkan
dg	:Doğal gaz
g	:Giren
h	:Hava
h,bü	:Bütan gazı için, gerekli hava
h,dg	:Doğal gaz için, gerekli hava
h,et	:Etan gazı için, gerekli hava
h,g	:Giren hava
h,me	:Metan gazı için, gerekli hava
h,pr	:Propan gazı için, gerekli hava
hs	:Stokiyometrik hava
iş	:Işınım
i	:Sıralama sayısı (1,2,...n)
j	:Sıralama sayısı (1,2,...n)
k	:Kayıp
m	:Malzeme
o	:Ortam
r	:Oda
s	:Stokiyometrik
sb	:Su buharı
sç	:Soğutma suyu çıkış
sg	:Soğutma suyu giriş
ss	:Soğutma suyu
su,bü	:Bütan gazı için, oluşan su
su,dg	:Doğal gaz için, oluşan su
su,et	:Etan gazı için, oluşan su
su,me	:Metan gazı için, oluşan su
su,pr	:Propan gazı için, oluşan su
taş	:Taşınım
y	:Yakıt
yb	:Yakıtla beslenen

DOĞAL GAZLI VE ELEKTRİKLİ CAM TEMPERLEME FIRINLARININ ENERJİ ANALİZİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu tezde; cam endüstrisinde yoğun olarak kullanılmakta olan bir adet elektrikli, bir adet doğal gazlı cam temperleme fırınının, nominal ve maksimum yükteki enerji verimleri, birim ürün başına enerji maliyetleri elde edilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Analizler termodinamiğin birinci kanununa göre yapılmıştır. Bir kg temperlenmiş cam başına doğal gazlı fırının enerji maliyeti 1363,53 kg/h cam yüklemesi için 11,375 krş, verimi % 14,21; elektrikli fırının 1269,35 kg/h cam yüklemesi için enerji maliyeti 7,279 krş, verimi ise % 59,81 olarak elde edilmiştir. Yukarıda belirtilen cam yüklerinde, elektrikli fırının enerji maliyeti doğal gazlı fırına kıyasla % 36 oranında daha düşük çıkmıştır. Doğal gazlı fırının maksimum kapasiteye karşılık gelen 2761,04 kg/h cam yüklemesinde 1 kg temperlenmiş cam başına enerji maliyeti 5,756 krş, verimi % 27,92; elektrikli fırının maksimum kapasiteye karşılık gelen 1732,8 kg/h cam yüklemesinde enerji maliyeti 6,500 krş, verimi ise % 67,01 elde edilmiştir. Elektrikli fırının enerji maliyeti, doğal gazlı fırına kıyasla maksimum kapasitelerde % 12,93 oranında daha yüksek elde edilmiştir. Düşük kapasitelerde eski nesil doğal gazlı temperleme fırınının enerji maliyetinin, elektrikli fırının enerji maliyetinden çok daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cam Temperleme, Fırınlarda Enerji Verimliliği, Temperleme Fırını.

ENERGY ANALYSIS AND COMPARISON OF NATURAL GAS AND ELECTRIC GLASS TEMPERING FURNACES

ABSTRACT

In this thesis; energy efficiency and energy cost per unit product of one electric and one natural gas glass tempering furnace, which is densely used in the glass industry, were determined and the results were compared. The calculations were based on the First Law of Thermodynamics at nominal and maximum loads. Firstly both furnaces were analysed according to nominal capacity. For a 1 kg of tempered glass; the glass flow rate of natural gas fired furnace was measured 1363,53 kg/h, the energy cost and the energy efficiency were calculated as 11,375 krş and 14,21 % respectively. Similarly, for a 1 kg of tempered glass; the glass flow rate of electric furnace was measured 1269,35 kg/h, the energy cost and the energy efficiency were calculated as 7,279 krş and 59,81 % respectively. The energy cost of the electric furnace at the specified flow rates was 36 % lower than the natural gas furnace. At maximum capacity, the glass flow rate of natural gas fired furnace was measured 2761,04 kg/h and the energy cost and the energy efficiency were calculated as 5,756 krş and 27,92 % respectively. The glass flow rate of electric furnace was measured 1732,8 kg/h, the energy cost and the energy efficiency were calculated as 6,500 krş and 67,01 % respectively. The energy cost of the electric furnace was 12.93 % higher compared to the natural gas furnace at the maximum capacity. In the case of low capacities, it was determined that the energy cost of the old generation natural gas tempering furnace was much higher than the energy cost of the electric furnace.

Key Words: Glass Tempering, Energy Efficiency In Furnaces, Tempering Furnace.

GİRİŞ

İnsan yaşamının vazgeçilmez bir parçası olan enerji, geçmişte olduğu gibi bugün de Dünya ve Türkiye gündeminde tartışılan konuların başında yer almaktadır. Tarihsel gelişim içinde birincil enerji kaynaklarının türleri ve tüketim miktarlarının artmasının yanında, ikincil enerji kaynağı olan elektrik enerjisi de teknolojik gelişmelerin günlük yaşama yansımalarının sonucu olarak birincil enerji kaynakları gibi toplum hayatının vazgeçilmezi haline gelmiştir. Ülkemiz 2015 yılı verilerine göre birincil enerji kaynakları tüketiminde dünya toplamının % 1'i oranına karşılık gelen 126,9 milyon TEP ile Dünya sıralamasında 19. sırada yer almaktadır. Çin, % 22,9 oranında 3.014 milyon TEP ile 1.sırada yer almaktadır [1]. İnsan ihtiyaçlarının karşılanması ve teknolojik gelişmelerin sağlıklı olarak sürdürülmesinde gerekli olan enerji; sanayi, konut ve ulaştırma gibi sektörlerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Hayatımızın önemli bir parçası haline gelmiş olan çamaşır makineleri, bulaşık makineleri, bilgisayarlar, televizyonlar, telefonlar, fırınlar, ısıtıcılar, otomobiller ve daha birçok araç ancak enerji sağlayabildiğimizde hayatımızı kolaylaştırabilmekte ve yine ancak enerji sağlayabildiğimizde endüstriyel tesislerde üretilebilmektedir. Ülkemiz 2015 yılı verilerine göre elektrik enerjisi tüketiminde dünya toplamının % 1,1'i oranına karşılık gelen 261,8 TWh ile Dünya sıralamasında 17. sırada yer almaktadır. Çin, % 24,1 oranında 5.810,6 TWh ile 1.sırada yer almaktadır [1].

2017 yılında elektrik üretimimizin % 37'si doğal gazdan, % 33'ü kömürden, % 20'si hidrolik enerjiden, % 6'sı rüzgârdan, % 2'si jeotermal enerjiden ve % 2'si diğer kaynaklardan elde edilmiştir [2]. Fosil yakıtlar, çok uzun bir zaman dilimi göz önüne alındığında teorik olarak yenilenebilir iken istismar edilerek kullanılması sonucu yakın gelecekte tamamen tükenme tehlikesi ile karşı karşıyadır. Bu nedenle fosil yakıt rezervleri hızla azalmakta, özellikle petrol ve doğal gaz rezervleri kritik seviyelere yaklaşmaktadır. Dünyadaki toplam petrol rezervleri 1,7 trilyon varil civarında ve bu miktar yaklaşık 51 yıllık tüketimi karşılamaktadır. Dünya doğal gaz rezervi 2015 yılı sonunda 187 trilyon m³ olarak belirlenmiştir. Bu miktar küresel enerji üretimini 53 yıl gibi bir süre boyunca karşılamak için yeterlidir [1]. Elektrik

ihtiyacının karşılanmasında kullanılan doğal gaz ve sıvı yakıtların tamamına yakını, kömür yakıtının ise yaklaşık % 30'u ithal edilmektedir. [3].

18. yüzyılın ikinci yarısında İngiltere'de başlayan sanayi devrimi, hızla Avrupa ve Amerika'ya yayılarak tüm dünyaya, enerjinin uygarlıkların devamı için vazgeçilmez bir kaynak olduğunu gösterdi. 18. yüzyılda başlayan sanayi devrimi, güçlü bir devlet olma yolunun sanayileşmek ve sanayileşme ile beraber ülkelerin enerji sorunlarını çözmekten geçtiğini de göstermiş oldu. Günümüzde de geçerliliğini koruyan bu düşünceyle, eğer bir devlet sanayileşmeyle beraber enerji sorununu da kendi çözebiliyorsa ekonomik anlamda belli bir güce ulaşmış, dünya siyasetine yön veren, bağımsız ve lider bir ülke konumuna gelmiş kabul edilmektedir. Devletler; güçlü bir ülke olmak ve büyük ekonomik değerlere ulaşmak için endüstrilerini sürekli geliştirmekte, bu gelişmeler de bir takım önemli problemleri ortaya çıkarmaktadır. Endüstrileri gelişen ülkelerin enerji ve ham madde ihtiyaçları da sürekli artmaktadır. Devletler bu ihtiyaçlarını karşılamak, aynı zamanda kendilerine yeni pazarlar bulmak için adına 'Enerji Savaşları' dediğimiz savaflara girmekten hiç çekinmemektedirler. Bu enerji savaşları, devletleri öteden beri silahlanma yarışına sürüklemektedir. Bu askeri teknoloji alanındaki yarışta, sanayilerini geliştiren lider ülkeler fabrikalarında son teknoloji silahlar üretip gerektiğinde askeri güç kullanarak başka ülkelerin enerji kaynaklarını kendi himayeleri altına alarak sömürmektedirler. Sömürgeciliğin doğuşundan, günümüze kadar geçen zaman içerisinde bir güç savaşı vardır. Bu güç savaşı, özellikle zengin enerji kaynaklarına sahip toprakların paylaşımı konusunda yaşanmaktadır. Güçlü devletler, bu paylaşımında enerji odaklı bir strateji izlemektedirler. Ayrıca devletler arasında yaşanan anlaşmazlıkların, çatışmaların ve uluslararası siyasi çekişmelerin nedenlerine baktığımızda çoğunlukla karşımıza enerji kaynaklarından istifade etme arzusu çıkmaktadır. Kendi mühendisine, teknolojiye, araştırma ve geliştirmeye önem vermeyen ülkeler her zaman teknolojiye hakim olan ülkelere bağımlı olmak zorunda kalmıştır. Üstelik teknolojiye hakim olan söz sahibi ülkeler, karşılarında kendilerine rakip istememekte ve bunun için engelleyici her yola başvurumaktadırlar. Bu sebeplerden dolayı ülkemizde sanayileşme ve enerji politikaları belirlenirken çok titiz bir çalışma yapmamız gerekmektedir.

Enerji kaynaklarının tükenebilir oluşu, dışa bağımlılık ve çevresel etkiler sebebiyle geçmişte olduğu gibi günümüzde de ülkeler için güvenli, yeterli, ucuz ve temiz enerji

temin etmek; ekonomik, siyasi ve toplumsal yaşamın en önemli sorunları arasında yer almaktadır. Ayrıca temin edilen enerjinin yüksek verimle kullanılması, mevcut enerji kaynaklarının yanı sıra alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ait potansiyelin doğru değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Dünyada siyasi ve ekonomik gelişmelere bağlı olarak enerji fiyatlarının sürekli artması, fosil yakıtların belli bir süre sonra bitecek olması, fosil yakıttan üretilen enerjinin pahalı olması, fazla miktarda yenilenemeyen enerji kaynaklarının kullanılıyor olması çevre kirliliği sorunlarını önemli oranda arttırmıştır. Enerji; hayatımızdaki vazgeçilmez yararlarının yanında enerji üretimi, enerji dönüşümü, enerji taşınımı ve enerji tüketimi esnasında da büyük oranda çevrenin kirlenmesine sebep olmaktadır. Bu ve benzeri durumlar enerji dönüşüm teknolojilerini yeniden değerlendirmeye ve var olan enerji kaynaklarından daha fazla yararlanabilmek için bilim dünyasını yeni teknikler geliştirmeye zorlamaktadır. Bu nedenlerden dolayı çevresel etkileri daha az olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek, enerjiyi verimli kullanmak ve konutlarda, işletmelerde enerji verimliliği çalışması yapmak her bakımdan avantajlı olmaktadır.

Literatürde, fırınlarla ilgili enerji verimliliğini arttırmaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Muharrem Eyidoğan ve ark. [4] bir sanayi kuruluşundaki tav fırınında fırın verimliliğini arttırmak amaçlı enerji tasarruf potansiyellerinin belirlenmesi için ölçümler yapmış, ölçümlerden elde edilen verilerden yola çıkarak kütle ve enerji denkliklerini oluşturmuş, fırındaki enerji tasarruf potansiyellerini tespit etmişlerdir. Fırına, yarı mamul giriş ve çıkış kapaklarından hava girmesiyle fırının yüksek hava fazlalık katsayılarında çalıştırılarak düşük verimliliklerde çalıştırıldığını ayrıca fırın reküperatörünün ısı transfer yüzey alanının yetersiz olmasının fırın verimliliğini daha da düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Fırının optimum hava-yakıt karışım oranıyla çalıştırılması ve fırına brülörler dışında giren havanın engellenmesine yönelik fırının baca hattına damper konulmasını; bu şekilde fırının atmosfer basıncından daha yüksek bir basınçta tutularak fırına dışarıdan fazla hava girmeyeceğini önermişler. Fırın çıkışında ısı transfer yüzey alanı daha fazla olan yeni bir reküperatörle baca gazı sıcaklığını 458 °C'den 120 °C'ye düşürerek % 52,76'ya çıkardıkları fırın verimiyle yıllık 150.910 \$ tasarruf elde edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Si ve ark. [5] batı Kanada bölgesinin bir eyaleti olan Manitoba'da bulunan bir çelik fabrikasındaki tav fırınının enerji verimliliğini analiz etmişlerdir. Proses ısıtma, değerlendirme ve gözden geçirme aracı (PHAST) yardımı ile yapılan çalışmada tav fırınının verimini % 60 olarak hesaplamışlardır. Çalışmada baca gazı kayıplarını, toplam enerji kayıplarının % 29,5'i ile tav fırınındaki en büyük enerji kaybını oluşturduğunu; baca gazı yardımıyla enerji verimliliğinin artırılması için yarı mamullerin 315 °C'ye ön ısıtılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Fatma Çanka Kılıç ve ark. [6] bir sanayi kuruluşuna ait doğal gaz yakıtlı tav fırınında enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapmış, fırına ait egzoz gazı atık ısı potansiyelini 3.630,31 kW olarak bulmuş, atık ısı potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla % 16 verimle çalışacak bir Organik Rankine Çevrimi (ORC) sisteminin teknik ve fizibilite çalışmalarını tamamlamışlar. Bu çevrimi kullanarak 1.626.378,88 kWh/yıl elektrik enerjisi üretilebileceğini hesaplamışlar ancak tav fırınının çalışma süresi yıllık 8.000 saat'den daha az (2800 saat) olduğundan yatırımı mali bakımdan uygulanabilir bulmamışlardır.

Manatura ve Tangtrakul [7] yaptıkları çalışmada reküperatör ile birleştirilmiş rejeneratif yakıcıların kullanıldığı bir tav fırınında enerji tüketimini incelemişler, yapılan çalışmada tav fırınının özgül enerji tüketimini 1.042 MJ/t, fırın verimini ise % 80,1 hesaplamışlardır. Birleştirilmiş rejeneratif yakıcıların kullanıldığı fırınlar ile sadece reküperatör kullanılan tav fırınları karşılaştırdıklarında, birleştirilmiş rejeneratif yakıcı sayesinde enerjiden % 43,4 oranında tasarruf edilebildiğini tespit etmişlerdir.

Mirko Filipponi ve ark. [8] dövme sektörünün dünyada önemli firmalarından birinde kullanılan ısıtma işlem fırınında, yarı mamul yükleme ve boşaltma kapılarının açık kalma sürelerinin fırın enerji verimliliğine etkisini CFD programı yardımıyla analiz etmişler. Analiz sonucuna göre toplam 10 dakika boyunca kaybedilen ısı enerjisi miktarını 5606 MJ'e eşit ve bu ısı kaybının 5252 MJ değerindeki kısmının konvektif ısı akışından kaynaklandığını ayrıca kapı açık kalma süresinin 157 s'den 40 s'ye düşürülmesinin yaklaşık 60 kg CO₂ tasarrufu sağladığını hesaplamışlardır.

Ertem ve ark. [9] yaptıkları çalışmada Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları'nın 3 nolu yassı kütük fırınında kullanılan ısı enerjisinin iyileştirilmesi üzerine çalışmış,

fırındaki kayıp enerjinin hesaplanması için bir enerji giriş-çıkış modeli oluşturmuş ve yassı kütük fırınının ısı enerjisi verimliliğini % 64,26 olarak hesaplamışlardır. Fırına; kütüklerin ön ısıtmadan sonra girmesini, reküperatörden sonra atılan baca gazı ısısının geri kazanılmasının uygun olacağını ve baca gazının ısı enerjisi potansiyelini 81.590 kcal/TEP olarak hesaplamışlardır. Çalışma sonucunda fırının ısı verimini % 38,3; enerji kayıplarını % 31,6 ile baca gazı kayıpları, % 10,4 ile yüzey kayıpları, % 13 ile sızıntı-açıklık kayıpları ve % 6,7 ile diğer kayıplar olarak bulmuşlardır.

Tütünoğlu ve ark. [10] bir cam temperleme fırınının enerji analizinin nasıl yapılacağını göstermiş ve örnek bir cam temperleme fırınının enerji verimini % 16,23 bulmuşlar. Fırın yüzeyindeki ısı kayıpları ve kaçaklarını termal kamera ile tespit etmişler, fırının verimi üzerinde etkili olan kayıpları belirtmiş ve fırının verimini artırıcı yöntemleri tartışmışlar. Baca gazı ısı kayıplarının yarısının, yüzeylerden ve açıklıklardan sızıntıyla olan ısı kayıpların da yarısının fırına geri kazanılmasıyla fırının veriminin % 27,38 olacağını hesaplamışlardır.

Özçelik ve ark. [11] yaptıkları çalışmada, cam endüstrisinde kullanılmakta olan bir adet elektrikli, bir adet doğal gazlı cam temperleme fırınının üretim esnasındaki enerji tüketimlerini, birim cam başına enerji maliyetlerini belirlemiş ve sonuçları karşılaştırmışlar ve analizleri termodinamiğin birinci kanununa göre gerçekleştirmişler. Doğal gazlı fırının birim temperlenmiş cam başına enerji maliyetini 11,305 krş/kg, elektrikli fırınını ise 7,548 krş/kg hesaplamışlar. Cam endüstrisinde çalışmasını yaptıkları özelliklerde bir temperleme fırın yatırımı yapmak ve işletme maliyetlerini düşürmek isteyen işletmelerin, eski nesil doğal gazlı fırın yerine elektrikli fırını tercih etmesinin daha doğru bir tercih olduğu sonucuna varmışlardır.

Literatürde yapılan çalışmalarda da görüldüğü üzere endüstriyel tesislerde doğal gazlı fırınlar, bacalarından ve yüzeylerinden atmosfere atılan ısı enerjileri sebebiyle çoğunlukla verimsiz çalışmaktadır. Fırın yüzeylerinden olan enerji kayıpları ilave yalıtım önlemleri ile azaltılabilirken fırınların egzoz bacalarından atılan enerjinin kazanılabilmesi için ise son yıllarda gelişen teknolojiyle tasarlanan reküperatörlü yakıcıların kullanılması gerekmektedir. Maalesef ülkemiz sanayisinde verimsiz çalışan doğal gazlı fırınlar yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Kendinden

reküperatörlü yakıcı veya rejeneratif yakıcı fırınlar kullanıldığında, endüstriyel fırınların egzoz bacalarından atmosfere atılan ısı enerjisinin büyük bir kısmının geri kazanılması mümkün olmaktadır [12,13]. Dünyada enerjinin büyük bir kısmı endüstriyel tesislerde kullanılmaktadır [14]. Enerjinin en yoğun kullanıldığı proseslerden biri de analizlerini yaptığımız elektrikli ve doğal gazlı cam temperleme fırınlarıdır.

Bu çalışma, Kocaeli’nde bir cam fabrikasında çalışmakta olan bir adet elektrikli ve bir adet doğal gazlı cam temperleme fırınlarında yapılmıştır. Üretim anında alınan ölçümler yardımıyla fırınların enerji analizleri yapılmıştır. Ölçümler; fırınların üretimde yoğun olarak temperledikleri, fırının nominal kapasitesine karşılık gelecek cam boyutlarında ve farklı cam tipi, cam kalınlıklarındaki maksimum kapasitelere karşılık gelecek cam boyutları üzerinden yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmada literatürden farklı olarak doğal gazın bileşenleri ve üst ısıl değerine göre hesaplamalar yapılmış; farklı kütlelerdeki camların temperleme prosesinde birim zamandaki enerji akışları, verim ve birim cam başına enerji maliyetleri elde edilmiştir. Elde edilen veriler doğal gazlı ve elektrikli fırınlar için karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak her iki fırının enerji verimlerinin artırılması ve birim cam başına enerji maliyetlerinin azaltılması için yöntemler tartışılmış ve tavsiyelerde bulunulmuştur.

1. TEMPERLEME VE TEMPERLEME PROSESİNİN TANITIMI

Temperleme işlemi; yaklaşık 700 °C homojen sıcaklığa sahip bir fırının içerisine çevre şartlarındaki cam levhaların konveyör yardımıyla beslenmesi, yaklaşık 615-650 °C sıcaklığa ulaştıktan sonra fırının çıkışında yüksek hıza sahip hava ile ani soğutulmasıdır. Bu esnada önce dış kısımların soğumasıyla yüzeyin sertleşerek camın yüzeylerinde basınç, daha sonra da iç kısımların soğumasıyla camın iç kısımlarında çekme gerilmesi oluşturularak cam mukavemetini artırma işlemidir. Yapılan ısı işlemler camın hacmini, rengini, berraklığını ve kimyasal yapısını değiştirmez [15].

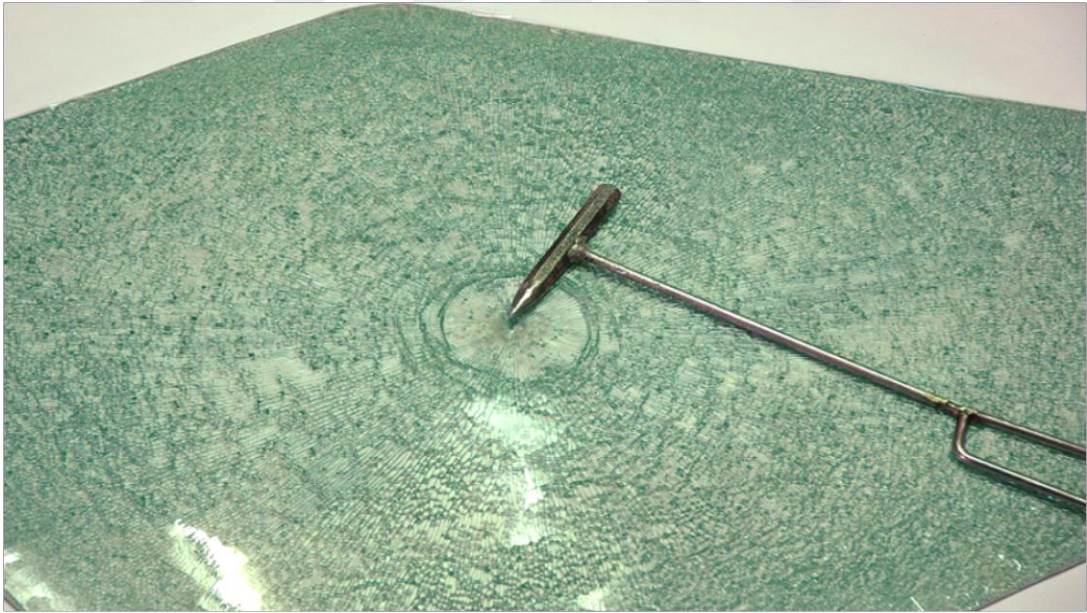
Temperleme işlemi Şekil 1.1'deki gibi yatay hat üzerinde camın dış yüzeylerine basınç gerilimi, camın ortasına ise dolaylı bir çekme gerilimi kazandırmak için ısıtma ve soğutma aşamalarını içerir. Temperli camlar aynı kalınlıktaki normal camlara göre yaklaşık 5 kat daha dayanıklı olup kırıldığı zaman Şekil 1.2'de gösterildiği gibi küçük parçalara ayrılarak yaralanma riskini azalttığından güvenlik camı olarak kullanımları uygundur. Temperleme işleminden sonra camlara kumlama hariç; herhangi bir kesim, delik delme, kenar ve yüzey işlemi yapılamaz [15].



Şekil 1.1. Camların, fırın içerisine temperleme işlemi için yönlendirilmesi

Temperli camın ısıya dayanıklılığı da normal camlara göre daha fazladır. Temperleme işleminden geçen cam 300 °C ısı şoka dayanabilirken temperlenmemiş cam yaklaşık 40 °C ısı şoka uğradığı zaman kırılabilmektedir. Temperlenmiş camların mekanik olarak test edilmesinde ‘Yüksekten Bilye Düşürme Deneyi’ uygulanmaktadır. Temperlenmiş 6 mm. kalınlıkta bir cam, 2 metre yükseklikten düşürülen 500 gram ağırlığındaki bir çelik bilyenin etkisi ile kırılırken temperlenmemiş normal cam, aynı deneyde 30 cm. yüksekten düşen aynı ağırlıktaki bilye ile kırılmaktadır [16].

Farklı soğutma aşamaları kullanarak camlara yarı temperleme (kısmi temperleme) işlemi de uygulanmaktadır. Yarı temperleme, tam temperlemedeki gibi aynı fırınlarda ve aynı sıcaklık derecelerinde gerçekleştirilir. Bu işlemdeki tek fark, soğutmanın nispeten daha yavaş yapılmasıdır. Yarı temperli camlar, işlemsiz camlara göre yaklaşık 2 kat daha fazla dayanıklıdır ve güvenlik camı sınıfına girmektedir [15].



Şekil 1.2. Temperli, kırılmış bir cam örneği

Temperli camın kullanım alanı oldukça fazladır, kullanım alanlarından bahsedilecek olursa şunlardır: Binaların dış cephesi, fırın kapakları, araç camları, duşa kabin camları, sehpa ve masa camları, cam korkuluklar, pişirme tepsileri, cep telefonu camları, kurşungeçirmez camlar, kayar kapılar, buzdolabı camları vb. [16].

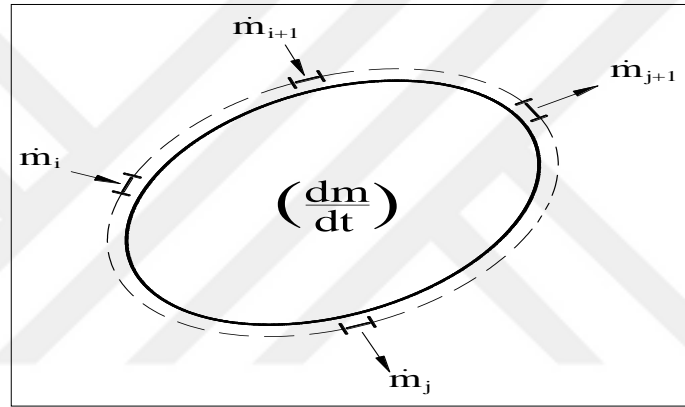
Temperleme prosesinde yalnızca bazı bakış açıları ve ışık koşullarında fark edilebilen küçük kusurlar: Temperleme izleri, kamburluk, dönüklük ve diğer distorsiyonlar gibi hatalar toleransları içinde kalmak kaydıyla ısı işlemin ortaya çıkan kaçınılmaz ve önlenemeyen sonuçlarıdır. Temperlemenin değişik şartlarda yapılması, temperleme üzerinde farklı etkiler ortaya çıkarmaktadır [17]. Temperleme işlemi sırasında hassas bir ısı rejimi uygulaması ile minimuma indirilmiş izler, başlı başına bir kusur olarak nitelendirilmemektedir. Tavsiye edilen: İzlerin yere paralel olmasıdır. Cam hamurunda bulunabilen mikroskobik nikel ve sülfid partiküllerden dolayı tam temperli camlarda da ani kırılma olasılığı mevcuttur. Bu riski azaltmak için tam temperli camlar istendiğinde ısı banyosu (Heat Soak) testinden geçirilerek bir ön elemeye tabi tutulabilirler. Bu test, ani kırılma riskini tamamen yok edememekte sadece azaltmaktadır [15].

Temperleme prosesindeki en önemli problemlerden biri de fırının verimsiz çalışması ve yüksek enerji tüketimi sebebiyle temperleme enerji maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

2. ENDÜSTRİYEL FIRINLARIN ANALİZİNDE KULLANILAN BAĞINTILAR VE ÖLÇÜM CİHAZLARININ ÖZELLİKLERİ

Doğal gazlı ve elektrikli cam temperleme fırınlarının analizinde kütle korunumu ve enerjinin korunumu adı altında aşağıda bahsedilen bağıntılar kullanılır. Momentumun korunumu hesaplarda dikkate alınmamıştır.

2.1. Kütle Korunumu



Şekil 2.1. Kütle akışı için sistem örneği

Bir kontrol hacmi için kütle korunumu ilkesi şu şekilde ifade edilir: Bir kontrol hacmine veya kontrol hacminden dt zaman aralığında olan kütle geçişi, aynı dt zaman aralığında kontrol hacmindeki toplam kütledeki değişime eşittir (Şekil 2.1). Bir sistem için kütle korunumu, en genel halde Denklem (2.1)'deki gibi yazılabilir [18].

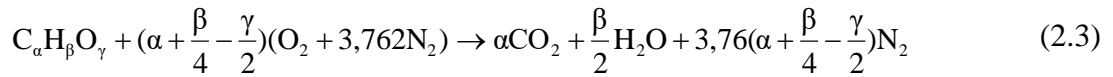
$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_i - \sum_{j=1}^m \dot{m}_j = \left(\frac{dm}{dt} \right)_{\text{sistem}} \quad (2.1)$$

Sürekli akışlı açık sistemde, eğer sistemde kararlı bir rejim söz konusu ise sisteme giren ve çıkan kütlelerin zamanla değişmediği kabul edilir ve kütle korunumu ilkesi uyarınca kontrol hacmine giren toplam kütle, kontrol hacminden çıkan toplam kütleyle eşit olması gerekir. Sürekli akışlı açık sistemleri çözümlerken bir zaman süresince sisteme giren veya çıkan kütleden çok, birim zamanda akan kütle ya

da kütle debisi önem kazanır. Birden fazla giriş ve çıkışı olan sürekli akışlı bir sistem için kütle korunumu ilkesi Denklem (2.2)'deki gibi yazılabilir [18].

$$\sum_{i=1}^n m_i - \sum_{j=1}^m m_j = 0 \quad (2.2)$$

Eğer sistem içinde, yanma prosesi gibi bir kimyasal reaksiyon gerçekleşiyorsa sistemden çıkan ürünlerin bileşenleri ve miktarlarının aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanması gerekir. Yanmanın yanında kimyasal bir reaksiyon gerçekleşiyorsa bu reaksiyonun denklemi de açık bir şekilde yazılmalı ve çıkan ürünlerin bileşenleri, miktarları bu denkleme göre hesaplanmalıdır. Yanma reaksiyonu, kimyasal bir bileşiğin oksijen atomu ile reaksiyona girmesi sonucunda gerçekleşir; yanma sonucunda ısı enerjisi ortaya çıkar ve kimyasal bir olaydır. Yanma için oksijenin varlığı şart ancak yanma tepkimesinin başlayabilmesi için tek başına yeterli değildir. Yanma için oksijen, yanacak madde, belirli bir tutuşma sıcaklığı gereklidir. Bu üç şart aynı anda sağlandığında yanma tepkimesi başlar. En genel halde stokiyometrik miktarda hava ile karbon, hidrojen ve oksijen içeren bir yakıtın doğal gaz fırınında yanması sonucu C, H, O ve N atomlarının atom dengesinden Denklem (2.3)'deki genel ifade elde edilir [19].



Bu bağıntıdaki α , β ve γ yakıtın bir molekülündeki karbon, hidrojen ve oksijen atomlarının sayısını göstermektedir. Ayrıca α , β , γ ; karbon, hidrojen ve oksijenin mol yüzdelerini de ifade etmektedir.

Çalışmasını yaptığımız doğal gaz fırınında enerji, elektrik enerjisinin yanında fırın içinde yakıtın yakılması ve yakıttan elde edilen buhar yardımıyla; elektrikli fırında ise sadece elektrik enerjisinden sağlanır.

Fazla hava yüzdesi Denklem (2.4)'deki bağıntı ile hesaplanır [19].

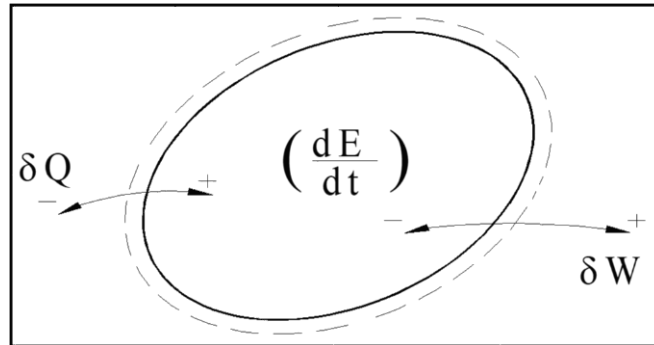
$$\% \text{ Fazla Hava} = \frac{100 \cdot (m_h - m_{hs})}{m_{hs}} = \frac{100 \cdot (n_h - n_{hs})}{n_{hs}} = \frac{100 \cdot (n_{O_2} - n_{O_2(s)})}{n_{O_2(s)}} \quad (2.4)$$

Fazla hava miktarı, yanma sonucu elde edilen ürünlerin kompozisyonları ölçülerek de elde edilebilir. Ölçülen mol miktarlarından hareketle, yanmadan arta kalan miktarların da fazla olacağı yaklaşımıyla Denklem (2.5)'deki bağıntı elde edilir [19].

$$\% \text{ Fazla Hava} = 100 \cdot \left[\frac{(n_{O_2})_{bg}}{((n_{N_2})_{bg}/3.76) - (n_{O_2})_{bg}} \right] \quad (2.5)$$

2.2. Enerjinin Korunumu

Doğal gazlı ve elektrikli fırınların enerji analizleri termodinamiğin birinci kanununa göre gerçekleştirilmiştir. Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumu ve dönüşümü yasasını ifade etmekte ve enerjinin termodinamikle ilgili bir özellik olduğunu vurgulamaktadır. Enerjinin korunumu ve dönüşümü yasasına göre enerji yok edilemez veya yokken var edilemez ancak değişik fiziksel ve kimyasal işlemlerle bir enerji biçiminden diğer bir enerji biçimine dönüşür. Termodinamiğin birinci yasası şöyle ifade edilebilir: Kapalı bir sistemin, belirli bir durumu arasında gerçekleşebilecek tüm adyabatik durum değişimleri sırasında yapılan net iş, sisteme veya durum değişimlerine bağlı olmaksızın aynıdır. Bir çevrimde iş ve ısı değerleri arasındaki fark $\delta Q - \delta W = dE$ diferansiyeli ile ifade edilir. Burada ilk iki terim eğri fonksiyonu, üçüncü terim ise nokta fonksiyonudur. Kapalı bir sistemde, termodinamiğin birinci yasası: $\delta Q = dU + d(E_k) + d(E_p) + \delta W$ şeklinde yazılabilmektedir. Bu, şu anlama gelir: Bir sistem termodinamik durum değişikliğine uğradığında enerji, ısı veya iş olarak sistem sınırlarını geçebilir; ısı ve iş pozitif veya negatif olabilir. Sistemin sahip olduğu enerjideki net değişim, tam olarak sistemin sınırlarını geçen net enerjiye eşittir [20].



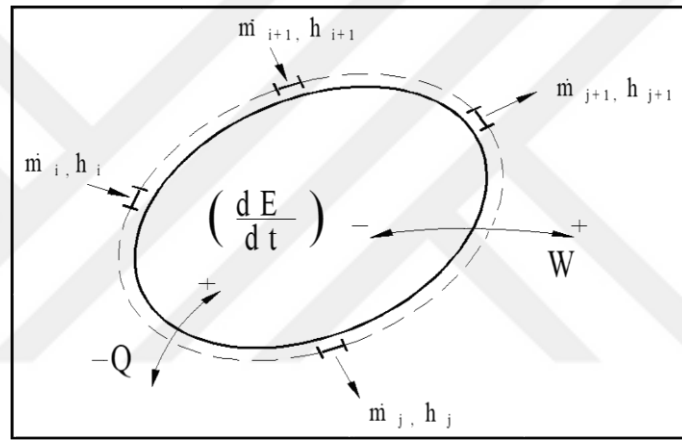
Şekil 2.2. Kapalı bir sistemin şematik gösterimi

Kapalı bir sistem, şematik olarak Şekil 2.2’de görülmektedir. Bu kapalı sistem için termodinamiğin birinci kanunu uygulanır ise Denklem (2.6) elde edilir [20].

$$\delta \dot{Q} - \delta \dot{W} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{\text{sistem}} \quad (2.6)$$

Bu bağıntıda δQ sisteme iletilen ısıyı, δW sistemden üretilen işi, $\left(\frac{dE}{dt} \right)_{\text{sistem}}$ ise sistemin enerjisindeki değişmeyi ifade etmektedir.

Açık bir sistem için termodinamiğin birinci kanunu Şekil 2.3 esas alınarak en genel durum için Denklem (2.7)’deki gibi yazılabilir [20].



Şekil 2.3. Açık bir sistemin şematik gösterimi

$$\left(\frac{dE}{dt} \right)_{\text{sistem}} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gZ \right)_i - \sum_{j=1}^p \dot{m}_j \left(h + \frac{V^2}{2} + gZ \right)_j + \sum \dot{Q} - \sum \dot{W} \quad (2.7)$$

Bazı durumlarda çözümlerin sürekli rejim şartlarında zamandan bağımsız olarak elde edilmesi gerekebilmektedir. Bu durumda yukarıdaki denklemdeki zamanla ilgili terim devre dışı kalmaktadır. Sistemler ısı ve/veya iş alış verişinde bulunmayabilir, sisteme giren çıkan kütlelerin hızından dolayı olan kinetik enerjileri ihmal edilebilir ayrıca potansiyel enerji değişimi olmadığı kabul edilebilir. Sisteme giriş çıkışlar tek hat üzerinden olabilir. Bu durumlarda denklem daha basit ifade edilebilir.

Ayrıca bazı basitleştirici yaklaşımlar yapılarak zaman bağlı problemler de çözülebilir. Bu durumda sistemdeki değişim başlangıç ve son hal arasında yazılır ise Denklem (2.8)’deki ifade elde edilir [20].

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gZ \right)_i - \sum_{j=1}^p \dot{m}_j \left(h + \frac{V^2}{2} + gZ \right)_j + \sum \dot{Q} - \sum \dot{W} \quad (2.8)$$

$$= \left[m_2 \left(u_2 + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 \right) \right]_{\text{kontrol hacmi}}$$

Kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği sistemlere enerji korunumu kanunu uygulanırken reaksiyonun gerçekleşmesi sonucu açığa çıkan veya sisteme ilave edilmesi gereken oluşum entalpi ısıları da göz önünde bulundurularak denklemlere ilave edilmelidirler.

Enerji analizinde sistemdeki entalpilerin, bir referans sıcaklık değerini baz alarak hesaplanması oldukça önemlidir. Farklı kaynaklardan alınan entalpi değerleri farklı referans sıcaklıkları için hazırlanmış olabilir, aynı referans sıcaklığındaki entalpi değerleri esas alınmazsa hesaplamalar hatalı olur. Bu yüzden enerji analizlerine başlamadan önce 0 °C, 20 °C, 25 °C veya çevre sıcaklığı referans sıcaklığı olarak seçilmeli ve tablolardan alınan değerler bu referans sıcaklığına dönüştürülmelidir. Doğal gazlı fırında yakıt ile sisteme beslenen birim zamandaki enerji Denklem (2.9)'daki ifade ile hesaplanır [19].

$$\Delta \dot{H}_{yb} = \dot{m}_y [H_u + C_y (T_y - T_r)] \quad (2.9)$$

Eğer baca gazı hesabında, su buharının yoğuşması sonucu kullanılan ısı hesaba katılıyorsa sisteme yakıtla beslenen birim zamandaki enerji hesabında da yakıtın üst ısı değeri esas alınmalıdır. Doğal gazlı fırında havanın ve baca gazının entalpileri hesaplanırken hava ve baca gazları içeriğinde su buharı bulunduğu gerçeğinden, su buharının hesaplara katıldığı Denklem (2.10)'daki ifade kullanılmalıdır [19].

$$\Delta \dot{H}_{bg} = \dot{m}_{bg} [C_{bg} (T_{bg} - T_r)] + \dot{m}_{sb} [C_{sb} (T_{bg} - T_r) + 2501,6] \quad (2.10)$$

Su buharının özgül ısısı $C_{sb} = 1,9$ kJ/kg K, CO₂ baca gazının özgül ısısı ise $C_{bg} = 1,1$ kJ/kg.K olarak kullanılabilir. Sıcaklık aralığı büyük olan sistemlerde, sıcaklığın fonksiyonu olan özgül ısı denkleminin Denklem (2.10)'da kullanılması gerekmektedir.

Elektrikli fırında elektrik enerjisi ile sisteme giren birim zamandaki enerji, proses sırasında enerji analizörü ile ölçülür.

Doğal gazlı ve elektrikli fırında malzeme akışları esnasında fırına beslenen malzemeler bir ön ısıtmadan geçirilerek fırına sevk edilebilir, fırında ısınmış malzemeler fırını terk ederken dış ortama ısı enerjisini verebilir bu iki durumda da alınan ve verilen birim zamandaki enerji miktarları Denklem (2.11) ile hesaplanır [19].

$$\Delta\dot{H}_m = \dot{m}_m C_m (T_m - T_r) \quad (2.11)$$

Eğer özgül ısı, sıcaklığın bir fonksiyonu ise Denklem (2.11)'de yerine yazılarak sıcaklık sınırları arasında elde edilen bu integralli denklem çözümlenir.

Doğal gazlı ve elektrikli fırının sıcak yüzeyleri, buldukları ortam ile ışıma ve taşınım yoluyla ısı alış verişinde bulunur. Bu ısı alış verişini Denklem (2.12)'deki bağıntı yardımı ile hesaplanır [21].

$$Q_k = (u_{\text{taş}} + u_{\text{ış}}) A (T_y - T_o) \quad (2.12)$$

Fırınlarda yüzeyden olan doğal taşınım ve türbülanslı akışta ısı taşınım katsayısı için aşağıda verilen Denklem (2.13)'teki bağıntı kullanılabilir [21].

$$u_{\text{taş}} = 1,32 \sqrt[3]{\Delta T} \quad (2.13)$$

Fırınlarda yüzeyden ışıma ile geçen ısı geçişini hesaplayabilmek için kullanılan, ışıma eşdeğer ısı taşınım katsayısı için ise Denklem (2.14)'teki bağıntı kullanılabilir [21].

$$u_{\text{ış}} = \left(\frac{\epsilon \sigma}{T_y - T_o} \right) (T_y^4 - T_o^4) \quad (2.14)$$

Doğal gazlı fırında homojenizasyon fanlarının yataklarındaki yüksek ısı, soğutma suyu marifeti ile atmosfere atılır; atılan bu birim zamandaki enerjinin hesabı için Denklem (2.15) kullanılır [18].

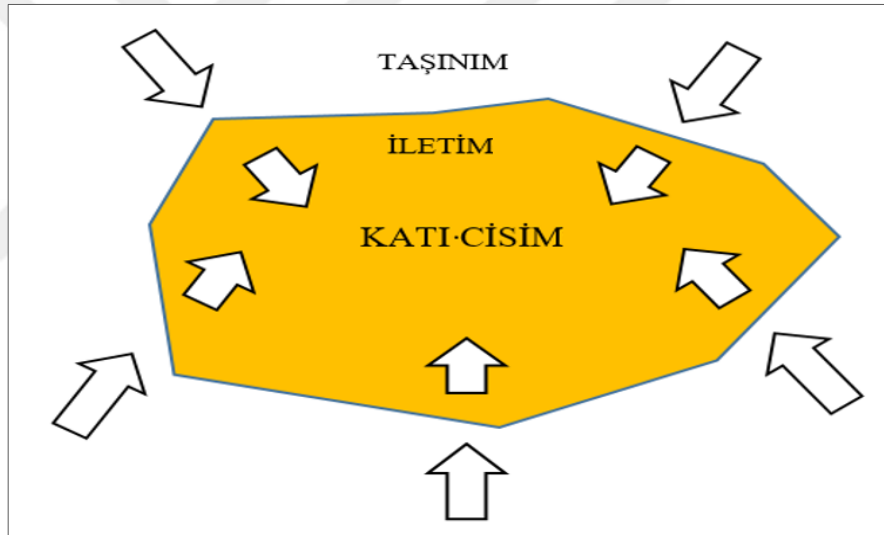
$$\Delta\dot{H}_{ss} = \dot{m}_{ss} C_p (T_{sg} - T_{sç}) \quad (2.15)$$

Zamana bağlı ısı iletimi:

Katı bir cisim, etrafındaki sıcak bir akışkan tarafından ısıtıldığında ısı önce cisme taşınır daha sonra cisim içerisinde iletilir. Biot sayısı: Cisim yüzeyindeki taşınım ile olan ısı transferinin cisim içindeki iletimle olan ısı transferine oranıdır.

$$L_c = \frac{V}{A_s} = \frac{\text{Cismin Hacmi}}{\text{Cismin Alanı}} \quad (2.16)$$

$$Bi = \frac{h \cdot \Delta T}{\frac{k \cdot \Delta T}{L_c}} = \frac{\text{Cisim yüzeyinde taşınım}}{\text{Cisim içerisindeki iletim}} \quad (2.17)$$



Şekil 2.4. Katı bir cismin, çevresindeki sıcak bir akışkan ile ısıtılması

Başka bir ifadeyle cisim içerisindeki ısı iletim direncinin cisim yüzeyindeki ısı taşınım direncine oranıdır. Biot sayısı boyutsuz bir sayıdır. Küçük biot sayısı, cisim içerisindeki küçük sıcaklık gradyanlarını gösterir.

$$Bi = \frac{\frac{L_c}{k}}{\frac{1}{h}} = \frac{\text{Cisim içerisindeki iletim direnci}}{\text{Cisim yüzeyindeki taşınım direnci}} \quad (2.18)$$

$Bi \leq 0,1$ olduğu zaman, sıcaklığın cisim içerisinde konumla değişimi önemsiz olup üniform kabul edilebilir.

Mükemmel gaz denklemi:

Gazlar karmaşık yapılardır, çarpışabilecek ve birbirleriyle etkileşebilecek milyarlarca enerjik gaz molekülleriyle doludurlar. Gerçek bir gazı tam olarak tanımlamak zor olduğundan, bilim insanları ideal gaz tanımını gerçek gazların davranışlarını modellememize ve tahmin etmemize yardımcı bir yaklaşım olarak türettiler. Bu tanıma uyan gazların birkaç kuralı karşılaması gerekir.

İdeal gazlar birbirini çekmez veya itmez:

İdeal gazlar arasındaki tek etkileşim, kendi aralarında esnek bir çarpışma ya da içinde buldukları kabın duvarlarıyla esnek bir çarpışmadır.

Bir maddenin basıncı, sıcaklığı ve özgül hacmi arasındaki ilişkiyi veren herhangi bir bağıntıya durum denklemi adı verilir.

$$P.v = R.T \quad (2.19)$$

Bu Denklem (2.20) ideal gaz durum denklemi olarak bilinir, $v = V/m$ olduğundan ideal gaz denklemi:

$$P.V = m.R.T \text{ yazılabilir.} \quad (2.20)$$

İdeal gaz durum denklemindeki R değeri, $R = \bar{R}/M = 8,3143/M$ şeklindedir. Burada M, gazın moleküler kütlesi (kg/kmol), $\bar{R} = 8,3143 \text{ kJ/kmol.K}$ 'dir. Bu \bar{R} değerine universal gaz sabiti denir ve bütün gazlar için aynıdır. Herhangi bir gazın kütlesi, mol kütlesi ile mol sayısının çarpımına $m = N.M$ eşittir [20].

Bu durumda mol sayısına bağlı olarak ideal gaz denklemi:

$$P.V = N. \bar{R}. T \text{ şeklinde de yazılabilir.} \quad (2.21)$$

$P.V = m. R.T = N. \bar{R}. T$ sonucuna varılabilir [20].

Düşük basınç ve yüksek sıcaklıklarda bir gazın yoğunluğu azalır ve mükemmel gaz gibi davranır. Doğal gazın sayaç üzerinden Nm^3/h cinsinden geçen miktarını kmol/h cinsinden hesaplamak için doğal gaz mükemmel gaz kabul edilir ve Denklem (2.21)'deki eşitlikten yararlanılır.

Doğal gazlı ve elektrikli fırınların verim (η) hesaplaması: Fırında malzemeye birim zamanda aktarılan enerjinin, fırına birim zamanda beslenen toplam enerjiye bölünmesiyle bulunur. Verim hesabı için Denklem (2.22) kullanılır.

$$\eta = \frac{\text{Fırında malzemeye birim zamanda aktarılan enerji}}{\text{Fırına birim zamanda beslenen enerji}} \quad (2.22)$$



3. DOĞAL GAZLI CAM TEMPERLEME FIRINININ VE ÖLÇÜM CİHAZLARININ ÖZELLİKLERİ, FIRINDA YAPILAN ÖLÇÜMLER, HESAPLAR

Doğal gazlı cam temperleme fırınında nominal kapasitede sadece fırın ünitesinin analizleri için gerekli görülen ölçümler, Tablo 3.1’de kalibrasyon bilgileri verilen ölçüm cihazları yardımıyla yapılır. Türkiye’de kullanılan doğal gazın bileşenlerine göre yanma denklemleri oluşturulur, bileşen oranları ve doğal gazın üst ısıl değeri baz alınarak gerekli hesaplamalar bu bölümde yapılır.

3.1. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırınının Özellikleri

Doğal gazlı fırın yan duvarında konveyörleri ortalar pozisyonda, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi altlı-üstlü 4 adet olmak üzere toplam 8 adet yakıcı bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Doğal gazlı cam temperleme fırınının genel görünümü

Fırın atmosferindeki havayı homojen hale getiren 8 adet homojenizasyon fanı ise yakıcıların tam karşısında fırın konstrüksiyonunun diğer tarafında Şekil 3.2’de gösterildiği gibi konumlanmış vaziyettedir. Fırının tavanında, içerideki egzoz gazını 4 noktadan tahliye eden egzoz bacaları bulunmaktadır. Egzoz bacalarından gelen bu gazlar büyük bir davlumbaz içerisinde birikerek davlumbaz bacasıyla atmosfere atılmaktadır. Ayrıca doğal gazlı fırının, homojenizasyon fanlarının yataklarını suyla soğutan bir sistem mevcut olup bu soğutma sistemi suyun ısınıp dışarıdaki bir soğutma kulesi yardımıyla atmosfere atmaktadır. Fırının boyutları nedeniyle temperlenebilecek maksimum cam boyutları 2400 mm eninde ve 5000 mm uzunluğundadır.



Şekil 3.2. Doğal gazlı cam temperleme fırınında homojenizasyon fanları görünümü

Temperleme işlemi için camlar bir konveyörle fırına yüklenmekte, fırın içerisinde yaklaşık 615-650 °C sıcaklığa ulaştıktan sonra yine konveyör yardımıyla fırın çıkışına yönlendirilmektedir. Fırın çıkışında soğutma bölümünde, camlar yüksek hızda hava ile kısa sürede soğutulularak cam temperleme işlemi tamamlanmış olmaktadır.

3.2. Ölçüm Cihazlarının Özellikleri

Doğal gazlı ve elektrikli fırınların ölçümleri aşağıda Tablo 3.1’de marka, tip ve hassasiyetleri verilen cihazlar yardımıyla alınmıştır. Cihazların tamamının kalibrasyonları eksiksiz yapılmış ve güncel durumdadır.

Tablo 3.1. Ölçüm cihazlarının özellikleri ve kalibrasyon bilgileri

Cihaz Adı	Marka	Model	Ölçüm Aralığı	Birim	Hass.	Kalibras. Tarihi
Enerji analizörü	Fluke	Tip 435	1 ~ 1000	Volt	±1	Güncel
Enerji analizörü	Fluke	Tip 435	Max. 3000	Amp.	±1	Güncel
Thermal kamera	Flir	T 200	(-20) ~ 360	°C	±1	Güncel
Baca analizörü	Testo	Tip 340	(-40) ~ 1200	°C	±1	Güncel
Y. temas termom.	Fluke	Tip 51-II	(-127) ~ 600	°C	±0,2	Güncel
Hava kalitesi	Fluke	975	(-5) ~ 50	°C	±0,2	Güncel
Hava kalitesi	Fluke	975	10 ~ 90	%	±0,2	Güncel
Temasız termom.	Fluke	566	(-40) ~ 800	°C	±1	Güncel

3.3. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırını İçin Nominal Kapasitede Yapılan Ölçümler ve Birim Zamandaki Enerji Dengesi

Doğal gazlı fırında doğal gaz tüketimi, fırın gaz yolu üzerinde bulunan doğal gaz sayacı üzerinden belirlenir (Tablo 3.2). Standart şartlar 1 atm. ve 15 °C dışında basınç ve sıcaklık değerine sahip olan ortam şartlarının bu standart şartlara göre düzeltilmesi gereklidir. Doğal gaz sayaçları bina içine yerleştirildiğinde standart sıcaklık olan 15 °C makul olarak sağlanır ve sıcaklık düzeltilmesi gerekmez [22]. Ayrıca sayacın bağlı bulunduğu boru tesisatındaki yüksek gaz basıncı sebebiyle doğal gaz sayacından geçen gaz hacmi değeri de önemli ölçüde sapma gösterir. Bu nedenle doğru bir ölçüm yapmak için basınç düzeltilmesi yapılmalıdır. Doğal gazlı fırında doğal gaz sayacı bina içinde olduğundan sıcaklık düzeltilmesi gerekmez ancak tesisat hat basınç değerinden dolayı basınç düzeltilmesi gerekir. Bunun için doğal gaz tesisatının işletme basıncı, atmosfer basıncına eklenerek bir düzeltme çarpanı bulunur ve bu düzeltme çarpanı, sayaçtan geçen doğal gaz tüketimi ile çarpılarak fırının düzeltilmiş (gerçek) doğal gaz tüketimi hesaplanır. Fırının gaz tesisatı üzerinde bulunan doğal gaz sayacından 0,2 bar işletme basıncında geçen gaz miktarı 87 Nm³/h olarak ölçülmektedir (Tablo 3.2).

Tablo 3.2. Doğal gazlı fırının ortam sıcaklığı, bağıl nem, doğal gaz hat basıncı ve doğal gaz tüketimi ölçüm sonuçları

Açıklama	Miktar
Ortam sıcaklığı (°C)	23,3
Bağıl nem (%)	33,7
Doğal gaz hat basıncı (bar)	0,2
Doğal gaz tüketimi (Nm ³ /h)	87,0

Tablo 3.3. Doğal gazlı fırının elektrik tüketimi ölçüm sonuçları

Cihazlar	Adet	Güç (kW)	Top.Güç (kW)	Top.Elekt. Tük. (kJ/h)	Düzeltilme Katsayısı	Top.Elekt. Tük. (kJ/h)
Brülör fanı	8	0,56	4,48	16.128,0	0,95	15.321,6
Karışım fanı	8	14,4	115,20	414.720,0	0,95	393.984,0
Fırın kaldırma	1	3,95	3,95	14.220,0	0,75	10.665,0
Fırın içi konveyör	1	0,56	0,56	2.016,0	0,75	1.512,0
Soğutma pompası	2	1,50	3,00	10.800,0	0,95	10.260,0
Soğutma Fanı	2	8,00	16,00	57.600,0	0,95	54.720,0

Brülörler, homojenizasyon fanları, soğutma grubu pompaları, soğutma fanı, fırın kapağı açma kapama ve fırın içi konveyör motorlarının elektrik tüketimleri imalatçı katalog değerleri Tablo 3.3'den hesaplanır; doğal gaz enerji tüketimine ilave edilir ve doğal gazlı fırının toplam birim zamandaki enerji tüketimi belirlenir.

Tablo 3.4. Doğal gazlı fırının baca gazı analizi ve ölçüm sonuçları

Ölçülen Değerler	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	Ortalama
Baca gazı sıcak. (°C)	514,3	559,5	570,4	534,5	544,68
Ortam sıcaklığı (°C)	28,4	27,6	24,7	29,1	27,45
Lambda	1,71	1,64	2,36	2,41	2,93
CO ₂ (%)	2,59	7,06	4,81	3,30	4,44
O ₂ (%)	16,46	8,62	12,56	15,22	13,22
CO (ppm)	97	153	206	56	128
CO (mgm ³)	479	278	550	219	381,5
NO (ppm)	21	51	39	27	34,5
NO (mgm ³)	171	152	171	172	166,5
NOx (ppm)	22	54	41	28	36,25
NOx (mgm ³)	179	160	179	181	174,75
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	0
SO ₂ (mgm ³)	0	0	0	0	0
Verim (%)	24,4	66,6	52,1	37,3	45,1

Tablo 3.5. Doğal gazlı fırının yüzey alanları ve ortalama yüzey sıcaklıkları

Yüzeyler	Alan (m²)	Ort. yüzey sıcak. (°C)
Sol yan yüzey	17,80	97,87
Sağ yan yüzey	17,80	47,43
Ön giriş yüzeyi	7,26	135,37
Arka çıkış yüzeyi	7,26	61,60
Fırın üst yüzeyi	26,70	93,07
Sol yan yüzey konveyörler	3,24	450,00
Sağ yan yüzey konveyörler	3,24	450,00

Doğal gazlı fırındaki baca gazlarının analizi için baca gazı analizörü kullanılır, ölçüm sonuçları Tablo 3.4’de verilmiştir. Fırın yüzey sıcaklıklarını ve baca gazı sıcaklığını tespit etmek için temaslı ve temassız termometrelerden faydalanılır (Tablo 3.5). Fırın açıklıklarındaki sıcaklık ve temperlenmiş cam çıkış sıcaklıkları yine aynı şekilde temassız termometre yardımıyla ölçülür. Doğal gazlı fırının homojenizasyon fanlarını soğutan suyun debisi, debi ölçer yardımıyla; gidiş- dönüş su sıcaklıkları da temaslı termometre ile ölçülür (Tablo 3.6). Ortamın hava sıcaklığı, nemi; termometre ve nemölçer aracılığıyla operasyon süreleri ise kronometre kullanılarak belirlenir. Doğal gazlı fırında nominal kapasitede temperlenen cam için alınan ölçüm değerleri aşağıda Tablo 3.7’de verilmiştir.

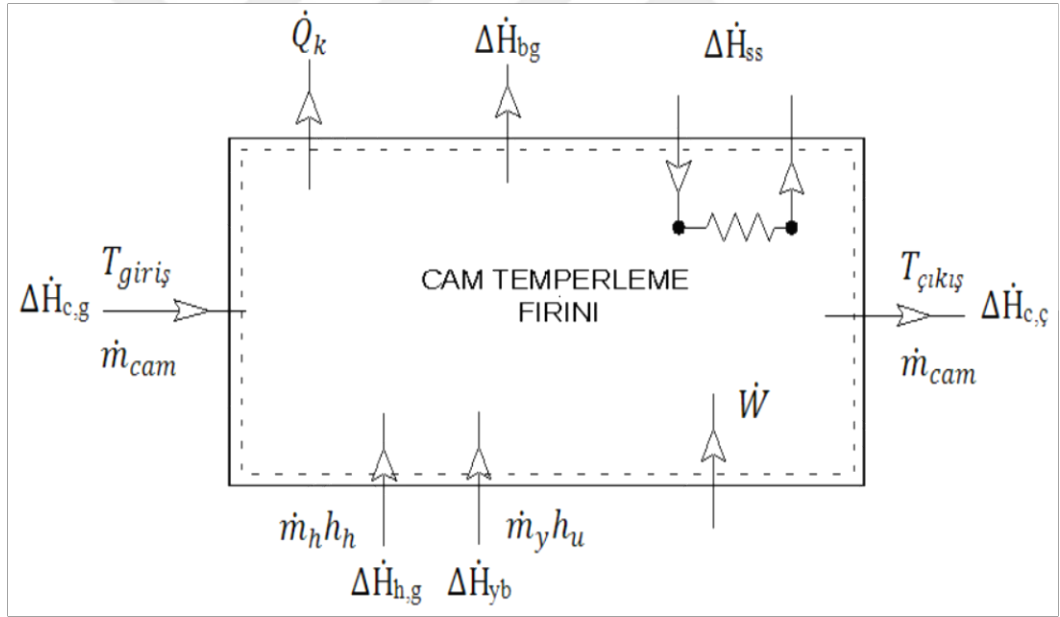
Tablo 3.6. Doğal gazlı fırının soğutma grubu ölçüm sonuçları

Açıklama	Miktar
Soğutma suyu gidiş sıcaklığı (°C)	15,9
Soğutma suyu dönüş sıcaklığı (°C)	20,1
Soğutma suyu debisi (m ³ /h)	8,97
Soğutma suyu hızı (m/s)	1,62
Soğutma grubu pompa gücü (2x1,5kW)	3

Tablo 3.7. Doğal gazlı fırında temperlenen cam için alınan ölçümler

Açıklama	Miktar
Cam eni (mm)	1910
Cam boyu (mm)	3339
Cam kalınlığı (mm)	8
Camın yoğunluğu (kg/m ³)	2450
Cam kütlesi (kg)	124,99
Tek seferde yüklenen (adet)	1
Fırındaki işlem süresi (s)	330
Ürün çıkış sıcaklığı (°C)	613

Doğal gazlı cam temperleme fırınında Şekil 3.3’de gösterildiği üzere sisteme yakıt enerjisiyle birim zamanda giren enerji $\Delta\dot{H}_{yb}$, fırın yan duvarına yerleştirilmiş brülör fanları ve fırının diğer yan duvarına yerleştirilmiş fırın içi homojenizasyon fanlarının tükettiği elektriksel güç \dot{W} , giren toplam birim zamandaki enerji miktarını oluşturmaktadır. Birim zamanda tüketilen enerjiler: Malzemeyle birim zamanda çıkan enerji $\Delta\dot{H}_{c,\phi}$, baca gazı ile birim zamanda atmosfere atılan enerji $\Delta\dot{H}_{bg}$, homojenizasyon fanlarını soğutmak için kullanılan soğutma suyu ile birim zamanda atmosfere atılan enerji $\Delta\dot{H}_{ss}$, fırın açıklıklarından ve yüzeylerden birim zamanda kaybolan enerji ile bütün diğer kayıplar \dot{Q}_k olarak ifade edilir. Referans sıcaklığı ortam havası sıcaklığı olduğu için fırına hava ve camla giren bir enerji yoktur. Bu sebepten $\Delta\dot{H}_{c,g}=0$, $\Delta\dot{H}_{h,g}=0$ olur.



Şekil 3.3. Doğal gazlı temperleme fırınında kütle ve enerji akışlarının şematik gösterimi

Kararlı rejimde çalışma durumunda Denklem (2.8)’den yararlanarak doğal gazlı cam temperleme fırını için birim zamandaki enerji dengesi olarak aşağıdaki bağıntı yazılır.

$$\Delta\dot{H}_{yb} + \sum \dot{W} + \Delta\dot{H}_{c,g} + \Delta\dot{H}_{h,g} = \Delta\dot{H}_{c,\phi} + \Delta\dot{H}_{bg} + \Delta\dot{H}_{ss} + \dot{Q}_k \quad (3.1)$$

Doğal gazlı fırının üretim esnasında, nominal kapasitede cam temperleme prosesi üzerinden alınan ölçüm sonuçları: Tablo 3.2, Tablo 3.3, Tablo 3.4, Tablo 3.5, Tablo 3.6. ve Tablo 3.7'den yapılır. Tablolardaki ölçümler ve doğal gazın Tablo 3.8'deki bileşenlerine göre gerekli hesaplamalar çıkarılır.

3.4. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırını için Nominal Kapasitede Yapılan Hesaplar

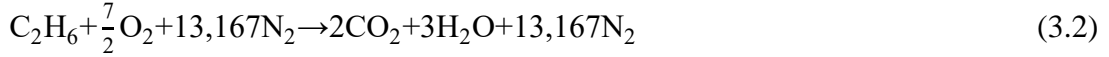
Türkiye'de kullanılan doğal gazın Tablo 3.8 üzerinden bileşenlerine göre yanma denklemleri oluşturulur; bu yanma denklemleri üzerinden bileşim oranlarına göre kuru baca gazı miktarı, baca gazındaki su buharı miktarı ayrı ayrı hesaplanır ve ilgili denklemlerde yerine konularak birim zamanda bacadan kaybolan enerji değeri bulunur. Fırında temperlenen camın kütlesi ve giriş-çıkış sıcaklığından birim zamanda cama aktarılan enerji, soğutma suyu debisi ve gidiş-dönüş suyu sıcaklıklarından soğutma suyu ile atmosfere birim zamanda atılan enerji değerleri hesaplanır. Doğal gazın üst ısıl değeri ile düzeltilmiş sayaç tüketimi çarpılarak fırına birim zamanlarda yakıtla beslenen enerji bulunur. Cama aktarılan enerji, soğutma suyu ile atmosfere atılan enerji, baca gazı yoluyla atmosfere atılan enerji değerleri toplanır ve fırına yakıtla beslenen enerjiden çıkarılarak fırın yüzey ve açıklıklarından birim zamanda kaybolan enerji (\dot{Q}_k) bulunur. Bulunan sonuçlar üzerinden fırın enerji verimi ve birim cam başına enerji maliyeti hesaplanarak, Tablo 3.9'daki doğal gazlı temperleme fırınının birim zamandaki enerji akışları çıkartılır. Hesaplarda doğal gazın üst ısıl değeri $38267,9 \text{ kJ/Nm}^3$ olarak alınmıştır. Doğal gaz Nm^3 fiyatı ve elektrik enerjisi kWh fiyatı, işletmeye gelen Şubat-2018 dönemine ait doğal gaz ve elektrik faturaları üzerinden alınmıştır. Şubat-2018 fatura dönemine göre 1 Nm^3 doğal gazın fiyatı 1,047 TL, 1 kWh elektrik enerjisi fiyatı ise 0,33 TL alınmıştır; bu fiyatlar vergiler dahil toplam ücretlerdir.

3.4.1. Doğal gazlı cam temperleme fırınında nominal kapasitede yanma denklemleri, stokiyometrik hava ihtiyacı ve baca gazlarının hesabı

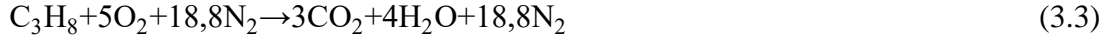
Doğal gazlı fırının doğal gazın bileşenlerine göre yanma denklemleri:

Doğal gazlı fırında doğal gazın bileşenlerine göre yanma denklemlerini oluştururken Denklem (2.3)'den yararlanılır ve aşağıdaki kimyasal yanma tepkimeleri yazılır.

Etan (C₂H₆) için kimyasal yanma denklemi:



Propan (C₃H₈) için kimyasal yanma denklemi:



Bütan (C₄H₁₀) için kimyasal yanma denklemi:



Metan (CH₄) için kimyasal yanma denklemi:



Yanma ürünü baca gazlarının hesabı:

Yukarıda yanma denklemlerinde oluşan baca gazlarının atom kütlelerinden molekül ağırlıkları bulunur ve Tablo 3.8’deki bileşen oranıyla çarpılarak her bir bileşen için baca gazı kütlesi hesaplanır.

Tablo 3.8. Türkiye’de kullanılan doğal gazın bileşenleri [23].

Bileşenler	Kimyasal Formül	Oranları (%)
Metan	CH ₄	Min. 85
Etan	C ₂ H ₆	Max. 7
Propan	C ₃ H ₈	Max. 3
Bütan	C ₄ H ₁₀	Max. 2
Azot	N ₂	2,6
Karbondoksit	CO ₂	Max. 3
Diğerleri		0,4

Etan (C₂H₆) yakıtı için oluşan baca gazı kütlesinin hesaplanması:

1 kmol Etan’ın yanması sonucu oluşan baca gazı miktarı Denklem (3.2)’den hesaplanır.

$$m_{\text{bg,et}} = 35,75 \text{ kg baca gazı oluşur.}$$

Propan (C₃H₈) yakıtı için oluşan baca gazı kütlesinin hesaplanması:

1 kmol Propan’ın yanması sonucu oluşan baca gazı miktarı Denklem (3.3)’den hesaplanır.

$m_{bg,pr}=21,91$ kg baca gazı oluşur.

Bütan (C_4H_{10}) yakıtı için oluşan baca gazı kütlelerinin hesaplanması:

1 kmol Bütan'ın yanması sonucu oluşan baca gazı miktarı Denklem (3.4)'den hesaplanır.

$m_{bg,bü} = 19,01$ kg baca gazı oluşur.

Metan (CH_4) yakıtı için oluşan baca gazı kütlelerinin hesaplanması:

1 kmol Metan'ın yanması sonucu oluşan baca gazı miktarı Denklem (3.5)'den hesaplanır.

$m_{bg,mc}=255,69$ kg baca gazı oluşur.

Doğal gaz için oluşan toplam baca gazı kütlelerinin hesaplanması:

1 kmol doğal gazın yanması sonucu oluşan toplam baca gazı miktarı, doğal gazı oluşturan bileşenlerin baca gazı kütlelerinin toplanmasıyla hesaplanır.

$m_{bg,dg} = 332,36$ kg baca gazı oluşur.

Yanma için gerekli stokiyometrik hava ihtiyacı hesabı:

Yukarıda yanma denklemlerinde yanma için gerekli stokiyometrik havanın atom kütlelerinden molekül ağırlıkları bulunur ve bileşen oranıyla çarpılarak her bir bileşen için stokiyometrik hava kütlesi hesaplanır ve sonuçlar toplanır.

Etan (C_2H_6) yakıtı için gerekli stokiyometrik hava ihtiyacının hesaplanması:

1 kmol Etan'ın yanması için gerekli stokiyometrik hava ihtiyacı Denklem (3.2)'den hesaplanır.

$m_{h,et}=33,65$ kg stokiyometrik hava gereklidir.

Propan (C_3H_8) yakıtı için gerekli stokiyometrik hava ihtiyacının hesaplanması:

1 kmol Propan'ın yanması için gerekli stokiyometrik hava ihtiyacı Denklem (3.3)'den hesaplanır.

$m_{h,pr}=20,59$ kg stokiyometrik hava gereklidir.

Bütan (C_4H_{10}) yakıtı için gerekli stokiyometrik hava ihtiyacının hesaplanması:

1 kmol Bütan'ın yanması için gerekli stokiyometrik hava ihtiyacı Denklem (3.4)'den hesaplanır.

$m_{h,bü} = 17,85$ kg stokiyometrik hava gereklidir.

Metan (CH_4) yakıtı için gerekli stokiyometrik hava ihtiyacının hesaplanması:

1 kmol Metan'ın yanması için gerekli stokiyometrik hava ihtiyacı Denklem (3.5)'den hesaplanır.

$m_{h,me} = 241,61$ kg stokiyometrik hava gereklidir.

Doğal gaz yakıtı için gerekli stokiyometrik hava ihtiyacının hesaplanması:

1 kmol doğal gazın yanması için gerekli olan stokiyometrik hava ihtiyacı, doğal gazın bileşenlerinin hava ihtiyaçlarının toplanmasıyla hesaplanır.

$m_{h,dg} = 313,70$ kg stokiyometrik hava gerekir.

Toplam baca gazı miktarının hesabı:

İdeal gaz denklemi Denklem (2.21)'den yararlanarak 1 kmol yakıtın hacmi hesaplanır.

$\bar{R} = 8,314$ kJ/kmol.K alınarak,

$V = 23,707$ Nm³ elde edilir.

Sayaçtan geçen doğal gaz tüketimi toplam 87 Nm³/h ölçülmüştü. (Tablo 3.2). Sayacın bağlı olduğu hattaki işletme basıncı 0,2 bar ve atmosfer basıncı 1,01325 bar değerleri toplanarak, 1,21325 değerinde bir düzeltme katsayısı elde edilir. Bu düzeltme katsayısı ile sayaçtan geçen tüketim çarpılarak düzeltilmiş (gerçek) doğal gaz tüketimi hesaplanır.

$V_y = 105,55$ Nm³/h elde edilir.

1 kmol doğal gaz yakıtı Denklem (2.21) yardımıyla 23,707 Nm³/kmol olarak bulunmuştu, doğal gaz sayacından saatte geçen toplam tüketimi bu değere bölerek sayaçtan saatte kaç kmol yakıt geçtiği hesaplanır ve $\dot{N} = 4,4523$ kmol/h elde edilir.

1 saatte 4,4523 kmol doğal gaz yandığında gerçek baca gazı için hava fazlalık katsayısı 2,21 olarak alınırsa gerekli fazla hava veya stokiyometrik yanma sonucu oluşacak baca gazları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{m}_h = 1,21 \times 4,4523 \text{ kmol/h} \times 313,7 \text{ kg/kmol} = 1689,99 \text{ kg/h fazla hava gerekir.}$$

Baca gazı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{m}_{bg} = 4,4523 \text{ kmol/h} \times 332,36 \text{ kg/kmol} = 1479,77 \text{ kg/h baca gazı oluşur.}$$

Toplam oluşan baca gazını bulmak için fazla hava ve baca gazı miktarları toplanır.

$$\dot{m}_{bg} = 1689,99 \text{ kg/h} + 1479,77 \text{ kg/h} = 3169,76 \text{ kg/h toplam baca gazı oluşur.}$$

Toplam baca gazı içerisindeki H₂O miktarının hesabı:

1 kmol doğal gaz yandığında ne kadar su oluştuğunu bulabilmek için Denklem (3.2), Denklem (3.3), Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'den toplam oluşan H₂O molekülü ağırlıkları aşağıdaki gibi hesaplanır.

Etan için oluşan H₂O kütlesi:

$$\dot{m}_{su,et} = 3,78 \text{ kg/h su oluşur.}$$

Propan için oluşan H₂O kütlesi:

$$\dot{m}_{su,pr} = 2,16 \text{ kg/h su oluşur.}$$

Bütan için oluşan H₂O kütlesi:

$$\dot{m}_{su,bü} = 1,8 \text{ kg/h su oluşur.}$$

Metan için oluşan H₂O kütlesi:

$$\dot{m}_{su,me} = 31,68 \text{ kg/h su oluşur.}$$

Toplam oluşan H₂O kütlesi:

$\dot{m}_{su,dg} = 39,42 \text{ kg/h}$ toplamda su oluşur. 1 kmol doğal gazdan saatte 39,42 kg H₂O oluşursa 4,4523 kmol doğal gazdan saatte $\dot{m}_{su,dg} = 175,51 \text{ kg}$ toplam H₂O oluşur.

3.4.2. Doğal gazlı cam temperleme fırınında nominal kapasitede enerji akışlarının hesabı

Doğal gaz yakıtı ile fırına birim zamanda beslenen enerji aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta\dot{H}_{yb} = V_{dg} \cdot H_u = 105,55 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 38.267,9 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$\Delta\dot{H}_{yb} = 4.039.176,85 \text{ kJ/h elde edilir.}$$

Doğal gazlı fırına elektrik enerjisiyle beslenen güç aşağıdaki gibi elde edilir.

Tablo 3.3'deki cihazların elektrik tüketimleri toplanır.

$$\Sigma\dot{W} = 486.462,6 \text{ kJ/h elde edilir.}$$

Doğal gaz ve elektrikle fırına beslenen birim zamandaki toplam enerji ($\Sigma\dot{E}$) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Sigma\dot{E} = \Delta\dot{H}_{yb} + \Sigma\dot{W}$$

$$\Sigma\dot{E} = 4.525.639,45 \text{ kJ/h elde edilir.}$$

Doğal gazlı fırına hava ve cam ile birim zamanda giren enerji aşağıdaki gibi elde edilir.

Referans sıcaklığımız atmosfer sıcaklığı olduğu için fırına hava ve cam ile giren bir enerji yoktur. $\Delta\dot{H}_{h,g} = 0$ ve $\Delta\dot{H}_{c,g} = 0$

Doğal gazlı fırın içerisinde birim zamanda cama aktarılan enerji aşağıdaki gibi elde edilir.

Fırın içerisinde birim zamanda cama aktarılan enerjiyi ($\Delta\dot{H}_{c,\zeta}$) hesaplamak için önce camın kütlesi ve birim zamandaki cam miktarı elde edilir. Camın kütlesi m_c ve bir saatteki cam kütlesi \dot{m}_c Tablo 3.7 üzerinden hesaplanır. Fırına bir seferde beslenen cam miktarı,

$$m_c = 124,99 \text{ kg iken,}$$

bir saat için fırına beslenen cam,

$$\dot{m}_c = 1363,53 \text{ kg/h olarak elde edilir.}$$

Birim zamandaki cam miktarı, Denklem (2.11)'de birim zamandaki enerji denkleminde yerine yazılarak ($\Delta\dot{H}_{c,\zeta}$) hesaplanır.

$\Delta\dot{H}_{c,\zeta} = 643.258,91$ kJ/h elde edilir.

Toplam baca gazı ile birim zamanda atmosfere atılan enerjinin ($\Delta\dot{H}_{bg}$) hesabı:

Baca gazı ile birim zamanda atmosfere atılan enerjiyi hesaplamak için Denklem (2.10)'dan yararlanılır.

$\Delta\dot{H}_{bg} = 2.330.174,69$ kJ/h elde edilir.

Doğal gazlı fırında soğutma suyuyla birim zamanda atmosfere atılan enerjinin ($\Delta\dot{H}_{ss}$) hesabı:

Soğutma suyu marifetiyle fırından atmosfere aktarılan birim zamandaki enerjiyi hesaplamak için Denklem (2.15) ve Tablo 3.6'daki değerler kullanılır.

$\Delta\dot{H}_{ss} = 157.703,36$ kJ/h elde edilir.

Doğal gazlı fırında yüzeylerden ve açıklıklardan birim zamanda kaybolan toplam enerji (\dot{Q}_k) hesabı:

Hesaplanan sonuçlar, Denklem (3.1)'den yararlanarak elde edilen eşitlikte yerine yazılır ve ' \dot{Q}_k ' elde edilir. Enerji akışları Tablo 3.9'da verilmektedir.

$$\dot{Q}_k = \Delta\dot{H}_{yb} + \Sigma\dot{W} - (\Delta\dot{H}_{bg} + \Delta\dot{H}_{c,\zeta} + \Delta\dot{H}_{ss})$$

$\dot{Q}_k = 1.394.502,49$ kJ/h elde edilir.

Tablo 3.9. Doğal gazlı temperleme fırınında nominal kapasitede enerji akışları

Enerji Akışı	Miktar (kJ/h)	Miktar (kW)
Yakıtla beslenen	4.039.176,85	1121,99
Elektrikle giren	486.462,60	135,13
Cama aktarılan	643.258,91	178,68
Soğutma suyuyla atılan	157.703,36	43,81
Baca gazlarıyla atılan	2.330.174,69	647,27
Yüzeylerden kaybolan	1.394.502,49	387,36

3.4.3. Doğal gazlı cam temperleme fırınında nominal kapasitede verim ve enerji maliyeti hesaplaması

Doğal gazlı temperleme fırınının verim hesaplaması:

Doğal gazlı fırının verim (η) hesaplaması Denklem (2.22)'deki bağıntı yardımıyla yapılır.

$$\eta = \frac{\text{Fırında malzemeye birim zamanda aktarılan enerji}}{\text{Fırına birim zamanda beslenen (yakıt enerjisi+elektrik enerjisi)}} = \%14,21$$

elde edilir.

Doğal gazlı temperleme fırınının toplam enerji maliyetinin (ΣM) hesaplanması:

Fırının doğal gaz enerjisi maliyetinin hesaplanması için fırına saatte beslenen doğal gaz hacmi ile doğal gazın Nm^3 birim fiyatı çarpılır, aynı fırına beslenen elektrik enerjisinin maliyet hesabı için ise elektrik birim fiyatı ile fırının saatte çektiği elektrik enerjisi değeri çarpılır. Bulunan her iki maliyet tutarı toplanarak fırının toplam enerji maliyeti (ΣM) aşağıdaki gibi hesaplanır.

Doğal gaz enerjisinin maliyet (M_D) hesabı:

$$M_D = V_y \times \text{Yakıt birim fiyatı}$$

$$M_D = 110,51 \text{ TL/h elde edilir.}$$

Elektrik enerjisinin maliyet (M_E) hesabı:

$$M_E = \text{Fırın elektrik tüketimi} \times \text{Elektrik birim fiyatı}$$

$$M_E = 44,59 \text{ TL/h elde edilir.}$$

Doğal gazlı fırının toplam enerji maliyetinin (ΣM) hesabı:

$$\Sigma M = M_D + M_E$$

$$\Sigma M = 155,10 \text{ TL/h elde edilir.}$$

Doğal gazlı fırınının birim cam başına enerji maliyetinin (M_{BC}) hesaplanması:

Yukarıda bulunan toplam enerji maliyeti değeri (ΣM), birim zamanda temperlenen cam kütleğine (m_c) bölünerek birim cam başına enerji maliyeti (M_{BC}) elde edilir.

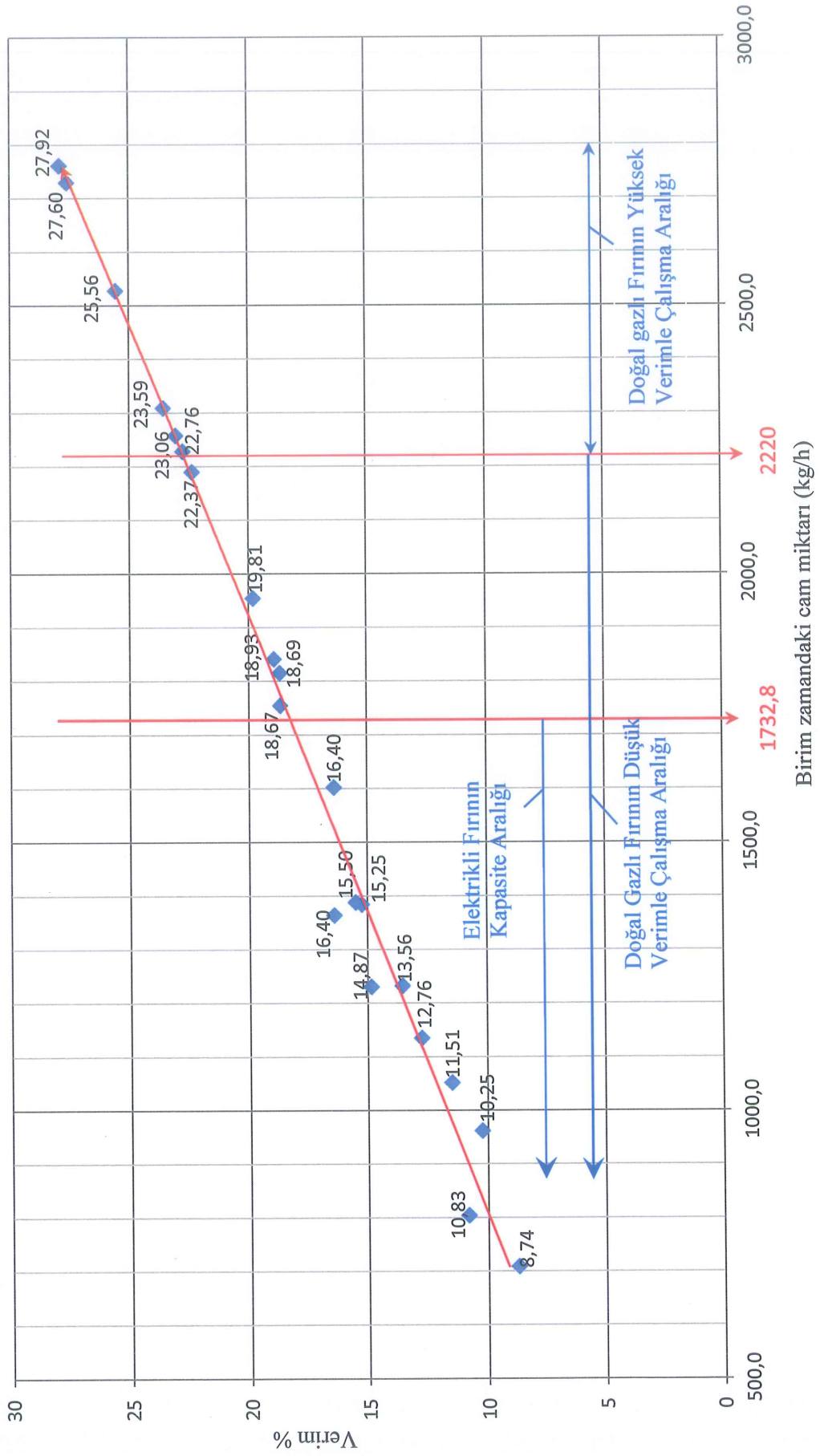
$$M_{BC} = 11,375 \text{ krş/kg elde edilir.}$$

3.5. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırınında Temperlenen Farklı Boyutlardaki Camlardan Alınan Ölçümler ve Fırın Verimleri

Doğal gazlı fırında ölçümü yapılan camdan farklı olarak, üretim esnasında Tablo 3.10'da verilen farklı boyutlardaki camlardan, fırın veriminin ne şekilde değişeceğini tespit etmek amacıyla ölçümler alınır. Alınan ölçüm sonuçlarına göre fırın verimleri hesaplandığında genel olarak artan fırın yüklemelerinde fırın veriminin de doğru orantılı olarak arttığı Tablo 3.10'daki verim değerlerinde görülmektedir. Bu sebeple fırınların farklı cam kalınlıklarında, maksimum cam yükleme kapasitelerindeki verim ve maliyetlerinin tespit edilerek karşılaştırılmasının daha doğru olacağı anlaşılmaktadır. Şekil 3.4'de doğal gazlı cam temperleme fırınının farklı cam yüklemeleri için fırın verimlerinin eğilimini gösteren grafik verilmiştir.

Tablo 3.10. Doğal gazlı fırında üretim esnasında, farklı boyutlardaki camlardan alınan ölçümler ve fırın verimleri

Cam Cinsi	Kalın. mm	En mm	Boy mm	Yük. Adet	m_c kg	ΣM kg	Sayaç m ³ /h	t s	\dot{m}_c kg/h	Verim %
Düz	8	1152	1350	2	30,48	60,96	72,00	310	707,97	8,74
Kapla.	6	1430	2865	1	60,23	60,23	65,00	270	803,00	10,83
Düz	8	1480	2945	1	85,43	85,43	85,00	320	961,07	10,25
Düz	6	989	1180	4	17,16	68,62	82,50	235	1051,21	11,51
Düz	8	875	980	6	16,81	100,84	80,00	320	1134,47	12,76
Düz	10	884	1834	4	39,72	158,88	73,74	465	1230,06	14,87
Düz	8	950	980	6	18,25	109,49	82,00	320	1231,71	13,56
Düz	8	1910	3339	1	125,00	125,00	87,00	330	1363,62	16,40
Düz	8	980	1067	6	20,49	122,97	81,87	320	1383,41	15,25
Düz	8	980	1070	6	20,55	123,32	80,64	320	1387,30	15,50
Kapla.	6	1016	2048	4	30,59	122,35	88,95	275	1601,66	16,40
Düz	8	980	1015	8	19,50	155,97	85,20	320	1754,65	18,67
Düz	8	980	1050	8	20,17	161,35	88,38	320	1815,16	18,69
Düz	8	980	1065	8	20,46	163,65	88,35	320	1841,09	18,93
Tek seferde, iki farklı ölçüde fırına yüklenen camlar										
Kapla.	8	1180	2980	2	103,15	206,30	89,92	380	1954,44	19,81
Kapla.	8	1180	1480	2						



Şekil 3.4. Doğal gazlı fırının farklı cam yükleri için fırın verimlerinin eğilimi ve fırınların kapasite aralığı

3.6. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırınında Farklı Cam Kalınlıklarında, Maksimum Kapasitelerde Yapılan Ölçümler ve Hesaplar

Doğal gazlı cam temperleme fırınında, fırına yüklenebilen maksimum malzeme boyutlarına göre enerji akışlarının ve fırın veriminin ne şekilde değişeceğini tespit etmek için farklı kalınlıklarda, aynı boyutlarda düz cam ve kaplamalı cam olmak üzere iki farklı tipte cam yüklemesi yapılır. Sadece 4 mm ve 5 mm camlarda temperleme işleminden önce malzeme kalınlıklarının az olmasından dolayı hızlı bir soğuma gerçekleştiğinden fırına daha kısa boylarda parçalar yüklenmektedir. Hassas bir ısı rejiminin sağlanabilmesi için ondülasyon, kamburluk ve kırıldığında parça sayısı gibi kalite kontrol parametrelerini doğrudan etkilemeyecek cam boyutlarında çalışmak çok önemlidir. Doğal gazlı cam temperleme fırınının içinin eni 2440 mm, boyu ise 5040 mm uzunluğundadır; bu nedenle maksimum 2400 mm eninde ve 5000 mm uzunluğunda bir adet cam temperlenebilir. Kalınlığı 4 mm olan camlar maksimum 2400 mm boyunda, kalınlığı 5 mm olan camlar ise 4900 mm boyunda temperlenebilmektedir. Kalınlıkları 6 mm, 8 mm, 10 mm ve 12 mm olan camlar ise 5000 mm boyunda sorunsuz temperlenebilir. Cam kalınlıklarına göre yüklenebilen maksimum cam boyutlarındaki fırın yükleri, fırının o cam kalınlığına göre maksimum kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Tablo 3.11’de doğal gazlı fırının maksimum kapasitelerde, farklı kalınlıklarda düz ve kaplamalı camlar için alınan ölçümler verilmiştir.

Tablo 3.11. Doğal gazlı temperleme fırınında farklı tip ve kalınlıklarda, maksimum boyutlardaki camlar temperlenirken alınan ölçümler

Cam Tipi	Kalınlık (mm)	En (mm)	Boy (mm)	İşlem Süresi (s)	Tç (°C)	Tr (°C)
Düz Cam	4	2000	2400	160	613	23,3
Düz Cam	5	2400	4900	190	613	23,3
Düz Cam	6	2400	5000	230	613	23,3
Düz Cam	8	2400	5000	335	613	23,3
Düz Cam	10	2400	5000	475	613	23,3
Düz Cam	12	2400	5000	580	613	23,3
Kaplamalı Cam	6	2400	5000	275	613	23,3
Kaplamalı Cam	8	2400	5000	375	613	23,3

Cam kalınlıkları arttıkça doğal gazlı fırında temperleme işlem sürelerinin uzadığı görülmektedir. Kaplamalı camlarda, aynı kalınlıklardaki düz camlara göre temperleme süreleri daha uzun sürmektedir (Tablo 3.11).

3.6.1. Doğal gazlı cam temperleme fırınında farklı cam kalınlıklarında, maksimum kapasitelerde enerji akışları ve verim değerleri

Doğal gazlı cam temperleme fırınında, temperleme esnasında alınan ölçüm sonuçları Tablo 3.11'den temperlenen camın Tablo 3.12'deki kütle akışları çıkarılır.

Tablo 3.12. Doğal gazlı temperleme fırınında farklı tip ve kalınlıklarda, maksimum boyutlardaki camların kütle akışları

Cam Tipi	Cam Boyutları (mm)	m_c (kg)	\dot{m}_c (kg/h)
Düz Cam	4x2000x2400	47,04	1.058,4
Düz Cam	5x2400x4900	144,06	2.729,6
Düz Cam	6x2400x5000	176,40	2.761,0
Düz Cam	8x2400x5000	235,20	2.527,5
Düz Cam	10x2400x5000	294,00	2.228,2
Düz Cam	12x2400x5000	352,80	2.189,8
Kaplamalı Cam	6x2400x5000	176,40	2.309,2
Kaplamalı Cam	8x2400x5000	235,20	2.257,9

Doğal gazlı fırının maksimum kapasitelerdeki kütle akışları Tablo 3.12'de görüldüğü üzere en fazla cam yüklemesinin 2761,0 kg/h ile 6x2400x5000 (mm) boyutlarındaki cam olduğu; en düşük cam yüklemesinin ise 1058,4 kg/h ile 4x2000x2400 (mm) boyutlarındaki cam olduğu görülmektedir. Ayrıca 6x2400x5000 (mm) ve 8x2400x5000 (mm) boyutlarındaki kaplamalı camlarda temperleme operasyon süresinin düz camlara göre uzun sürmesi, birim zamanda temperlenen cam kütlelerinin de farklı olmasına neden olmuştur. Bu sebepten kaplamalı camlarda aynı boyutlardaki düz camlara göre birim zamandaki fırın cam yüklemeleri daha az kütlelerde gerçekleşmektedir.

Tablolardaki sonuçlardan, doğal gazlı fırında farklı kalınlıklarda, maksimum boyutlardaki camlar için önceki bölümlerde yapılan hesapların aynısı bu kapasiteler için de yapılarak birim zamandaki enerji akışları ve verim değerleri elde edilir. (Tablo 3.13, Tablo 3.14).

Tablo 3.13. Doğal gazlı temperleme fırınında farklı tip ve kalınlıklarda, maksimum boyutlardaki camları temperlemek için giren enerji akışları

Cam Tipi	Cam Boyutları (mm)	$\Delta\dot{H}_{yb}$ (kJ/h)	$\Sigma\dot{W}$ (kJ/h)
Düz Cam	4x2000x2400	3.342.854,14	486.462,6
Düz Cam	5x2400x4900	4.178.567,67	486.462,6
Düz Cam	6x2400x5000	4.178.567,67	486.462,6
Düz Cam	8x2400x5000	4.178.567,67	486.462,6
Düz Cam	10x2400x5000	4.132.139,14	486.462,6
Düz Cam	12x2400x5000	4.132.139,14	486.462,6
Kaplamalı Cam	6x2400x5000	4.132.139,14	486.462,6
Kaplamalı Cam	8x2400x5000	4.132.139,14	486.462,6

Doğal gazlı fırına birim zamanda yakıtla beslenen maksimum enerji $\Delta\dot{H}_{yb}=4.178.567,67$ kJ/h, elektrikle beslenen güç $\Sigma\dot{W}=486.462,6$ kJ/h, baca gazları ile birim zamanda atmosfere atılan maksimum enerji $\Delta\dot{H}_{bg}=2.325.318,6$ kJ/h, soğutma suyu yolu ile birim zamanda atmosfere atılan enerji $\Delta\dot{H}_{ss}=157.703,36$ kJ/h olarak 6x2400x5000 (mm) boyutlarında cam için elde edilmiştir.

Tablo 3.14. Doğal gazlı temperleme fırınında farklı tip ve kalınlıklarda, maksimum boyutlardaki camları temperlemek için çıkan enerji akışları ve verimler

Cam Tipi	Cam Boyutları (mm)	$\Delta\dot{H}_{c,\zeta}$ (kJ/h)	$\Delta\dot{H}_{bg}$ (kJ/h)	$\Delta\dot{H}_{ss}$ (kJ/h)	\dot{Q}_k (kJ/h)	Verim (%)
Düz Cam	4x2000x2400	499.310,8	1.860.254,9	157.703,4	1.312.047,7	13,04
Düz Cam	5x2400x4900	1.287.696,2	2.325.318,6	157.703,4	894.312,0	27,60
Düz Cam	6x2400x5000	1.302.549,9	2.325.318,6	157.703,4	879.458,4	27,92
Düz Cam	8x2400x5000	1.192.384,0	2.325.318,6	157.703,4	989.624,3	25,56
Düz Cam	10x2400x5000	1.051.180,6	2.299.481,8	157.703,4	1.110.236,0	22,76
Düz Cam	12x2400x5000	1.033.056,8	2.299.481,8	157.703,4	1.128.359,8	22,37
Kapl. Cam	6x2400x5000	1.089.405,3	2.299.481,8	157.703,4	1.072.011,3	23,59
Kapl. Cam	8x2400x5000	1.065.196,3	2.299.481,8	157.703,4	1.096.220,3	23,06

Doğal gazlı temperleme fırınında farklı tip ve kalınlıklardaki camlar için maksimum kapasitelerdeki verim grafiği Şekil 3.5 incelendiğinde cam kalınlığı 4 mm'den 6 mm'ye kadar çıktığında fırın verimi artmakta, 6 mm'den 12 mm'ye kadar çıktığında ise fırın verimi azalmaktadır ayrıca aynı kalınlıklardaki kaplamalı camlarda fırın verimi azalmaktadır. En yüksek fırın verimi 6x2400x5000 (mm) boyutlarındaki düz cam için % 27,92 elde edilir.

3.6.2. Doğal gazlı cam temperleme fırınında farklı cam kalınlıklarında, maksimum kapasitelerde enerji maliyetleri

Doğal gazlı fırının maksimum kapasitedeki gaz tüketim maliyeti ile elektrik tüketim maliyeti değeri toplanarak toplam enerji maliyeti değerleri (ΣM), Tablo 3.15'e yazılır.

Doğal gazlı temperleme fırınının birim cam başına enerji maliyetinin hesaplanması: Doğal gazlı fırının birim cam başına enerji maliyetini hesaplayabilmek için toplam enerji maliyeti değerini (ΣM), temperlenen birim zamandaki cam kütlesine (\dot{m}_c) bölerek Tablo 3.15'de doğal gazlı fırının maksimum kapasitelerde birim cam başına enerji maliyeti değerleri (M_{BC}) elde edilir.

Tablo 3.15. Doğal gazlı temperleme fırınında farklı cam tipi ve kalınlıklarda, maksimum fırın kapasitelerinde enerji maliyetleri

Cam Tipi	Kalınlık (mm)	En (mm)	Boy (mm)	\dot{m}_c (kg/h)	ΣM (TL/h)	M_{BC} (krş/kg)
Düz Cam	4	2000	2400	1058,4	136,05	12,854
Düz Cam	5	2400	4900	2729,6	158,92	5,822
Düz Cam	6	2400	5000	2761,0	158,92	5,756
Düz Cam	8	2400	5000	2527,5	158,92	6,288
Düz Cam	10	2400	5000	2228,2	157,65	7,075
Düz Cam	12	2400	5000	2189,8	157,65	7,199
Kaplamalı Cam	6	2400	5000	2309,2	157,65	6,827
Kaplamalı Cam	8	2400	5000	2257,9	157,65	6,982

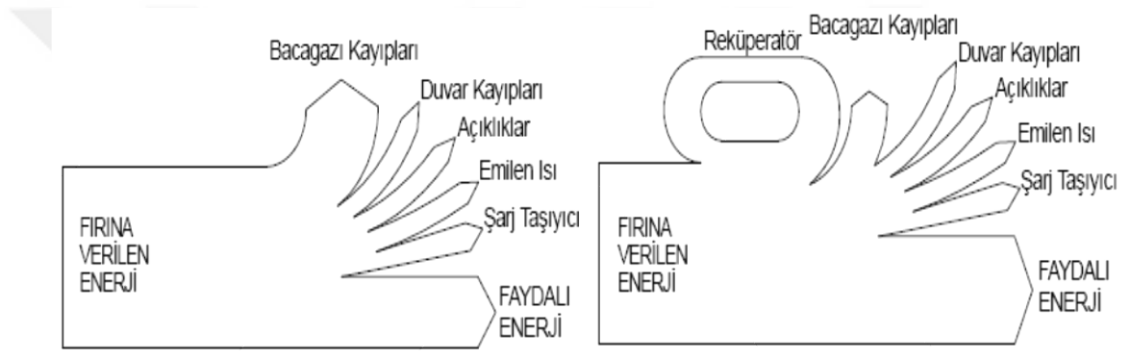
Doğal gazlı fırının maksimum kapasiteler için tespit edilen birim cam başına enerji maliyetleri Tablo 3.15'de verilmektedir. Tablo incelendiğinde, 6x2400x5000 (mm) cam boyutlarında, 2761,0 kg/h cam yüklemesinde en düşük enerji maliyeti 5,756 krş/kg değeri elde edilmektedir.

3.7. Doğal Gazlı Sanayi Fırınlarında Reküperatör Kullanarak Enerji Tasarrufu Sağlama Yöntemleri

Açık alevli bir demirci ocağı ile başlayan demir ve demir dışı metalleri işleyen fırınlar, günümüzde enerjiyi daha verimli kullanılır hale getirmişlerdir. Doğal gazın imalat maliyetlerine etkisi, diğer yakıtlara oranla daha az olmakla beraber her geçen gün yapılan yeniliklerle minimuma indirilmektedir. Gelişen teknolojik yöntemlerle

üretim her safhasında, gelişmiş sanayi fırınları kullanılır. Metal, cam, seramik, toprak, gıda sanayisinde kullanılan fırınlar çeşitli yapılarda olmakla beraber ortak noktaları sıcaklığın oluşması ve saklanmasıdır. Ürün ne kadar uzun süre sıcak bölgede kalırsa enerjiden o kadar çok fayda sağlanır. Doğal gazlı fırınlarda amaç yakıtın kimyasal enerjisinden açığa çıkan ve yüksek sıcaklığa sebep olan bu enerjiyi uzun süre fırın ortamında tutmaktır. [24].

Rekuperatör Tanımı: Endüstriyel tesislerdeki doğal gazlı fırınların bacalarından atmosfere atılan, yüksek enerji içeriğine sahip baca gazlarının enerjisinin geri kazanılmasını sağlayan bir enerji geri kazanım cihazıdır.



Şekil 3.6. Isıl işlem fırını enerji diyagramı ve reküperatörlü ısıl işlem fırını enerji diyagramı [12].

Sanayi fırınlarında ısı kaybının önemli bir kısmı fırının yüzeylerinden (taban, yan duvarlar, tavan ve kapaktan) kaybolur. Fırın yüzeyleri, mamul taşıyıcı sepetleri, mamul yükleme boşaltma kapaklarıyla olan ısı kayıpları ve fırının baca gazı kayıpları fırına verilen enerjinin büyük bir kısmının kaybolmasına neden olur (Şekil 3.6). En büyük enerji kaybı, baca kaybıdır ve alınacak önlemlerle asgariye düşürülmelidir. Bu atıl enerjinin bir kısmından yararlanmak için fırın bacasına ilave edilen merkezi rekuperatör yardımıyla yakma havasının ön ısıtılması yoluyla bacadan atılan enerjinin fırına geri kazanımı mümkün olabilmektedir. Maalesef merkezi rekuperatörlerin verimli imal edilememesi, tesisat borularının çok iyi izole edilmesi zorunluluğu, baca gazında ve sıcak havada oluşan basınç kayıpları, sıcak hava boru çaplarının sıcak hava yoğunluğunun azalmasından dolayı büyümesi bununla birlikte borularda kullanılan kumanda ve ayar ekipmanlarının da büyümesine, dolayısıyla ilk yatırım ve bakım maliyetlerinin yükselmesine neden olabilmektedir. Ancak iyi

tasarlanarak uygulanan merkezi reküperatörlü sistemlerin, büyük bir enerji tasarrufu sağladığı açıktır ve genelde uygulanır [12,13].

Kendinden reküperatörlü brülörlerle ısıtılan fırınlarda, kapılar ve menfezlerin sızdırmaz olarak kontrol edilmesiyle fırın içerisinde artı bir basınç oluşturma imkanı elde edilebilmektedir. Oluşturulan bu artı basınç sayesinde baca gazları; ilave bir merkezi reküperatör veya baca yerine, reküperatörü kendi bünyesinde tasarlanmış, kendinden reküperatörlü brülör üzerinden geçirilirken yakma havası ile ayrı kanallarda zıt akışlı olarak karşılaştırılır ve yakma havasının yüksek sıcaklığa kadar ısıtılması sağlanır. Bu çalışma tekniğiyle, baca gazındaki atıl enerjinin önemli bir kısmının fırına geri kazanımı mümkün olabilmektedir (Şekil 3.6).

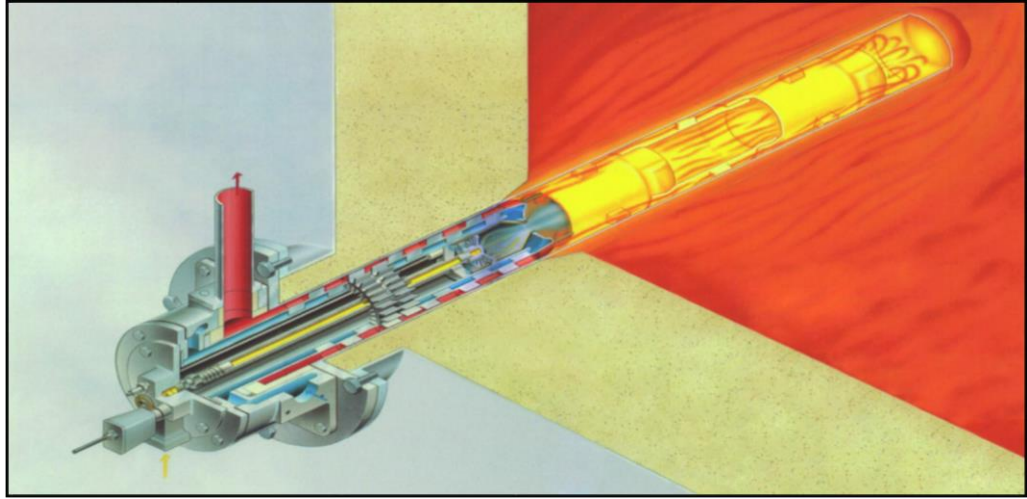
Kendinden reküperatif brülörlü sistemlerde merkezi reküperatör gibi yüksek baca, büyük çaplı sıcak hava boruları yoktur. Brülörün kendi gövdesi üzerindeki reküperatör marifetiyle yakma havası daha yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılır ve baca gazı soğutularak daha yüksek enerji verimliliğine erişilir. Merkezi reküperatördeki gibi yüksek baca, büyük çaplı sıcak hava boru imalatı ve boru izolasyonu gibi ilk yatırım maliyetleri olmayan bu yakma sistemlerinde, yakma havası 600-700°C'ye kadar ısıtılabilirdiği için böyle fırınların enerji verimlilik değerleri, geleneksel fırınların enerji verimlilik değerlerinden daha yüksektir; % 50 oranına kadar enerji tasarrufu elde edilir [12,13].

Enerji tasarruflu endüstriyel fırınlar şunlardır:

- a- Kapalı alevli, reküperatif brülörlü fırınlar
- b- Açık alevli, reküperatif brülörlü fırınlar
- c- Merkezi reküperatörlü fırınlar
- d- Rejeneratif yakmalı fırınlar

3.7.1. Kapalı alevli reküperatif brülörler

Isıtılacak mamulün, fırın içerisindeki yanmış gazlarla temasının istenmediği özel durumlarda endirekt ısıtmalı radyant tüplü reküperatif yakıcılar kullanılır (Şekil 3.7). Fırın içine yabancı bir madde girmez, yanıcı gaz ile hava fırın içindeki bir boruda yanar. Yakıcı, enerjisini radyasyonla fırın ortamına bırakır ve yanmış gazlar reküperatif brülör üzerinden fırını terk eder.

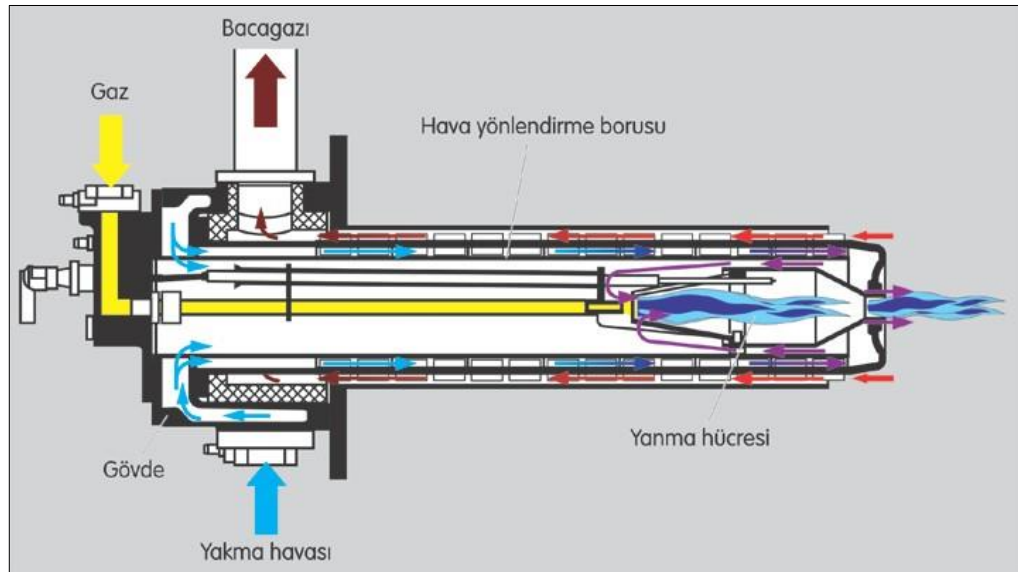


Şekil 3.7. Reküperatif brülörde endirekt yanma [13].

Endirekt yanmalı reküperatif brülör kullanılan fırınların verimi, direkt yanmalı reküperatif brülörlü fırınların veriminden daha düşüktür.

3.7.2. Açık alevli reküperatif brülörler

Isıl işlem görececek ürün açık alevli uygulamadan etkilenmiyorsa daha verimli olan açık alevli reküperatif brülörler kullanılır. Yanmış gazlar, fırın ortamında ısıtma işlemini tamamladıktan sonra brülör bünyesindeki reküperatör üzerinden Şekil 3.8’de gösterildiği gibi fırını terk eder.

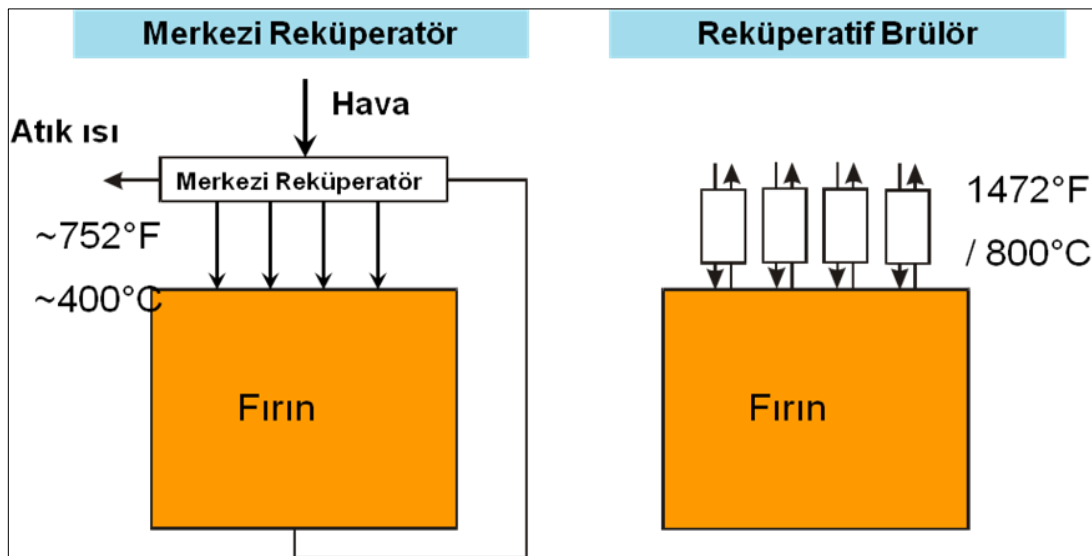


Şekil 3.8. Kendinden reküperatörlü brülörün çalışması [13].

Fırın çıkışında kontrollü küçük bir baca olduğu için oluşan artı basınç, baca gazlarını brülör üzerinden yönlendirir. Bu şekilde kendi bünyesine entegre reküperatör ile fırın içerisindeki egzoz gazından yanma havasını ısıtmak için yararlanır. Reküperatif yakıcılar enerji verimliliği yüksek, düşük baca emisyon değerleri ile direkt (açık alevli) ve endirekt (kapalı alevli) ısıtma sistemlerine uygundur. Fırın bünyesinde devamlı bir artı basıncı dengede tutmak için küçük bir baca ile yanmış gazların % 20'si kontrollü olarak fırın dışına atılır. Çok az bir ısı kaybı ile yanmış gazların % 80'i reküperatif brülör üzerinden fırını terk ederken brülör reküperatörü üzerinden giren yakma havasını 700-800 °C ye kadar ısıtır. Merkezi reküperatörle sıcak hava üretiminin verimi, açık alevli reküperatif brülörün veriminden çok daha düşüktür. Merkezi reküperatörde en iyi şartlarla elde edilen 450 °C sıcaklığında hava ile % 15-20 verime ulaşılabilirken açık alevli reküperatif brülörler ile 700-800 °C sıcaklığında hava ile % 40-50 arasında verim elde edilir [13].

3.7.3. Merkezi reküperatörlü ısıtma fırınları

Merkezi reküperatörler: Endüstriyel tesislerdeki doğal gazlı fırınların bacalarından atılan, yüksek enerji ihtiva eden gazların enerjisinin geri kazanılması için tasarlanmış, basit ve verimli kullanım imkanı sağlayan ısı değişirme araçlarıdır. Bu fırınlar, fırın bacasına entegre reküperatör yardımıyla baca gazlarından aldığı ısı yardımıyla yakma havasının sıcaklığını artırırlar (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Merkezi reküperatörlü ve reküperatif brülörlü fırınların şematik gösterimi [13].

Merkezi reküperatör kısa sürelerde yenilenmek zorundadır, bu ve benzeri dezavantajlarına rağmen endüstride en yaygın kullanılan ısı geri kazanım aracıdır.

3.7.4. Rejeneratif yakma fırınları

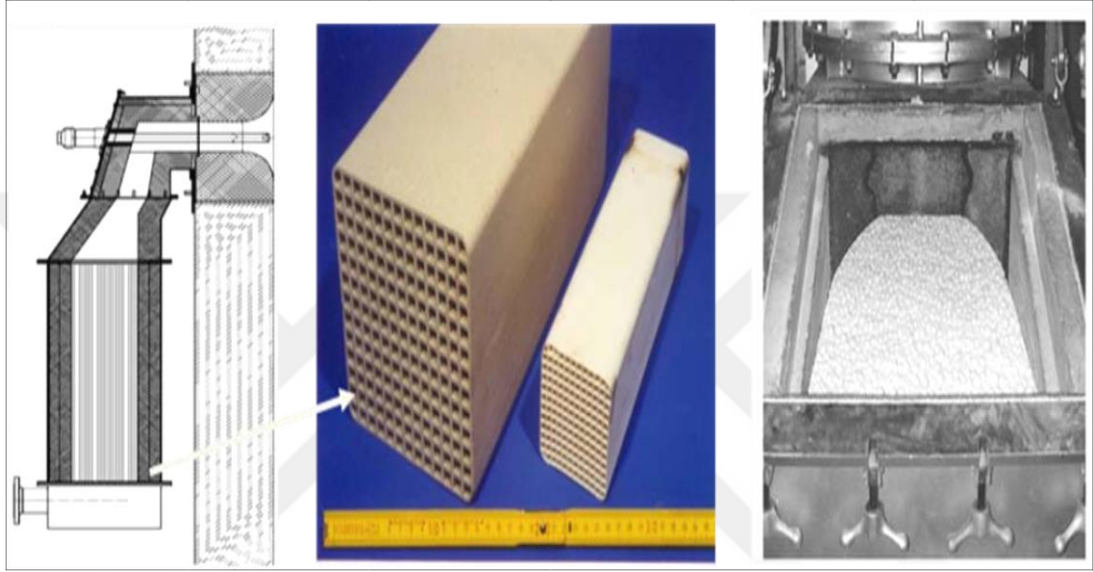
Rejeneratif yakmalı fırınlar, endüstride bilinen en yüksek ısı geri kazanımı sağlayan cihazlardır. Bu fırınlarla 1500 °C çalışma sıcaklığında 1000 °C yakma havası sıcaklığına ulaşılabilir. Rejeneratif fırınlar aynı özelliklere sahip iki ısı hücreli yapının karşılıklı ve kontrollü devreye girmesi prensibiyle çalışır (Şekil 3.10, Şekil 3.11).

Bu yakma sisteminde her yakıcı, seramik peteklerden veya alümina toplardan oluşan bir ısı jeneratörü içerir. Yakma havasının ısıtılması da ısının Şekil 3.12’de gösterilen seramik petek ve alümina toplara depolanması ile olur. Bir rejeneratif yakıcı, jeneratöründe biriken ısı yardımıyla sıcak yakma havası ile yanma modunda çalışırken diğer yakıcı fırın içerisindeki egzoz gazlarını emerek egzoz gazları içerisindeki ısının seramik petek ve alümina toplara depolanmasını sağlar. Baca gazı sıcaklığına göre veya zamana bağlı çalışma yönü değişimi ile çalışan sistem, sırası geldiğinde karşılıklı çalışan rejeneratif brülörlerin çalışma yönünü değiştirir ve jeneratöründe ısı biriken brülörü yakma modunda çalıştırırken karşısındaki brülörü egzozu emmesi için çalıştırır.

Şekil 3.10 incelendiğinde Yakıcı A, jeneratöründe biriken ısı yardımıyla sıcak yakma havasıyla alev fazında yüksek verimde yanarken; fırın içerisindeki egzoz gazları egzoz fazındaki Yakıcı B’nin jeneratörü üzerinden ısınıp seramik petek ve alümina toplara bırakarak fırını terkeder. Bu şekilde çalışma esnasında Yakıcı A’nın jeneratöründeki yüksek sıcaklık azaldığında çalışma yön değiştirir. Yakıcı B, alev fazında devreye girerek yakma havasını daha önce ısınmış olan kendi jeneratörü üzerinden emmeye başlar. Jeneratöründe biriken ısı yardımıyla yüksek sıcaklıkta yakma havasıyla yanan Yakıcı B, diğer taraftan egzoz gazlarıyla egzoz fazında olan Yakıcı A’nın jeneratörünü ısıtmaya devam eder.

Bu şekilde çiftli çalışma yöntemiyle çalışan doğal gazlı rejeneratif yakma sistemli fırınlar, konvansiyonel olarak çalışan doğal gazlı fırınlara göre daha yüksek verimle çalışarak % 60’a varan enerji tasarrufu sağlarlar. [13].

Rejeneratif fırınlar, endüstriyel proseslerde direkt açık alevli veya endirekt radyant ısıtmalar için de uygundur. Serbest kanal kesiti 9 mm x 9 mm petek gövde, seramik alümina topraklar Şekil 3.12’de gösterilmektedir. Kanallardan geçen yanmış gazlar, ısılarını petek gövde ısı kanalına ve seramik alümina topraklara bırakarak fırını terkeder. Çalışma yönü değiştiğinde taze yanma havası, buradaki ısıdan yararlanarak sıcaklığını artırır. Baca gazı enerji kayıpları, bu şekilde düşerek fırın verimi artar.



Şekil 3.12. Rejeneratif yakma sisteminin petek gövde ısı depolama kanalı [13].

3.8. Doğal Gazlı Cam Temperleme Fırınına Nominal Kapasitede İyileştirme Yöntemleri Uygulanması Durumunda Yapılan Hesaplar

Doğal gazlı cam temperleme fırınında nominal kapasite üzerinden alınan ölçümlerde fırın yüzeylerinden, açıklıklardan ve fırın bacasından çok fazla miktarda ısı enerjisinin yeterince değerlendirilmeden kayıp olarak atmosfere atıldığı açık bir şekilde görülmektedir. Fırın bacasından, fırın yüzey ve açıklıklarından atmosfere atılan bu kayıp ısı enerjisinin en azından yarısının fırın üzerinde iyileştirmeler yapılarak geri kazanılabileceği, bir önceki bölümde anlatılan doğal gazlı fırınlarda iyileştirme yöntemleri konusunda anlaşılmaktadır. Bu iyileştirmeler iyileştirme 1: Doğal gazlı fırında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması, iyileştirme 2: Doğal gazlı fırında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması ve fırın yalıtımının iyileştirilmesi durumları için olmak üzere iki ayrı başlık altında incelenecektir. Tablo 3.9 üzerinden bahsedilen oranlardaki iyileştirmeler için hesaplar yapılarak iyileştirme

önerisi sonrası fırının birim zamandaki enerji akışları elde edilir (Tablo 3.16). Bulunan bu akışlar üzerinden doğal gazlı fırının her bir iyileştirme durumu için enerji verim değerleri ve enerji maliyetleri hesaplanır.

3.8.1. İyileştirme-1:Doğal gazlı cam temperleme fırınında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması durumu için enerji akışlarının hesabı

Doğal gazlı temperleme fırınında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması sonrası doğal gaz yakıtı ile birim zamanda fırına beslenen enerjinin hesabı:

Kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması önerisi ile baca gazı yoluyla dışarı atılan enerjinin yarısı (%50) kadarının geri kazanıldığı düşünülür, fırına doğal gaz ve elektrik enerjisi ile beslenen toplam enerjiden düşülerek iyileştirme sonrası fırına beslenecek birim zamandaki toplam enerji değeri hesaplanır. Bu birinci iyileştirme, birim zamandaki diğer enerji akışlarını ($\Delta\dot{H}_{ss}$, $\Delta\dot{H}_{c,g}$, $\Delta\dot{H}_{c,\phi}$ ve \dot{Q}_k) etkilememektedir.

Birinci iyileştirme sonrası birim zamanda baca gazı ile atmosfere atılan enerji ($\Delta\dot{H}_{1,bg}$) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Delta\dot{H}_{1,bg} = \frac{\Delta\dot{H}_{bg}}{2}$$

$\Delta\dot{H}_{1,bg} = 1.165.087,34$ kJ/h elde edilir.

Birinci iyileştirme sonrası fırına birim zamanda doğal gaz ile beslenen enerji ($\Delta\dot{H}_{1,yb}$), aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta\dot{H}_{1,yb} = \Delta\dot{H}_{yb} - \Delta\dot{H}_{1,bg}$$

$\Delta\dot{H}_{1,yb} = 2.874.089,51$ kJ/h elde edilir.

Birinci iyileştirme sonrası fırına doğal gaz ve elektrikle beslenen birim zamandaki enerji ($\Sigma\dot{E}_1$) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Sigma\dot{E}_1 = \Delta\dot{H}_{1,yb} + \Sigma\dot{W}$$

$\Sigma\dot{E}_1 = 3.360.552,11$ kJ/h elde edilir.

3.8.2. İyileştirme-1:Doğal gazlı cam temperleme fırınında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması durumu için verim ve enerji maliyetinin hesabı

Doğal gazlı temperleme fırınının verim hesaplaması:

Doğal gazlı fırında kendinden reküperatörlü (self reküperatörlü) yakıcı kullanarak yanmış baca gazları yoluyla atmosfere atılan ısı enerjisinin % 50'sinin geri kazanılması durumunda verim, daha öncede hesapladığımız yöntemlerle Tablo 3.9'daki verilerden ve Denklem (2.22)'den faydalanılarak hesaplanır.

$\eta_1 = \% 19,14$ elde edilir.

Doğal gazlı temperleme fırınının reküperatörlü yakıcı kullanılması sonrası enerji maliyetlerinin hesaplanması:

Birinci iyileştirme durumu için doğal gazlı fırına birim zamanda yakıt ile beslenen enerji ($\Delta\dot{H}_{1,yb}$) değerini, yakıtın üst ısıl değeri (H_u)'ya bölerek bu değeri verecek hacimsel debi hesaplanır. Bu hacimsel debi, doğal gazın birim fiyatı ile çarpılarak fırının doğal gaz enerjisi maliyeti bulunur. Bu iyileştirme, doğal gazlı fırına giren elektrik enerjisi maliyetini etkilemeyeceğinden fırına giren elektrik enerjisi maliyeti ile doğal gaz enerjisi maliyeti toplanarak fırının birinci iyileştirme durumu için toplam enerji maliyeti bulunmuş olur.

Bulunmuş olan birim zamandaki bu enerjiden, bu değeri verecek doğal gazın hacmi ($V_{1,dg}$) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta\dot{H}_{1,yb} = V_{1,dg} \times H_u$$

$V_{1,dg} = 75,10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ elde edilir.

Birinci iyileştirme sonrası doğal gaz enerjisi maliyeti (M_{D1}) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$M_{D1} = V_{1,dg} \times \text{Doğal gaz birim fiyatı}$$

$M_{D1} = 78,63 \text{ TL/h}$ elde edilir.

Doğal gazlı fırınının elektrik enerjisi maliyeti değişmeyeceğinden daha önce hesapladığımız M_E maliyet değeri hesaplarda kullanılır. Birinci iyileştirme sonrası fırının toplam enerji maliyeti (ΣM_1) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Sigma M_1 = M_{D1} + M_E$$

$$\Sigma M_1 = 123,22 \text{ TL/h elde edilir.}$$

Doğal gazlı temperleme fırınına reküperatörlü yakıcı kullanılması sonrası birim enerji maliyetinin hesaplanması:

Yukarıda bulunan toplam enerji maliyeti (ΣM_1) değeri, temperlenen birim zamandaki camın kütlesine (\dot{m}_c) bölünerek birim cam başına enerji maliyeti (M_{BC1}) elde edilir.

Birinci iyileştirme sonrası birim cam başına enerji maliyeti (M_{BC1}) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$M_{BC1} = \frac{\Sigma M_1}{\dot{m}_c}$$

$$M_{BC1} = 9,036 \text{ krş/kg elde edilir.}$$

3.8.3. İyileştirme-2: Doğal gazlı cam temperleme fırınında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması ve fırın yalıtımının iyileştirilmesi durumu için enerji akışlarının hesabı

Doğal gazlı cam temperleme fırınında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması önerisiyle birim zamanda baca gazı yoluyla dışarıya atılan enerjinin yarısının, fırın yalıtımının iyileştirilmesi önerisiyle yüzey ve açıklıklardan birim zamanda kaybolan enerjinin de yarısının geri kazanıldığı düşünülün. İyileştirme önerileri sonrası fırına yakıtla beslenen birim zamandaki enerjiyi hesaplamak için iyileştirme önerileriyle geri kazanılan her iki kayıp enerjinin yarısı, fırına birim zamanda yakıtla beslenen enerjiden çıkarılır. Bu ikinci iyileştirme, birim zamandaki diğer enerji akışı değerlerini ($\Delta \dot{H}_{ss}$, $\Delta \dot{H}_{c,g}$ ve $\Delta \dot{H}_{c,\phi}$) etkilememektedir.

İkinci iyileştirme sonrası fırın yüzey ve açıklıklardan birim zamanda atmosfere atılan enerji $\dot{Q}_{2,k}$ aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{Q}_{2,k} = \frac{\dot{Q}_k}{2}$$

$$\dot{Q}_{2,k} = 697.251,25 \text{ kJ/h elde edilir.}$$

Daha önce kendinden reküperatörlü brülör kullanılması önerisiyle hesaplanan, birinci iyileştirme sonrası birim zamanda yakıtla beslenen enerji $\Delta\dot{H}_{1,yb}$ 'yi hesaplarda kullanarak ikinci iyileştirme önerisi sonrası fırına birim zamanda yakıtla beslenen enerji $\Delta\dot{H}_{2,yb}$ aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta\dot{H}_{2,yb} = \Delta\dot{H}_{1,yb} - \dot{Q}_{2,k}$$

$$\Delta\dot{H}_{2,yb} = 2.176.838,26 \text{ kJ/h elde edilir.}$$

İkinci iyileştirme sonrası fırına doğal gaz ve elektrikle beslenen enerji ($\Sigma\dot{E}_2$) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Sigma\dot{E}_2 = \Delta\dot{H}_{2,yb} + \Sigma\dot{W}$$

$$\Sigma\dot{E}_2 = 2.663.300,86 \text{ kJ/h elde edilir.}$$

3.8.4. İyileştirme-2:Doğal gazlı cam temperleme fırınında kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması ve fırın yalıtımının iyileştirilmesi durumu için verim ve enerji maliyeti hesaplaması

Doğal gazlı temperleme fırınının verim hesaplaması:

Kendinden reküperatörlü yakıcı ile baca gazı enerjisinin % 50'sinin geri kazanılmasına ilaveten fırın yalıtımı ve sızıntı kayıplarının ilave yalıtım önlemleri ile % 50 iyileştirildiği ikinci bir iyileştirmenin de yapılmış olması durumunda ise verim, Tablo 3.9'daki verilerden ve Denklem (2.22)'den faydalanılarak hesaplanır.

$$\eta_2 = \% 24,15 \text{ elde edilir.}$$

Doğal gazlı temperleme fırınının ikinci iyileştirme sonrası enerji maliyetlerinin hesaplanması:

İkinci iyileştirme sonrası fırına birim zamanda beslenen enerji ($\Delta\dot{H}_{2,yb}$) değeri yakıtın üst ısıl değeri (H_u)'ya bölünerek bu değeri verecek hacimsel debi hesaplanır. Bulunan hacimsel debi doğal gazın birim fiyatı ile çarpılıp fırına beslenen doğal

gazın maliyeti elde edilir. İkinci iyileştirme fırına giren elektrik enerjisi maliyetini etkilemeyeceğinden, fırına giren elektrik enerjisi maliyeti ile doğal gaz enerjisi maliyeti toplanır; fırının ikinci iyileştirme sonrası için toplam enerji maliyeti elde edilmiş olur.

Fırına doğal gazla birim zamanda beslenen enerjiden ($\Delta\dot{H}_{2,yb}$), bu değeri verecek doğal gaz hacmi ($V_{2,dg}$) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta\dot{H}_{2,yb} = V_{2,dg} \times H_u$$

$$V_{2,dg} = 56,88 \text{ Nm}^3/\text{h} \text{ elde edilir.}$$

İkinci iyileştirme sonrası doğal gaz enerjisi maliyeti (M_{D2}) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$M_{D2} = V_{2,dg} \times \text{Doğal gaz birim fiyatı}$$

$$M_{D2} = 59,55 \text{ TL/h} \text{ elde edilir.}$$

İkinci iyileştirme doğal gazlı fırınının elektrik enerjisi maliyetini değiştirmeyeceğinden daha önce hesapladığımız M_E maliyet değeri hesaplarda kullanılır.

İkinci iyileştirme sonrası fırının toplam enerji maliyeti (ΣM_2) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Sigma M_2 = M_{D2} + M_E$$

$$\Sigma M_2 = 104,14 \text{ TL/h} \text{ elde edilir.}$$

Doğal gazlı temperleme fırınının ikinci iyileştirme sonrası birim cam başına enerji maliyeti aşağıdaki gibi hesaplanır.

Yukarıda hesaplanan toplam enerji maliyeti (ΣM_2) değeri, temperlenen birim zamandaki camın kütlesine (\dot{m}_c) bölünerek birim cam başına enerji maliyeti (M_{BC2}) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$M_{BC2} = \frac{\Sigma M_2}{\dot{m}_c}$$

$$M_{BC2} = 7,638 \text{ krş/kg} \text{ elde edilir.}$$

Tablo 3.16. Doğal gazlı cam temperleme fırınında nominal kapasitede, iyileştirme önerileri sonrası enerji akışları

Enerji akışı	Miktar(kJ/h)	Miktar(kW)
İyileştirme önerisi-1 sonrası yakıtla beslenen	2.874.089,51	798,36
İyileştirme önerisi-2 sonrası yakıtla beslenen	2.176.838,26	604,68
Elektrik olarak sisteme giren	486.462,60	135,13
Cama aktarılan	643.258,91	178,68
Soğutma suyu ile atılan	157.703,36	43,81
İyileştirme önerisi-1 sonrası baca gazıyla kaybolan	1.165.087,34	323,64
İyileştirme önerisi-2 sonrası, yüzeylerden kaybolan	697.251,25	193,68

Doğal gazlı cam temperleme fırınında nominal kapasitede Tablo 3.16'daki iyileştirmeler sonrası her bir durum için enerji akışlarından enerji verimleri elde edildiğinde, kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması önerisi sonrası fırın verimi % 19,14; kendinden reküperatörlü yakıcı kullanılması ve yalıtım iyileştirmesi önerileri sonrası fırın verimi % 24,15 olarak elde edilmektedir. Doğal gazlı fırının nominal kapasitede mevcut durumdaki fırın verimi % 14,21 iken iyileştirme önerileri ile verimlerin önemli oranlarda artacağı görülmektedir.

4. ELEKTRİKLİ CAM TEMPERLEME FIRINININ ÖZELLİKLERİ, FIRINDA YAPILAN ÖLÇÜMLER, HESAPLAR

Elektrikli fırının içerisinde fırının tabanında, tavanında fırına boylamasına 21 adet olmak üzere toplamda 42 adet elektrik rezistansı ve yine fırının tabanında, tavanında fırına enlemesine 3 adet olmak üzere toplamda 6 adet elektrik rezistansı, fırının tamamında 48 adet elektrik rezistansı bulunmaktadır. Fırın girişinde, içinde ve çıkışında Şekil 4.1’de görüldüğü üzere camların fırın içerisine yüklenmesi ve boşaltılması için konveyörler bulunmaktadır. Elektrikli fırının enerji tüketimini belirlemek için fırınlar çalışırken enerji analizörü ile ölçüm alınır, fırın yüzey sıcaklıklarını ve baca gazı sıcaklığını tespit etmek için temaslı ve temassız termometreden faydalanılır. Fırın açıklıklarındaki sıcaklık ve temperlenmiş cam çıkış sıcaklıkları, yine aynı yöntemle temassız termometre kullanılarak; ortam havası sıcaklığı, nemi termometre ve nem ölçer aracılığıyla; operasyon süreleri ise kronometre kullanılarak belirlenir.



Şekil 4.1. Elektrikli cam temperleme fırınının genel görünümü

Temperleme işlemleri için konveyörle fırına yüklenen camlar, fırın içerisinde 620-650 °C sıcaklığa ulaştıktan sonra aynı konveyör grubu yardımıyla fırın çıkışına Şekil 4.2’de gösterildiği gibi yönlendirilmektedir. Fırın çıkışında soğutma bölümünde camlar yüksek hızda hava ile kısa sürede soğutularak cam temperleme işlemi tamamlanmış olmaktadır. Elektrikli cam temperleme fırınının boyutları nedeniyle maksimum cam temperleme eni 2400 mm, boyu ise 4200 mm uzunluğundadır. Bu çalışmada sadece fırın ünitesinin analizleri yapılmıştır.



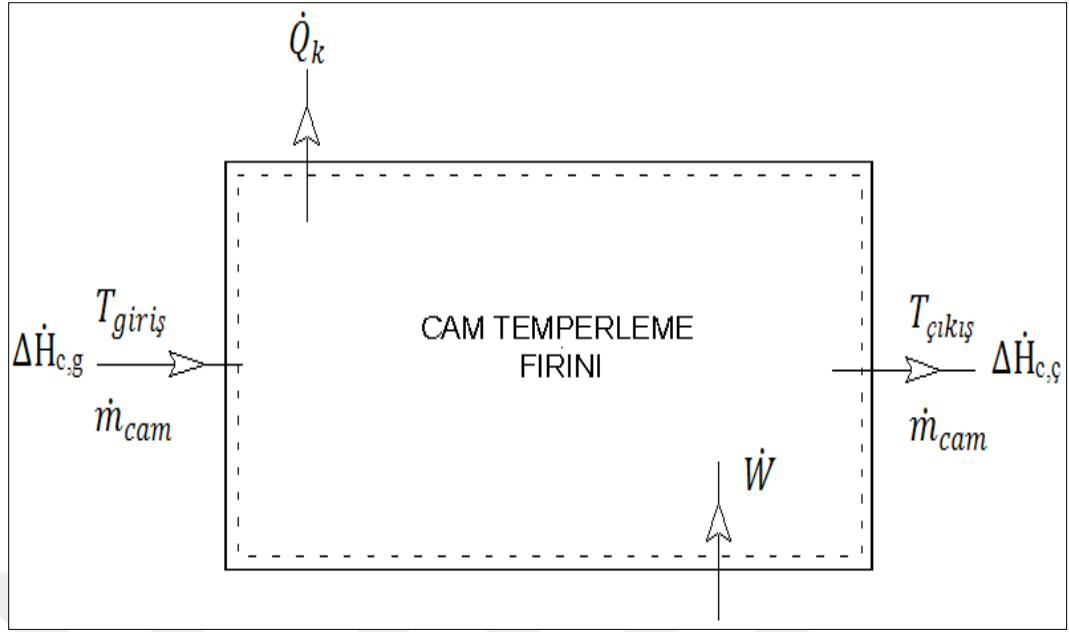
Şekil 4.2. Elektrikli cam temperleme fırınının cam soğutma bölümü görünümü

4.1. Elektrikli Cam Temperleme Fırını İçin Nominal Kapasitede Yapılan Ölçümler ve Birim Zamandaki Enerji Dengesi

Aşağıda Şekil 4.3’de elektrikli cam temperleme fırınının kütle ve enerji akışı şematik olarak gösterilmiştir.

Kararlı rejimde çalışma durumunda elektrikli temperleme fırını için birim zamandaki enerji dengesi Denklem (2.8)’den yararlanarak Denklem (4.1)’deki gibi yazılabilir.

$$\Sigma \dot{W} + \Delta \dot{H}_{c,g} = \Delta \dot{H}_{c,\varphi} + \dot{Q}_k \quad (4.1)$$



Şekil 4.3. Elektrikli cam temperleme fırını için kütle ve enerji akışlarının şematik gösterimi

Birim Zamanda Giren Enerjiler:

Elektrik enerjisi ile birim zamanda giren enerji: $\Sigma \dot{W}$

Cam ile birim zamanda giren enerji: $\Delta \dot{H}_{c,g}$

Birim Zamanda Çıkan Enerjiler:

Camla birim zamanda çıkan enerji: $\Delta \dot{H}_{c,\ç}$

Yüzeylerden ve açıklıklardan birim zamanda kaybolan enerji: \dot{Q}_k

Hesaplamalar, cam fabrikasındaki elektrikli cam temperleme fırınından üretim esnasında alınan ölçüm sonuçları Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'den faydalanılarak yapılır.

Tablo 4.1. Elektrikli fırının ortam sıcaklığı, bağıl nem ve elektrik tüketimi ölçüm sonuçları

Açıklama	Miktar
Ortam sıcaklığı (°C)	23,3
Bağıl nem (%)	33,7
Elektrik tüketimi (kW)	280

Elektrikli fırının elektrik tüketimi Şekil 4.4'deki ölçüm sonucundan elde edilir ve Tablo 4.1'e yazılır.

Elektrikli fırının yüzey alanları ve ortalama yüzey sıcaklıkları Tablo 4.2’de verilmektedir. Fırının yüzeylerinin sıcaklık ortalamalarının doğal gazlı fırına nazaran çok daha düşük olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 4.2. Elektrikli fırının yüzey alanları ve ortalama yüzey sıcaklıkları

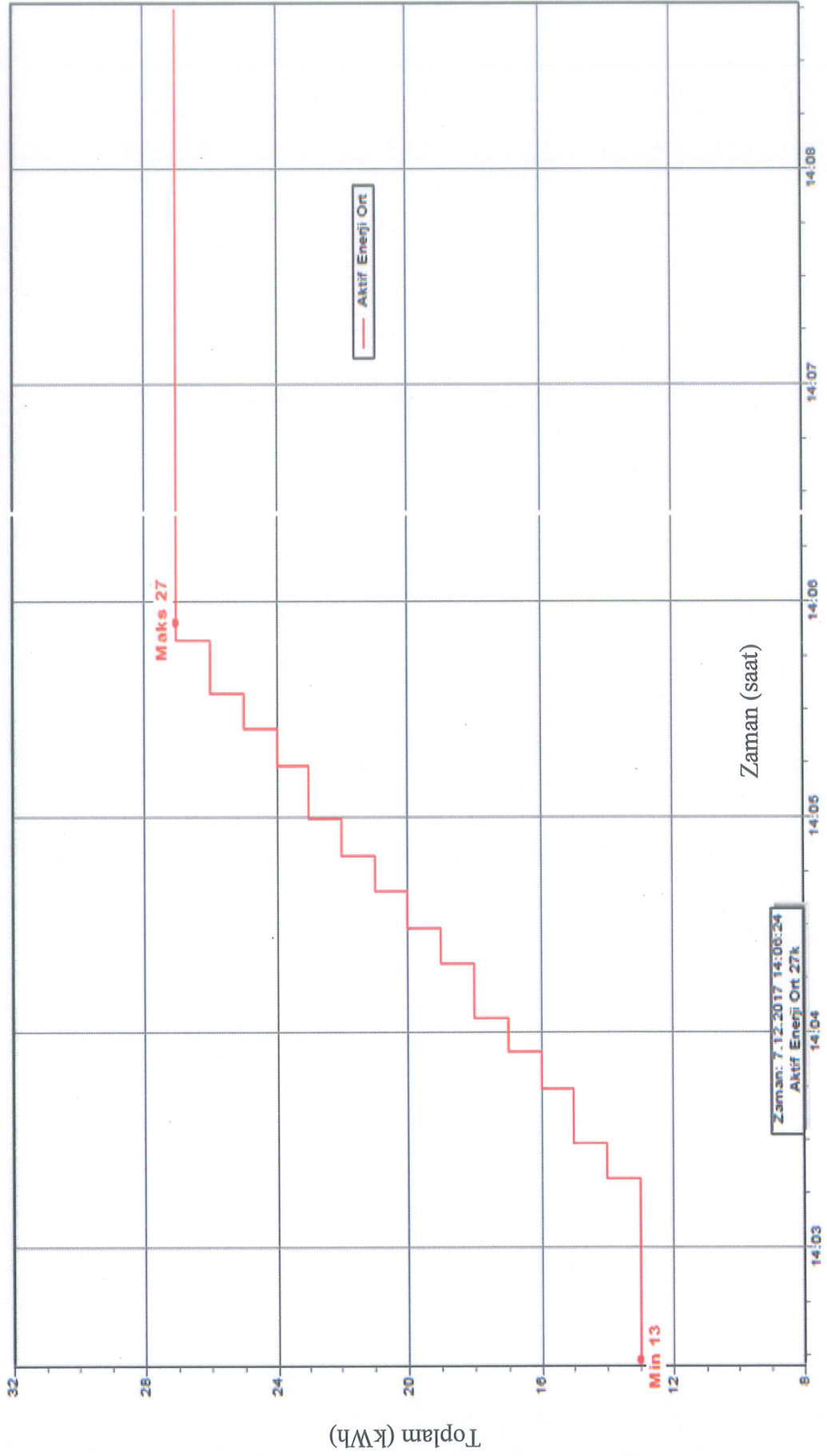
Yüzey	Alan (m ²)	Ortalama yüzey sıcaklığı (°C)
Sol yan yüzey	10,54	44,10
Sağ yan yüzey	10,54	48,10
Ön giriş yüzeyi	5,44	33,8
Arka çıkış yüzeyi	5,44	53,2
Fırın üst yüzeyi	19,84	37,6

Elektrikli cam temperleme fırınında temperlenen cam için alınan ölçümler Tablo 4.3’de verilmektedir. Fırına 8x530x1980 (mm) boyutlarında tek seferde 6 adet cam yüklemesi yapılmaktadır. Camların, fırında temperleme işlemi için bekleme süresi 350 s olarak gerçekleşmektedir.

Tablo 4.3. Elektrikli fırında temperlenen cam için alınan ölçümler

Açıklama	Miktar
Cam eni (mm)	530
Cam boyu (mm)	1980
Cam kalınlığı (mm)	8
Tek seferde yüklenen adet	6
Yüklenen cam kütlesi (kg)	123,41
Fırındaki işlem süresi (s)	350
Ürün çıkış sıcaklığı (°C)	617
Camın yoğunluğu (kg/m ³)	2450

Elektrikli ve doğal gazlı fırınlarda temperlenen cam kütleleri, her iki fırının karşılaştırmasının hassas sonuçlar içermesi bakımından yakın seçilmelidir. Fırılarda ki temperleme işlem sürelerinin farklı olması, aynı kütlelerdeki camların birim zamandaki kütlelerinin farklı olmasına neden olur. Tablolardaki ölçüm sonuçları ve Şekil 4.4’deki enerji analizörü ile ölçülen elektrik tüketim enerjisi verileri hesaplamalarda kullanılarak Tablo 4.4’de elektrikli fırının birim zamandaki enerji akışları elde edilir. Bu tablolardaki değerlerden elektrikli cam temperleme fırınının, nominal kapasitelerine karşılık gelecek cam boyutlarındaki verimi ve birim cam başına enerji maliyeti hesaplanır.



Şekil 4.4. Elektrikli firmanın enerji analizörü ile ölçülen elektrik tüketimi

Şekil 4.4’de görülen elektrik tüketimi değerleri, fırının sadece tavan kısmındaki rezistansların tüketim değerleridir. Fırının tabanında da eşdeğer rezistanslar olduğu için grafikteki okunan tüketim değerlerinin 2 katı, toplam tüketim değerini vermektedir. Ölçümler enerji analizörü ile toplamda 30 dk. boyunca yapılmıştır.

4.2. Elektrikli Cam Temperleme Fırını için Nominal Kapasitede Yapılan Hesaplar

Elektrikli fırının enerji tüketimi, enerji analizörü ile belirlenir. Fırın çıkışında temperlenen camın sıcaklığı tespit edilerek cama birim zamanda aktarılan enerji hesaplanır. Fırına elektrik enerjisi ile birim zamanda giren enerjiden, cama birim zamanda aktarılan bu enerji çıkarılarak toplam kayıp enerji bulunur. Elektrik enerjisi kWh fiyatı, işletmeye gelen Şubat-2018 dönemine ait elektrik faturaları üzerinden hesaplanmıştır. Şubat-2018 fatura dönemlerine göre elektrik kWh fiyatı 0,33 TL alınmıştır. Bu fiyatlar vergiler dahil birim enerji tüketimine ödenen ücrettir. Aşağıda yapılan hesaplarda fırının birim zamandaki enerji akışları, enerji verimi ve enerji maliyeti elde edilir.

4.2.1. Elektrikli cam temperleme fırınında nominal kapasitede enerji akışlarının hesabı

Elektrik ile fırına beslenen gücün ($\Sigma\dot{W}$) hesabı:

Trifaze sistemlerde her bir fazdaki akım ve gerilim değerleri enerji analizörü ile ölçülerek $P=\sqrt{3}.V.I.\cos\phi$ formülü yardımıyla fırının çektiği elektrik güç değeri hesaplanır. Burada V:Gerilim, I:Akım, ϕ :Güç çarpanı olarak ifade edilir.

Elektrikli fırında enerji analizörü ile yapılan ölçüm sonucunda Şekil 4.4’de görüldüğü üzere 1.008.000 kJ/h elektrikselsel güç girişi olduğu görülmüştür.

$$\Sigma\dot{W}=1.008.000 \text{ kJ/h}=280 \text{ kW}$$

Elektrikli fırına hava ve cam ile birim zamanda giren enerjinin hesabı:

Referans sıcaklığımız atmosfer sıcaklığı olduğu için fırına hava ve cam ile giren bir enerji yoktur.

$$\Delta\dot{H}_{h,g}=0 \quad \text{ve} \quad \Delta\dot{H}_{c,g}=0$$

Elektrikli fırın içerisinde cama birim zamanda aktarılan enerji:

Fırın içerisinde cama birim zamanda aktarılan enerjiyi ($\Delta\dot{H}_{c,\zeta}$) hesaplamak için önce camın kütlesini daha sonra camın birim zamandaki kütlesini bulmamız gerekir. Camın kütlesi (m_c) ve birim zamandaki kütlesi (\dot{m}_c) değerini hesaplamak için Tablo 4.3'den yararlanılır.

$m_c = 123,409$ kg iken,

bir saat için fırına beslenen cam, $\dot{m}_c = 1269,35$ kg/h elde edilir.

Fırın içerisinde cama birim zamanda aktarılan enerji ($\Delta\dot{H}_{c,\zeta}$) değerini hesaplamak için Denklem (2.11)' deki bağıntı kullanılır.

$\Delta\dot{H}_{c,\zeta} = 602.890,48$ kJ/h elde edilir.

Elektrikli fırın yüzey ve açıklıklardan birim zamanda kaybolan enerji (\dot{Q}_k):

Elektrikli fırında yüzey ve açıklıklardan birim zamanda kaybolan enerjiyi (\dot{Q}_k) bulmak için Denklem (4.1)' deki ifade kullanılır.

$$\dot{Q}_k = \Sigma \dot{W} - \Delta\dot{H}_{c,\zeta}$$

$\dot{Q}_k = 405.109,52$ kJ/h elde edilir.

Yukarıda hesaplanan birim zamandaki enerji akışlarının tamamı aşağıdaki tabloda yerine yazılır (Tablo 4.4).

Tablo 4.4. Elektrikli temperleme fırınında nominal kapasitede enerji akışları

Enerji Akışı	Miktar (kJ/h)	Miktar (kW)
Elektrikle giren	1.008.000,00	280,00
Cama aktarılan	602.890,48	167,47
Yüzey ve açıklıklardan kaybolan	405.109,52	112,53

4.2.2. Elektrikli cam temperleme fırınında nominal kapasitede verim ve maliyet hesapları

Elektrikli temperleme fırınının verim hesaplaması:

Elektrik fırınının verim ' η ' hesaplaması Tablo 4.4'den yararlanarak Denklem (2.22) yardımıyla hesaplanır.

$\eta = \% 59,81$ elde edilir.

Elektrikli temperleme fırınının enerji maliyetinin hesaplanması:

Elektrikli fırının elektrik enerjisi maliyet hesabı için işletmenin elektrik enerjisi birim fiyatı için ödediği tutar ile fırının saatte çektiği elektrik enerjisi değeri çarpılır.

Elektrikli fırının, elektrik enerjisi maliyeti (M_E) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$M_E = \Sigma W \times \text{Elektrik birim fiyatı}$

$M_E = 92,40 \text{ TL/h}$ elde edilir.

Elektrikli temperleme fırınının birim cam başına enerji maliyetinin hesaplanması:

Fırının yukarıda bulunan toplam elektrik enerjisi maliyet (M_E) değeri, temperlenen birim zamandaki camın kütlesine (\dot{m}_c) bölünerek birim cam başına enerji maliyeti değeri (M_{BC}) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$M_{BC} = 7,279 \text{ krş/kg}$ elde edilir.

4.3. Elektrikli Cam Temperleme Fırınında Farklı Cam Kalınlıklarında, Maksimum Kapasitelerde Yapılan Ölçümler ve Hesaplar

Elektrikli cam temperleme fırınında fırına yüklenebilen maksimum malzeme boyutlarına göre birim zamandaki enerji akışlarının, fırın veriminin ve enerji maliyetinin ne şekilde değişeceğini tespit etmek için fırına farklı kalınlıklarda, aynı boyutlarda cam yüklemesi yapılır. Sadece 4 mm kalınlığında camlarda, temperleme işleminden önce malzeme kalınlıklarının az olmasından dolayı hızlı bir soğuma gerçekleştiğinden fırın içerisine daha kısa boylarda parçalar yüklenebilmektedir. Elektrikli fırında hassas bir ısı rejiminin sağlanabilmesi; ondülasyon, kamburluk ve kırıldığında parça sayısı gibi kalite kontrol parametrelerini doğrudan etkilemeyecek cam boyutlarında çalışmak çok önemlidir.

Cam kalınlıklarına göre yüklenebilen maksimum cam boyutlarındaki birim zaman fırın yükleri, fırının o cam kalınlığındaki maksimum kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Fırının maksimum kapasitesindeki analizlerine göre elde edilen verimi de fırının maksimum verimi olarak belirtilmektedir.

4.3.1. Elektrikli cam temperleme fırınında farklı cam kalınlıklarında, maksimum kapasitelerde enerji akışları ve verim değerleri

Elektrikli cam temperleme fırınında 4mm kalınlıktaki ince camlar, fırın çıkışında temperleme operasyonuna girmeden önce hızlı bir şekilde soğuduğu için uzun boylarda temperlenemez; hızlı soğuma probleminden dolayı 4 mm kalınlığındaki cam, maksimum 2400 mm boyunda temperlenebilmektedir. 6 mm, 8 mm ve 10 mm cam kalınlıklarında ise 4100 mm boyunda camlar sorunsuz temperlenir (Tablo 4.5).

Tablo 4.5. Elektrikli temperleme fırınında maksimum kapasitelerde, farklı kalınlıklardaki camlar için alınan ölçümler ($T_r = 23,3 \text{ }^\circ\text{C}$)

Cam Tipi	Kalınlık (mm)	En (mm)	Boy (mm)	İşlem Süresi (s)	T_c ($^\circ\text{C}$)
Düz Cam	4	2000	2400	200	617
Düz Cam	5	2300	4100	240	617
Düz Cam	6	2300	4100	290	617
Düz Cam	8	2300	4100	390	617
Düz Cam	10	2300	4100	520	617

Elektrikli fırında temperleme sırasında Tablo 4.5’de alınan ölçüm sonuçlarına göre temperlenen camların Tablo 4.6’daki kütle akışları çıkarılır.

Tablo 4.6. Elektrikli temperleme fırınında maksimum kapasitelerde, farklı kalınlıklardaki camları temperlemek için kütle akışları

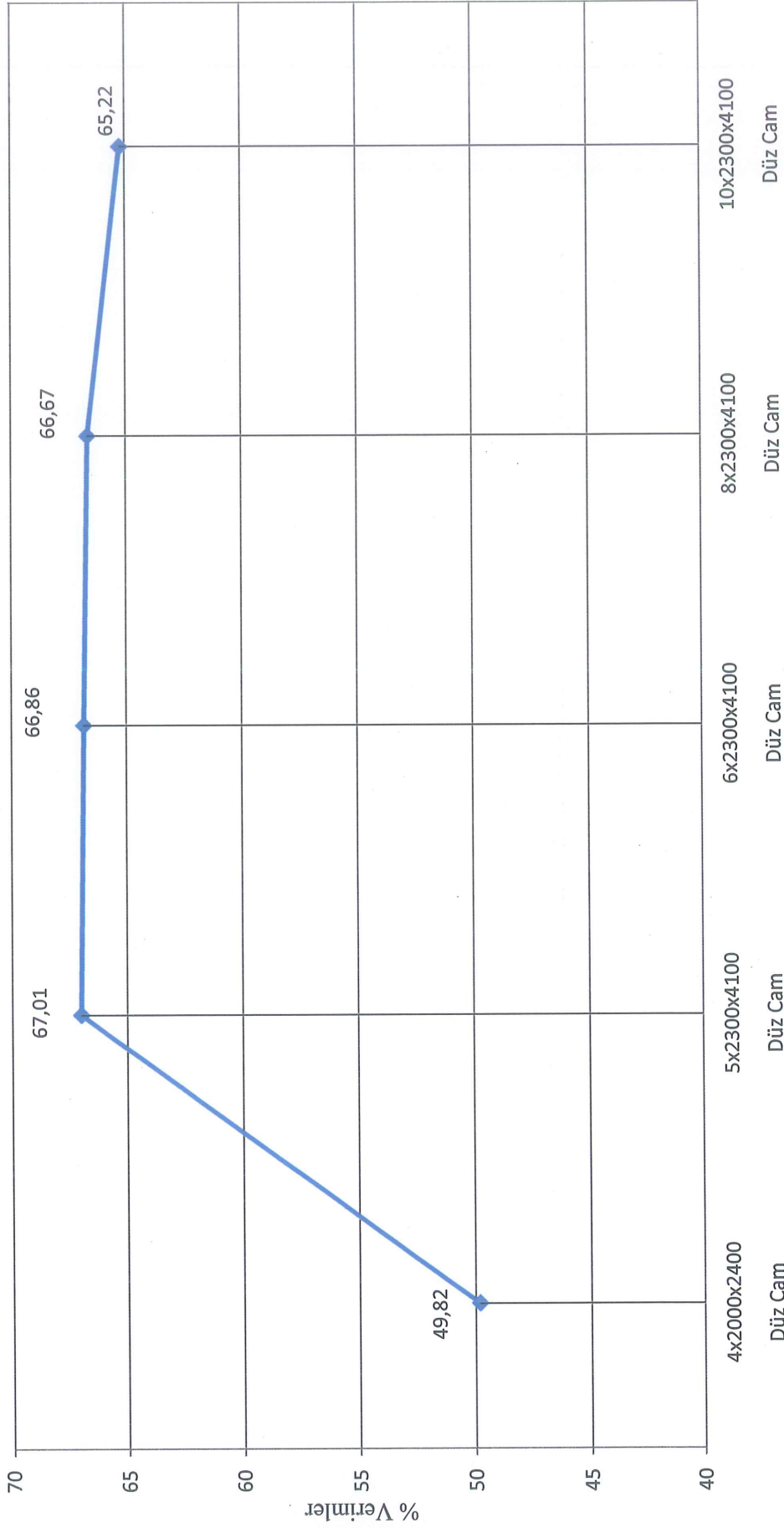
Cam Tipi	Cam Boyutları (mm)	m_c (kg)	\dot{m}_c (kg/h)
Düz Cam	4x2000x2400	47,040	846,7
Düz Cam	5x2300x4100	115,518	1732,8
Düz Cam	6x2300x4100	138,621	1720,8
Düz Cam	8x2300x4100	184,828	1706,1
Düz Cam	10x2300x4100	231,035	1599,5

Elektrikli temper fırının maksimum kapasitelerdeki kütle akışları, Tablo 4.6’da görüldüğü üzere en fazla cam yüklemesinin 1732,8 kg/h ile 5x2300x4100 (mm) boyutlarındaki camla olduğu; en düşük cam yüklemesinin ise 846,7 kg/h ile 4x2000x2400 (mm) boyutlarındaki camla olduğu görülmektedir. Tablolardan yararlanarak farklı kalınlıklardaki camlar için daha önceki bölümlerde yapılan hesaplamalar, bu kapasiteler için de yapılarak birim zamandaki enerji akışları ve verim değerleri elde edilir (Tablo 4.7).

Tablo 4.7. Elektrikli temperleme fırınında maksimum kapasitelerde, farklı kalınlıklardaki camları temperlemek için giren, çıkan enerji akışları ve verimler

Cam Tipi	Cam Boyutları (mm)	ΣW (kJ/h)	$\dot{Q}_{c,\phi}$ (kJ/h)	\dot{Q}_k (kJ/h)	Verim (%)
Düz Cam	4x2000x2400	807.267,62	402.158,1	405.109,52	49,82
Düz Cam	5x2300x4100	1.228.102,42	822.992,9	405.109,52	67,01
Düz Cam	6x2300x4100	1.222.426,62	817.317,1	405.109,52	66,86
Düz Cam	8x2300x4100	1.215.440,92	810.331,4	405.109,52	66,67
Düz Cam	10x2300x4100	1.164.795,22	759.685,7	405.109,52	65,22

Elektrikli cam temperleme fırınının farklı cam kalınlıkları için maksimum kapasitelerdeki verimleri Tablo 4.7 incelendiğinde cam kalınlığı 4 mm'den 5 mm'ye kadar çıktığında fırın verimi artmakta; 5 mm'den 10 mm'ye kadar çıktığında ise fırın verimi azalmaktadır. En yüksek fırın verimi 5x2300x4100 (mm) boyutlarındaki düz cam için % 67,01 elde edilmektedir.



Cam boyutu: Kalınlık, en, boy (mm)

Şekil 4.5. Elektrikli cam temperleme fırınının farklı cam kalınlıkları için maksimum kapasitelerdeki verimleri

4.3.2. Elektrikli cam temperleme fırınında farklı cam kalınlıklarında, maksimum kapasitelerde enerji maliyetleri

Elektrikli temperleme fırınının birim cam başına enerji maliyetinin hesaplanması:

Elektrikli fırının enerji maliyetini hesaplamak için toplam enerji maliyetlerini (ΣM), temperlenen birim zamandaki cam kütlelerine (\dot{m}_c) bölerek Tablo 4.8'deki enerji maliyeti değerleri (M_{BC}) elde edilir.

Tablo 4.8. Elektrikli temperleme fırınında farklı cam kalınlıklarında, maksimum kapasitelerde enerji maliyeti

Cam Tipi	Cam Boyutları (mm)	\dot{m}_c (kg/h)	$\Sigma \dot{W}$ (kJ/h)	$\Sigma \dot{W}$ (kW)	Elk.Fiy. (TL/kWh)	ΣM (TL/h)	M_{BC} (krş/kg)
Düz Cam	4x2000x2400	846,7	807.267,62	224,24	0,33	74,00	8,74
Düz Cam	5x2300x4100	1732,8	1.228.102,42	341,14	0,33	112,58	6,50
Düz Cam	6x2300x4100	1720,8	1.222.426,62	339,56	0,33	112,06	6,51
Düz Cam	8x2300x4100	1706,1	1.215.440,92	337,62	0,33	111,42	6,53
Düz Cam	10x2300x4100	1599,5	1.164.795,22	323,55	0,33	106,77	6,68

Elektrikli fırının maksimum kapasitelerdeki enerji maliyetleri Tablo 4.8'de verilmektedir. Tablo incelendiğinde, artan cam yüklemelerinde fırın veriminin de arttığı görülmekte; 1732,8 kg/h'in altındaki cam yüklemelerinde elektrikli fırının enerji maliyeti yükselmektedir. Boyutları 4x2000x2400 (mm) ve 846,7 kg/h cam yüklemesinde maksimum kapasitelerdeki en yüksek maliyete 8,74 krş/kg; 5x2300x4100 (mm) boyutlarında, 1732,8 kg/h cam yüklemesinde maksimum kapasitelerdeki en düşük maliyete 6,50 krş/kg'a ulaşmaktadır.

4.4. Elektrikli Cam Temperleme Fırınına Nominal Kapasitede İyileştirme Yöntemi Uygulanması Durumunda Yapılan Hesaplar

Elektrikli temperleme fırınında fırın yüzey ve açıklıklarından atmosfere atılan ısının, doğal gazlı fırına nazaran az olduğu ve elektrikli fırın yalıtımının daha iyi olduğu ölçümlerden anlaşılmaktadır. Bu sebepten elektrikli fırının yüzey ve açıklıklardan atılan ısının, en azından dörtte birinin iyileştirmeler yapılarak geri kazanılabileceği öngörülmektedir. Bu iyileştirmenin yapılmış olduğu kabul edilerek elektrikli fırının enerji akışları, verimi ve enerji maliyeti Tablo 4.4'den yararlanılarak elde edilir.

4.4.1. Elektrikli cam temperleme fırınında fırın yalıtımının iyileştirilmesi önerisi için enerji akışlarının hesabı

Elektrikli fırının yalıtımının iyileştirildiği durum sonrası elektrik enerjisi ile fırına beslenen enerjinin hesabı:

Elektrikli fırının yüzey ve açıklıklarından olan ısı kayıplarının iyileştirmesi % 25 olarak kabul edilir. Elektrikli fırının yüzey ve açıklıklardan atmosfere birim zamanda atılan bu enerjinin geri kazanılması durumunda elektrikli fırının birim zamandaki enerji tüketimi ($\Sigma\dot{W}_1$) ve birim zamandaki kayıp enerji ($\dot{Q}_{1,k}$) değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

Elektrikli fırının iyileştirme önerisi sonrası birim zamandaki kayıp enerjisi ($\dot{Q}_{1,k}$) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{Q}_{1,k} = \dot{Q}_k - \frac{\dot{Q}_k}{4}$$

$$\dot{Q}_{1,k} = 84,40 \text{ kW elde edilir.}$$

Elektrikli fırına iyileştirme önerisi sonrası beslenen elektriksel güç ($\Sigma\dot{W}_1$) aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\Sigma\dot{W}_1 = \Sigma\dot{W} - \frac{\dot{Q}_k}{4}$$

$$\Sigma\dot{W}_1 = 251,87 \text{ kW elde edilir.}$$

Bu iyileştirme önerisi, cama aktarılan enerji miktarını etkilemez. Bulunan birim zamandaki enerji akışları Tablo 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.9. Elektrikli temperleme fırınında nominal kapasitede, iyileştirme önerisi sonrası enerji akışları

Enerji Akışları	Miktar (kJ/h)	Miktar (kW)
İyileştirme önerisi sonrası elektrik enerjisi olarak sisteme giren	906.722,62	251,87
Cama aktarılan	602.890,48	167,47
% 25 İyileştirme önerisi sonrası yüzey ve açıklıklardan kaybolan	303.832,14	84,40

4.4.2. Elektrikli cam temperleme fırınında fırın yalıtımının iyileştirilmesi önerisi için verim ve enerji maliyetinin hesaplanması

Elektrikli temperleme fırınının yalıtım iyileştirmesi sonrası verim hesaplaması:

Elektrik fırınının verimi Denklem (2.22) yardımıyla elde edilir.

$$\eta_1 = \% 66,53$$

Elektrikli fırının mevcut durum enerji verimi % 59,81 iken fırına öngörülen yalıtım iyileştirmesinin yapılması sonrası durum için enerji verimi artarak % 66,53 elde edilir.

Elektrikli temperleme fırınının yalıtım iyileştirmesi sonrası enerji maliyetinin hesaplanması:

Elektrikli fırının saatte çektiği elektrik enerjisi ile işletmenin elektrik enerjisi birim fiyatı için ödediği tutar çarpılır ve elektrikli fırının iyileştirme önerisi sonrası enerji maliyeti (M_{E1}) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$M_{E1} = \Sigma \dot{W}_1 \times \text{Elektrik birim fiyatı}$$

$$M_{E1} = 83,12 \text{ TL/h elde edilir}$$

Elektrikli temperleme fırınının yalıtım iyileştirme önerisi sonrası birim cam başına enerji maliyetinin hesaplanması:

Fırının yukarıda bulunan toplam elektrik enerjisi maliyeti (M_{E1}), temperlenen birim zamandaki camın kütlesine (\dot{m}_c) bölünür ve birim cam başına enerji maliyeti (M_{BC1}) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$M_{BC1} = 6,548 \text{ krş/kg elde edilir.}$$

5. DOĞAL GAZLI VE ELEKTRİKLİ CAM TEMPERLEME FIRINLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Doğal gazlı ve elektrikli cam temperleme fırınlarının nominal ve maksimum kapasitelerde enerji akışları, enerji maliyetleri, verimlilik değerleri, sankey diyagramları; önerilen iyileştirme durumları için verimlilik değerleri, enerji maliyetleri ve nominal kapasitedeki termal kamera görüntüleri bu bölümde karşılaştırılır.

5.1. Doğal Gazlı ve Elektrikli Fırınların Nominal Kapasitede Enerji Akışları, Verimleri ve Mevcut Durum ile İyileştirme Önerileri Sonrası Durum İçin Verimlerinin ve Enerji Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Doğal gazlı fırına nominal kapasitede birim zamanda Tablo 5.1’de görülüşü üzere yakıtla 1121,99 kW, elektrik ile 135,13 kW değerinde enerji girişı olmuştur. Giren bu değerin 178,68 kW’lık kısmı cama aktarılabilmişken 647,27 kW’lık kısmı baca gazıyla, 387,36 kW’lık kısmı ise yüzey ısı kayıpları olarak fırından atmosfere atılmıştır. Doğal gazlı fırının enerji maliyeti 11,375 krş/kg elde edilmiştir.

Tablo 5.1. Doğal gazlı fırının nominal kapasitede enerji akışları, verim ve enerji maliyeti

Enerji Akışı/Verimi/Maliyeti	Miktar (kJ/h)	Miktar (kW)
Yakıtla beslenen	4.039.176,85	1121,99
Elektrik enerjisi olarak sisteme giren	486.462,60	135,13
Cama aktarılan	643.258,91	178,68
Soğutma suyu ile taşınan	157.703,36	43,81
Baca gazı kayıpları	2.330.174,69	647,27
Yüzeylerden olan kayıplar	1.394.502,49	387,36
Verim %	14,21	
Doğal gaz tüketim maliyeti (TL/h)	110,51	
Elektrik tüketim maliyeti (TL/h)	44,59	
Birim zamandaki camın kütlesi (kg/h)	1363,53	
Temperleme enerji maliyeti (krş/kg)	11,375	

Elektrikli fırında nominal kapasitede Tablo 5.2’de görüldüğü üzere 1269,36 kg/h cam temperlenirken enerji analizörü ile yapılan ölçümlerde 280 kW değerinde elektriksel güç harcadığı tespit edilmiştir; bu gücün ancak 167,47 kW değeri cama aktarılabilmektedir. Elektrikli fırının enerji maliyeti 7,279 krş/kg elde edilmiştir.

Tablo 5.2. Elektrikli fırının nominal kapasitede enerji akışları, verim ve enerji maliyeti

Enerji Akışı/Verimi/Maliyeti	Miktar (kJ/h)	Miktar (kW)
Elektrik enerjisi olarak sisteme giren	1.008.000,00	280,00
Cama aktarılan	602.890,48	167,47
Yüzeylerden kaybolan	405.109,52	112,53
Verim %	59,81	
Elektrik tüketim maliyeti (TL/h)	92,40	
Birim zamandaki camın kütlesi (kg/h)	1269,36	
Temperleme enerji maliyeti (krş/kg)	7,279	

Mevcut durumda elektrikli fırının enerji maliyeti, doğal gazlı fırına kıyasla % 36 oranında daha düşük çıkmaktadır. Doğal gazlı ve elektrikli fırınların mevcut durum birim zamandaki enerji akışları Tablo 3.9’da, Tablo 4.4’de; iyileştirme önerileri sonrası enerji akışı verileri ise Tablo 3.16 ve Tablo 4.9’da önceden hesaplanmıştı. Tablolardaki verilerden faydalanarak önceden hesaplanan enerji maliyetleri Tablo 5.3’de verilmektedir.

Tablo 5.3. Doğal gazlı ve elektrikli fırının nominal kapasitede mevcut durum ve iyileştirme önerileri sonrası durumlar için verimleri ve enerji maliyetleri

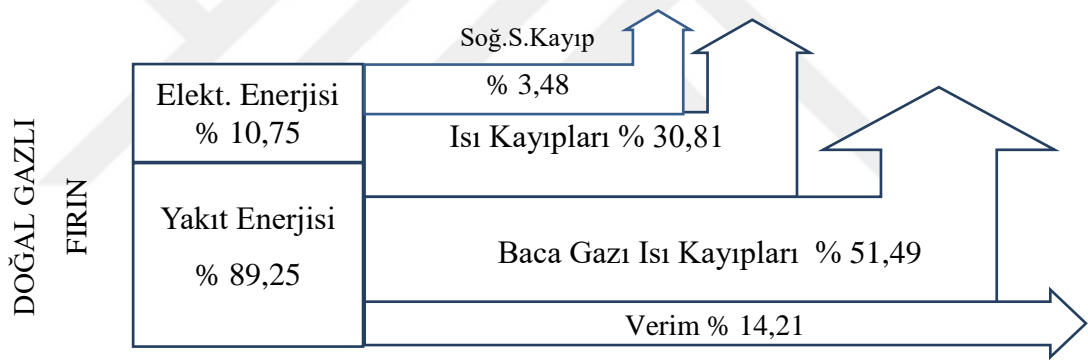
İyileştirme Önerisi Açıklaması	Verim%	Maliyet(krş/kg)
Doğal gazlı fırının mevcut durumu	14,21	11,375
Doğal gazlı fırın. kendin. reküper. yakıcı kullanılması önerisi sonrası	19,14	9,036
Doğal gazlı fırın. kendin. reküper. yakıcı kull. ve yalıt. iyileş.öner. son.	24,15	7,638
Elektrikli fırının mevcut durumu	59,81	7,279
Elektrikli fırın. yalıt. iyileş. öner. son.	66,53	6,548

Tablo 5.3’de görüldüğü üzere doğal gazlı fırının verimleri 1.durum için % 19,14; enerji maliyeti 9,036 krş/kg, 2.durum için ise verim % 24,15; enerji maliyeti 7,638 krş/kg elde edilmiştir. Elektrikli fırının 1. iyileştirme önerisi sonrası verimi % 66,53; enerji maliyeti ise 6,548 krş/kg elde edilmiştir. İyileştirme önerileri için yapılan

hesaplar neticesinde her iki fırının da enerji verimleri artmakta enerji maliyetleri de düşmektedir. Mevcut duruma göre kıyaslama yapıldığında, doğal gazlı fırının enerji maliyeti % 33 oranında, elektrikli fırınki ise % 10 oranında düşüş göstermektedir.

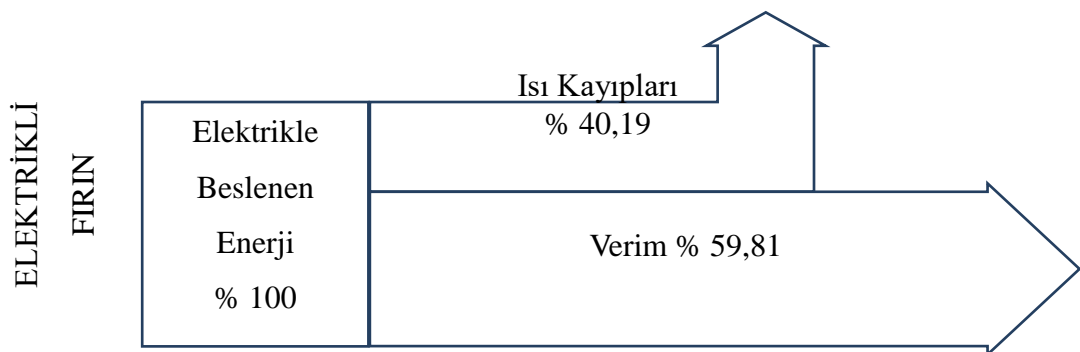
5.2. Doğal Gazlı ve Elektrikli Fırınların Enerji Akışlarının Nominal ve Maksimum Kapasitelerde Sankey Diyagramı Üzerinden Karşılaştırılması

Doğal gazlı ve elektrikli cam temperleme fırınlarının analizlerini yaptığımız nominal cam boyutlarındaki fırın verimleri, sankey diyagramları üzerinden karşılaştırıldığında doğal gazlı fırına giren toplam enerjinin % 10,75’lik kısmı elektrik enerjisinden karşılanmaktadır. Şekil 5.1’de sankey diyagramında görüleceği üzere giren enerjinin % 30,81’i ısı kayıpları, % 3,48’i soğutma suyu kayıpları, % 51,49’u baca gazı kayıpları olarak atmosfere atılmakta iken fırının verimi % 14,21 olarak gerçekleşmektedir.



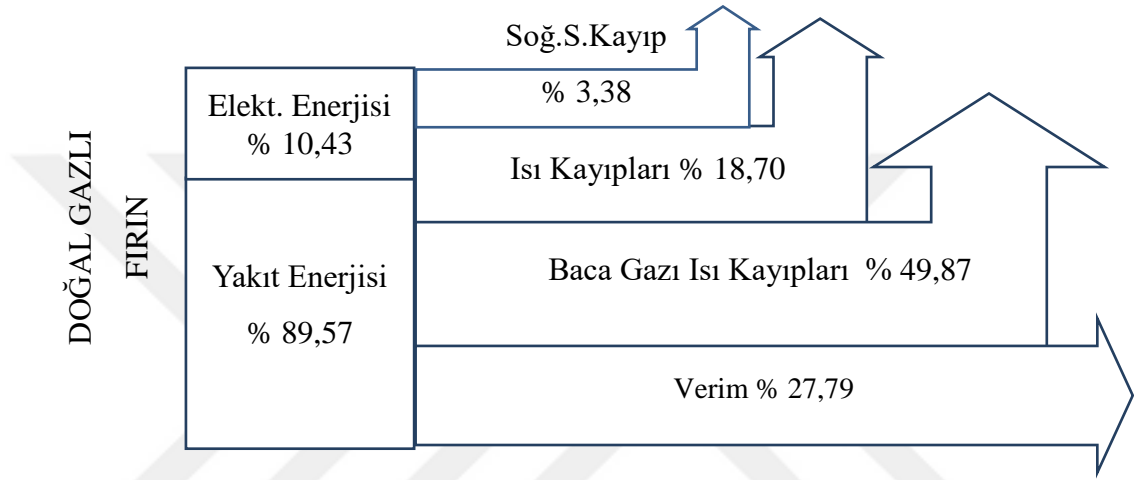
Şekil 5.1. Doğal gazlı fırının nominal kapasitedeki sankey diyagramı

Elektrikli fırında giren enerjinin tamamı elektrik enerjisinden karşılanmaktadır. Şekil 5.2’de sankey diyagramında görüleceği üzere giren enerjinin % 40,19’u ısı kayıpları olarak atmosfere atılmışken fırın verimi % 59,81 olarak gerçekleşmiştir.



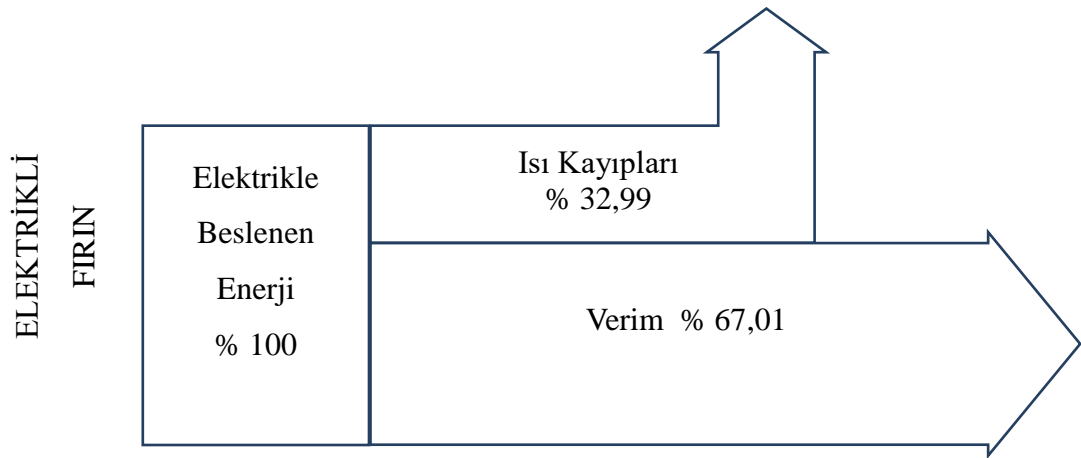
Şekil 5.2. Elektrikli fırının nominal kapasitedeki sankey diyagramı

Doğal gazlı ve elektrikli fırınların analizlerini yaptığımız maksimum cam boyutlarında, fırınların cam temperleme prosesindeki sankey diyagramları karşılaştırıldığında doğal gazlı fırına giren toplam enerjinin % 10,43'lük kısmı elektrik enerjisinden karşılanmaktadır. Şekil 5.3'de sankey diyagramında görüleceği üzere giren enerjinin % 18,70'i ısı kayıpları, % 3,38'i soğutma suyu kayıpları, % 49,87'si baca gazı kayıpları olarak atmosfere atılmakta iken fırının verimi % 27,94 olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 5.3. Doğal gazlı fırının maksimum kapasitedeki sankey diyagramı

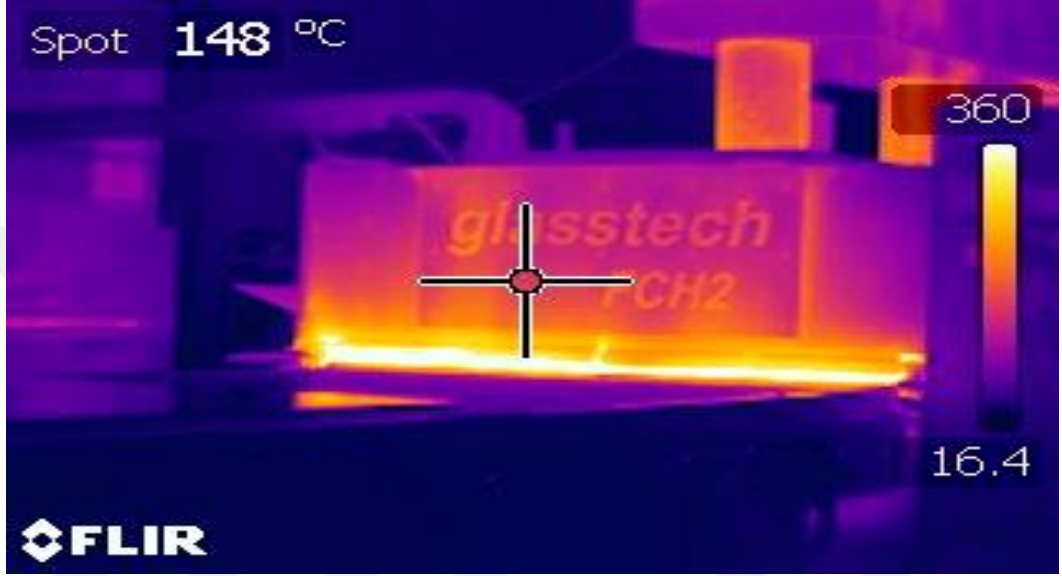
Elektrikli fırında giren enerjinin tamamı elektrik enerjisinden karşılanmaktadır. Şekil 5.4'de sankey diyagramında görüleceği üzere giren enerjinin % 32,99'u ısı kayıpları olarak atmosfere atılmakta iken fırın verimi % 67,01 olarak gerçekleşmektedir.



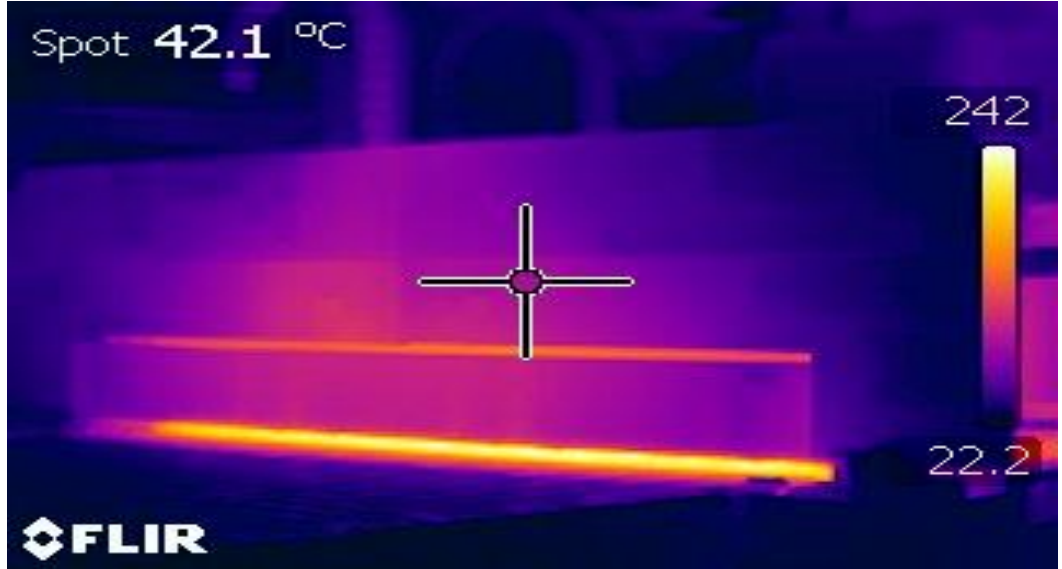
Şekil 5.4. Elektrikli fırının maksimum kapasitedeki sankey diyagramı

5.3. Doğal Gazlı ve Elektrikli Fırınlrın Nominal Kapasitede Termal Kamera Görüntülerinin Karşılaştırılması

Doğal gazlı ve elektrikli fırınların aşağıdaki tüm termal kamera görüntülerini incelediğimizde doğal gazlı fırının yüzey ve açıklıklarından olan ısı kayıplarının elektrikli fırına kıyasla daha fazla olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.5. Doğal gazlı fırın ön giriş bölgesi termal kamera görüntüsü



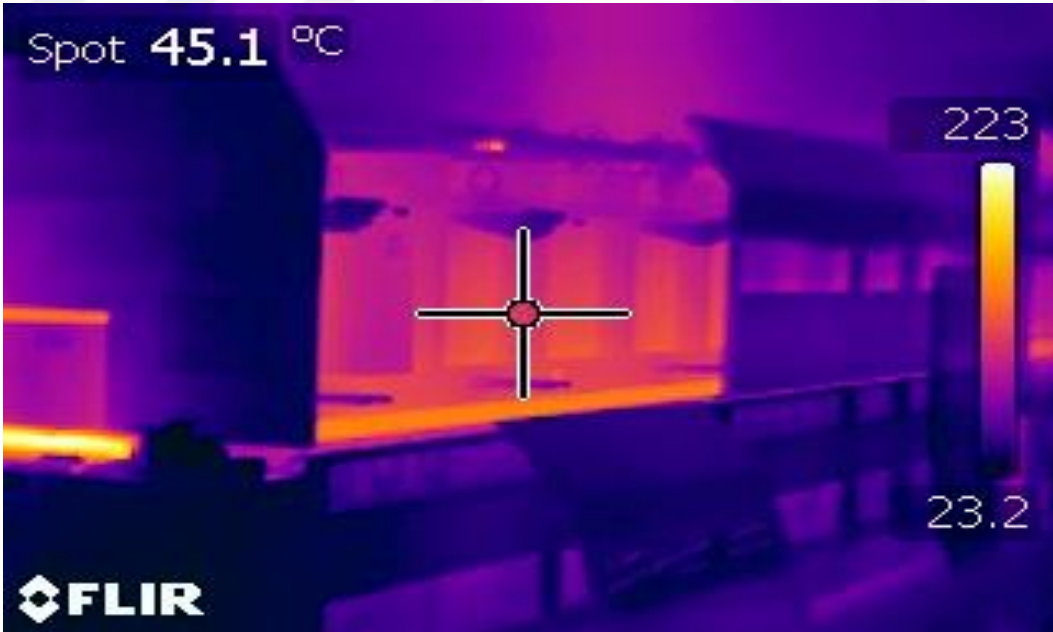
Şekil 5.6. Elektrikli fırın ön giriş bölgesi termal kamera görüntüsü

Şekil 5.5'deki doğal gazlı fırının termal kamera görüntüsünde baca gazı ve fırın açıklıklarından olan ısı kayıplarının çok yüksek olduğu Şekil 5.6'daki elektrikli

fırının termal kamera görüntüsünde ise ısı kayıplarının doğal gazlı fırına nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. Sıcaklık skalaları arasında maksimum, yaklaşık 120 °C sıcaklık farkı vardır.



Şekil 5.7. Doğal gazlı fırının yan duvar bölgesi termal kamera görüntüsü



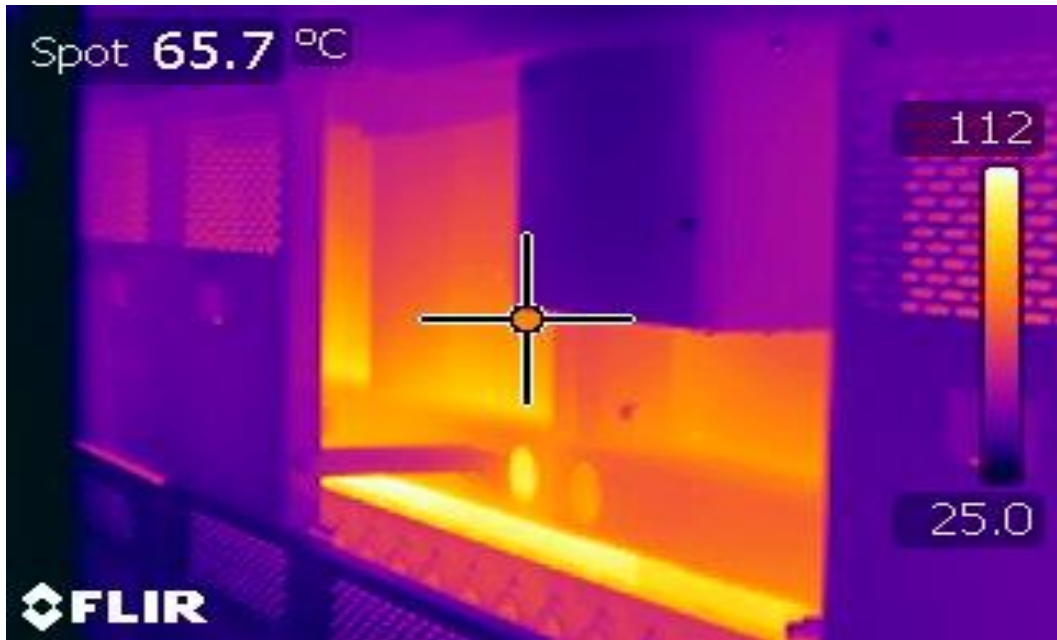
Şekil 5.8. Elektrikli fırının yan duvar bölgesi termal kamera görüntüsü

Şekil 5.7'deki doğal gazlı fırının termal kamera görüntüsünde yan duvar yüzeyi ve fırın açıklıklarından olan ısı kayıplarının çok yüksek olduğu Şekil 5.8'deki elektrikli

fırının termal kamera görüntüsünde ise yan duvar yüzeyinden olan ısı kayıplarının doğal gazlı fırına nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. Sıcaklık skalaları arasında maksimum, yaklaşık 120 °C sıcaklık farkı vardır.



Şekil 5.9. Doğal gazlı fırının homojenizasyon fanları yan duvar bölgesi termal kamera görüntüsü



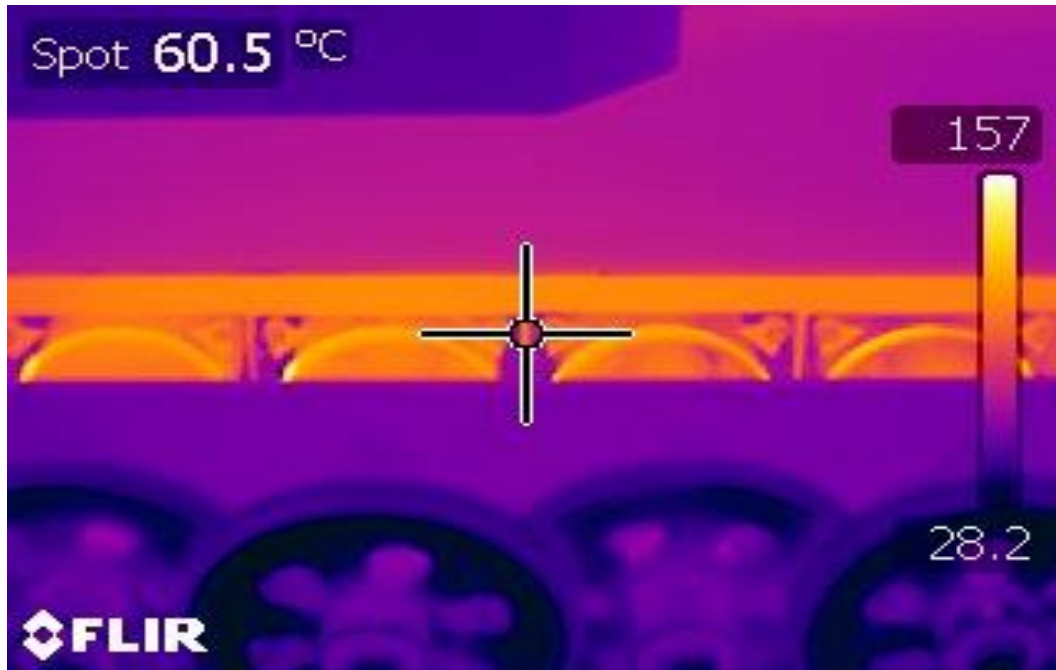
Şekil 5.10. Elektrikli fırının yan duvar bölgesi termal kamera görüntüsü

Şekil 5.9'daki doğal gazlı fırının termal kamera görüntüsünde yan duvar yüzeyi ve fırın açıklıklarından olan ısı kayıplarının çok yüksek olduğu Şekil 5.10'daki elektrikli

fırının termal kamera görüntüsünde ise yan duvar yüzeyinden olan ısı kayıplarının doğal gazlı fırına nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. Sıcaklık skalaları arasında maksimum, yaklaşık 250 °C sıcaklık farkı vardır.



Şekil 5.11. Doğal gazlı fırının konveyör dış bölgesi termal kamera görüntüsü



Şekil 5.12: Elektrikli fırının konveyör dış bölgesi termal kamera görüntüsü

Şekil 5.11'deki doğal gazlı fırının termal kamera görüntüsünde konveyör bölgesi ve fırın açıklıklarından olan ısı kayıplarının çok yüksek olduğu Şekil 5.12'deki elektrikli

fırının termal kamera görüntüsünde ise konveyör bölgesinden olan ısı kayıplarının doğal gazlı fırına nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. Sıcaklık skalaları arasında maksimum, yaklaşık 200 °C sıcaklık farkı vardır.

5.4. Doğal Gazlı ve Elektrikli Fırınların Maksimum Kapasitelerdeki Temperleme Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Doğal gazlı ve elektrikli fırınların analizlerini yaptığımız maksimum cam boyutlarında, temperleme prosesinde birim cam başına enerji maliyetleri doğal gazlı fırında 1058,40 kg/h cam yüklemesinde en yüksek maliyet 12,854 krş/kg, 2761,04 kg/h cam yüklemesinde en düşük maliyet 5,756 krş/kg; elektrikli fırında ise 846,70 kg/h cam yüklemesinde en yüksek maliyet 8,740 krş, 1732,80 kg/h cam yüklemesinde en düşük maliyet 6,500 krş elde edilmektedir. Doğal gazlı ve elektrikli fırınların maksimum kapasitelerde birim cam başına enerji maliyetleri Şekil 5.13’de gösterilmiştir. Şekil 5.13’deki sonuçlardan anlaşılacağı üzere düşük kapasitelerde doğal gazlı fırının enerji maliyeti, elektrikli fırının enerji maliyetine göre çok daha yüksek çıkmaktadır. Elektrikli fırının fiziki boyutları, 1732,80 kg/h den daha fazla olan cam yüklemelerinde yeterli gelmemektedir. Doğal gazlı fırının fiziki boyutlarının elektrikli fırına nazaran daha büyük olması, aynı kalınlıklardaki ve aynı boyutlardaki camları elektrikli fırından daha kısa sürede temperleyebilmesi doğal gazlı fırının birim zamandaki temperlediği cam miktarını da arttırmaktadır. Doğal gazlı fırının hızlı cam temperleme özelliği ve fiziki boyutlarının büyüklüğü ancak 2220 kg/h üzeri cam yükleme kapasitelerinde etkisini göstermekte ve elektrikli fırının enerji maliyetinden daha düşük enerji maliyeti değerlerine ulaşmaktadır.



Birim zamandaki cam kütlesi

Şekil 5.13. Doğal gazlı ve elektrikli fırının maksimum kapasitelerde 1 kg cam başına enerji maliyetleri

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Doğal gazlı ve elektrikli fırınların yaptığımız enerji analizi ve birim cam başına enerji maliyeti hesaplamaları neticesinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Doğal gazlı fırına nominal yükte Tablo 3.9'da görüldüğü üzere toplamda 1257,12 kW birim zamanda enerji beslemesi yapılmaktadır. Bunun 1121,99 kW'lık kısmı doğal gazla, 135,13 kW'lık diğer kısmı ise elektrikle karşılanmaktadır. Şekil 5.1'de görüleceği üzere doğal gazlı fırının toplam enerjisinin % 89,25'i doğal gaz, % 10,75'i elektrik enerjisinden oluşmaktadır.

Doğal gazlı fırının birim zamandaki enerji akışları Tablo 5.1'de görüldüğü üzere fırının baca gazı kayıpları 647,24 kW, fırın yüzeylerinden olan ısı kayıpları 387,36 kW değerindedir.

Nominal yükteki termal kamera görüntüleri Şekil 5.5, Şekil 5.7, Şekil 5.9, Şekil 5.11 ve sankey diyagramı Şekil 5.1'de görüleceği üzere doğal gazlı fırının birim zamandaki baca gazı enerjisi kayıpları ile fırın yüzeylerinden olan birim zamandaki ısı kayıpları doğal gazlı fırının verimini düşüren sebeplerin başında gelmektedir. Sadece bu iki enerji kaybı fırına giren toplam enerjinin % 82,30'u gibi yüksek bir değere karşılık gelmektedir. Bu değer % 30,81'i yüzey kayıplarından, % 51,49'u baca kayıplarından oluşmaktadır.

Elektrikli fırının nominal yükte, yüzeylerinden olan birim zamandaki enerji kayıpları Şekil 5.2'de 112,53 kW ile fırına giren toplam değer % 40,19'una karşılık gelmektedir. Burada elektrikli fırına birim zamanda giren toplam enerjinin Tablo 5.2'de 280 kW, doğal gazlı fırına giren birim zamandaki toplam enerjinin ise Tablo 5.1'de 1257,12 kW olduğuna dikkat edilmelidir. Doğal gazlı fırının yüzeylerinden olan ısı kayıpları, elektrikli fırının yüzeylerinden olan ısı kayıplarının 3,44 katı kadar daha fazladır

Doğal gazlı fırına nominal yükte birim zamanda giren enerjinin 178,68 kW ile % 14,21'i temperlenen cama aktarılabilmıştır (Tablo 5.1, Şekil 5.1). Elektrikli fırına

nominal yükte, giren toplam gücün 167,47 kW ile % 59,81'i temperlenen cama aktarılabilmektedir (Tablo 5.2, Şekil 5.2). Doğal gazlı fırında bacadan atılan enerji, cama aktarılan enerjinin 3,62 katına; yüzeylerden kaybolan enerji ise 2,17 katına karşılık gelmektedir (Tablo 5.1).

Nominal yüklerde, doğal gazlı fırının birim temperlenmiş cam başına enerji maliyeti 11,375 krş/kg, elektrikli fırının ise 7,279 krş/kg hesaplanmıştır. Mevcut durumda elektrikli fırının enerji maliyeti, doğal gazlı fırına kıyasla % 36 oranında daha düşük çıkmaktadır (Tablo 5.1, Tablo 5.2).

Doğal gazlı fırın üzerinde iyileştirmeler yapılırsa örneğin: Kendinden reküperatörlü yakıcı ile yakma havası ısıtılarak bacadan atılan enerjinin % 50'si tekrar kazanılsa, ilaveten yalıtımla yüzey kayıpları % 50 azaltılsa nominal yükte fırın verimleri 1.durum için % 19,14; 2.durum için ise % 24,15 olmaktadır. Doğal gazlı fırının reküperatör ilavesi sonrası birim temperlenmiş cam başına enerji maliyeti 9,036 krş/kg, reküperatör ve yalıtım iyileştirmesi sonrası 7,638 krş/kg hesaplanmıştır (Tablo 5.3).

Elektrikli fırının üzerinde de iyileştirmelerin yapılabileceği değerlendirilmiştir. Örneğin: İlave yalıtım önlemleriyle ısı kayıplarının % 25 azaltıldığı durum için nominal yükte fırın verimi % 59,81'den % 66,53'e yükselmiştir. Önerilen iyileştirmeler sonrası durum için elektrikli fırının enerji maliyeti 6,548 krş/kg'a düşerek iyileştirilmiş doğal gazlı fırının enerji maliyetine kıyasla % 14,27 oranında daha düşük çıkmıştır (Tablo 5.3).

Nominal yükte, öngörülen iyileştirmelerin tamamının yapıldığı doğal gazlı fırının birim cam başına enerji maliyeti, hiçbir iyileştirme yapmadığımız elektrikli fırının enerji maliyetinden % 4,93 oranında daha yüksek çıkmıştır (Tablo 5.3).

Elektrikli ve doğal gazlı fırınlarda nominal yükte temperlenen cam kütleleri, her iki fırının karşılaştırmasının hassas sonuçlar içermesi bakımından yakın seçilmiştir; fırınlardaki temperleme işlem sürelerinin farklı olması, aynı kütlelerdeki temperlenen birim zamandaki cam kütlelerinin farklı olmasına neden olmuştur. Özellikle doğal gazlı temperleme fırınının temperleme süresinin az olması, birim zamandaki temperlenen cam miktarını arttırmaktadır.

Termal kamera görüntüleri Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 incelendiğinde doğal gazlı ve elektrikli fırınların sıcaklık skalalarındaki maksimum yüzey sıcaklıkları farkının 120 °C ile 250 °C arasında olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle doğal gazlı ve elektrikli fırınların konveyör dış bölgeleri arasında bu yüzey sıcaklıkları farkının 200 °C'ye, doğal gazlı fırın homojenizasyon fanları ile elektrikli fırın yan duvar bölgeleri arasındaki bu sıcaklık farkının ise 250 °C gibi yüksek bir değere ulaştığı termal kamera görüntülerindeki sıcaklık skalaları üzerinden açık bir şekilde görülmektedir. Doğal gazlı fırının bu bölgelerindeki yüksek ısı kayıplarının, işletmedeki elektrikli fırının da örnek alınarak en azından elektrikli fırının yüzey ısı kayıpları değerlerine düşürülebileceği öngörülmektedir. Buna ilaveten termal kamera görüntülerinde, yüksek ısı kaybı görülen doğal gazlı fırının daireye uzanan baca çıkışlarının yalıtımının da iyileştirilmesi gerekmektedir (Şekil 5.5).

Doğal gazlı fırının verimini artırmak için alınabilecek tedbirlerin başında, baca gazı enerjisinin geri kazanılarak yakma havasının ısıtılması veya fırına beslenen camın ön ısıtılmasını sağlamak olabilir [12,13]. Yakma havasının, baca gazından kazanılan enerji ile ön ısıtılması iyileştirmesi: Brülör sayısının fazla olması ve bir ısı değiştirgecinde baca gazı ile ısıtılacak havanın sıcaklığının artırılarak kanallarla brülörlerin bulunduğu bölümlere getirilmesi zorunluluğu sistemi daha karmaşık hale getirecek ve geri kazanılacak enerji miktarını da sınırlayacaktır. Bunun yanında ısınan havanın yoğunluğunun azalması, yakma havası tesisatı kanal çaplarını arttıracığından ilave yatırım maliyetlerini de yükseltecektir. Bu sebeplerden böyle bir iyileştirmenin yapılması ekonomik olarak uygun görülmemektedir.

İkinci bir iyileştirme yolu ise doğal gazlı fırınlarda kullanılan self reküperatörlü veya rejeneratif yakma sistemli yakıcıların kullanılması önerisidir. Fırınlarda reküperatörlü yakıcılar kullanarak egzoz bacasındaki enerji kayıpları % 40 oranında azaltılabilmektedir. Rejeneratif yakıcılar kullanıldığında iyileşme % 60'lara ulaşmaktadır [12,13]. Bu önerilerin uygulanabilmesi için fırının uzun bir süre tadilata alınması gerekecektir. Tadilatın başlamasından tekrar devreye alınana kadar geçecek zaman diliminde, üretimi aksatmayacak bir çözüm bulunduktan sonra iyileştirme yapılması uygun olacaktır. Doğal gazlı fırına tadilatı yapmanın maliyeti ile verimli

yeni nesil bir fırın satın almanın maliyeti hesaplanmalı ve iyileştirme getirisi en fazla olan seçenek tercih edilmelidir.

Doğal gazlı ve elektrikli fırın yüzey sıcaklıklarını bir miktar daha düşürmek için fırın yalıtımlarının iyileştirilmesi ve yalıtımın zayıf olduğu bölgelerin iyileştirilmesi de diğer bir önlemdir. Tambur yataklarının olduğu açıklık kısımları, ışımaya kalkanlı özel kanal içine alınmalıdır. Her iki fırında da üretimi aksatmadan yüzey yalıtımlarının iyileştirilebileceği tavsiye edilmektedir. Ayrıca doğal gazlı ve elektrikli fırınların enerji tüketimi, kayıp ısı enerjileri nedeniyle sıcak havalarda azalacak, soğuk havalarda artacaktır.

Doğal gazlı fırının egzoz gazı ısısı yardımıyla işletmenin diğer işlerinde ısıtma, mutfak ve benzeri işlerde kullanılacak sıcak su üretimi veya yazın absorpsiyonlu soğutma cihazı, bu atık ısı ile çalıştırılarak işletmenin soğutma için tükettiği enerjinin önemli bir kısmı tasarruf edilebilir. Ayrıca üretimde iş programı yaparken düşük kapasitelerde elektrikli temper fırınının öncelikli olarak kullanılması maliyetleri düşürmek için bir avantajdır.

Temperleme esnasında fırınlardan yaklaşık 650 °C sıcaklığında çıkan camlar, hızlı ortam sıcaklığına soğutulduğundan açığa çıkan kayıp enerjinin camların ön ısıtılmasında veya bir ortamın ısıtılmasında kullanılmasıyla enerji tasarrufu sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Doğal gazlı ve elektrikli fırınlarda temperlenecek camların, fırın yükleme tablasını maksimum oranda kullanacak şekilde yerleştirilerek üretim planlarının yapılması fırındaki cam miktarlarını arttırarak enerji tasarrufu sağlayacaktır.

Doğal gazlı fırın yakma sisteminde sıcaklık değerini ayarlayan geniş; alev modülasyon aralığının olmaması, fırın egzoz bacasında alev modülasyonu ve fırın sıcaklığına göre çalışan damperli bir baca sisteminin olmaması, ideale yakın hava/yakıt oranının kontrol edilmemesi gibi fırın yakma otomasyonu eksiklikleri de egzoz gazları enerji kayıplarını arttırarak doğal gazlı cam temperleme fırınının enerji verimini düşürmüştür. Bu sebeplerden otomasyon iyileştirilmelidir.

Doğal gazlı fırında nominal yükte baca gazı ile fırını terk eden enerjinin yarısının fırına tekrar geri kazandırıldığı, fırın yüzeylerinden ısı geçişi ve sızıntı ile olan kayıpların yarısının önlenemediği; elektrikli fırında ise nominal yükte yüzeylerden olan ısı kayıplarının % 25' inin ilave yalıtım önlemleri ile azaltıldığı düşünülse dahi doğal gazlı fırının birim cam başına enerji maliyeti, elektrikli fırının birim cam başına enerji maliyetinden 0,359 krş/kg daha yüksek çıkmaktadır (Tablo 5.3).

Doğal gazlı temperleme fırınında farklı tip ve kalınlıklarda camlar için Tablo 3.11'de ölçümler alınmış; 6x2400x5000(mm) boyutlarında, 2761,04 kg/h düz cam yüklemesi için maksimum fırın kapasitesinde % 27,92 ile en yüksek doğal gaz fırın verimi ve 5,756 krş/kg maliyet ile doğal gazlı fırının en düşük enerji maliyeti elde edilmiştir (Tablo 3.14, Tablo 3.15).

Şekil 3.5'de doğal gazlı fırının farklı cam tipi ve kalınlıkları için verim grafiği oluşturulmuştur; bu grafiğe göre cam kalınlığı 4 mm' den 6 mm' ye kadar artarken, fırın verimi de artmış, 6 mm cam kalınlığındaki maksimum boyutlarda maksimum fırın verimine ulaşılmıştır. 6 mm cam kalınlığından 8 mm, 10 mm ve 12 mm cam kalınlıklarına geçildiğinde temperleme süresi arttığından camın miktarı azalmış ve fırın verimi düşmüştür.

Doğal gazlı fırında aynı kalınlıklarda, maksimum boyutlarda 6 mm düz cam ile kaplamalı cam karşılaştırıldığında düz camda fırın verimi % 27,92; kaplamalı camda fırın verimi % 23, 59 oranında gerçekleşmiştir. Düz camdan kaplamalı cama geçildiğinde fırın veriminin azaldığı Şekil 3.5' de görülmektedir. Aynı kalınlıkta 8 mm düz cam ve kaplamalı cam fırın verimleri sırasıyla % 25,56 ve % 23,06 olarak gerçekleşmiştir.

Elektrikli temperleme fırınında farklı tip ve kalınlıklarda camlar için Tablo 4.5'de ölçümler alınmış; 5x2300x4100(mm) boyutlarında, 1732,8 kg/h düz cam yüklemesi için maksimum fırın kapasitesinde % 67,01 ile en yüksek elektrikli fırın verimi ve 6,50 krş/kg maliyeti ile elektrikli fırının en düşük enerji maliyeti elde edilmiştir (Tablo 4.6, Tablo 4.7, Tablo 4.8).

Elektrikli fırında, maksimum fırın kapasitesi Tablo 4.6, Tablo 4.7'den görüleceği üzere 1732,8 kg/h cam yüklemesi olarak tesbit edilmiştir. Elektrikli fırının fiziki boyutlarının izin verdiği maksimum 2300 mm en ve 4100 mm boyundaki 1732,8

kg/h'e kadar olan tüm cam yüklemelerinde elektrikli fırının kullanılması enerji maliyetlerinin düşük çıkması bakımından önemli görülmektedir. Doğal gazlı fırının özellikle 2220 kg/h'den daha küçük cam yüklemelerinde kullanılması enerji verimliliğinin düşük, enerji maliyetinin yüksek çıkması sebebiyle doğal gazlı fırın için düşük kapasite olarak tanımlanmıştır. (Tablo 3.12, Tablo 3.14, Tablo 3.15).

Elektrikli fırının fiziki koşullarının yeterli olmadığı 1732,8 kg/h den yüksek 2220 kg/h'e kadar olan cam yüklemelerinde doğal gazlı fırınının düşük kapasitede çalıştırılma zorunluluğu bulunmaktadır (Şekil 3.4).

Doğal gazlı fırındaki homojenizasyon fanları, brülörler, soğutma grubu gibi cihazların elektrik tüketimlerinin tüm kapasitelerde sabit olması, farklı kapasitelerde yakıt tüketimini ayarlayan geniş; alev modülasyonu aralığının olmaması, nominal kapasite fırın yüklemelerinde fırın verimini olumsuz etkilemiş enerji maliyetini de daha yüksek çıkararak doğal gazlı fırının enerji maliyetinin elektrikli fırından % 36 oranı kadar daha yüksek çıkmasına sebep olmuştur. Elektrikli fırında yüzey ve açıklıklardan olan ısı kayıplarının daha az olması, fırının istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra enerji tüketimini kesmesi (on-off çalışması) gibi olumlu özellikler düşük kapasitelerde elektrikli fırının enerji maliyetinin daha düşük çıkmasına sebep olmuştur. Maksimum kapasitelerde elektrikli fırınının en düşük enerji maliyeti, doğal gazlı fırının en düşük enerji maliyetinden %12,93 oranında daha yüksek çıkmıştır. Görüldüğü üzere düşük kapasitelerde elektrikli fırın, yüksek kapasitelerde doğal gazlı fırının kullanımı avantajlı görülmektedir. Üretimde temperlenen camların büyük çoğunluğunun (neredeyse tamamı) Tablo 3.10'da görüldüğü üzere düşük kapasitelere karşılık geldiğine dikkat etmek gerekmektedir.

Doğal gazlı fırında bulduğumuz sonuçlar, daha önce incelenen 'Cam Temperleme Fırınında Enerji Analizi' isimli çalışma ile uyum içerisindedir [10]. Önceki çalışmada sadece doğal gazlı fırın üzerinde çalışma yapılmış, 1973 kg/h cam yüklemesi için doğal gazlı fırının verimi % 16,23 bulunmuştur. Bu çalışmada aynı fırının verimi 1363,53 kg/h düz cam yüklemesi için % 14,21 bulunmuştur. Ayrıca doğal gazlı ve elektrikli fırının farklı cam tipi ve kalınlıklarında maksimum kapasiteler için ölçümleri, hesapları yapılmış ve fırın verimleri tespit edilmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, bir cam fabrikasında aynı işletmede kullanılan doğal gazlı ve elektrikli cam temperleme fırınlarından enerji verimi en yüksek ve enerji maliyeti en düşük olanı belirlemek; farklı cam tipi ve kalınlıklarında, maksimum ve nominal fırın kapasitelerinde doğal gazlı fırının ve elektrikli fırının enerji verimlerini tespit etmek için yapılmıştır. Doğal gazlı fırının artan cam miktarlarında verimi artmış; 6 mm' den sonra artan cam kalınlıklarında ve aynı kalınlıklardaki kaplamalı camlarda, düz cama göre temperleme zamanı uzadığından birim zamanda temperlenen cam miktarı azalmış dolayısıyla fırın verimi düşmüştür; enerji maliyeti de yüksek çıkmıştır. Doğal gazlı ve elektrikli fırınlarda maksimum kapasitelere yaklaştıkça her iki fırında da enerji verimleri artmakta ve enerji maliyetleri düşmekte, doğal gazlı fırın ile elektrikli fırının enerji maliyetleri arasındaki fark ise doğal gazlı fırının lehine olacak şekilde azalmaktadır. Doğal gazlı fırında fırın bacasından atmosfere atılan enerjinin olması gerekenden fazla olması, bu atık ısının reküperatif veya rejeneratif bir sistemle (yeni nesil fırın) geri kazanılmaması, fırın konstrüksiyonunda yalıtımın yeterli olmaması, fırın giriş çıkış ve konveyör açıklıklarından olan ısı kayıplarının fazla olması gibi sebepler doğal gazlı cam temperleme fırınının enerji verimini özellikle düşük kapasitelerde (2220 kg/h'den küçük cam yüklerinde) fazla düşürmüştür. Ayrıca doğal gazlı fırınının çalışma sisteminin daha karmaşık bir yapıya sahip olması, nominal fırın kapasitelerinde sadece homojenizasyon fanlarının, brülör fanlarının ve soğutma sistemlerinin çektiği elektrik enerjisinin cama aktarılan ısı enerjisinin % 76'sına karşılık gelmesi doğal gaz fırınının verimini düşük kapasitelerde daha fazla düşüren diğer bir olumsuzluk sebebidir. Bu olumsuzluklara ilave olarak doğal gazlı fırının ilk devreye alma süresinin elektrikli fırına nazaran çok daha uzun sürmesi ve bu devreye alma süresinin uzunluğu nedeniyle doğal gazlı fırının üretim esnasında hiç kapatılmaması gibi hesaplarımıza dahil edemediğimiz kayıplar, aslında doğal gazlı fırınının enerji veriminin daha da düşük olduğunu göstermektedir. Elektrikli fırının ısı yalıtımının doğal gazlı fırından daha iyi olduğu yaptığımız ölçümler ve termal kamera görüntülerinden anlaşılmıştır. Elektrikli fırında egzoz bacası kayıplarının olmaması, homojenizasyon fanları soğutma

sisteminin olmaması, fan motorları ve brülör motorlarının olmaması gibi sebepler sistemi daha da basitleştirdiği gibi özellikle de düşük kapasitelerde enerji tüketimlerinin doğal gazlı fırından daha düşük çıkmasını sağlamıştır. Elektrikli fırının hızlı bir şekilde devreye alınıp çıkarılabilmesi de enerji tüketimini düşürmesinin yanında esnek çalışma imkanı sağladığından elektrikli fırının avantajı olarak değerlendirilmiştir. Termodinamiğin birinci kanununa göre gerçekleştirilen analizlerde birim temperlenmiş cam başına doğal gazlı fırının enerji maliyeti 1363,53 kg/h cam yüklemesi için 11,375 krş/kg, verimi 14,21 %; elektrikli fırının 1269,35 kg/h cam yüklemesi için enerji maliyeti 7,279 krş/kg, verimi ise 59,81 % olarak elde edilmiştir. Doğal gazlı fırının maksimum kapasitesine karşılık gelecek 2761,04 kg/h cam yüklemesinde birim temperlenmiş cam başına enerji maliyeti 5,756 krş/kg, verimi 27,92 %; elektrikli fırının maksimum kapasitesine karşılık gelecek 1732,8 kg/h cam yüklemesinde enerji maliyeti 6,500 krş/kg, verimi ise 67,01 % hesaplanmıştır.

Açıklanan tüm bu sebeplerden dolayı cam endüstrisinde çalışması yapılan özelliklerde bir temperleme fırın yatırımı yapmak ve işletme maliyetlerini düşürmek isteyen işletmelerin, eski nesil doğal gazlı fırın (reküperatörsüz) veya elektrikli fırın yerine kendinden reküperatör yakıclı veya rejeneratif yakıclı yeni nesil fırını tercih etmesinin daha doğru bir tercih olduğu, düşük kapasitelerde eski nesil doğal gazlı temperleme fırınının enerji maliyetinin elektrikli fırının enerji maliyetinden çok daha yüksek olduğu, 1732,8 kg/h'e kadar olan cam yüklemelerinde düşük enerji maliyeti açısından elektrikli fırının kullanılmasının daha doğru bir seçim olduğu sonucuna varılmıştır. Bu konuda çalışmaya yapacaklara, yeni nesil kendinden reküperatörlü ve/veya rejeneratif yakma sistemli doğal gazlı fırın ile elektrikli fırının enerji analizlerinin yapılması ve karşılaştırılması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı resmi internet sitesi, http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FEnerji%20ve%20Tabii%20Kaynaklar%20G%C3%Bcr%C3%BCn%C3%BCm%C3%BC%2FSayi_15.pdf, (Ziyaret tarihi: 01 Kasım 2018).
- [2] Elektrik Enerjisi, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı resmi internet Sitesi, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>, (Ziyaret tarihi: 02 Ekim 2018).
- [3] Nükleer Enerji, Akkuyu Nükleer A.Ş. internet sitesi, <http://www.akkunpp.com/mersin-turkiyenin-enerjisine-enerji-katacak>, (Ziyaret tarihi: 02 Eylül 2018).
- [4] Eyidoğan M., Kaya D., Dursun Ş., Taylan O., Endüstriyel Tav Fırınlarında Enerji Tasarrufu ve Emisyon Azaltım Fırsatları, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 2014, **29**(4), 735-743.
- [5] 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*, 2011, **15**(6), 2904-2908.
- [6] KILIÇ F. Ç., SERT M. Ö., EYİDOĞAN M., KAYA D., ÖZDEMİR N. C., Endüstriyel Tav Fırınlarında Bir ORC Sistemi Uygulaması ile Enerji Tasarrufu, *GU J Sci*, 2018 , **6**(1), 33-43.
- [7] 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*, 2010, **4**(2) , 7-13.
- [8] Filipponi M., Rossi F., Presciutti A., Ciantis S.D., Castellani B., Carpinelli A., Thermal Analysis of an Industrial Furnace, *Energies*, doi:10.3390/en9100833.
- [9] 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.
- [10] Tütünoğlu Y., Güven A., Öztürk İ. T., Cam Temperleme Fırınında Enerji Analizi, *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 2012, **53**(629), 55-62.

- [11] Özçelik A. ve Öztürk İ. T., Doğal Gazlı ve Elektrikli Cam Temperleme Fırınlarının Enerji Analizi ve Karşılaştırılması, 4. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, Trakya Üniversitesi Edirne, 18-20 Nisan 2018.
- [12] Önder D., Sanayi Fırınlarında Enerji Performansı, Yeni Yakıcı Teknolojisi ile Enerji Tasarrufu Doğal gaz semineri, MMO Teskon, <http://mmoteskon.org/wp-content/uploads/2014/12/2009DG-08.pdf> (Ziyaret tarihi: 05/12/2017).
- [13] Örenay S., Sanayi Fırınlarında Merkezi Reküperatör, Reküperatör ve Rejeneratif Yakıcılar, III. Enerji Verimliliği Kongresi MMO, http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/2a99fc4f9b8c329_ek.pdf, (Ziyaret tarihi: 05 Aralık 2017).
- [14] Topbaş M. A., Endüstri Fırınları, Cilt 2, Damla Matbaacılık, İstanbul, 1992.
- [15] Temperli Camlar, Yıldız Cam San. Tic. A.Ş. internet sitesi, <http://www.yildizcam.com.tr/tr/urunler/guvenlik-camlari/temperli-camlar>, (Ziyaret tarihi: 11 Ocak 2018).
- [16] Temperli Cam, Asia Cam Ayna ve Cam Sanayi A.Ş. internet sitesi, <http://asiacam.org/index.php/urunlerimiz/temperli-cam>, (Ziyaret tarihi: 20 Eylül 2018).
- [17] Türkbaş S. ve Ataer Ö.E., Camın Temperlenmesinde Isıtma ve Soğutma Süreçlerinin Karışık Sınır Şartlarında Sayısal Modellenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 2007, **22**(4), 727-738,
- [18] Incropera F. P., and De Witt D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Fifth edition, John Willey and Sons Publisher, New York, 2002.
- [19] Enerji Yöneticisi Eğitimi Ders Notları 3, Makine Mühendisleri Odası, Kocaeli Şubesi, 2014.
- [20] Çengel Yunus A., And Boles Micheal A., Thermodynamics An Engineering Approach, 7.Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara, 2015.
- [21] Çengel Yunus A., Isı ve Kütle Transferi, 3.Baskı, Güven Kitabevi, İzmir, 2011.
- [22] Akgüngör A. A., Doğal Gaz Sayaçları ve Çalışma Prensipleri, UGETAM Yayınları 55, İstanbul, www.ugetam.istanbul/wp-content/uploads/2017/05/55_dogalgaz_say_ve_cal_pren.pdf (Ziyaret tarihi: 11 Eylül 2018)
- [23] Doğal gaz nedir, Targaz A.Ş. internet sitesi, <http://www.targaz.com.tr/dogalgaznedir.html>, (Ziyaret tarihi: 11 Eylül 2018)
- [24] Waste heat Reduction and recovery for Improving Furnace Efficiency, Productivity and Emissions Performance, *US Department of Energy, Washington*, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/35876.pdf>. (Ziyaret tarihi: 11 Eylül 2018)

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1]Özçelik A., Öztürk İ. T., ‘Doğal Gazlı ve Elektrikli Cam Temperleme Fırınlarının Enerji Analizi ve Karşılaştırılması’, 4. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, 18-20 Nisan 2018, Trakya Üniversitesi, Edirne.



ÖZGEÇMİŞ

Adana'da 01.12.1974 yılında doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamladı. Uzun yıllar Adana D.S.İ. Yüzme Spor Kulübü'nde lisanslı sporcu olarak yüzdü. 1993 yılında girdiği Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 1999 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 1998-2000 yıllarında Bursa'da Beyçelik Kalıp ve Otomototiv Yan. San. Tic. A.Ş.'de ilk işine başladı. 2000-2001 yıllarında yedek subay olarak askerlik hizmetini Tekirdağ'da tamamladı. 2002-2004 yılları arasında Bursa'da Ermetal Kalıp ve Otomotiv Yan. San. Tic. A.Ş.'de çalıştı. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 2016-2019 yılları arasında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2004 yılından bugüne Zirve Mühendislik-Ahmet ÖZÇELİK isimli firmanın yetkilisi olarak Doğal Gaz, Isıtma, Soğutma ve Mekanik Tesisatı sektöründe proje ve taahhüt işleri yapmaktadır.