

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

106217

**BİR DÜZ CAM ÜRETİM FABRİKASINDA ERGİTME FIRINI
ENERJİ DENGESİ HESABI ve SOĞUTMA HAVASI ÜFLEME
ŞEKİLLERİNİN FIRIN DUVARLARININ SOĞUTULMASINDAKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Makina Müh. Serkan SEZER

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Sabiha YILDIZ (Y.T.Ü.)

106217

Prof. Dr. Hasan HEPERKAN

Doc. Dr. U. KESKİN

Yrd. Doç. Dr. Sabiha Yıldız

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

İSTANBUL, 2001

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	i
KISALTMA LİSTESİ.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	v
ÖNSÖZ.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
1. GİRİŞ	1
2. CAM YAPISI	2
2.1 Camın Oluşumu ve Yapısı	2
2.2 Camı Meydana Getiren Maddeler	2
2.2.1 Cam Yapıcılar	2
2.2.2 Ağ Yapısı Düzenleyiciler (Tadil Ediciler)	3
2.2.3 Ara Oksitler (Aracılar)	4
2.3 Cam Ergime Prosesi ve Düşük Viskozitenin Önemi	4
2.4 Çalışma Aralığı.....	5
2.5 Soğutma ve Tavlama Aralığı.....	5
2.6 Hammaddeler.....	5
2.6.1 Hammaddelerin Sınıflandırılması.....	5
2.6.1.1 Ana Hammaddeler	5
2.6.1.2 Yardımcı Hammaddeler	5
2.6.1.3 Kullanılan Belli Başlı Hammaddeler	6
3. CAM ERGİME PROSESİ	8
3.1 Cam Eldesi Prosesi	8
3.2 Harman Prosesi.....	8
3.3 Camın Ergitilmesi	11
3.4 Camın Afınasyonu	11
3.5 Camın Şartlandırılması.....	12
3.6 Yanma	13
4. REFRAKTERLER.....	17
5. BİR DÜZ CAM ÜRETİM FIRINININ ISI HESAPLAMALARI	19
5.1 Fırın İçindeki Isı Transfer Şekilleri ve Akım Olayları.....	19
5.2 Trakya Cam Fabrikasında Bulunan TR1 Fırınının Teknik Özellikleri.....	21

5.3	TR1 Fırını Enerji Dengesinin Çıkartılması	22
5.4	TR1 Fırınının Isı Dengesinin Sayısal Hesabı	26
5.4.1	Yakıt Enerjisi	27
5.4.1.1	TR1 Fırını Yakıt Enerjisi Hesabı	28
5.4.2	Fırın Duvarlarından Kaybolan Enerji	29
5.4.2.1	TR1 Fırın Duvarlarından Konveksiyonla Olan Isı Kayıplarının Hesabı.....	31
5.4.2.2	TR1 Fırın Yüzeyinden ve Fırın Açıklıklarından Radyasyonla Isı Hesaplanması.....	34
5.4.3	Cama Geçen Enerji	35
5.4.3.1	TR1 Fırınında Cama Geçen Enerjinin Hesabı.....	37
5.4.3.1.1	Reaksiyon Sonucu Oluşan Gazlar için Enerji Miktarı Hesabı	37
5.4.3.1.2	Camı Çalışma Sıcaklığı Olan 1220 ⁰ C ye Çıkarmak İçin Gerekli Olan Enerji Miktarının Hesabı	37
5.4.3.1.3	Camı Çalışma Sıcaklığı Olan 1220 ⁰ C ye Çıkarmak için Gerekli Olan Enerji Miktarının 2. Yoldan Hesabı	38
5.4.3.1.4	Kimyasal Reaksiyon İçin Gerekli Enerji	43
5.4.4	Ön Isıtılmış Havanın Enerjisi	43
5.4.4.1	TR1 Fırını İçinde Ön Isıtılmış Havanın Enerji Miktarı Hesabı.....	43
5.4.5	Yanmış Gazlarla Fırından Ayrılan Enerji	44
5.4.5.1	Rejeneratörlerde Isı Geri Kazanımı	44
5.4.5.2	TR1 Fırınında Yanmış Gazlarla Ayrılan Enerji Miktarı Hesabı	46
5.4.6	Bacadan Atılan Yanmış Gazların Enerjisi.....	46
5.4.7	Isı Geri Dönüşüm Sistemi Yapısından Kaybolan Enerji.....	47
5.4.8	TR1 Fırınında Sisteme Giren ve Sistemden Çıkan Enerjilerin Sonuçlarının Yüzdesel Olarak Karşılaştırılması.....	48
6	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	51
7	TR1 FIRINI İÇİNDE SICAKLIKLARIN ÖLÇÜMÜNDE KULLANILAN CİHAZLAR.....	52
7.1	Radyasyon Pirometreleri	52
7.1.1	Çalışma Prensibi	52
7.2	Termokuplar	53
7.2.1	Termokupların Çalışma Prensibi	53
7.2.2	TR1 Fırınında Mevcut Bulunan Termokupların Yerleştirilmesi	55
7.3	Portatif Test Pirometreleri	56
7.4	Optik Pirometreler	57
8.	FIRIN YAN BLOKLARININ HAVA İLE SOĞUTULMASI	58
8.1	TR1 Fırınında Kullanılan Fanların Özellikleri	59
9	FIRIN YAN DUVARLARININ SOĞUTULMASINDA KULLANILAN HAVANIN ÜFLENME ŞEKİLLERİNİN İNCELENMESİ	63
9.1	Havanın Fırın Yan Duvarlarına Yatay Olarak Üflenmesi.....	64
9.2	Havanın Fırın Yan Duvarlarına Dik Olarak Üflenmesi	66

9.3	Fırın Yan Duvarlarının Dış Yüzeyindeki Ortalama Sıcaklık Değerinin Sayısal Hesabı.....	67
9.4	Duvar Boyunca Dikdörtgen Kesitli Hava Soğutma Nozullarının Yanyana Dizilmesi Halinde Meydana Gelen Isı Transferi Hesabı.....	68
9.5	Fırın Duvarlarına Yatay Olarak Havanın Üflenmesi Durumunda Elde Edilen Isı Transfer Miktarı Hesabı	71
9.6	Yuvarlak Kesitli Nozul Kullanılması Durumunda Elde Edilen Isı Transfer Miktarı Hesabı	74
9.7	Dikdörtgen Kesitli Nozulların Eksenleri Arasındaki Mesafenin Değiştirilmesi Durumunda Duvar Boyunca Isı Transferi.....	78
10	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	81
	KAYNAKLAR	83
	EKLER	85
EK1	TR1 Taban ve Kemer Termokupları Yerleşim Planı	85
EK2	TR1 Fırın İçi Sıcaklık Dağılımı	86
EK3	TR1 Fırını Değerlerinin Günlük Miktarları.....	87
EK4	TR1 Fırını Önden Görünüşü.....	90
EK5	Çeşitli Camların Hammadde Miktarları	91
EK6	Refrakter ve Diğer Malzemelerden Yapılmış Parçaların Birleşiminden Oluşan Fırın Yapısının Kesiti	93
	ÖZGEÇMİŞ.....	94

SİMGE LİSTESİ

A	:Fırın yüzey alanı (m ²)
A _K	:Nozul çıkış kesitinin alanı (m ²)
b	:Hava çıkış nozulunun boyu (m)
C	:Yakıttaki C oranı
C _p	:Havanın özgül ısısı (kcal/kg °K)
D	:Yuvarlak kesitli nozul çapı (m)
E _B	:Fırına beslenen yakıt enerjisi (kj/h)
F	:Yuvarlak kesitli nozul için katsayı
g	:Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
G	:Yuvarlak nozul için katsayı
Gr	:Grashof sayısı
h ₀	:Gazın oluşum ısısı (kj/kmol)
h _r	:Radyasyon ısı geçiş katsayısı (kcal/m ² h °C)
h _t	:Konveksiyon ısı geçiş katsayısı (kcal/m ² h °C)
h ₁	:Tepkimeye giren hammadde entalpisi (kj/kmol)
h ₂	:Tepkimedan çıkan hammaddenin entalpisi (kj/kmol)
H	: Nozul çıkışının yüzeye dik olan mesafesi (m)
H _u	:Yakıtın alt ısı değeri (kcal/kg)
H _A	:Fırını terk eden gazların duyulur enerjisi (kj/h)
H _G	:Toplam yakma havasının duyulur enerjisi (kj/h)
H _Ü	:Yakıtın üst ısı değeri (kcal/kg)
ΣE _T	:Tepkime sonucu açığa çıkan hammaddelerin ısınma enerjisi toplamı (kj/h)
Σh	:Refrakter malzemesinin ısı iletim katsayısı (m ² h °C/ kcal)
ΣΔh	:Kimyasal tepkime sonucu açığa çıkan tepkime ısılarının toplamı (kj/kmol)
k	:Havanın ısı iletim katsayısı (kcal/m h °C)
l	:Duvar malzemesinin kalınlığı (m)
L	:Karakteristik uzunluk (m)
m	:Havanın dik üflenmesindeki ısı transferi için kullanılan boyutsuz katsayı
m _h	:Yanmış gazların miktarı (kg)
m _{h0}	:Ön ısıtılmış hava miktarı (kg)
m _y	:Yakıtın debisi (kg/h)
m _{BG}	:Yanmış gazların toplam mol ağırlığı (kg/kmol)
m _G	:Yanma havası ve metan karışımının miktarı (Nm ³)
N	:Nusselt sayısı
Nu _L	:L mesafesindeki, duvar boyunca Nusselt sayısı
Nu _X	:x mesafesindeki yerel Nusselt sayısı
Pr	:Prandtl sayısı
r	:Nozulun merkezinden çevreye radyal doğrultuda olan uzaklık (m)
Re	:Reynold sayısı
Re _X	:x mesafesindeki Reynold sayısı
Re _L	:L mesafesindeki Reynold sayısı
q	:Birim yüzeyden konveksiyonla oluşan ısı transferi (W/m)
Q _a	:Bacadan atılan yanmış gazların enerjisi (kj/h)
Q _d	:Nozul hava üfleme debisi (m ³ /h)
Q _r	:Fırın duvarlarından çevreye olan kayıp enerjisi(kj/h)
Q _{ra}	:Radyasyon ile oluşan ısı kaybı (kj/h)
Q _t	:Konveksiyon ile oluşan ısı kaybı (kj/h)
Q _y	:Yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısı (kj/h)
Q _A	:Ön ısıtılmış havanın enerjisi (kj/h)

Q_{AO}	: Isı geri dönüşüm sistemine giren havanın enerjisi (kj/h)
Q_G	: Fırın içinde ergimiş cama geçen enerji (kj/h)
Q_{IG}	: Isı geri dönüşüm sistemi yapısından kaybolan enerji (kj/h)
Q_R	: Yakıt enerjisi (kj/h)
Q_W	: Yanmış gazlarla fırından kaybolan enerji (kj/h)
Q_1	: Reaksiyon sonucu oluşan gazların enerji miktarı (kj/h)
Q_2	: Camı çalışma sıcaklığına çıkarmak için gerekli enerji miktarı (kj/h)
Q_3	: Kimyasal reaksiyon için gerekli enerji miktarı (kj/h)
S	: Nozul için hidrolik çap (m)
$T_{ÇIK}$: Hammaddelerin reaksiyondan çıkış sıcaklığı (K)
T_d	: Fırın duvarlarının ortalama dış sıcaklık değeri (K)
T_F	: Ortalama film sıcaklığı (K)
$T_{GİR}$: Hammaddelerin reaksiyona giriş sıcaklığı (K)
T_R	: Ortam sıcaklığı (K)
T_y	: Yüzey sıcaklığı (K)
T_1	: Ön ısıtılmış havanın sıcaklığı (K)
V	: Havanın nozuldaki üflenme hızı (m/s)
V_{air}	: TR1 fırınında kullanılan havanın debisi (m^3/h)
V_{gas}	: Kullanılan doğalgaz debisi (m^3/h)
V_O	: Serbest akım bölgesindeki akışkanın hızı (m/s)
ν	: Kinematik viskozite (m^2/s)
x	: Akışkanın duvar ucundan itibaren akım yönündeki mesafesi (m)
x_1	: Nozul merkezinden radyal doğrultuda olan uzaklık (m)
α_L	: x mesafesindeki akışkanın konveksiyon ısı transfer katsayısı ($kcal/m^2h^{\circ}C$)
α_x	: L mesafesindeki akışkanın konveksiyon ısı transfer katsayısı ($kcal/m^2h^{\circ}C$)
λ	: Akışkanın kondüksiyon ısı transfer katsayısı ($m^2h^{\circ}C/kcal$)
β	: Isıl genleşme katsayısı
ϵ	: Yüzey emisivitesi
η	: Fırın etkenliği
η_f	: Yanma hacmi etkenliği
ρ	: Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
μ	: Dinamik viskozite (kg/ms)
Ψ	: Hava fazlalık katsayısı
σ	: Stefan –Botzman sabiti

KISALTMA LİSTESİ

AZS Alüminazirkonyasilika
LPG Sıvılaştırılmış petrol gazı



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1	TR1 cam fırınının yandan görünüşü.....	9
Şekil 5.1	TR1 fırınında ısı transferi	19
Şekil 5.2	TR1 fırınında harmana ısı transferi	20
Şekil 5.3	TR1 fırını enerji dengesi.....	24
Şekil 5.4	Fırın sisteminde Sunkey diyagramı.....	25
Şekil 5.5	TR1 fırın boyutları.....	33
Şekil 5.6	TR1 fırını rejeneratör yapısı.....	45
Şekil 5.7	TR1 fırını içinde mevcut enerjilerin dağılımı.....	50
Şekil 7.1	Radyasyon pirometresi	53
Şekil 7.2	Bir termokupl yapısı.....	54
Şekil 8.1	TR1 fırını yan bloklarının yaygın aşınma profili	58
Şekil 8.2	TR1 fırını yan duvarlarının dikdörtgen çıkış kesitine sahip nozul kullanılarak hava ile soğutulması.....	59
Şekil 8.3	TR1 fırın refrakteri üzerinde sıcaklık ölçüm noktaları.....	61
Şekil 9.1	Duvar boyunca havanın yatay olarak akışı.....	64
Şekil 9.2	Duvar yüzeyine dik olarak yapılan üfleme.....	67
Şekil 9.3	Dikdörtgen kesitli nozulların boyutları.....	71
Şekil 9.4	Dikey ve yatay akışlı üfleme tiplerinin karşılaştırılması.....	73
Şekil 9.5	Yuvarlak kesitli nozulların boyutları.....	77
Şekil 9.6	Dikdörtgen ve yuvarlak kesitli nozulların karşılaştırılması.....	77

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Camlarla ilgili önemli sıcaklıklar	5
Çizelge 3.1	Çeşitli sıcaklıklarda ön ısıtılmış hava ile ulaşılabilecek maksimum alev sıcaklığı	15
Çizelge 5.1	TR1 fırınında kullanılan hammaddelerin ağırlık oranı.....	38
Çizelge 5.2	TR1 fırınında hammaddelerin birbirleri ile kimyasal reaksiyon sıcaklıkları.....	38
Çizelge 5.3	Hammaddelerin ağırlık oranları	38
Çizelge 5.4	Hammaddelerin ağırlık oranları	39
Çizelge 5.5	Hammaddelerin ağırlık oranları	39
Çizelge 5.6	Hammaddelerin ağırlık oranları	39
Çizelge 5.7	Hammaddelerin ağırlık oranları	39
Çizelge 5.8	25 °C- 789 °C arasında oluşan ısınma enerjisi hesabı	40
Çizelge 5.9	789 °C-837 °C arasında oluşan ısınma enerjisi hesabı	40
Çizelge 5.10	837 °C-900 °C arasında oluşan ısınma enerjisi hesabı	41
Çizelge 5.11	900 °C-1070 °C arasında oluşan ısınma enerjisi hesabı	41
Çizelge 5.12	1070 °C-1425 °C arasında oluşan ısınma enerjisi hesabı	42
Çizelge 5.13	TR1 fırınında elde edilen enerji değerleri.....	48
Çizelge 8.1	TR1 fırın yan duvarlarının dış yüzeyinden ölçülen sıcaklık değerleri	62

ÖNSÖZ

Hedeflerim doğrultusunda gerçekleştirmeye çalıştığım bu tezimin hazırlanma sürecinde bana yön veren ve çalışmalarımın her aşamasında büyük bir özveri ile destek ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Sabiha YILDIZ'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Şişe Cam Fabrikaları A.Ş.'ye bağlı olan Trakya Cam Fabrikası'nda yapmış olduğum gözlem ve deneylere izin veren Üretim Müdürü Şevket ASILKAZANCI, bilgilerini benimle paylaşan ve her türlü yardımda bulunan Makina Mühendisi Erkan HEPŞEN, Ali YÖNDEN ve düz cam üretim kısmındaki tüm ustabaşılara teşekkürlerimi borç bilirim.

Ayrıca, her türlü dokümanların temini ve bilgilendirme açısından desteğini ve ilgisini gördüğüm Şişe Cam Fabrikaları-Topkapı Araştırma Merkezi Enerji Bölümünden Lale ÖNSEL ve Araştırma Merkezi Kütüphane sorumlusu A. Semih İŞEVİ'ye teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere kadar gelmemde ve Makina Mühendisi olarak görev yapmamda emeği geçen Yıldız Teknik Üniversitesi'nin tüm saygı değer hocalarına minnet borcumu ayrıca belirtmek isterim.

SERKAN SEZER

ÖZET

Günümüzdeki ekonomik koşullar nedeni ile cam üretim prosesleri optimum enerji tüketimi temelinde çalıştırılmakta veya dizayn edilmektedir. Bu nedenle yeni ve uygun metodların uygulanması bir gereksinim olmuştur.

Bu çalışmada, Trakya Cam Fabrikasında mevcut bulunan ergitme fırınlarının enerji dengelerinin hesabı yapılarak, ortaya çıkan ısı kayıplarının çeşidi ve miktarı tam olarak tespit edilmektedir. Özellikle radyasyon ve konveksiyon ısı enerjisi kayıplarının artması fırın için kullanılan yakıt enerjisi miktarının artmasına sebep olmakta ve dolayısıyla işletmenin ekonomik girdilerini büyütmektedir. Ayrıca hesaplanan yakıt ve atık gaz miktarı fırın üzerinde şematik bir sistem olarak gösterilmiştir. Atık ısının yeniden kazanılması sistemleri araştırılmıştır. Böylece enerji tasarrufu sistemleri hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, fırın duvarları boyunca en iyi ısı transferini hesaplayabilmek için, dikdörtgen ve yuvarlak akış kesitine sahip hava nozulları, birbirleri ile konveksiyon ısı transferleri bakımından karşılaştırılmıştır. Bu nozullardan çıkan havanın duvar yüzeyine göre dik ve yatay olarak üflenmesi durumunda da elde edilecek ısı transferleri de ayrıca hesaplanmıştır. Tüm bu sonuçlar doğrultusunda fırın duvarlarının soğutulmasında kullanılan havanın duvar yüzeyine dik olarak yapılan üfleme ile en iyi ısı transferinin sağlandığı ispat edilmiştir. Bu sayede fırın duvarlarının zaman içerisinde yüksek sıcaklık nedeni ile hızlı aşınması, uygulanan doğru ve etkin hava soğutması ile önlenmiştir. Ayrıca hava nozullarının eksenleri arasındaki mesafeler ve duvar yüzeylerine olan uzaklıklarının etkileri de incelenmiştir.

ABSTRACT

In view of today's economic conditions processes of glass production are operated or designed on the basis of optimum energy consumption. Therefore, It is necessary to use new and useful methods.

This article is a report on calculating heat losses of the melting furnaces in Trakya Glass Production Factory and on determining the quantities of the heat losses and kinds of heat losses in melting furnaces. Especially, convection and radiation heat losses increase the quantity of fuel for the furnace. Calculated fuel, heat losses and waste gas quantities were shown on the furnace as diagrammatic system. Also, waste heat recovery systems were investigated. So, detailed knowledge on energy saving systems were given.

In the second section, it is aimed to calculate the best heat transfer along the walls of the furnace by the use of nozzles that have rectangular and ball cross section and heat transfer coefficients were compared. Also, the air was blown at straight and horizontal positions by the nozzles to the surfaces of the walls of the furnace and the heat transfer coefficients were calculated again. According to these results, best heat transfer was provided when the air was blown at straight position to the surface of the wall. Therefore, decaying of the walls because of the high temperatures in the melting furnace can be prevented by selecting the best and correct blowing type of the nozzles. Also the influence of distances between the axes of the nozzles and the influence of distances of nozzles' outlets to the surface of the wall were investigated.

1. GİRİŞ

Dünyamızda enerjiye olan ihtiyaç, toplumların gelişmesine paralel olarak günden güne artmakta buna karşılık kısıtlı enerji kaynakları ise sürekli olarak azalmaktadır. Mevcut olan enerji kaynaklarından en ekonomik şekilde yararlanabilmek için sistemlerin az enerji harcayarak verimliliklerini daha çok arttırmanın yolları araştırılmalıdır. Ayrıca sistemlerde prosesler esnasında meydana gelen enerji kayıplarının nedenleri tespit edilerek, bu kayıp enerjileri tekrar işletmeler için aktif olarak kullanılabilir hale getirmek temel hedeflerden biri olmalıdır.

Bu tez çalışmasında Trakya Cam fabrikasında ergitme fırınlarının ısı enerji analizi yapılarak, elde edilen sonuçlardan kayıp enerjilerin işletmeye yüklemiş olduğu ekonomik maliyet araştırılmıştır. Bu hedef doğrultusunda, fırın duvarlarını soğutmak için kullanılan havanın üfleme şekillerinin doğru tespiti yapılarak, işletme için hangi tip soğutma şeklinin daha avantajlı olduğu belirlenmiştir.

Yeni bir sistemin kurulmasının zorluğu, uygun şartların yaratılması, yeni sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin fazla olması ve AR-GE departmanlarının konulara bakış açıları gibi etkenler her zaman işletmeler için etkili olmuştur. Ancak rekabet ortamında başarılı olabilmek ve gelişmelere ayak uydurabilmek için özellikle sanayi alanında birçok ekonomik ve akılcı çözümlerin üretilmesi kaçınılmaz olmuştur.

Günde 1000 tonun üzerinde düz cam üretimi yapan Trakya Cam fabrikasında, sürekli büyüyen üretim potansiyelinin yanında bu tür araştırma konularında da çalışmaların yapılması ve teknolojik gelişmelerin fabrika bünyesinde tatbik edilmesi geleceğe yönelik atılmış adımlardandır.

2. CAM YAPISI

2.1 Camın Oluşumu ve Yapısı

Ergimiş yada sıvı haldeki cam, yüksek bir viskoziteye sahiptir. 1000 °C civarında olan normal ergimiş yada sıvı haldeki camın viskozitesi, en koyu yağdan daha yüksektir. Böyle bir cam soğutulduğunda sıvı durumdaki moleküller, yüksek viskozite, ağır molekül hareketleri ve yetersiz süre nedeniyle, moleküler yapı düzlemindeki katı durumun düzgün kristal yapısını geçemezler.

Cam yapısı sıvı gibi kalmasına rağmen katı madde görünümündedir. Ayrıca kristallenmesine engel olacak kadar yüksek bir viskoziteye (10^{13} poiseden büyük) sahiptir (Tooley, 1953; Kuşçuoğlu vd., 1993). Diğer bir deyişle cam soğutulduğunda bir katı madde gibi davranır. Cam sıklıkla aşırı soğutulmuş sıvı olarak tanımlanır. Camın davranışı katı madde gibidir. Fakat molekül yapısı sıvılardaki gibidir.

Cam, bir katı gibi görünmesine ve gerçekte pek çok katı maddeden daha sert olmasına rağmen aslında bir sıvı yapısına sahiptir. Camın molekül düzeni bir sıvının içindeki molekül düzenine benzer, düzensiz bir ağ örgüsü vardır ve bu cama özgü bir özelliktir. O yüzden sabit bir ergime noktası olmayan amorf bünyeli bir silikat bileşimi olarak da tanımlanabilir.

Cam ısıtıldığında viskozitesi kademeli olarak düşer ve soğutulduğunda ise bunun tersine kademeli olarak yükselir. Bu durumu, ergimiş yada sıvı haldeki bir metal ile karşılaştırsak, metalin sıvı halden katı hale dönüşümü anidir, yada suya uyguladığımızda, su donma noktasında hızla buz haline dönüşür. Camın (katılaşmaya kadar) soğutulması ile viskozitesindeki kademeli artış, cama arzu edilen ürün şeklinin verilmesine fırsat yaratarak diğer metallere nazaran daha geniş bir çalışma aralığı kazandırır. İstenirse cam, ısıtma ile yumuşatılabilir ve istenildiği kadar şekillendirilebilir ve soğutulabilir.

2.2 Camı Meydana Getiren Maddeler

2.2.1 Cam Yapıcılar

Herhangi bir camın temel yapısını oluşturan bu maddelere Cam Yapıcılar adı verilir. Çoğunlukla bilinen cam yapıcılar silisyumdioksit yada silistir (SiO_2).

Eğer silis kristalleri, ergime noktası olan 1730 °C'a ısıtılırsa, kristal ağı daha düzensiz bir yapıya dönüşür. Hızlı soğumada sıcaklık değişiminin hızı, düzeni bozulan atomik yapının, yine kristal yapıda düzenli hale geçebilmesi için yeterli süreyi tanımaz ve sonuçta silis düzensiz bir atomik yapı ile katılaşır.

Silis soğutulduğunda diğer cam yapıcı maddeler gibi düzensiz bir atomik ağ yapı oluşturur. Soğumakla birlikte, rijit hale gelir. Katı madde görünümü verir ama gerçekte aşırı soğutulmuş bir sıvıdır. Bu yapıya cam gibi silis anlamına gelen Camsı Silis adı verilir. Diğer bir cam yapıcı madde, bor metalinin oksididir (Boroksit- B_2O_3). Fosfor oksitleri, arsenik ve germanyum da cam yapıcı madde sınıfına girerler. Cam yapıcı maddeler soğuma sırasında atomik ağ yapı oluşturma niteliğine sahiptir.

2.2.2 Ağ Yapısı Düzenleyiciler (Tadil ediciler)

Silise sodanın (Sodyumoksit- Na_2O) ilavesi iki madde arasında kimyasal bir reaksiyona neden olur. Soda ve silis karışımı, silisin ergime noktasından çok daha düşük bir sıcaklıkta reaksiyon verir. Gerçekte soda-silis karışımının sıvı faza geçtiği sıcaklık soda miktarının artırılması ile 1000 °C' nin altına düşülebilir. Soğutulduğunda, soda-silis karışımı da silis camı gibi bir cam oluşturur.

Soda bir ağ yapı düzenleyicisi olarak hareket eder. Başlıca özelliği bir ergitici olmasıdır ve ergime sıcaklığını düşürücü rol oynar. Diğer bir taraftan soda, daha kolay ergiyen bir ürün oluşturarak, silisin daha düşük bir sıcaklıkta akıcı hale gelmesini sağlar. Soda-silis camındaki soda miktarı arttırıldığı takdirde, camın su tarafından kimyasal olarak etkilenmesi de artar. Bu nedenle kolay ergitilebilen ve kolaylıkla şekillendirilebilen kullanışlı bir cam üretmek için, cam kompozisyonunda bazı ilaveler ile düzeltmeler yapmak gerekir.

Yaygın kullanılan bir başka ağ yapısı düzenleyici madde kireçtir (Kalsiyumoksit- CaO). Kireç ilavesi camın kimyasal etkilere dayanıklılığını artırır. Bu özelliği ile kireç cama bozulmazlık kazandıran ağ yapısı düzenleyici madde özelliğindedir. Mağnezyum (MgO) camın dayanıklılığını artırır, fakat kireç kadar etkili değildir. Diğer ağ yapısı düzenleyiciler, potasyumoksit (K_2O), lityumoksit (Li_2O) ve çinkooksit (ZnO)' tir. Bunlardan K_2O ve Li_2O

Na_2O 'nin özelliklerini gösteren oksitlerdir. ZnO ise CaO ve MgO ' e benzer şekilde hareket ederek kararlık kazandıran maddedir.

2.2.3 Ara Oksitler (Aracılar)

Bu maddelerin bir kısmı cam yapıcı bir kısmı ise ağ yapısı düzenleyicisi gibi hareket eder. Alümina (Alüminyumoksit- Al_2O_3) ara oksitlere bir örnektir. Ara oksitin rolü; camın devitrifikasyonu (kristalleşme) eğilimini azaltmak ve sağlamlığını arttırmaktır. Camın atomik ağ yapısına bir cam yapıcı gibi katılırlar. Kurşunoksit, ara oksit gibi hareket eden diğer bir maddedir. Böylece camın daha kolay işlenebilir hale getirilmesi ve cama belirli uygulama alanları için gerekli görülen niteliklerin kazandırılması için, cam yapıcılara başka maddeler ilave edilir. Bu maddeler ağ yapısı düzenletici yada ara oksitlerdir. Ara oksitler, cam yapıcı ve ağ yapısı düzenleyici maddelerin rolünü birlikte oynayarak, cam özelliklerini etkiledikleri gibi aynı zamanda, atomik ağ yapısını zenginleştirirler.

Normal cam yapımında, kristaller oluşursa, camın içinde bir hata olduğu düşünülür. Bazı durumlarda belli şartlar altında kontrol edilerek kısmen yada tamamen kristalleşmiş cam kullanılır. Eğer sıcaklık, soğuma esnasında kristal oluşumunun meydana geldiği noktada yada civarında tutulursa, ayrıca kristallerin tekrar düzenli bir yapıya girmesi için gerekli süre verilirse, kristal oluşur. Cam seramikleri ve bazı opal camlarda belirli görünümünün oluşturulması için kristalleşme kontrollü bir şekilde gerçekleştirilir.

2.3 Cam Ergime Prosesi ve Düşük Viskozitenin Önemi

Cam yapımı prosesi, hammaddenin karıştırılması ve ısıtılmasıyla başlar. Bu işlemlere ergime prosesi denir. Ergime prosesi, kimyasal reaksiyonların meydana gelmesine neden olur. Ergime sırasında meydana gelen sıvı fazın harman bileşenleri arasındaki teması arttırarak ergimeyi kolaylaştırmak, konveksiyon akımlarının meydana gelmesini sağlamak üzere yeterince düşük viskoziteli olması gerekir. Ergime prosesi sırasında, ergimiş camın içinde habbeler halinde gaz oluşur. Bu habbelerin camı terk edebilmesi, ergitilen camın yeterince düşük viskozitede olması ile mümkün olur.

2.4 Çalışma Aralığı

Cam, şekillendirilme prosesi için fırından alındığı zaman, sıcaklığı düşürülür ve buna bağlı olarak viskozitesi arttırılır. Şekillendirme prosesinin başlangıç ve sonu arasındaki viskozite aralığına çalışma aralığı adı verilir.

2.5 Soğutma ve Tavlama Aralığı

Cam, normal olarak soğumaya bırakılırsa kırılabilir yada içinde daha sonra kırılmasına neden olacak gerilimler oluşur. Bu durum kesme, dekorlama ve kullanım sırasında tehlike yaratır. Bu gerilimlerin giderilmesi için belirli bir sıcaklık aralığında soğutma hızı kontrollü olmalıdır. Bu sıcaklık aralığına tavlama aralığı adı verilir.

Çizelge 2.1 Camlarla ilgili önemli sıcaklıklar

(°C)	TavlamaNoktası	Çalışma Aralığı	Ergime Noktası
Soda-Kireç-Silis Camı	560	700-1200	1370
Borosilikat Camı	570	790-1450	1600

(Tooley, 1953; Kuşçuoğlu vd., 1993)

2.6 Hammaddeler

2.6.1 Hammaddelerin Sınıflandırılması

Cam hammaddelerin görevlerine göre iki sınıfa ayrılırlar

2.6.1.1 Ana Hammaddeler

Bunlar camın ana bileşenlerini sağlayan ve harmana genellikle ağırlıkça %1' in üzerinde giren hammaddelerdir. Kum, kuvarsit, kalker, dolomit, feldspat, soda, boraks, asitborik, potasyum karbonat, sülyen ve cam kırığı bu grupta yer alır.

2.6.1.2 Yardımcı Hammaddeler

Bunlar genellikle harmanda %1' in altında yer alan hammaddelerdir. Görevleri bakımından bazı alt başlıklara ayrılırlar. Bu alt başlıklar sırasıyla,

Afinan maddeler: Camda afinasyonu (ergimiş camın gaz kabarcıklarından arınması) sağlamak için kullanılırlar. Belli başlıları; Na_2SO_4 , $(\text{CaSO}_4, \text{BaSO}_4)$, NaCl ' dir.

Renklendiriciler ve renk gidericiler: Bunlar genellikle cama renk vermek veya renksiz camda FeO, Fe₂O₃ nedeniyle oluşan istenmeyen renkleri maskelemek amacıyla kullanılırlar. Başlıcaları Co, CuO, NiO, NiO₂, MnO₂, Fe₂O₃, metalik Se, Au, Pt, Ag, V, CdS gibi maddelerdir.

Oksidan maddeler: Ana görevleri harmandaki organik karakterli kirlilikleri oksitlemek ve demiroksiti cama daha az renk veren Fe₂O₃' e çevirmektir. Belli başlı oksidan malzemeler Na₂SO₄' a ilaveten NaNO₃, Sb₂O₃ ile CaO₂' dir.

İndirgen Maddeler: Ergitme işleminin indirgen koşullarda yapılmasını sağlayan maddelerdir. Belli başlıları, kömür (C), kükürt (S), yüksek fırın cürufu (calumite)' dir.

2.6.1.3 Kullanılan Belli Başlı Hammaddeler

Sillika (SiO₂): En yaygın kullanılan cam yapıcı oksittir. Cama dayanım ve kimyasal dayanıklılık kazandırır. 1700 °C' nin üzerinde ergir.

Soda (Na₂O): Ergime derecesini düşürmek amacıyla en sık kullanılan ağ yapısı düzenleyici oksittir. Sahip olduğu akışkanlık kazandırma özelliğine "flanks oluşturucu" (ergitici) denilir. Bu nedenle soda bir flanks maddesi olarak anılır. Ergime derecesini düşürmenin yanısıra soda, camın kimyasal dayanıklılığını azaltır, ısıl genleşme katsayısını düşürür.

Potasyumoksit (K₂O): Sodaya benzer biçimde ağ yapısını düzenleyici bir oksittir. Soda kadar olmasa da flanks oluşturucu bir oksittir. Camın kırılma indisini ve Na₂O' ya göre elektriksel direncini arttırır. Na₂O ile birlikte kullanılmasıyla oluşturulan karışık alkali etkisi, camların kimyasal dayanıklılığını ve elektriksel dirençlerini çok yükseltir.

Kireçtaşı (CaO): Ağ yapısını düzenleyici bir oksittir, ergimeye yardımcı olur, çalışma aralığını daraltır, kimyasal dayanıklılığı arttırır. Fakat genellikle camın devitrifikasyon eğilimini yükseltir.

Mağnezyumoksit (MgO): Kalsiyumoksite benzer özellikler gösterir. Ancak devitrifikasyona karşı eğilimi daha azdır. Camın havaya karşı mukavemetini arttırır.

Alümina (Al_2O_3): Küçük miktarda kullanılır. Ergime sıcaklığını yükseltir, camın çalışma aralığını genişletir, kimyasal dayanıklılığı artırır, devitrifikasyon olayını engeller. Ara oksitlerden biridir.

Boroksit (B_2O_3): Boroksit, ısı genleşme katsayısı düşük olması istenen camlarda kullanılır. Bu durum fırın kaplarında ve diğer pek çok özel cam türünde istenen bir özelliktir. Boroksit ikinci en önemli cam yapıcı oksittir. Camın ergime işlemini kolaylaştırır, kimyasal dayanıklılığını artırır.

Cam yapımında kullanılan bazı hammaddeler oksit formundadır. Örnek olarak SiO_2 , PbO , Al_2O_3 ' i gösterebiliriz. Ancak hammaddelerin hepsi oksit formunda değildir. En çok bilinen formlar karbonlar, nitratlar ve sülfatlardır. Bazı hammaddelerde birden çok oksit de bulunabilir.



3. CAM ERGİME PROSESİ

3.1 Cam Eldesi Prosesi

Hammaddeler doğru oranlarda dikkatlice tartılıp birbiri ile iyice karıştırıldıktan sonra bunlar genellikle fırının arka tarafında yer alan fırın silosuna nakledilir. Bunu izleyen işlem, karıştırılmış hammaddeler fırına beslenir ve dekompozisyon yoluyla oksitlerine dönüşmelerine yetecek sıcaklık derecelerine ısıtılırlar. Böylece önce dekompozisyon, ardından ergime yada daha önceden ergimiş bir başka hammaddenin içinde çözünme yoluyla oksitlerine dönüşürler.

Meydana gelen kimyasal reaksiyonlarda ortaya çıkan gazlar, yüzeye doğru yükselirken; ergimiş camı, bir miktar karıştırarak terk eder. Bütün bu olayların meydana gelmesi yüksek sıcaklık gerektirdiğinden, elde edilen camın işlenebilmesi ve son ürün olarak şekillenebilmesi için soğutulması gerekir. Bu işlemlerden fırın içinde meydana gelenler, cam eldesi olarak tanımlanan prosesdir.

3.2 Harman Prosesi

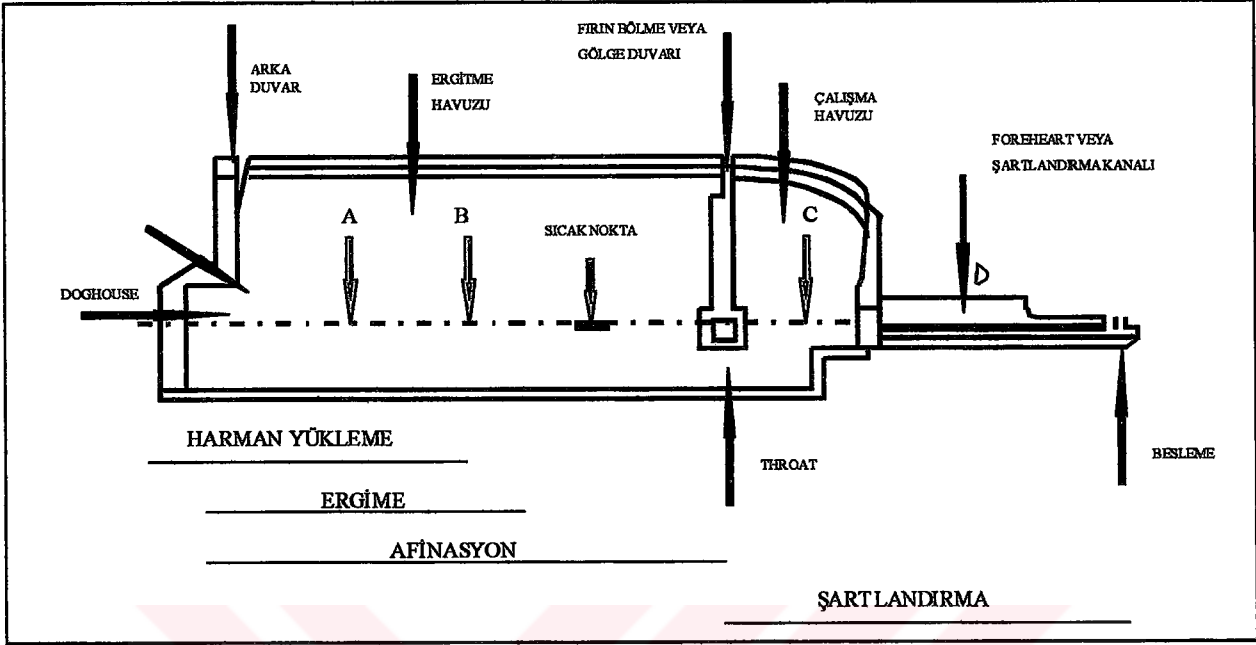
Harman prosesi aşağıdaki aşamalardan oluşur.

- a) Harmanın fırına verilmesi (harman besleme).
- b) Harmanın dekompoze olması, reaksiyona girmesi, ergimesi ve oksitler halinde çözünmesi (ergime).
- c) Habbelerin camdan uzaklaşması ve ayrı ayrı eriyiklerin birbiri ile karışması (afinasyon-arıtma). İki kısımda incelenir.
 - Habbelerin ergimiş camdan uzaklaşması, buna Afinasyon denir.
 - Ergimiş camın karışması, buna Homojenizasyon denir.
- d) Camın doğru bir şekilde çalışma sıcaklığına soğutulması (şartlandırma).

Şekil 3.1'de görülen fırın, Trakya Cam fabrikasında bulunan ve TR1 olarak isimlendirilen düz cam üretiminde kullanılan sürekli bir ertitme fırınının boyuna kesitidir. Burada cam eldesi prosesi aşamalarının nerelerde oluştuğu görülmektedir. Bu fırın tipi, üretilen tüm camların %60'ının elde edildiği fırınların bir örneğidir.

Harman besleme besleme ağzında (doghouse) başlar ve ertitme havuzunun ortasına geirmeden önce tamamlanır. Ergitme, fırının arka duvarından başlar ve sıcak noktanın bulunduğu yerde

tamamlanır. Habbelerden arındırma (afinasyon), fırın arka duvarından başlar ve boğaz (throat) bölgesinde tamamlanır. Şartlandırma boğazda başlar ve şartlandırma kanalında tamamlanır.



Şekil 3.1 TR1 cam fırınının görünüşü

A Bölgesi: Bir miktar harman hala cam yüzeyinde yüzmektedir. Bu nedenle harman besleme işleminin etkisi henüz bitmiş değildir. Ergime reaksiyonları hızlı bir şekilde devam etmektedir, bu reaksiyonlar çeşitli gazların açığa çıkması ve camdan uzaklaşmasına neden olduğundan afinasyonun başladığı söylenebilir.

B Bölgesi: Yüzen harman tabakası artık görülmeyip harman besleme tamamlanmıştır. Fakat halen geriye kalan çözünmemiş hammadde parçacıklarının çözünmesi için ergime işleminin bir süre daha devam etmesi gerekmektedir. Buna rağmen ergime havuzunda geriye kalan önemli iş, afinasyonun tamamlanmasıdır. Böylece ergimiş camdaki habbelerin sayısı kabul edilebilir düşük bir seviyeye inerek camın kimyasal açıdan homojen duruma gelmesi sağlanır.

C Bölgesi: Bu bölgede artık cam, ergimesi ve afinasyonunu tamamlamıştır ve soğumaktadır (şartlanmaktadır) fakat halen şekillendirme prosesi için çok sıcaktır.

D Bölgesi: Cam, şekillendirme aşamasına yaklaşırken şartlandırma bu noktada gerçekten kritik bir hal almaktadır. Sıcaklığın istendiği gibi olması ve sıcaklık farklılıklarının görülmemesi gerekir.

Ergitme havuzu: Fırında hammaddelerin ergitilmek amacıyla ısıtıldıkları ve ergimiş camın afine olduğu kısımdır. Boğazlı bir fırında bu bölge genellikle fırın bölme duvarının olduğu bölgeye kadardır. Bir düz cam fırınında ise bu bölge gölge duvarına kadar uzanır.

Çalışma havuzu: Fırında camın şartlandırılması ve dağıtılması amacıyla yapılmış bir bölümdür.

Şartlandırma kanalı (Foreheart): Şekillendirme işleminden önce çalışma havuzundan gelen camın, şartlandırıldığı kısımdır. Genellikle derin olmayan bir kanal şeklindedir.

Besleme ağzı (Doghouse): İçinden harmanın fırına verildiği kutuya benzer bir kısımdır. Açık veya kapalı olabilir. Açık doghouse harman verici, fırından ayrıdır. Besleme ağzı (doghouse) içindeki cam yüzeyi atmosfere açıktır.

Fırın bölme duvarı: Fırının ergitme havuzu ile çalışma havuzu arasında bir köprü veya seperasyon oluşturan bölümdür.

Boğaz (Throat): Bir cam fırınında ergitme havuzu ile çalışma havuzunu dipten birleştiren bir kanaldır.

Fırın arka duvarı: Genellikle harmanın beslendiği bölümdeki duvardır.

Sıcak nokta: Cam fırınında en yüksek sıcaklığın olduğu yerdir. Burada aynı zamanda ergitme havuzundaki tüm cam akımları yüzeye doğru yükselir. Bu nokta yaklaşık olarak fırın arka duvarından ileriye doğru ergitme havuzunun tam boyunun %70 kadarlık bir mesafede oluşur. Bu uzaklık fırın çekişi arttıkça artar.

Kemer: Fırının üst kısmını teşkil eden bölümdür. Genellikle sürekli bir ark biçimindedir.

Fırın tabanı: Üzerinde cam bulunan ve fırının oturma yüzeyini oluşturan kısımdır veya pota fırınlarında üzerinde potaların oturduğu yüzeydir.

Port: Fırında yakıt, alev veya havasının girdiği veya baca gazlarının çıkış yaptığı açıklıktır.

Gölge duvarı: Fırın bölme duvarının üzerine inşa edilen veya kemerden asılı durumda bulunan, fonksiyonu ısıtma havuzundan çalışma havuzuna fazla ısının geçişini engellemek olan bir duvardır.

3.3 Camın Ergitilmesi

Camın ergitilmesi prosesinde harmanların birbirleriyle belli oranlarda karıştırıldıktan sonra, belli sıcaklık şartları altında yakıtın yanmasıyla açığa çıkan kimyasal reaksiyonların bir sonucu olmaktadır. Proses esnasında aşağıda belirtilen birtakım olaylar meydana gelmektedir..

Harmana ısı transferi: Alevin sıcaklığı, fırın üst yapısı, harman kümecikleri ve ergimiş camdan daha fazladır. Bu nedenle ısı transferi bu bölgelerde konveksiyon ile gerçekleşir. Alevden ısı geçişi temel olarak radyasyon yolu ile olur. Benzer biçimde baca gazlarının da sıcaklığı çevreden daha yüksek olduğu için ısı geçişi yine aynı yolla yapılır. Cam seviyesinin altında ısı harman kümelerinin alt tarafına ergimiş camdan radyasyon, kondüksiyon ve konveksiyon yolu ile geçer.

Ergimiş cama ısı transferi: Isı, cama afinyasyon bölgesinin üstünde diğer bir ifade ile fırında cam yüzeyinin harman adacıkları ve harman köpüğünden arınmış kısmından iletir. Bu kısım en az fırının ısıtma bölümü uzunluğunun %20 ile %40' ı kadardır.

Isı cama başta radyasyon yolu ile olmak üzere cam yüzeyinden baca gazları ve üst yapıdan iletir. Cam yüzeyinden giren ısı cam kütlesi içinde dahili radyasyon, kondüksiyon ve konveksiyon yolu ile iletir. Elektrikli fırınlarda ısı direkt olarak cam kütlesinin içinden iletir. Elektrikli fırınlarda karbon, mobilden ve kalayoksitten yapılmış elektrotlar, ergimiş cama batmış durumdadır ve aralarından kontrollü bir akım geçirilir.

3.4 Cam Afinyasyonu

Afine prosesi, cam ergitilmesinin en önemli unsurlarından biridir. Bu prosesde, ergitilmiş camdaki gazlar atılmalı, ergimiş cam homojenleştirilmelidir. Burada, bir saat kadar süreye ihtiyaç vardır. Afine bölgesinde alttan sağlanan enerji ihtiyacı, bloktan olan ısı kayıplarını karşılaması ve harmanın ergitilmesinin tamamlanması amacıyla gerekli istenen seviyeye ulaşması için cam yüzeyi temiz tutulmalıdır. Harman artıklarının afine bölgesine ulaşması ve afinyasyon

bölgesinde bir termal bariyer ile şartlandırma bölgesi oluşması için belli bir süre belirli bir sıcaklıkta kalınması gerekir.

Harmanın reaksiyona girmesi ve ergimiş camın oluşması için, sıcaklığın yeterli yüksekliğe çıkarılması gerekir. Reaksiyon sonucu oluşan gazlar, ergimiş camın içinden yükselir ve cam yüzeyini terkeder. Cam, mamul hale getirilme aşamasında, şekillendirilebilmesi için gereken sıcaklığa soğutulur. Camın içinde, kabarcık şeklinde herhangi bir gaz kalmasına habbe denir. Afinyasyon, cam hazırlama prosesinde ergime aşamasında camın gaz kabarcıklarından temizlenmesi ve kimyasal açıdan homojen hale gelmesidir.

Habbeler, harman tanecikleri arasındaki havadan, harman reaksiyonlarından, hammadde ayrışmasından kaynaklanır ve çeşitli reaksiyonlardan çıkan gazları içerir. Örnek olarak karbonatlar karbondioksit, hidratlar su verirler. Normalde CO₂ en yüksek yüzdeye sahiptir. Çünkü karbonlar, en çok kullanılan gaz çıkartıcı harman maddeleridir. Ayrıca havadan gelen O₂ ve N₂' da vardır.

Sıcaklığın artması camın viskozitesini düşürür ve konveksiyon akımlarını kuvvetlendirir. Ayrıca içlerindeki gazın genişmesi nedeniyle gaz habbelerinin büyüklüğü artar. Bu etkileri nedeniyle habbelerin yükselme hızları artar.

Boğaz'ın (throat) görevleri: Throat, afinyasyona yardımcı olan iki amaca hizmet eder. Birincisi enine kesit alanı fırın alanından çok daha küçük olduğundan, ergitme havuzundan gelen cam akımları çalışma havuzuna doğru geçerken birbirine yaklaşmaya zorlar.

Boğaz (throat) öncesi cam akımlarının yaklaşarak birbirini sıkıştırmaları homojenizasyon olayına yardımcı olur. Boğazdan geçiş hızı nedeniyle boğaz bölümünde hiç yada çok az karışma meydana gelir.

3.5 Camın Şartlandırılması

Ergitmenin ve afinyasyonun başarılı bir şekilde gerçekleşebilmesi bakımından camın üretim için çok yüksek olan bir sıcaklığa kadar ısıtılması gerekir. Bu nedenle üretim prosesleri için uygun olan sıcaklığa kadar uniform olarak soğutulmalıdır.

Şartlandırma, camın başarılı ve verimli bir düzeyde şekillendirilmesi için uygun olan sıcaklığa kadar uniform olarak soğutulmasıdır. Sürekli bir tank fırınında şartlandırmanın tümü çalışma havuzunda gerçekleşir. Son şartlandırma; şartlandırma kanalı (forehearth) veya çalışma havuzu ile bağlantıyı sağlayan diğer tipteki bağlantı yapıları içinde gerçekleşir.

Çalışma havuzu: Tank fırınlarında camın şartlandırılması veya mekanik prosesleri için camın kanallara dağıtımından önce kısmen şartlandırılması için kullanılan alandır.

Şartlandırma kanalı (Foreheart): Dar bir kanaldır. Çalışma havuzu ile üretim makinaları arasında yer alır. 1. Fırın çalışma havuzuna dört foreheart, 2. Fırın çalışma havuzuna ise iki forehearth bağlıdır. Belli bir sıcaklık için ısıtma yapılmaktadır. Son şartlandırma burada gerçekleşir.

Şekillendirme kanalı (Feeder): Şartlandırılmış camın şekillendirme prosesine kontrollü bir şekilde verilmesini sağlayan sistemdir. Feeder şartlandırma prosesinin son bulunduğu en uç noktaya yerleşmiştir. Burası da forehearth' in sonudur.

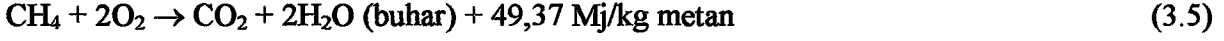
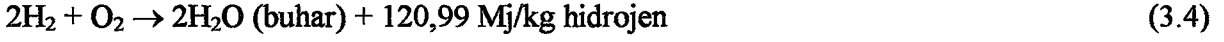
3.6 Yanma

Cam fırınlarında yakıt olarak fuel-oil ve doğalgaz kullanılmaktadır. Özellikle doğalgazın daha ucuz ve daha verimli bir yakıt olmasından dolayı sürekli fırınlarda daha sık kullanıldığı görülmektedir.

Buna göre yanma olayının kimyası incelendiğinde;

Yanma reaksiyonunda serbest hale geçen ısı miktarı:





Net kalorifik değer üzerinden aynı bek blokları kullanılarak yakıldığında doğal gazı fuel-oil ile karşılaştırırsak %5-10 oranında daha fazla kullanmak gerekir. Hava gazı kullanıldığında ise bu fazlalık %15-20 seviyesindedir.

Teorik ve aşırı hava: 1m^3 gaz veya 1lt petrolün tam ve mükemmel yanmasını sağlamak için gereken hava miktarı teorik hava miktarıdır. Pratikte, yanmanın fırın odasında tamamlanmasını sağlamak için her zaman fazla hava kullanılır. Karbon, yeterli oksijen olmaksızın yanarsa karbonmonoksit'e dönüşür ve tam bir yanmada açığa çıkan ısının ancak %30'u elde edilebilir. Eğer az hava kullanılırsa yanma tamamlanmaz. Çok fazla hava kullanılırsa da atık gaz hacmi artar ve alev sıcaklığı düşer. Her ikisinde de yakıt tüketimi artar. Yakıtın yanması için ihtiyaç duyulan hava fazlalığı, fırın üst yüzeyi ve rejenaratör kontrol sistemi arasındaki atık gazların ihtiva ettiği oksijen ölçümü ile yapılır.

Gaz yakıtlar: Gaz yakıtları etkileyen başlıca faktörler; gazın hızı, yanma gazlarının emisivitesi, sıcaklık olarak sıralayabiliriz. Gaz yakıtların emisivitesi düşüktür (0,1-0,2 düzeyinde). Ancak alev sıcaklığı $1900\text{ }^\circ\text{C}$ 'yi bulur.

Sıvı yakıtlar : Sıvı yakıtlarda püskürtme oldukça önemlidir. Emisivite, yanma hızı ve hava ile karışmaya bağlıdır.

Isı transferi: Fırın içindeki alev, ısıyı harmana, cama ve fırın içine konveksiyon ve radyasyon yolu ile iletir. Yüksek sıcaklıklarda, radyasyon konveksiyondan çok daha önemlidir. Cama ve fırının içine iletilen ısı alev sıcaklığına çok daha fazla bağlıdır.

Alev sıcaklığına ön ısıtmanın etkisi: Yakma havası ön ısıtmadan geçirilirse alev sıcaklığında artış meydana gelir. (Çizelge 3.1) ön ısıtma aralıkları 0°C ile 1250°C arasında değişen üç temel

yakıtın teorik alev sıcaklıklarını göstermektedir. Maksimum alev sıcaklığı teoriktir. Pratikte alev sürekli çevresine ısı verdiği için bu sıcaklığa erişmek mümkün değildir. Maksimum teorik alev sıcaklığı Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Çeşitli sıcaklıklarda ön ısıtılmış hava ile ulaşılabilecek maksimum alev sıcaklığı

Yakıt	Sıcaklık °C					
	Yok	250	500	750	1000	1250
Ön Isıtma	Yok	250	500	750	1000	1250
Doğal Gaz	1990	2110	2240	2390	2520	2660
Fuel-oil	2150	2260	2410	2550	2680	2800
Hava Gazı	1950	2080	2200	2340	2470	2590

Teorik alev sıcaklığı, ön ısıtma ile elde edilen hava sıcaklığının yarısı kadar artar. Yakma havası 600°C ısıtılırsa, alev sıcaklığı 300°C artar. Ön ısıtılan yakma havası kullanmanın avantajları şunlardır:

- Alev sıcaklığındaki artış, ısı transferinde artışla sonuçlanır.
- Yakma için ihtiyaç duyulan aşırı hava miktarında azalma olur.
- Atık gazlardan kazamılan ısı, yakma havasının ısıtılmasında kullanılır. Böylece ısının fırına geri dönüşü sağlanır.

Yüksek çekişli cam fırınlarında ihtiyaç duyulan yüksek sıcaklıktaki alevin üretilmesi için ısıtılmış hava kullanılması gerekmektedir.

Fazla havanın etkisi: Çok fazla hava kullanımı sonucu alev sıcaklığı düşer. Daha soğuk alevden radyasyon yolu ile gerçekleşen ısı transferindeki azalma, sıcaklığın dördüncü kuvveti olarak büyüyerek ortaya çıkar.

Oksijen ile zenginleştirme: Fırın çekişini arttırmanın veya rejenaratör örgülerindeki blokaj veya çökmeyi engellemenin bir yolu oksijen zenginleştirme yöntemidir. Yakma havasının bir kısmının veya tamamının oksijenle değiştirilmesi sonucu iki olay meydana gelir

- Alev sıcaklığı arttırılır.

- Sistemdeki azot çok daha az olduğundan yanma ürünlerinde ısıyı taşıyacak atık gaz miktarı çok daha az olur.



4. REFRAKTERLER (FIRIN YAN DUVAR TUĞLALARI)

Refrakter, yüksek ısıya ve kimyasal etkilere dayanıklı malzemelerdir. Bir fırın yapısındaki refrakter malzemeler, yüksek sıcaklıklarda mekanik olarak dayanıklı, aşınmalara karşı dirençli, cam ve fırın gazları ile temas halinde olan kararlı malzemeler veya bu malzemelerden hazırlanmış ürünlerdir. Ayrıca ısı ve elektrik iletkenliklerine sahip olmaları gerekir. Refrakter yapımında kullanılacak malzemelerin seçiminde dikkate alınacak en önemli faktör, malzemenin yüksek ergime noktasına sahip olmasıdır. Bu nedenle refrakter ürünlerinde çoğunlukla oksitler kullanılır. Bunların başlıcaları; Alümina (Al_2O_3), Kromoksit (Cr_2O_3), Kromit ($FeO.Cr_2O_3$), Kireç (CaO), Magnezit (MgO), Silis (SiO_2), Zirkonyumdioksit (ZrO_2)' dir.

Refrakter seçimi: Refrakter kullanımı cam ve fırın çekişine göre değişir. Örneğin, soda-kireç-silis camının ergitildiği kısa ömürlü bir fırında ergitme bölümü yan duvarları sillimanit'den yapılırken uzun ömürlü bir fırın için ergimiş AZS(Alüminazirkonyasilika) kullanılır. Düşük çekişli borosilikat fırınının ergitme kemeri için silis kullanılırken yüksek çekiş için mullit tercih edilir.

Silis: Fırın ana kemeri ve alın duvarı, çalışma bölgesi üst yapısında kullanılır.

Ateş Tuğlası: Fırın taban izolasyonu, baca duvarları ve alt rejeneratör sıcak yüzeylerinde veya üst rejeneratör duvarlarındaki krom-magnezitlerin arkasında kullanılır.

Sillimanit: Soda-kireç-silis fırınlarında AZS yan bloklarının arka bloğu, çalışma bölgesi yan blokları, taban altlıkları, fırın bölme duvarı örtüsü, feeder kanalları, üst yapıda kullanılır.

Mullite: Soda-kireç-silis fırınlarının arka duvarlarında, doghouse kemerlerinin üstünde, portlarda, rejeneratör kemerlerinde, duvarların üst kısmında, feeder kanallarında, bek bloklarında kullanılır.

Zirkon: Fırın taban kaplamasında, fırın üst yapısında AZS ile silis arasında tampon sıra olarak kullanılır.

Ergimiş AZS: Soda-kireç-silis fırınlarında ergitme bölgesi yan duvarları, taban kaplaması, üst yapıda, doghouse kemerlerinde, throatlarda, elektrod ve bubbler blokajlarında, baraj duvarlarında, port ağızlarında, bek bloklarında kullanılır.

Krom-magnezit: Portların ikinci bölgelerinde, rejenaratör duvarlarında, kemerlerde kullanılır.



5. BİR DÜZ CAM ÜRETİM FIRINININ ISI HESAPLAMALARI

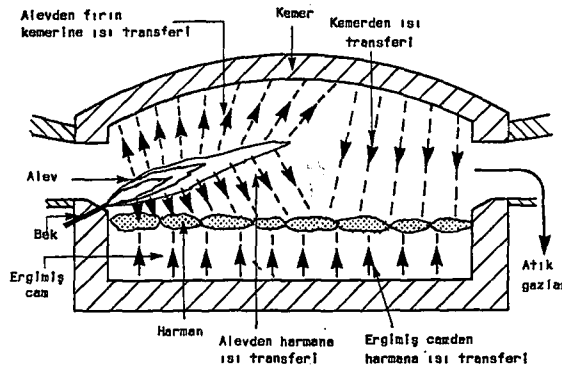
5.1 Fırın İçindeki Isı Transfer Şekilleri ve Akım Olayları

Isı enerji dengesinin hesaplanmasındaki amaç, eritme fırını içine; hava ile belli bir karışım oranında giren yakıtın; camın üretimi için kullanılan hammaddelerle reaksiyona girmesi sonucu, meydana gelen ısı enerji miktarının belirlenmesidir. Açığa çıkan bu ısı enerjisinin ne kadarlık bir bölümünün camın eritilmesi işleminde kullanıldığı ve bu arada fırın içinde meydana gelen ısı kayıplarının türünü ve yüzdesel olarak oranını belirlemektir.

Isıtma prosesi üç aşamalı bir süreçtir.

- Isı verimli bir yanma ile üretilmelidir.
- Üretilen ısı mümkün olduğu kadar, verimli bir şekilde ısı absorblayan yüzeylere iletilmelidir.
- Faydalı iş yapabilmek için ısı fırın içinde tutulmalıdır.

Doğalgaz veya fuel oil kullanılan fırınlarda ısı kaynağı alevdir. Alev, harman ve erimiş camın üstünde fırın kemerinin altındadır. Alevin sıcaklığı, fırın üst yapısı, harman kümecikleri ve erimiş camdan daha fazladır. Bu nedenle ısı bu bölgelere radyasyon ve konveksiyon yolu ile iletilir. Alevden ısı transferi esasta radyasyon yolu ile olur. Konveksiyon ile ısı iletimi sadece alev harmana geçtiğinde meydana gelir.



Şekil 5.1 TR1 fırınında ısı transferi

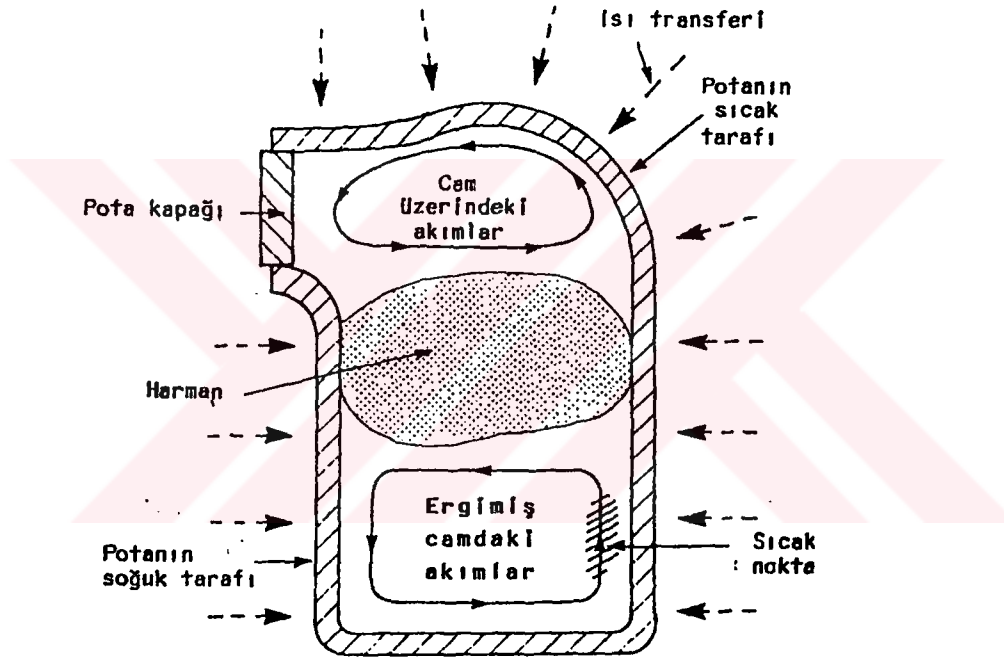
Benzer biçimde baca gazlarının da sıcaklığı çevre sıcaklığından daha yüksek olduğu için ısı transferi aynı yollar ile gerçekleşir. Cam seviyesinin altında ısı harman kümelerinin alt tarafına erimiş camdan radyasyon, kondüksiyon ve konveksiyon yolu ile geçer. Ergimiş cam üzerindeki harman örtüsünün ısıtılması oldukça güçtür. Çünkü harman ısıyı iyi iletmez. Isı,

sıcak noktanın bulunduğu yerde yüzeydeki sıcak ve ince cam tabakasının ergimemiş harman örtüsünün altına doğru ilerlemesi halinde daha kolay iletilebilir.

Cam fırınlarında ısı ergimiş cama iki yolla geçer.

- 1) cam seviyesi üstünden
- 2) direkt olarak cam kütlelerinin içinden

Harmana ise ısı transferi; cam seviyesinin üstünde radyasyon ve konveksiyon ile cam seviyesinin altında ise radyasyon, kondüksiyon ve konveksiyonla iletilmektedir.



Şekil 5.2 Harmana ısı transferi

Isı, cama afinyasyon bölgesinin üstünde diğer bir ifade ile fırında cam yüzeyinin harman adacıkları ve harman köpüğünden arınmış kısmından iletilir. Bu kısım en az fırının ergitme bölümü uzunluğunun %20 ile %40' ı kadardır. Isı cama başta radyasyon yolu ile olmak üzere cam yüzeyinden baca gazları ve üst yapıdan iletilir. Cam yüzeyinden giren ısı cam kütleleri içinde dahili radyasyon, kondüksiyon ve bir miktar konveksiyon yolu ile iletilir.

Konveksiyon ile ısı transferinde alev hemen hemen cam yüzeyi veya fırının iç kısmı ile temas halindedir. Diğer taraftan radyasyon, boş hacim boyunca ilerler ve fırın içindeki herhangi bir noktaya ısıyı iletilebilmektedir.

Cama konveksiyon ile iletilen ısı, alev ve cam sıcaklıkları arasındaki fark ile orantılıdır. Yüksek sıcaklıklarda , radyasyon konveksiyondan çok daha önemlidir. Cama ve fırının içine iletilen ısı alev sıcaklığına çok daha fazla bağlıdır. Genellikle fırın içinde iki tip konveksiyon akımı olduğu kabul edilir. Fırın genişliği boyunca enine ve fırın uzunluğu boyunca oluşan boyuna akımlardır. Cam yüzeyinde ise bu akımların her ikisinde sıcak noktadan daha soğuk noktalara doğru gerçekleşir.

5.2 Trakya Cam Fabrikasında Bulunan TR1 Fırınının Teknik Özellikleri

Trakya Cam sanayii fabrikasında düz cam üretimi yapmak için 2 adet ergitme fırını tesis edilmiştir. TR1 fırınının günlük düz cam üretim kapasitesi 700 ton/gün, TR2 fırınının günlük düz cam üretim kapasitesi ise yaklaşık olarak 600 ton/gün'dür. Isı hesaplarının analizi TR1 fırının üzerinde yapılacaktır. Buna göre TR1 fırınının teknik özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

- 1)Fırındaki işlem sırası: ergitme, şekil öncesi şartlar, hızlı soğutma, kalınlık ayarı, tavlama tüneline gerilim ayarıdır.
- 2)Fırında besleme ağızı (doghouse) mevcuttur, yandan ateşlemelidir, 6 portludur, fırında molibden elektrodlu elektrik ısıtması vardır.
- 3)Camın çekiş hızı 550 m/h'dır.
- 4)Her port için iki tane bek var. 6*2*2 (sağ-sol)
- 5)Fırındaki günlük cam kapasitesi 700 ton/gün'dür.
- 6)Fırındaki cam yüksekliği 116 cm'dir.
- 7)Fırındaki hacimsel olarak hava yakıt oranı 10.75'dir.
- 8)Fırın yan duvarlarında cam seviyesindeki dalgalanmanın aşındırıcı etkisi yüzünden hava ve su soğutması yapılmaktadır. Su soğutması daha sıcak bölgelere uygulanmaktadır. Su giriş sıcaklığı 26 °C çıkış sıcaklığı 36 °C 'dır.
- 9)Yüksek basınç fanları yan blokların korunması için alevli kısımları soğutuyor. Fan debisi 220.000 m³/h, basıncı ise 888 mmSS'dır.
- 10)Fırın ergitme basıncı (+) 35 mmSS'dır.
- 11)Alçak basınç fanlarının debisi 125.000 m³/h, basıncı 162 mmSS, motor gücü 66 kW'dır. Fanların biri çalışır durumda iken diğeri yedek olarak tutulmaktadır.
- 12)Fırında kullanılan yakıt miktarı (doğalgaz) 105000 Nm³/ gün'dür.
- 13)Fırında 1400°C- 1425°C'e çıkılmasının sebebi afinasyon (habbeden arındırma) işlemini kolaylaştırmaktır. Bu sıcaklık kemerden radyasyon pirometresi ile ölçülmektedir.

14) Baca gazlarından yararlanmak amacıyla rejeneratör (atık ısı geri kazanım sistemi) bulunmaktadır.

5.3 TR1 Fırınının Enerji Dengesinin Çıkartılması

Bir cam fırınında yakılan her birim yakıttan elde edilen enerjinin kullanım yerlerine göre dağılımı aşağıda verildiği biçimde özetlenebilir.

- 1) Enerjinin önemli bir bölümü hammaddeleri ergitmeye ve camın sıcaklığını arttırmaya harcanır.
- 2) Bir kısmı, eğer yakıt tam yanmamış ise fırın atık gazları içinde kimyasal enerji formunda saklı kalır.
- 3) Bir kısmı, fırını cam sıcaklığında veya camdan daha yüksek sıcaklıkta tutmaya harcanır ve fırını yapısal ısı kayıpları şeklinde terk eder.
- 4) Bir kısmı, fırın yanma odasını yüksek sıcaklıktaki yanma ürünleri şeklinde terk eder.
- 5) Bir kısmı da radyasyon ve fırındaki diğer açıklıklar aracılığı ile fırını terk eder.

Bu sonuçlar doğrultusunda TR1 fırınının enerji denge şeması çıkartılmıştır (Şekil 5.3). Bu şemada fırına giren ve çıkan enerjiler gösterilmektedir. Giren enerjiler; yakıtın yanma enerjisi, ön ısıtılmış havanın enerjisi ve fırına baca gazlarından geri döndürülen enerjidir. Çıkan enerjiler ise; camın eritilmesi için gerekli olan enerji, fırın duvarlarından radyasyon ve konveksiyonla kaybolan enerji, rejeneratör yapısından kaybolan enerji ve bacadan atılan atık gazların enerjisi olmaktadır. Bu enerji denge şemasından yararlanarak 1 kg cam üretimi için gerekli olan enerji miktarları hesaplanabilmektedir.

Fırın sisteminin ısı performansını arttırabilmenin en etkin yolu, fırının enerji dengesini oluşturarak gerekli analizlerin yapılması ve buna göre çeşitli önlemlerin alınmasıdır. Burada da TR1 fırın sisteminin ısı enerji dengesi oluşturulmasında bilinmesi gerekli olan temel hesaplama yönteminin verilmesi amaçlanmıştır.

Bir sistemin enerji dengesi kurulurken öncelikle sistem sınırlarının bilinmesi gerekir. Daha sonra sistem sınırlarından sisteme giren veya sistemden çıkan gaz ve kütle debilerinin belirlenmesi gerekir. Fırını bir sistem olarak ele aldığımızda, enerji dengesi için çok sayıda ölçüm ve analize gerek duyulur.

Şekil 5.3’de TR1 fırınının enerji akış diyagramını görebiliriz.

Q_F = Yakıt enerjisi

Q_A =Ön ısıtılmış havanın enerjisi

Q_G =Cama geçen enerji

Q_R =Fırın yapısından kaybolan enerji

Q_W =Yanmış gazlarla ayrılan enerji

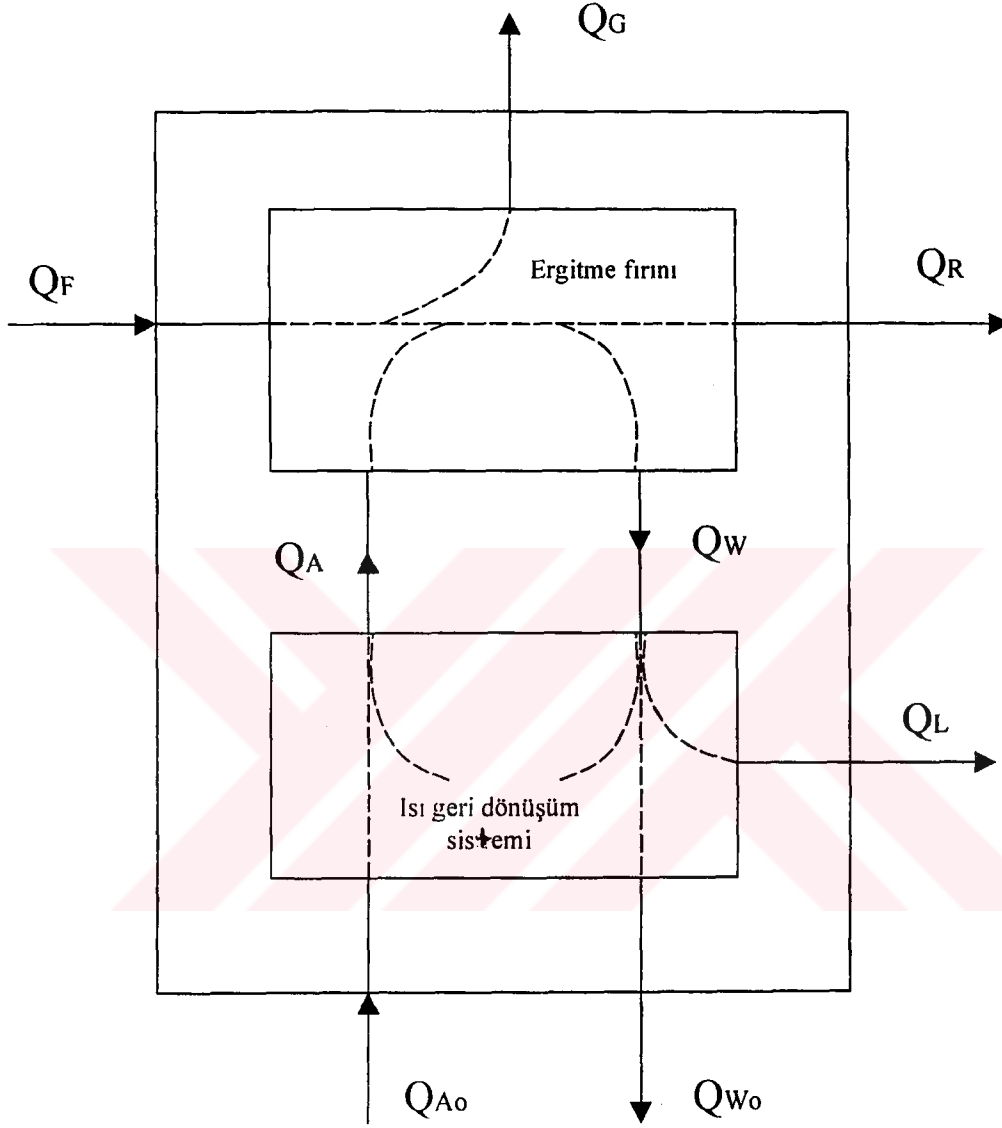
Q_L =Isı geri dönüşüm sistemi yapısından kaybolan enerji

Q_{W0} =Sistemden atık gazla dışarı atılan enerji

Q_{A0} =Isı geri dönüşüm sistemine giren enerji

Isı geri dönüşümü içeren bir sistemde üç temel ısı dengesinden bahsedilir. Bu şekil 5.3’de gösterilmiştir.





Şekil 5.3 TR1 fırını enerji dengesi
(Sismey 1983)

1. Ergitme fırını için

$$Q_F + Q_A = Q_G + Q_R + Q_W$$

(Sismey 1983)

2. Isı geri dönüşüm sistemi için

$$Q_W + Q_{A0} = Q_A + Q_L + Q_{W0}$$

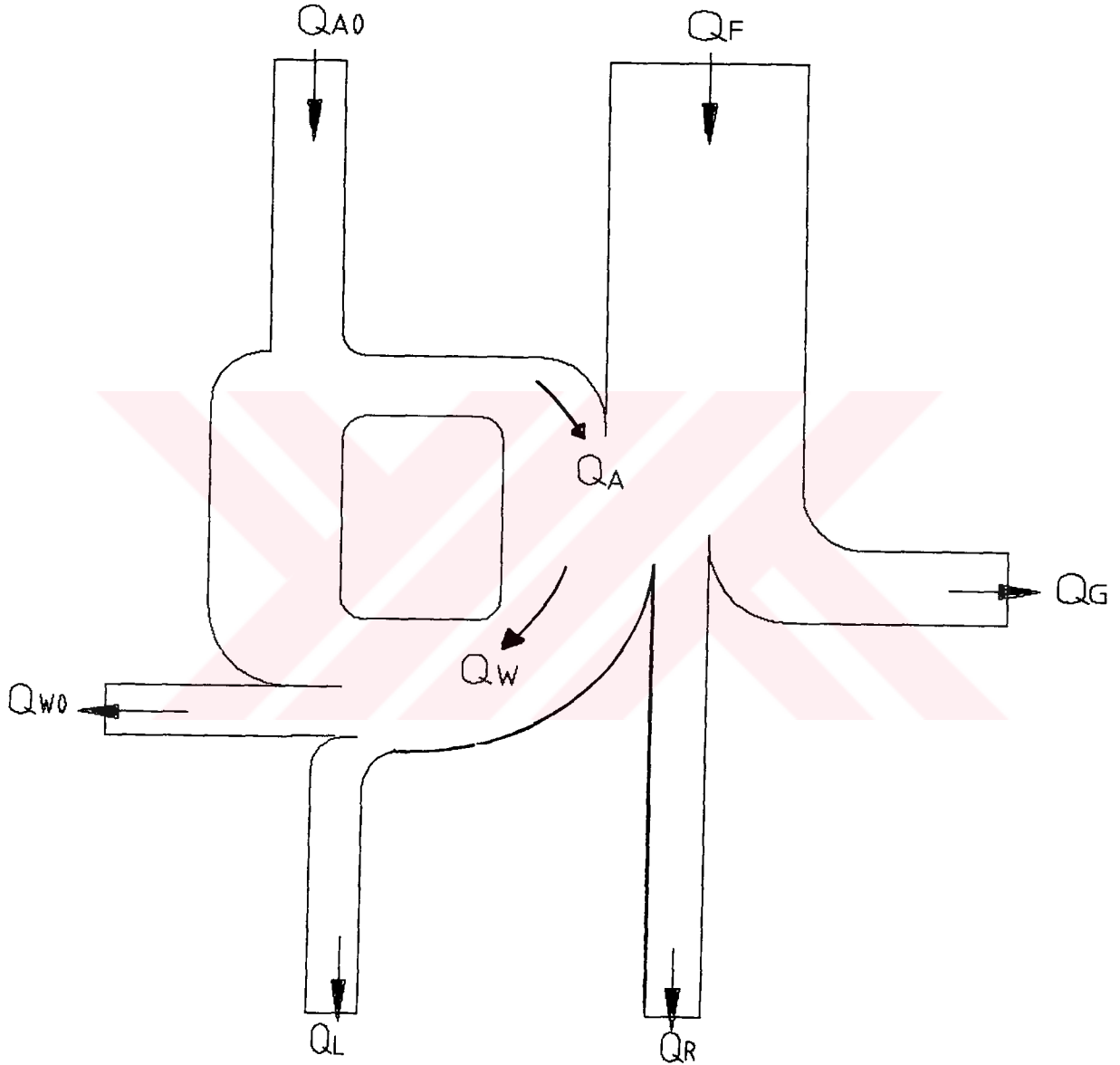
(Sismey 1983)

3. Bütün sistem için

$$Q_F + Q_{A0} = Q_G + Q_R + Q_L + Q_{W0}$$

(Sismey 1983)

Yukarıda elde edilen enerji dengesi, yakıt; hava ve harman malzemelerinden oluşan üç ana girdinin termodinamik hesaplarını, tek bir eşitliğe indirir ve bu eşitlik Şekil 5.4'de Sankey diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Fırın sisteminde Sankey diyagramı

Yakıtın kalorifik değeri, cam ve hammaddelerin spesifik ısısı, yakıt ve havanın reaksiyon ısısı fırın sistemi üzerinde belirleyicidir. Benzer olarak fırın sisteminden geri alınabilen enerji miktarı camın özellikleri, ısı kapasite ve termal konduktivite gibi yapının termodinamik özellikleri de fırın sisteminden kaybolan yada fırın sisteminde tutulabilen enerji miktarı üzerinde belirleyicidir.

Bir cam fırınının performansı ile ilgili olarak değişik etkenlik tarifi yapılabilir. Bu tarifler sırasıyla şöyledir.

$$\text{Fırın Etkenliği} \quad \eta = (E_B + H_G - H_A) / E_B = (Q_G + Q_r) / E_B \quad (5.1)$$

$$\text{Yanma Hacmi Etkenliği} \quad \eta_f = (E_B + H_G - H_A) / (E_B + H_G) = (Q_G + Q_r) / (E_B + H_G) \quad (5.2)$$

$$\text{Faydalı Isı Oranı} \quad \eta_f = (E_B + H_G) - (H_A + Q_r) = Q_G / (E_B + H_G) \quad (5.3)$$

$$\text{Yakıt Enerjisi Kullanım Oranı} \quad \eta_f = Q_G / E_B \quad (5.4)$$

Burada;

E_B = Fırına beslenen yakıt enerjisi

H_G = Toplam yakma havasının duyulur ısı enerjisi

H_A = Fırını terk eden atık gazların duyulur ısı enerjisi

Q_r = Fırın duvarlarından çevreye olan kayıp ısı enerjisi

Q_G = Fırın içinde ergimiş cama geçen ısı enerjisi

Buna göre ergitme fırınlarının enerji dengesini hesaplarırken daha basit bir yöntem ile;

$$\text{Giren enerji} + \text{Üretilen enerji} = \text{Çıkan enerji} + \text{Sistem bünyesinde depo edilen enerji} \quad (5.5)$$

olarak analiz yapmak mümkündür.

5.4 Trakya Cam Fabrikasında Bulunan TR1 Fırını Isı Dengesinin Sayısal Hesabı

Aşağıda TR1 fırınına giren ve çıkan tüm enerjilerin sayısal hesabı yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar çizelge 5.13' de belirtilmiştir.

Yer yer çeşitli kabüller yapılmış olup, bunun için daha önceden, bu amaçla hazırlanmış olan fırın enerji denge şemalarından yararlanılmıştır.

5.4.1 YAKIT ENERJİSİ (Q_F)

Isı transferi üzerinde;

- Fırın yanma hacmi yükü
- Fırın malzeme yükü (tonajı)
- Isı akışı yoğunluğu

gibi parametreler etkin rol oynamaktadır.

Fırın yanma hacmi yükü, birim yanma hacmi başına fırına beslenen yakıt enerjisi olarak ifade edilir.

Yakıt-hava karışımının ideal olarak sağlanamamasından dolayı yanma olayının stokiyometrik olarak tamamlanması mümkün değildir. Bu yüzden teorik olarak gerekli oksijenin bir miktar fazlası gerekmektedir. Bu miktardan daha fazla oksijenin (veya havanın) alev sıcaklığının düşmesine neden olmasının yanında atık gaz miktarını arttıracığından enerji kaybını artırır.

Yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısı, yakıtın alt ısıl değerine göre belirlenir. Sıvı yakıtlarda yaklaşık bir değer olarak yakıtın elementel analizinden de hesaplanabilir. Elementel analizi – ağırlık oranı olarak- C (karbon), H (hidrojen), O (oksijen) ve S (kükürt) şeklinde verilen bir yakıtta alt ısıl değer;

$$H_u = 8100C + 34000[H - O/8] + 2500S \text{ (kcal/kg)}$$

Buna göre yanma ısısı;

$$Q_y = H_u m_y$$

Burada;

Q_y : Yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısı; kcal/h

H_u : Yakıtın alt ısıl değeri, kcal/kg

m_y : Yakıtın debisi, kg/h

C : Yakıttaki C oranı

H : Yakıttaki H oranı

O : Yakıttaki O oranı

S : Yakıttaki S oranı

5.4.1.1 TR1 Fırını Yakıt Enerjisi Hesabı (Q_F)

Buna göre TR1 fırınında kullanılan yakıtın açığa çıkardığı enerji aşağıda hesaplanmıştır.

Bilinen değerler

$V_{air} = 44900 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (TR1 fırınında kullanılan havanın debisi)

$V_{gas} = 4375 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (kullanılan doğalgaz debisi)

$V_{air}/V_{gas} = 44900 / 4375 = 10.26$ (Hava-yakıt oranı)

Normal şartlar altında teorik yanma miktarı (Stokiyometrik yanma) = 9.52'dir.

Hava giriş sıcaklığı $991 \text{ }^\circ\text{C}$ (1264 K)

Doğal gaz giriş sıcaklığı $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (283 K)

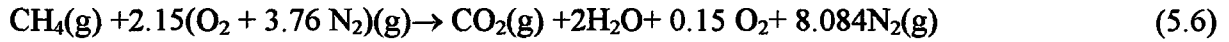
Baca gazı sıcaklığı $1520 \text{ }^\circ\text{C}$ (1793 K) olarak ölçülmüştür.

Teorik (tam) yanma için gerekli minimum hava miktarına teorik hava miktarı denir. Yanmanın tamamlanabilmesi için teorik hava miktarından daha fazla hava kullanılır. Gerçek hava miktarı belirtilirken, teorik havanın yüzdesi ile hava fazlalık katsayısı (Ψ) ifade edilir.

$\Psi = (\text{Gerçek hava miktarı} / \text{Teorik hava miktarı})$

$\Psi = 10.26/9.52 = \%107.5$ olarak hesap edilir.

$\%107.5$ hava ile kullanılan doğalgaz reaksiyona girdiği takdirde; meydana gelen yanma denklemi



Buna göre yakıtın tam ve mükemmel yanabilmesi için gerekli olan üst ısıl değerinin gösterilişi aşağıdaki şekilde olmaktadır.

$$H_U = h_0 \text{ CH}_4(\text{g}) = h_0 \text{ CO}_2(\text{g}) + \Delta h \text{ CO}_2 + 2h_0 \text{ H}_2\text{O}(\text{g}) + 2\Delta h \text{ H}_2\text{O} + 0.15\Delta h \text{ O}_2 + 8.084 \Delta h \text{ N}_2 \quad (5.7)$$

Denklemdaki gazların oluşum ısıları sırası ile

$h_0 \text{ CO}_2(\text{g}) = -393 \text{ 522 kJ/kmol}$ (Öztürk ve Kılıç, 1993)

$h_0 \text{ H}_2\text{O}(\text{g}) = -241 \text{ 827 kJ/kmol}$ (Öztürk ve Kılıç, 1993)

$h_0 \text{ CH}_4(\text{g}) = -74 \text{ 873 kJ/kmol}$ (Öztürk ve Kılıç, 1993)

Oluşum ısıları (5.7) denkleminde yerine konulursa

$$-74\,873 = -393\,522 + \Delta h_{\text{CO}_2} + (2)(-241\,827) + 2\Delta h_{\text{H}_2\text{O}} + 0.15\Delta h_{\text{O}_2} + 8.084\Delta h_{\text{N}_2}$$

$$802\,303 \text{ kJ/kmol} = \Delta h_{\text{CO}_2} + 2\Delta h_{\text{H}_2\text{O}} + 0.15\Delta h_{\text{O}_2} + 8.084\Delta h_{\text{N}_2}$$

Kimyasal tepkime sonucunda açığa çıkan tepkime ısılarının toplamı $\sum \Delta h = 802\,303 \text{ kJ/kmol}$ 'dır.
(molar yanma ısısı)

1 mol hava-yakıt karışımı 22.4 lt ise

$V_{\text{gas}} = 4375 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (kullanılan dogalgaz debisi) olduğuna göre

$$4375 / 22.4 = 195.31 \text{ kmol/h (Tam ve mükemmel yanma şartları altında)}$$

$$802\,303 \text{ kJ/kmol} * 195.31 \text{ kmol/h} = 156\,700\,000 \text{ kJ/h} = 156.7 * 10^6 \text{ kJ/h}$$

$Q_F = 156.7 * 10^6 \text{ kJ/h}$ (TR1 fırını yakıt enerjisi) olarak hesaplanmıştır.

5.4.2 Fırın Duvarlarından Kaybolan Enerji(Q_R)

Fırın içinde yapılan en önemli hesaplamalardan biri de duvarlardan açığa çıkan ısı kayıplarıdır. Değişmez şartlar altında, fırın içinde meydana gelen ısı duvarların iç yüzeyine ve oradan da dış yüzeyine kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon enerjisi ile iletilmektedir. Fırının yanma bölümünden fırın duvarlarının iç yüzeyine olan ısı transferinin hesaplanması oldukça zor bir işlemdir. Duvar kayıplarının hesabı yapılırken, en iyi yol fırın duvarlarının iç ve dış yüzeyindeki sıcaklıkların bilinmesi ile yapılacak olan hesaplama yöntemidir.

Cam ergitme fırınlarının yüzeyinden konveksiyon ve radyasyon kayıpları ile, birçoğu zorunluluktan doğan fırın üzerindeki boşluklardan oluşan radyasyon enerjisi kaybı göz önüne alınmıştır. Konveksiyon kaybında hesaba giren ısı katsayısı (h) fırınların farklı bölgelerinin çok farklı değerlerde olmasından dolayı, ortalama bir değer olarak alınmıştır. Fırın yüzey sıcaklığı, kalibre edilmiş yüzey termometresi ve pirometresi ile yapılmıştır. Fırının yirmi kadar değişik noktasından alınmış ölçümler sonucu fırın yüzeyi için bir ortalama sıcaklık değeri hesaplanmıştır. Radyasyon kaybı hesabında emisivite (ϵ), tecrübelerden yararlanılarak pirometreye ve yüzey termometresi ile kontrol edilerek formüllerde yerine konmuştur.

Bir duvarın her birim alanına kondüksiyon ile gelen ısı, bu duvardan çevreye radyasyon ve konveksiyon ile yayılan ısıya eşit olması gerekir. Diğer bir ifade ile;

Kondüksiyon ile gelen ısı= Radyasyon ve konveksiyonla kaybedilen ısı'dır.

Alevler radyasyonla ısı yayarlar. Duvarlar, yüzeyleri arasındaki ısıyı kondüksiyonla iletir ve çevrelerine konveksiyonla ve radyasyonla ısı verirler. Yüksek sıcaklıklardaki gazlarda radyasyon yolu ile ısı yayarlar.

Buna göre duvar kayıpları, fırın yüzey alanına, duvar kalınlıklarına ve fırının çeşitli bölgelerindeki çeşitli refrakter malzemelerinin ısı iletim dirençlerine bağlı olarak değişir.

$$Q_R = f(s, l, \Sigma k)$$

l: Duvar kalınlığı (m)

s:Fırın yüzey alanı (m²)

Σk :Refrakter malzemelerinin ısı iletim direnci (kcal /m h °C)

Radyasyon ile olan ısı kayıpları, iç kısımdaki sıcaklığın dış ortamdaki sıcaklıktan fazla olduğu durumlarda fırın yapısındaki tüm açıklıklardan ve fırın dış yüzeyindeki sıcaklık ile ortam sıcaklığı arasındaki farklılığa bağlı olarak meydana gelir. Meydana gelen ısı kayıplarının miktarı iç ortamdaki sıcaklığa, deliğin şekline, duvarın kalınlığına ve fırın dış yüzey sıcaklığına bağlıdır.

Dışarı alev çıkışları ise fırın iç basıncının yüksek olduğu durumlarda yanma ürünlerinin fırın açıklıklarından dışarıya tahliye olması esnasında meydana gelir. Bu açıklıklara örnek olarak açık gözetleme delikleri, sızdırmazlığı sağlanmamış refrakter birleşim noktaları, fırın yapısından tamir gerektiren delikler (fırın kemerindeki fare delikleri, sızdırmazlığı iyi sağlanmamış harman besleme açıklıkları gibi) verilebilir.

Buna göre yüzeyden olan ısı kaybı, konveksiyon ve radyasyon ile olan ısı transferlerinin toplamına eşittir.

a) Konveksiyonla ile oluşan enerji kaybı

Konveksiyonla oluşan ısı kaybı, yüzey sıcaklığı ve konveksiyon ısı geçiş katsayısına bağlı olarak aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$Q_t = h_t A (T_y - T_a) \quad (5.8)$$

- Q_t : Konveksiyon ile oluşan ısı kaybı (kcal/h)
 h_t : Konveksiyon ısı geçiş katsayısı (kcal/ m² h °C)
 T_y : Fırının yüzey sıcaklığı (K)
 T_a : Ortam sıcaklığı (K)
 A : Fırın yüzey alanı (m²)

Konveksiyon ısı geçiş katsayısı ortamdaki hava hareketine bağlı olup; doğal haller için aşağıda verilmiştir.

Düşey yüzeyde laminar doğal konveksiyon ısı geçiş katsayısını hesaplayabilmek için,

$Nu = 0.517 [Pr Gr]^{1/4}$ denklemi uygulanır.

$Gr*Pr < 2*10^9$ olmalıdır. (Kakaç,1998)

Düşey yüzeyde türbülanslı doğal konveksiyon ısı geçiş katsayısını hesaplayabilmek için,

$Nu = 0.17 [Pr Gr]^{0.33}$ denklemi uygulanır.

$Gr*Pr > 2*10^9$ olmalıdır. (Kakaç,1998)

$$Nu = (h_t l) / \lambda$$

Nu : Nusselt sayısı,

Gr : Grashof sayısı ($= l^3 g \beta T / \nu^2$)

Pr : Prandtl sayısı ($= C_p \mu / k$)

l : Karakteristik uzunluk (m)

λ : Havanın ısı iletim katsayısı (kcal/ m h °C)

g : Yerçekimi ivmesi (m/s²)

β : Isıl genleşme katsayısı (1/K)

μ : Dinamik viskozite (kg/ms)

ν : Kinematik viskozite (m²/s)

C_p : Havanın özgül ısısı (kcal/kg °C)

5.4.2.1 TR1 Fırın Duvarlarından Konveksiyonla Olan Isı Kayıplarının Hesabı (Q_t)

Bilinen değerler:

T_Y : 260°C (533K)

TR1 fırını dış duvarlarının yüzey sıcaklığı olarak tüm fırın duvarları için ortalama bir değer olarak alınmıştır. Fırın yüzeyi üzerinde 20 farklı noktada yapılan ölçümler sonucu ortalama sıcaklık değeri elde edilmiştir.

A: 1500 m² (TR1 fırın yüzey alanı) olarak hesaplanmıştır. Fırın boyutları şekil 5.5'de gösterilmiştir.

T_a=25 °C (298 K) (dış ortam sıcaklığı) olarak ölçülmüştür.

h_t =7 kcal/ hm²C [dış yüzeyden hava ortamına olan konveksiyon ısı transfer katsayısı] [Günther,1958]

h_t (konveksiyon ısı transfer katsayısı) hesaplanması:

t_f= (T_y+ T_a)/2 formülü uygulanırsa

t_f=(260+25)/2=142.5 °C olur.

t_f sıcaklığında havanın özellikleri tablolardan belirlenir. (Kakaç,1998)

C_p=0.242 kcal/kg °C

λ=0.03 kcal/ m h °C

β=2.43*10⁻³ 1/K

μ=2.37*10⁻⁵ kg/m.s

ν=27.9*10⁻⁶ m²/s

Pr=0.69

g=9.81 m/s²

Gr=[l³ g β(T_y - T_a)] / ν² denkleminde tüm değerler yerine konulursa,

Gr=19.7*10⁹ olur.

Gr*Pr= 19.7*10⁹*0.69=13.59*10⁹ olur.

Gr*Pr>2*10⁹ sınır şartlarına uyduğuna göre,

Nu = 0.17 [Pr Gr]^{0.33} denklemi uygulanır. Buradan da,

Nu=0.17 [13.59*10⁹]^{0.33}=369.6 bulunur.

Nu = (h_t *l) / λ formülünde tüm değerler yerine yazılırsa

h_t= (369.6*0.03)/1.4

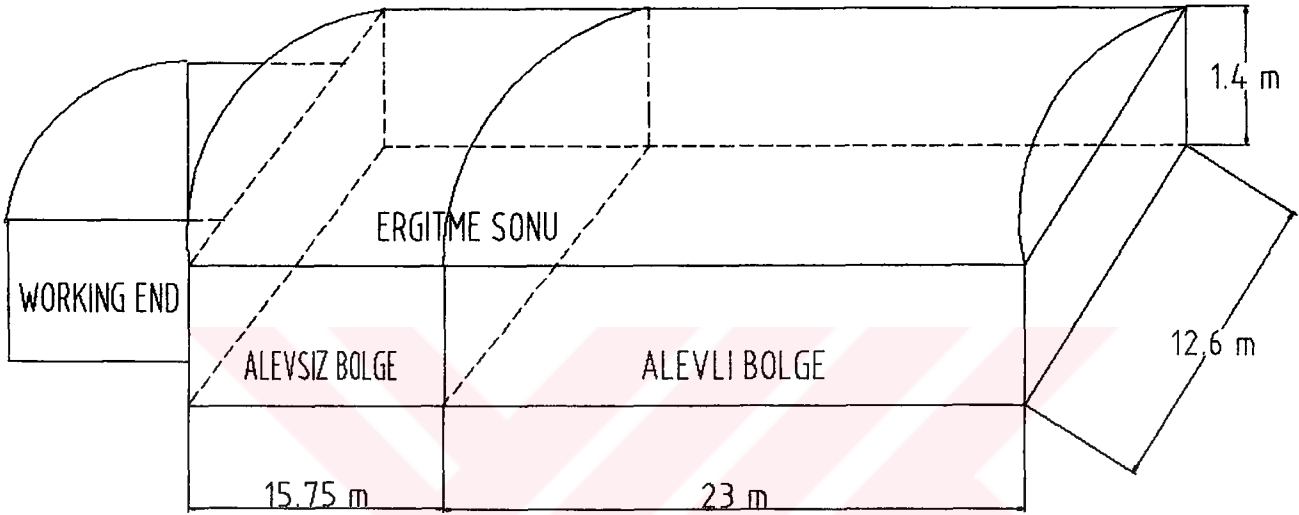
l=1.4 m (fırın duvarı yüksekliği)

$$h_t = 7.92 \text{ kcal/ m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C} = 33.1 \text{ kJ/ m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

$Q_t = h_t A (T_y - T_a)$ denkleminde tüm değerleri yerine koyarsak

$$Q_t = 33.1 \text{ kJ/ m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C} * 1500 \text{ m}^2 * [(260-25)]^\circ\text{C}$$

$$Q_t = 11.6 * 10^6 \text{ kJ/h (TR1 fırın duvarlarından konveksiyonla kaybolan enerji)}$$



Şekil 5.5 TR1 fırın boyutları

b) Radyasyonla Oluşan Isı Kaybı

Radyasyon ile oluşan ısı kaybı ise şöyledir.

$$Q_r = \sigma \epsilon A [(T_y/100)^4 - (T_a/100)^4] \quad (5.9)$$

Burada;

Q_r : Radyasyon ile olan ısı kaybı (kcal/h)

σ : Stefan-Botzman Katsayısı ($4.87 \text{ kcal/ m}^2 \text{ hK}^4 = 5.67 \text{ W/ m}^2 \text{ K}^4$) (Kakaç, 1993)

ϵ : Yüzeyin emisivitesi

A : Fırın yüzey alanı (m^2)

T_y : Fırın dış yüzey sıcaklığı (K)

T_a : Dış ortam sıcaklığı (K)

5.4.2.2 TR1 Fırın Yüzeyinden ve Fırın Açıklıklarından Radyasyon İle Olan Isı Kayıplarının Hesabı

a) Fırın yüzeyinden radyasyonla meydana gelen ısı kayıpları:

Bilinen değerler:

$$T_y = 260 \text{ }^\circ\text{C} (533\text{K})$$

$$T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C} (298\text{K})$$

$$A : 1500 \text{ m}^2$$

$$\varepsilon : 0.8 \text{ (Günther, 1958)}$$

$Q_r = \varepsilon A [(T_y/100)^4 - (T_a/100)^4]$ denkleminde tüm bilinen değerler yerine konulursa

$$Q_r = 4.87 \text{ kcal/m}^2 \text{ hK}^4 * 0.8 * 1500 \text{ m}^2 * [5.33^4 - 2.98^4] \text{ K}$$

$$Q_r = 4255250.1 \text{ kcal/h}$$

$$Q_r = 17.8 * 10^6 \text{ kJ/h}$$

b) Fırın açıklıklarından radyasyonla meydana gelen ısı kayıpları

İkinci olarak fırın açıklıklarından dışarıya ısının kaçması ile meydana gelen kayıplar hesaplanacaktır.

Buna göre TR1 fırınında mevcut olan açıklıkların konumu, m^2 cinsinden alanları ve meydana gelen radyasyon ısı kayıpları aşağıda hesaplanmıştır.

Throat bölgesinde 2 m uzunluğunda ve 0.4 m genişliğinde bir kanal bulunmaktadır. Bu kanal ergitme havuzu ile çalışma havuzunu dipten birleştiren bir açıklıktır. Bu bölgenin sıcaklığı yaklaşık $1170 \text{ }^\circ\text{C}$ (1443K) olarak ölçülmüştür.

$$\text{Alan}_1 = 2 \text{ m} * 0.4 \text{ m} = 0.8 \text{ m}^2$$

$$Q_r = \varepsilon A [(T_y/100)^4 - (T_a/100)] \text{ denklemini uygulandırsa,}$$

$$Q_r = 4.87 \text{ kcal/m}^2 \text{ hK}^4 * 0.8 * 0.8 \text{ m}^2 * [14.43^4 - 2.98^4] \text{ K}$$

$$Q_r = 134891.17 \text{ kcal/h}$$

$$Q_r = 0.57 * 10^6 \text{ kJ/h}$$

Melting end (ergitme işleminin bittiği bölge) bölümünde 25 cm uzunluğunda ve 25 cm genişliğinde 6 adet delik bulunmaktadır. Bu bölgedeki sıcaklık yaklaşık olarak 1400 °C(1673 K) dir.

$$\text{Alan}_2 = 0.25 \text{ m} * 0.25 * 6 = 0.375 \text{ m}^2$$

$Q_r = 6 \epsilon A [(T_y/100)^4 - (T_a/100)^4]$ denklemi uygulanırsa

$$Q_r = 4.87 \text{ kcal/m}^2 \text{ hK}^4 * 0.8 * 0.375 \text{ m}^2 * [16.73^4 - 2.98^4] \text{ K}$$

$$Q_r = 114339.5 \text{ kcal/h} = 0.48 * 10^6 \text{ kJ/h}$$

Working end (çalışma havuzunun bittiği bölge) bölümünde 25 cm uzunluğunda ve 25 cm genişliğinde 5 adet delik bulunmaktadır. Bu bölgedeki sıcaklık yaklaşık olarak 1050 °C (1323 K) dir.

$$\text{Alan}_3 = 0.25 \text{ m} * 0.25 \text{ m} * 5 = 0.31 \text{ m}^2$$

$Q_r = 6 \epsilon A [(T_y/100)^4 - (T_a/100)^4]$ denklemi uygulanırsa

$$Q_r = 4.87 \text{ kcal/m}^2 \text{ hK}^4 * 0.8 * 0.31 \text{ m}^2 * [13.23^4 - 2.98^4] \text{ K}$$

$$Q_r = 36906.3 \text{ kcal/h} = 0.15 * 10^6 \text{ kJ/h}$$

Yukarıdaki hesaplamalara göre fırın açıklıklarından oluşan toplam radyasyon kaybı Q_r

$$Q_{rt} = 0.57 * 10^6 \text{ kJ/h} + 0.48 * 10^6 \text{ kJ/h} + 0.15 * 10^6 \text{ kJ/h}$$

$$Q_{rt} = 1.20 * 10^6 \text{ kJ/h} \text{ olarak hesaplanır}$$

Buna göre toplam radyasyon kaybı $Q = Q_r + Q_{rt}$ olduğuna göre

$$Q = 17.8 * 10^6 \text{ kJ/h} + 1.20 * 10^6 \text{ kJ/h}$$

$$Q = 19 * 10^6 \text{ kJ/h} \text{ olarak hesaplanır.}$$

5.4.3 Cama Geçen Enerji (Q_G)

Cam yapımı için gerekli olan ısı: Bu kapsam içinde; camın ergime reaksiyonları için gerekli ısı ile camda ve gaz fazındaki reaksiyon ürünlerinin harmanın fırına giriş sıcaklığından fırını terk ettikleri sıcaklığa yükseltilmesi için gerekli olan ısı değerleri hesaplanacaktır.

Cam endüstrisinde camın ergitilmesi ifadesi yanlış yönlendirici olabilir. Gerçekte cam hammaddelerinin birbirleri ile reaksiyona girmeleri ve birbirlerinin içinde çözünmeleri ile meydana gelir. Bu hammaddelerin birbirleri ile nasıl reaksiyona girdikleri oldukça karmaşıktır. Bazı reaksiyonlar düşük sıcaklıkta başlar fakat nihai cam oluşumu yüksek sıcaklıklarda tamamlanır. Buna göre;

İlk önce fırın sıcaklığının harmanınkinden yüksek olması nedeniyle harman sıcaklığı yükselmeye başlar. Sıcaklık yükselirken de aşağıda belirtilen reaksiyonlar meydana gelir.

- Hammaddelerdeki serbest suyun (rutubet) buharlaşması
- Hammaddelerin bozunması sonucu CO_2 , SO_2 , SO_3 , H_2O (su buharı) gibi gazların oluşarak ortamdan uzaklaşması.
- Tek tek hammaddelerin veya bunların kombinasyonunun ergimesi ve reaksiyona girmesi sonucu sıvı fazların oluşumu.
- Ergimemiş harman taneciklerden arınmış, homojen bir sıvı elde edilecek şekilde geriye kalan katı taneciklerin sıvı faz içinde çözünmeleri.

Bu arada meydana gelen diğer iki olguda dikkate alınmalıdır.

Na_2O , K_2O , B_2O_3 , PbO , SiF_2 gibi maddeler ergitme için gerekli sıcaklıklarda harman ve ergimiş camdan buharlaşarak uzaklaşırlar. Genellikle buharlaşan madde miktarı azdır fakat fırının bir başka bölgesinde yoğunlaştıklarında sorun yaratabilirler.

Buharlaşma ile meydana gelen madde kaybı, özellikle cam yüzeyinde kompozisyon değişikliğine yol açabilecek büyüklükte olabilir.

Camdan harman reaksiyonlarında açığa çıkan gazların bir kısmının çözünmesinin yanısıra ergimiş camın üstündeki fırın atmosferinden küçük miktarda gazlarda çözünür.

TR1 fırınında sıcaklık o şekilde ayarlanırsa ergimeye başlayan harman ergimiş camı oluştururken cam fırın içinde sıcaklığın daha yüksek olduğu ve afinyasyonun başladığı bölgeye doğru çekilir.

5.4.3.1 TR1 Fırınında Cama Geçen Enerjinin Hesabı (Q_G)

Cama geçen enerji 3 kısımda incelenmektedir ve bunların hesapları ayrı ayrı yapılacaktır.

5.4.3.1.1 Reaksiyon Sonucu Oluşan Gazlar İçin Enerji Miktarı Hesabı (Q_1)

Buna göre reaksiyona giren hammaddelerin ergitme bölümü sonunda açığa çıkan gazlarının enerji miktarı her ton için yaklaşık olarak 2.23 therms/ton olmaktadır (Günther, 1958).

1 therms= 105480 kJ/h olduğuna göre

2.23 therms/ton =235 220 kJ/ ton olarak birim analizi yapılır.

TR1 fırının günlük cam üretim kapasitesi 700 ton/gün'dür.

235 220 kJ/ton* 700 ton/24 h = 6.9*10⁶ kJ/h

$Q_1 = 6.9*10^6$ kJ/h enerji açığa çıkar.

5.4.3.1.2 Camı Çalışma Sıcaklığı Olan 1220 °C 'ye Çıkarmak İçin Gerekli Olan Enerji Miktarı Hesabı (Q_2)

Buna göre camı çalışma sıcaklığına çıkarabilmek için gerekli olan enerji miktarı her ton için yaklaşık olarak 11.3 therms/ton olmaktadır (Günther, 1958).

1 ther.ms=105480 kJ/h

11.30 Therms/ton = 1 193 980 kJ/ ton olarak birim analizi yapılır.

1 193 980 kJ/ ton *700 ton/24 h =34.8*10⁶ kJ/ h

$Q_2 = 34.8*10^6$ kJ/ h enerji açığa çıkar.

Not: Camı çalışma sıcaklığına çıkarmak için gerekli olan enerji miktarının (Q_2) diğer bir hesaplama şekli bölüm 5.4.3.1.3'de yapılmıştır. Bu hesaplamaları yaparken çeşitli sıcaklıklardaki hammaddelerin birbirleri ile reaksiyona girmesi sonucu açığa çıkan ısınma enerjileri ayrı ayrı hesaplanmış ve sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur.

5.4.3.1.3 Camı Çalışma Sıcaklığı Olan 1220 °C 'ye Çıkarmak İçin Gerekli Olan Isı Miktarının II. Yoldan Hesabı

TR1 fırınında düz cam üretiminde kullanılan hammaddelerin toplam ağırlık oranları aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir

Çizelge 5.1 TR1 fırınında kullanılan hammaddelerin ağırlık oranları

CaCO ₃	Na ₂ CO ₃	SiO ₂	K ₂ (Na ₂)O, Al ₂ O ₃ , SiO ₂
%16.6	%20.2	%55.3	%7.9

TR1 fırını içinde düz cam üretimi için kullanılacak hammaddeler; fırın içine ortam sıcaklığında beslenir. Aşağıdaki sıcaklıklarda hammaddeler birbirleri ile kimyasal reaksiyonlara girerek açığa belli miktarlarda ısınma enerjilerinin çıkmasına neden olurlar. Buna göre oluşan kimyasal reaksiyonlar şöyledir.

Çizelge 5.2 TR1 fırınında hammaddelerin birbirleri ile kimyasal reaksiyon sıcaklıkları

SICAKLIK	OLUŞAN KİMYASAL REAKSİYONLAR
789 °C	Disilika-kuarz (Na ₂ O.2 SiO ₂)
837 °C	Disilika-metsilikat (Na ₂ O SiO ₂)
851 °C	Sodakül (Na ₂ CO ₃) ergiyor
874 °C	Na ₂ CO ₃ + SiO ₂ → Na ₂ O.SiO ₂ + CO ₂ (g)
900 °C	CaCO ₃ → CaO+ CO ₂
980 °C	Feldspar sıvı faza geçmeye başlıyor.
1070 °C	Al ₂ O ₃ +K ₂ O sıvı halde, Na ₂ O SiO ₂ ise sıvı faza geçiyor
1080 °C	Feldsparın sıvı faza geçmesi bitiyor.
1200 °C	Son kum taneleri ergiyor.
1480 °C	Son CaO 'lar ergiyor.

Yukarıdaki sıcaklıklar esnasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlarda; tepkimeye giren hammaddelerin ağırlık oranları aşağıdaki şekilde tespit edilmiştir.

25 °C (298 K) - 789 °C (1062 K) sıcaklıkları arasında tepkimeye giren hammadde ağırlık oranı

Çizelge 5.3 Hammaddelerin ağırlık oranları

CaCO ₃	Na ₂ CO ₃	SiO ₂	Cam Kırığı	K ₂ (Na ₂)O	Al ₂ O ₃	SiO ₂
13.3 kg	16.2 kg	44.2 kg	20.0 kg	4.3 kg	0.82 kg	1.14 kg

789 °C(1062 K)-837 °C (1110 K) sıcaklıkları arasında tepkimeye giren hammadde ağırlık oranı:

$\text{Na}_2\text{CO}_3 + 2 \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 + \text{CO}_2$ reaksiyonu oluşmaktadır.

Çizelge 5.4 Hammaddelerin ağırlık oranları

CaCO_3	SiO_2	Cam Kırığı	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	Al_2O_3	CO_2
13.3 kg	28.7 kg	20.0kg	30.2 kg	1.1 kg	6.7 kg

837 °C (1100K)- 900 °C (1173 K) sıcaklıkları arasında tepkimeye giren hammadde ağırlık oranı

$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 + \text{SiO}_2$ reaksiyonu oluşmaktadır.

Çizelge 5.5 Hammaddelerin ağırlık oranları

CaCO_3	SiO_2	Cam kırığı	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	Al_2O_3	CO_2
13.3 kg	38.7 kg	20.0 kg	20.2 kg	1.1 kg	6.7 kg

900 °C(1173 K)-1070 °C (1343 K) sıcaklıkları arasında tepkimeye giren hammadde ağırlık oranı

CaCO_3 (Kireç Taşı) $\rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ reaksiyonu oluşmaktadır.

Çizelge 5.6 Hammaddelerin ağırlık oranları

CaO	Al_2O_3	Cam kırığı	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	Al_2O_3	CO_2
7.4 kg	38.7 kg	20.0 kg	20.2 kg	1.1 kg	12.6 kg

1070 °C(1343 K)-1425 °C(1698K) sıcaklıkları arasında tepkimeye giren hammadde ağırlık oranı

Ergime Prosesi sonucu Na_2OSiO_2 , CaO , Al_2O_3 , SiO_2 , Cam kırığı ergiyerek camın oluşumu için gerekli olan sıvı eriyik şekline gelirler.

Çizelge 5.7 Hammaddelerin ağırlık oranları

CaO	SiO_2	Cam kırığı	Na_2OSiO_2	Al_2O_3	CO_2
7.4 kg	38.7 kg	20.0 kg	20.2 kg	1.1 kg	12.6 kg

Aşağıda tespit edilen sıcaklık değerleri arasında hammaddelerin ergitilip camın elde edilmesine kadar oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucunda meydana gelen ısı enerjileri ayrı ayrı hesaplanıp sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur.

Çizelge 5.8 25 °C (298 K) - 789 °C (1062 K) arasında oluşan ısınma enerjisi hesabı

Hammadde	Ağırlık (t/h)	Mol sayısı (kmol/h)	T _{ÇIK} (K)	T _{GİR} (K)	h ₁ kJ/kmol	h ₂ kJ/kmol	Δh kJ/kmol	ΣEnerji kJ/h
CaCO ₃	3.87	38.73	1062	298	29483.7	7676.7	21807	844658
Na ₂ CO ₃	4.71	44.46	1062	298	39007.8	10356	28651.8	1274015
SiO ₂	12.90	236.25	1062	298	16284.7	4150.6	12134.1	2866741
K ₂ Na ₂ O	0.24	3.86	1062	298	19718.5	4918.3	14800.2	57203.6
Al ₂ O ₃	0.33	3.25	1062	298	29456.4	7781.7	21674.6	70506.5
Cullet	5.88	-	1062	298	-	-	-	-

Açığa çıkan ısınma enerjisi toplamı $\Sigma E_T = 5\ 113\ 124.5$ kJ/h olarak hesap edilmiştir.

$C_p = a + b \cdot 10^3 + c \cdot 10^{-5}$ ampirik formülü ile herbir hammadde için hesaplanır. (Dç. Dr. Orkaç, 1982) (5.10)

$h_1 = a \cdot T_{gir} + \frac{b \cdot T_{gir}^2}{2} \cdot 10^3 + \frac{c \cdot T_{gir}^{-1}}{10^{-3}}$ ampirik formülü ile bulunur ve sonuçlar tabloya işlenir. (5.11)

$h_2 = a \cdot T_{çik} + \frac{b \cdot T_{çik}^2}{2} \cdot 10^3 + \frac{c \cdot T_{çik}^{-1}}{10^{-3}}$ ampirik formülü ile bulunur ve sonuçlar tabloya işlenir. (5.12)

$\Delta h = h_2 - h_1$ farkı ile hesaplanır ve sonuçlar tabloya işlenir. (5.13)

Çizelge 5.9 789 °C (1062 K)-837 °C (1110 K) arasında oluşan ısınma enerjisi hesabı

Hammadde	Ağırlık (ton/h)	Mol sayısı (kmol/h)	T _{ÇIK} (K)	T _{GİR} (K)	h ₁ kJ/kmol	h ₂ kJ/kmol	Δh kJ/kmol	ΣEnerji kJ/h
CaCO ₃	38.733	38.7	1110	1062	30955.9	29483.7	1472.19	57022.9
Na ₂ CO ₃	44.465	0	1110	1062	40908.9	39007.8	1901.06	0
SiO ₂	236.25	139.6	1110	1062	17118.8	16284.7	834.07	116430
K ₂ Na ₂ O	3.86	0	1110	1062	20753.6	19718.5	1035.09	0
Al ₂ O ₃	3.25	3.3	1110	1062	30901.0	29456.4	1444.58	4699.1
Cullet		0	1110	1062	-	-	-	0
Na ₂ OSiO ₂	44.46	48.3	1110	1062	56639.2	56639.2	3009.12	145432
CO ₂	44.46	44.5	110	-	-	-	-	-

Açığa çıkan ısınma enerjisi toplamı $\Sigma E_T = 323\ 585$ kJ/h olarak hesap edilmiştir.

Na₂O 2 SiO₂ oluşum entalpisi = 26 632 501.4 kJ/h

Çizelge 5.10 837 °C (1100K)- 900 °C (1173 K) arasında oluşan ısınma enerjisi toplamı

Hammadde	Ağırlık (ton/h)	Mol sayısı (kmol/h)	T _{ÇIK} (K)	T _{GİR} (K)	h ₁ kJ/kmol	h ₂ kJ/kmol	Δh kJ/kmol	ΣEnerji kJ/h
CaCO ₃	38.7	38.7	1173	1110	32906.4	30955.9	1950.5	75552.2
Na ₂ CO ₃	0	0	1173	1110	43422.2	40908.9	2513.2	0
SiO ₂	139.6	187.9	1173	1110	18226.4	17118.8	1107.5	208141
K ₂ Na ₂ O	0	0	1173	1110	22131.1	20753.6	1377.4	0
Al ₂ O ₃	3.3	3.3	1173	1110	32811.8	30901.0	1910.8	6216
Cullet	0	0	1173	1110	0	0	0	0
Na ₂ OSiO ₂	48.3	48.3	1173	1110	46615.4	43776.1	2839.3	137225
CO ₂	44.5	44.5	-	-	-	-	-	-

Açığa çıkan ısınma enerjisi toplamı $\Sigma E_T = 427\,134$ kJ/h olarak hesap edilmiştir.

Na₂OSiO₂ oluşum entalpisi = -10 246 058.1 kJ/h' dır.

Çizelge 5.11 900 °C (1173 K)-1070 °C (1343 K) arasında oluşan ısınma enerjisi toplamı

Hammadde	Ağırlık (ton/h)	Mol sayısı (kmol/h)	T _{ÇIK} (K)	T _{GİR} (K)	h ₁ kJ/kmol	h ₂ kJ/kmol	Δh kJ/kmol	ΣEnerji kJ/h
CaCO ₃	0	0	1343	1173	38273.7	32906.4	5367.2	0
Na ₂ CO ₃	0	0	1343	1173	50306.5	43422.2	6884.3	0
SiO ₂	191.5	191.5	1343	1173	21288.0	18223.4	3061.6	586239
K ₂ Na ₂ O	4.8	4.8	1343	1173	25954.9	22131.1	3823.8	18326.4
Al ₂ O ₃	3.3	3.3	1343	1173	38052.3	32811.8	5240.5	17047.1
Cullet	-	-	1343	1173	-	-	-	-
Na ₂ OSiO ₂	44.5	44.5	1343	1173	54467.2	46615.4	7851.7	349131
CO ₂	38.7	38.7	1343	1173	16116.5	13861.1	2255.44	87360
CaO	38.7	38.7	1343	1173	16901.9	14654.7	2247.17	87040

Açığa çıkan ısınma enerjisi toplamı $\Sigma E_T = 1\,145\,146$ kJ/h olarak hesaplanmıştır.

CaO oluşum entalpisi=1655850.0 kJ/h 'dır.

Çizelge 5.12 1070 °C (1343 K)- 1425 °C (1698 K) arasında oluşan ısınma enerjisi toplamı

Hammadde	Ağırlık (ton/h)	Mol sayısı (kmol/h)	T _{ÇIK} (K)	T _{GİR} (K)	h ₁ kJ/kmol	h ₂ kJ/kmol	Δh kJ/kmol	ΣEnerji kJ/h
CaCO ₃	0	0	1693	1343	49800.7	38273.7	11527.01	0
Na ₂ CO ₃	0	0	1693	1343	64951.7	50306.5	14645.1	0
SiO ₂	191.5	191.5	1693	1343	27926.2	21288	6638.18	1271087
K ₂ Na ₂ O	4.8	4.8	1693	1343	34318.9	25954.9	8364	40086
Al ₂ O ₃	3.3	3.3	1693	1343	49228.4	38052.3	11176.02	36355
Cullet	-	-	1693	1343	-	-	-	-
Na ₂ OSiO ₂	44.5	44.5	1693	1343	72460.4	57480.4	14980	666091.
CO ₂	38.7	38.7	1693	1343	20956.7	16116.5	4640.11	187473
CaO	38.7	38.7	1693	1343	21626.7	16901.9	4724.8	183007

Açığa çıkan ısınma enerjisi toplamı $\Sigma E_T = 2384101$ kJ/h olarak hesap edilmiştir.

Na₂OSiO₂ ergime enerjisi= 555 817.6 kJ/h

Al₂O₃ ergime enerjisi =84576.5 kJ/h

CaO ergime enerjisi= 735933.3 kJ/h

SiO₂ ergime enerjisi=139440.0 kJ/h

Buna göre reaksiyonlar sonucu ergime enerjileri toplamı= 1 515 767.4 kJ/h (1)

Cam kırığının 25 °C -1425 °C arasında oluşan ısınma enerjisi miktarı=2 041 666.7 kJ/h 'dır.

Tüm reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan ısınma enerjileri toplamı :

$\Sigma \text{Enerji} = 5113124.5 + 323585 + 427134 + 1145146 + 2384101 + 2041666.7 = 11 434 757.2$ kJ/h (2)

Tüm reaksiyonlar sonucu meydana gelen oluşum entalpileri toplamı= 18 042 293.3 kJ/h (3)

Açığa çıkan toplam ısı enerjisi miktarı (1)+(2)+(3) nolu değerlerin toplanması ile bulunur.

Toplam ısı enerjisi miktarı=1 515 767.4 kJ/h +11 434 757.2 kJ/h+18 042 293.3 kJ/h

=30 992 817.9 kJ/h olarak hesaplanır.

=31*10⁶ kJ/h

Buna göre bölüm 5.4.3.1.2 de bulduğumuz 34.8*10⁶ 'lık toplam ısı enerjisi miktarı enerji dengesinin oluşturulması için gerekli olacak hesaplarda kullanılacaktır.

5.4.3.1.4 Kimyasal Reaksiyon İçin Gerekli Enerji (%20 Cam Kırığı)

Doghuse beslenen hammaddelerden belirli sıcaklık sınırları dahilinde kimyasal reaksiyonların meydana gelebilmesi için gerekli olan enerji miktarı her bir ton için yaklaşık olarak 4.60 therms/ton olmaktadır (Günther, 1958).

$$1 \text{ therms} = 105480 \text{ kJ/h}$$

4.60 therms/ton = 485 200 kJ/ton olarak birim analizi yapılır.

$$485 \text{ 200 kJ/ton} * 700 \text{ ton/24 h} = 14.2 * 10^6 \text{ kJ/h}$$

$Q_3 = 14.2 * 10^6 \text{ kJ/h}$ enerji açığa çıkar.

Buna göre cama geçen toplam enerji miktarı $Q_G = Q_1 + Q_2 + Q_3$ enerji miktarlarının toplamına eşit olmaktadır.

$$Q_G = 6.9 * 10^6 \text{ kJ/h} + 34.8 * 10^6 \text{ kJ/h} + 14.2 * 10^6 \text{ kJ/h}$$

$Q_G = 55.9 * 10^6 \text{ kJ/h}$ olarak (cama geçen ısı enerjisi) hesaplanır.

5.4.4 Ön Isıtılmış Havanın Enerjisi (Q_A)

Ergitme fırını içerisinde ön ısıtmaya tabi tutulan yakma havasının kullanılmasının avantajları:

- Alev sıcaklığındaki artış, ısı transferindeki artış ile sonuçlanır.
- Yakma için ihtiyaç duyulan aşırı hava miktarında azalma olur.
- Atık gazlardan kazanılan ısı, yakma havasının ısıtılmasında kullanılır. Böylece ısının fırına geri dönüşü sağlanır.

Yakma havasının ön ısıtmaya tabi tutulması, yakıtın daha verimli kullanılmasını sağlar. Ayrıca TR1 fırını gibi yüksek çekişli cam fırınlarında ihtiyaç duyulan yüksek sıcaklıktaki alevin üretilmesi için ön ısıtmaya tabi tutulmuş hava kullanımı şarttır.

5.4.4.1 TR1 Fırını İçinde Ön Isıtılmış Havanın Enerji Miktarı Hesabı (Q_A)

Bilinen değerler:

$$m_h = 44900 \text{ Nm}^3 \text{ (ön ısıtılmış hava miktarı) [Honeywell]}$$

$$T_2 = 991 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (1264 K) (ön ısıtılmış havanın sıcaklığı) [Honeywell]}$$

$$T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (298 K) (ortam sıcaklığı)}$$

$$T_3 = 0 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (273 K) (ön ısıtılacak havanın rejeneratöre giriş sıcaklığı)}$$

$$C_p = (1.007 + 1.185) / 2 = 1.096 \text{ kJ/kgK (havanın özgül ısınma ısısı)}$$

$$\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3 \text{ (havanın yoğunluğu) [273K için]}$$

$$Q_A = m_h C_p \Delta t \text{ denklemi uygulanırsa} \quad (5.14)$$

$$Q_A = 44900 * 1.293 * 1.096 * (1264 - 273) = 63.05 * 10^6 \text{ kJ/h olarak hesaplanır.}$$

$$Q_A = 63.05 * 10^6 \text{ kJ/h (TR2 fırını ön ısıtılmış havanın enerjisi)}$$

5.4.5 Yanmış Gazlarla Fırından Ayrılan Enerji (Q_w)

Bir fırın ne kadar iyi dizayn edilirse edilsin veya iyi çalıştırılırsa çalıştırılsın buradaki enerji kullanımı, toplam enerji girdisinin önemli bir kısmını oluşturur. Bu nedenle bir çeşit ısı geri kazanım sistemi kullanılarak bu ısıyı etkin bir biçimde değerlendirmek önemli bir husustur.

Atık gazlardan geri kazanılan ısı iki şekilde tekrar kullanılabilir.

- 1) Fırına geri döndürülebilir.
- 2) Fırından bağımsız bir fonksiyon için kullanılabilir.

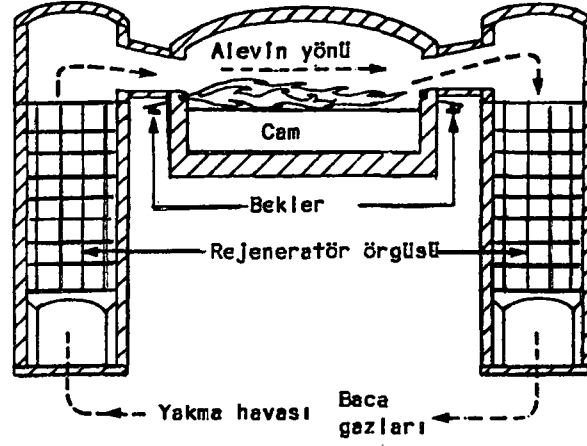
İlk metotta ısı fırına birkaç yol ile geri döndürülebilir. Bunlardan en çok bilinen yakma havasının ön ısıtılmasıdır.

İkinci metod cam fırınının randımanını arttırmaz, fakat cam fabrikasının ısı randımanını artırır. Buna göre ısı buhar üretiminde kullanılabilirki buda fabrika için ısıtma, yakıt tanklarını ve devrelerini ısıtma, su ısıtma veya eldeki miktar yeterince büyük ise elektrik enerjisi veya kompresör havası elde etmede kullanılabilir.

Sürekli bir cam ergitme fırınında (TR1 fırınında olduğu gibi) ısıyı geri kazanmak amacı ile rejeneratör sistemi kullanılır. Sıcak gazların ısılarını absorblayabilen genellikle refrakter tuğlalara verdiği ve ısının buradan soğuk yakma havası tarafından alındığı bir prosestir.

5.4.5.1 Rejeneratörlerde Isı Geri Kazanımı

Bu proseste atık gazların ısısı belli bir süre refrakter yapının sıcaklığını yükseltir. Bu periyodun sonunda refrakter yapıya iletilen ısı çapraz akımla sisteme verilen soğuk yakma havası tarafından alınır. Rejeneratör, refrakter malzeme ile inşa edilmiş bir ısı eşanjörüdür.



Şekil 5.6 Rejeneratör yapısı

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi fırına verilen yakıt sol tarafta yanarsa bu durumda yakma havası sol taraftaki bölümü takip eder ve sıcak atık baca gazları fırını sağ taraftaki porttan terk ederler. Bu portlardan gelen sıcak baca gazları, rejeneratörden aşağı doğru geçerken sahip oldukları ısının büyük kısmını rejeneratör tuğla örgüsüne bırakırlar. Tuğlaların sıcaklıkları yukarıdan aşağı doğru azalma gösterir.

15 ile 30 dakika arasında olan önceden belirlenmiş belli bir süre sonunda bir yön değiştirme mekanizması yakıt ve baca gazlarının akış yönünü değiştirir. Bu durumda yakıt ve yakma havası fırına sağ taraftaki rejeneratörden girmeye atık baca gazları ise sol taraftaki rejeneratörden çıkmaya başlar. Yakma havası sağ taraftaki rejeneratörün alt tarafına girer. Bu taraftaki çeker tuğlaları depolamış oldukları ısıyı yakma havasının ön ısınması için verirler ve yakma havasının sıcaklığı fırına girmeden önce yükselmeye başlar. Bu arada sıcak baca gazları, fırını sol taraftaki portlardan terk etmeye ve sol taraftaki rejeneratör bölümündeki örgü tuğlalarını ısıtmaya başlar.

Bir rejeneratör dizaynı aşağıdaki belirtilen gereksinimlerin uyumu ile gerçekleştirilir.

- Isı transfer yüzeyinin maksimizasyonu
- Mekanik mukavemet
- Kanalların, harman tozuması ve buharların etkisi ile tıkanma ihtimalinin azaltılması
- Çeker tuğlalarının dip taraflarında kondensasyonun olmaması
- Maliyet açısından verimlilik
- Yer (alan) kısıtları

İyi dizayn edilmiş bir rejeneratör atık gazlardaki ısının en az %60'ını geri kazanabilecek bir etkinliktedir.

5.4.5.2 TR1 Fırınında Yanmış Gazlarla Ayrılan Enerji Miktarını Hesaplama (Q_w)

Bilinen değerler :

$$T_2 = 1260 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (1533 K) (yanmış gazların sıcaklığı) [Honeywell]}$$

$$T_1 = 464 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (737K) (rejeneratör içindeki yanmış gazların sıcaklığı) [Honeywell]}$$

$$Q_w = m_h C_p \Delta t \text{ denklemi uygulanır.} \quad (5.15)$$

Yanmış gazların ortalama özgül ısı $C_{Port} = [C_{PCO_2} N_{O_2} + C_{PH_2O} N_{H_2O} + C_{PO_2} N_{O_2} + C_{PN_2} N_{N_2}] / (N_{CO_2} + N_{H_2O} + N_{O_2} + N_{N_2})$ denklemi ile bulunur.

C_{Port} bulmak için (5.7) denkleminde ürün kısmındaki $[CO_2(g) + 2H_2O + 0.15 O_2 + 8.084 N_2(g)]$ yanmış gazların C_p 'leri bulunur. (Günther, 1958)

$$C_{Port} = [(1 \cdot 1.346) + (2 \cdot 2.447) + (0.15 \cdot 1.2) + (8.084 \cdot 1.20)] / [1 + 2 + 0.15 + 8.084]$$

$$C_{Port} = 16.169 / 11.234 = 1.439 \text{ kJ/kgK olarak hesaplanır.}$$

Karışımın mol ağırlığını bulabilmek için (M_{BG}),

$$M_{BG} = [(1 \cdot 44) + (2 \cdot 18) + (0.15 \cdot 32) + (8.084 \cdot 28)] / (1 + 2 + 0.15 + 8.084)$$

$$M_{BG} = 311.152 / 11.234 = 27.7 \text{ kg/kmol olarak hesaplanır.}$$

$$m_G = 49600 \text{ Nm}^3 \text{ (yanma havası+metan miktarı)}$$

$$49600 \text{ Nm}^3 / 22.4 \text{ m}^3/\text{kmol} = 2214.2 \text{ kmol (hava-yakıt karışımının mol miktarı)}$$

$$m_h = 2214.2 \text{ kmol} \cdot 27.7 \text{ kg/kmol} = 61335.7 \text{ kg (yanmış gazların miktarı)}$$

$Q_w = m_h C_p \Delta t$ denklemindeki tüm değerler yerine konulursa,

$$Q_A = 61335.7 \text{ kg} \cdot 1.439 \text{ kJ/kgK} \cdot 796 \text{ K} = 70.2 \cdot 10^6 \text{ kJ/h olarak hesaplanır.}$$

$$Q_A = 70.2 \cdot 10^6 \text{ kJ/h (TR1 fırınında yanmış gazlarla ayrılan ısı enerjisi)}$$

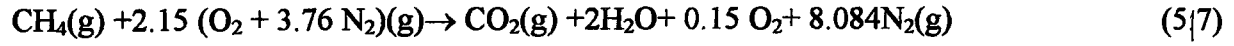
5.4.6 Bacadan Atılan Yanmış Gazların Enerjisi (Q_a)

Bacadan kaybolan enerji hesap edilirken, fabrika tarafından verilen veriler kullanılmıştır. Baca gazı sıcaklığı otomatik kontrol sisteminden doğrudan alınmış, baca gazı kütlesi otomatik

kontrol sisteminden alınan doğalgaz ve yanma havası kütesinden hesap edilmiştir. Buradan bulunan cam fırını verimi kullanılarak, baca gazından kaybolan enerji hesaplanmıştır. Harmanın ısıtılması ile açığa çıkan reaksiyonlar sonucu oluşan gazlar, harmanın ısıtılması bölümünde ele alınmıştır.

Bacadan atık ısı olarak, bir daha sistem için kullanılmamak üzere atılan yanmış gazların ısı enerjisi hesabı aşağıdaki şekilde olmaktadır.

$$Q_a = m_h \Delta h \text{ denklemini uygulanır.} \quad (5.16)$$



yanma denkleminde, mevcut bulunan yanmış gazların Δh (entalpi farkını) bulabilmek için [464 °C-25 °C] sıcaklık değeri için herbir yanmış gazın entalpi değeri tablolardan okunur (Kakaç, 1993).

$$\Delta h = [19631-0] + (2) (15593-0) + (0.15) (13737-0) + (8.084) (13087-0)$$

$$\Delta h = 158673 \text{ kJ/kmol (yanmış gazların toplam entalpi farkı)}$$

Yanmış gaz olarak bacadan atılan gazların mol sayısı 195.3 kmol/h olarak hesaplanır.

$Q_a = m_h \Delta h$ denkleminde tüm değerler yerine konulursa

$$Q_a = 195.3 \text{ kmol/h} * 158673 \text{ kJ/kmol} = 31 * 10^6 \text{ kJ/h olarak hesaplanır.}$$

$$Q_a = 31 * 10^6 \text{ kJ/h (TR1 fırınında bacadan atılan gazların enerjisi)}$$

5.4.7 Isı Geri Dönüşüm Sistemi Yapısından Kaybolan Enerji (Q_{IG})

TR1 fırını enerji akış diyagramından da görüleceği gibi Q_1 hesaplanması için; rejeneratör sistemini fırından bağımsız bir sistem gibi düşünürsek sisteme giren ve sistemden çıkan enerji miktarlarının farkı;

$$Q_{IG} = Q_w (\text{Yanmış gazla fırından ayrılan enerji}) + Q_{AO} (\text{Isı geri dönüşüm sistemine giren hava}) - Q_a (\text{bacadan atılan gazların enerjisi})$$

şeklindedir.

Buna göre tüm bilinen değerler yerine konulursa

$$Q_{IG} = 70.2 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} + 0 - 31 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} = 39.2 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \text{ olarak hesaplanır.}$$

$$Q_{IG} = 39.2 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \text{ (TR1 fırını ısı geri dönüşüm sistemi yapısından kaybolan enerji)}$$

5.4.8 TR1 Fırınında Sisteme Giren ve Çıkan Enerjilerin Sonuçlarının Yüzdesele Olarak Karşılaştırılması

Yukarıda hesaplar sonucunda; TR1 fırını için sisteme giren enerjiler ve sistemden kayıplarla ayrılan enerji miktarlarının sonuçları Çizelge 5.13'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.13 TR1 fırınında elde edilen enerji değerleri

Enerji Türü	Giren enerji miktarı (kJ/h)	Çıkan enerji miktarı (kJ/h)	Yüzdesele oran %
Yakıt enerjisi	156.7*10 ⁶		100
Konveksiyon enerjisi kaybı		11.6*10 ⁶	7.40
Radyasyon enerjisi kaybı		19*10 ⁶	12.1
Cama geçen enerji		55.9*10 ⁶	35.6
Bacadan atılan gazların enerjisi		31*10 ⁶	19.8
Rejeneratöre giren enerji		0	0
Rejeneratör yapısından kaybolan enerji		39.2*10 ⁶	25.1
Toplam	156.7	156.7	100

Isı dengesi, hem fırın operatörleri hem de fırın tasarımcıları için faydalı bir yol göstericidir. Isı dengesi, ısı kayıplarının meydana geldiği alanları tanımlayarak hem fırın tasarımı hem de işletiminde bu kayıpları azaltıcı önlemlerin alınmasına imkan verir. Isı dengesi iki şekilde; ya teorik olarak ya da fiili ölçümlerle kurulur, ikincisi özellikle fırın işletmecileri açısından daha önemlidir. Isı dengesini hazırlamak uzun ve zahmetli bir iştir, fakat yarattığı fayda bakımından buna fazlası ile değer. Sonuçlar tablo halinde verileceği gibi SANKEY DİYAGRAMI olarak anılan bir diyagram biçiminde de verilebilir.

Toplam Enerji (kcal)

5113124.5 (789C-25C)
 0 NaB4O7
 26632501.4 Na2O.2SiO2
 0 MgO
 323585 (837C-789C)
 0 PbO
 -10246058.1 Na2O.SiO2
 0 K2O.SiO2
 427134 (900C-837C)
 1655850 CaO
 1145146 (1070C-900C)

555817.6 Na2O.SiO2
 84576.5 Al2O3
 735933.3 CaO
 139440 SiO2
 0 Fe2O3
 0 BaO
 0 BaO
 K2(Na2)O

2384101.5 (1425C-1070C)
 2041666.7 Cam Kırığı (cullet)
 31113662.1 TOPLAM (kcal)

55.9 TOPLAM (kJ*10E6/h)

34.8 Isınma Enerjisi (kJ*10E6)
 14.2 Reaksiyon Enerjisi (kJ*10E6)
 6.9 Ergime Enerjisi (kJ*10E6)

Stand By (yüzey kay.)

2791800 Konveksiyon(kcal)

Isınma Enerjisi+SuyunBuharlaşması
 Ergime Isısı
 Oluşum Enerjisi
 Oluşum Enerjisi
 Isınma Enerjisi
 Ergime Isısı
 Oluşum Enerjisi
 Oluşum Enerjisi
 Isınma Enerjisi
 Oluşum Enerjisi
 Isınma Enerjisi
 Isınma Enerjisi

Ergime Enerjisi
 Ergime Enerjisi
 Ergime Enerjisi
 Ergime Enerjisi
 Oluşum Enerjisi
 Ergime Enerjisi
 Ergime Enerjisi
 Isınma Enerjisi
 Isınma Enerjisi

Alan (m2) h (kcal/hm2K)

1500	7.92
------	------

Radyasyon (Fırın yüzeyinden)

286136 Radyasyon(Delikler)(kcal)

7733186 TOPLAM (kcal)

30.6 Toplam St.By (kJ*10E6/h)

31 Bacadan Atılan Enerji(kJ*10E6)

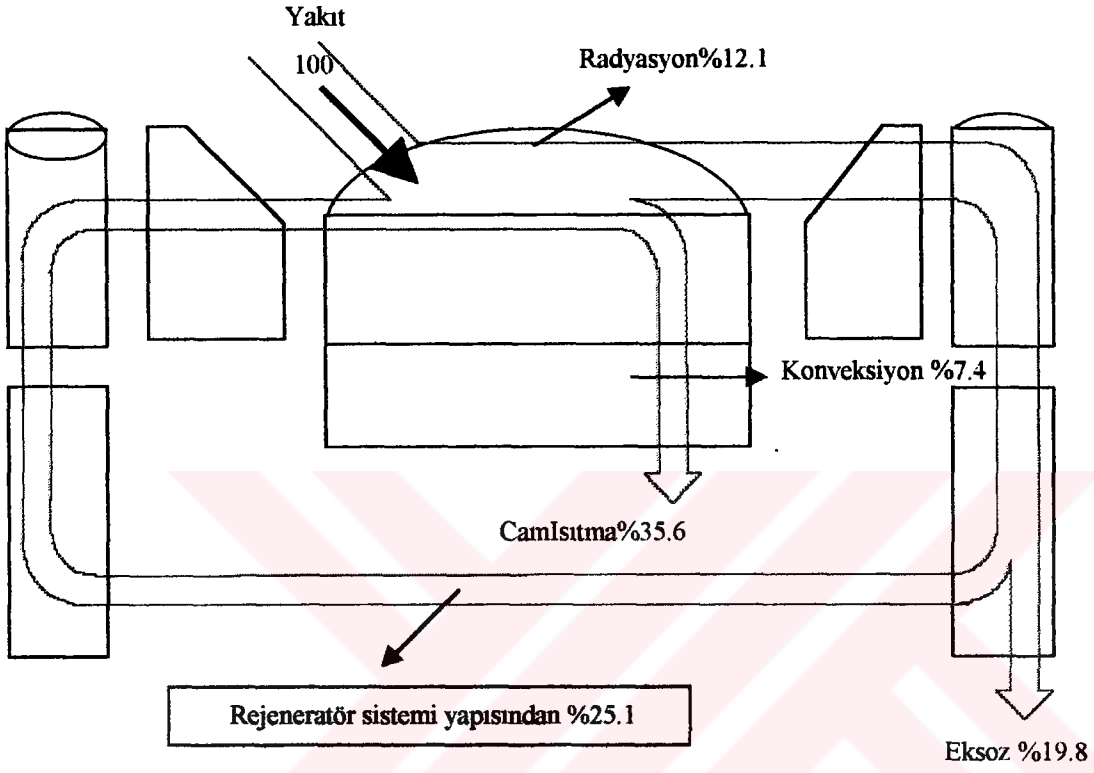
39.2 Rejeneratör yapısından kaybolan enerji (kJ.10⁶)

156.7 Yakıt Enerjisi(kJ*10E6/h)

195.31 Yakıt Harcaması (kmol/h)

4375 Yakıt Harcaması (Nm³/h)

Yukarıda TR1 fırınında, çeşitli reaksiyon sıcaklıklarında meydana gelen enerji miktarları toplu olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.6 TR1 fırını içinde mevcut enerjilerin dağılımı

6. SONUÇLAR(1)

- 1) Fırın içersine giren ve fırın bünyesinden çıkan enerjilere bağlı olarak oluşturulan Sankey diyagramı, kayıp enerjilerin işletmeye yüklemiş olduğu ekonomik kayıpların tespit edilmesi ve bu kayıp enerjilerin minimuma indirilmesi için izlenecek en etkili yöntemdir.
- 2) Yapılan hesaplamalar neticesinde fırın duvarlarından radyasyon ve konveksiyonla meydana gelen enerji kayıpları, fırın içersine giren toplam enerjinin yani yakıt enerjisinin yaklaşık olarak %20'ni oluşturmaktadır. Fırın içersindeki ergimiş camın sıcaklığı yaklaşık 1450 °C ve dış ortam sıcaklığı 25 °C olduğundan fırın içersinde radyasyonla olan enerji kaybı konveksiyonla olan enerji kaybından daha büyük olmaktadır.
- 3) Bacadan yanmış gazlarla atılan ısı enerjisi, giren yakıt enerjisinin yaklaşık olarak %19.8'ni oluşturmaktadır. Daha önceki konularda belirtildiği üzere rejeneratör (geri dönüşüm sistemi) ile fırın içersinde gazların yanması sonucu açığa çıkan enerji tekrar fırın için kullanılabilir hale getirilmektedir.
- 4) Fırın duvarlarının soğutulması için duvar yüzeyine izolasyon malzemesinin ilavesi ile duvar kalınlığının artırılması, soğutmayı gerçekleştirmek için etkili bir yöntem olabilmektedir. Ancak bu yöntem fırın iç yüzeyi ile dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını arttıracığından özellikle tam cam seviyesinde izolasyon malzemesi kullanılması pek avantajlı olmamaktadır.
- 5) Fırın içersinde yakıt olarak doğalgaz kullanılması, fuel oil veya mazota göre daha verimli bir yanmanın gerçekleştirilmesi ve daha ucuz bir enerji kaynağı olduğu için tercih edilmiştir. Buna göre fırın için kullanılan doğalgaz miktarı 4375 Nm³/h olarak hesaplanmıştır.
- 6) Cam yapımında kullanılan hammaddelerin %20 oranında cam kırığı ile karıştırılıp harman yapıldıktan sonra işleme tabi tutulması, hem daha iyi bir kimyasal reaksiyonun meydana gelmesi ve hem de kullanılan hammadde miktarının azaltılması için uygulanan ekonomik bir yöntemdir. Fabrika bünyesinde hatalı üretilen camlar bu amaç doğrultusunda ziyan edilmeyip tekrar cam üretimi için doğrudan kullanılmaktadır.
- 7) Fırın yan duvarlarında (refrakterlerde) fırın içersindeki yüksek sıcaklıklar nedeniyle tam cam seviyesinde aşınmalar meydana gelir. Uygulanan hava soğutması neticesinde refrakterlerin ömürleri yani kampanya süresi 12-15 yıla kadar uzatılmıştır. Eğer tam cam seviyesi boyunca etkin bir hava soğutması uygulanmasaydı 8-10 sene içersinde fırın refrakterleri tamamıyla aşınıp, kullanılmaz hale gelecekti. Fırın çevresinin 85.5 metre olduğu düşünülürse yeniden duvar bloklarının inşaatı, kullanılan malzemenin pahalı olması ve inşaat süresince cam üretiminin tamamen durması, oluşacak ekonomik zararın boyutlarını gözler önüne sermektedir.

7. TR1 FIRINI İÇİNDE SICAKLIKLARIN ÖLÇÜMÜNDE KULLANILAN CİHAZLAR

7.1 Radyasyon Pirometreleri

7.1.1 Çalışma Prensibi

Düz cam üretimi yapan ergitme fırınlarında proses için en önemli ve en zor ölçümlerden biri de fırın içindeki sıcaklıkların ölçülmesi işlemidir. Çünkü fırın içinde ergitme işleminin ve sıcaklık dağılımlarının kontrol edilmesi için ölçüm işleminin doğru yapılması ve doğru ölçü tekniğinin kullanılması gerekir.

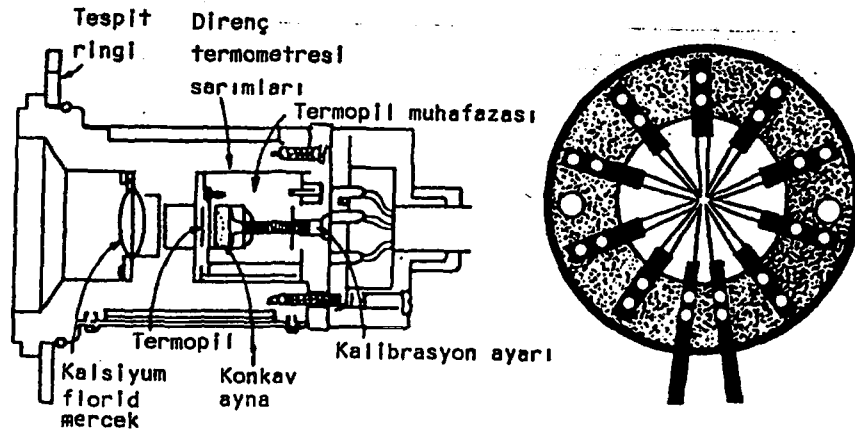
Fırınların duvar sıcaklıkları, alev sıcaklığı, ve cam yüzey sıcaklıkları her noktada birbirlerinden farklı değerlerdedir. Fırın içinde yapılan ölçümlerde duvar sıcaklıkları, ergitmenin başladığı ve bittiği yerdeki sıcaklıklar, enerji kayıplarının hesaplanması yönünden daha önemlidir. Bu amaçla bu noktaların hassas olarak ölçülmesinde radyasyon pirometreleri kullanılmaktadır.

Radyasyon pirometrelerinde bir termopil veya bir termokupl bulunur. Termopil, sıcaklığın bir ölçüsü olan e.m.k'nin oluşturulabilmesi için sıcak bir cisimden radyasyon yolu ile yayılan ısının bir ayna veya bir mercek aracılığı ile çok sayıda küçük termokupl üzerinde odaklandırılması esasına dayanır. Herhangibir fiziksel temasa ihtiyaç duyulmaması ve ölçülecek sıcaklığın bir üst limitinin bulunmaması gibi avantajları vardır. Hızlı ölçüm yapma ve elemanların bozulmaması gibi özelliklerinin yanısıra spesifik olarak kalibre edilmesi gerekir. Pirometre kafası üzerinde çevre sıcaklığındaki değişimlerin etkisi kompanse edilebilir.

Radyasyon pirometrelerinin avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Ergitme fırını boyunca sıcaklık gradyanlerinin tespitinde
- Fırın duvarları arasındaki sıcaklık farklarının hassas olarak ölçülmesinde
- Fırın içinde ölçülmesi istenen noktada düzenli olarak gözlemlerin yapılmasında kullanılır.

Şekil 7.1'de TR1 fırınında kullanılan bir radyasyon pirometresinin ve dedektör olarak kullanılan termopilin kesiti görülmektedir.



Şekil 7.1 Radyasyon pirometresi

7.2 Termokuplar

7.2.1 Termokupların Çalışma Prensibi

Genellikle T/C kısaltması ile belirtilen termokuplar bir uçta birbiri ile birleştirilmiş iki farklı metalden yapılmış iki telden meydana gelmiştir. Kaynak yapılan uç ısıtıldığında elektromotor kuvveti (e.m.k.) oluşur. Milivolt olarak ölçülen bu e.m.k. büyüklüğü;

Termokupl yapımında kullanılan tellerin cinsine

Termokuplun sıcak ile soğuk ucu arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Bir ölçüm cihazı da termokuplun açık uçları arasındaki devreyi tamamlar.

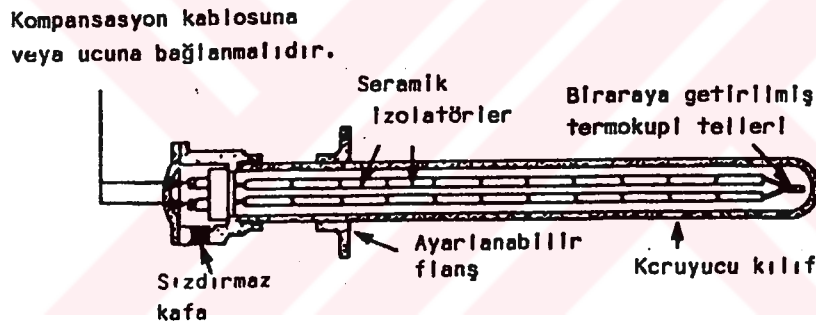
Termokupl yapımında kullanılacak metalleri belirleyen 3 ana faktör şunlardır.

- 1) Çalışma sıcaklığı: Tellerin çalışma sıcaklığında ergimemesi, okside olmaması veya korozyona uğramaması gerekir.
- 2) E.m.k./sıcaklık ilişkisi: 1° C'lık sıcaklık yükselmesine karşılık gelen e.m.k. değişikliği ne kadar büyük ise doğru ölçüm yapma şansı o kadar artar.
- 3) E.m.k. 'nin sıcaklığa oransallığı: e.m.k. 'nın sıcaklığa karşı değişim oranı ne kadar sabit ise geniş bir sıcaklık aralığında yapılacak ölçümün hassasiyeti de o kadar sabitir.

Ölçüm cihazlarının çoğu soğuk uçtaki sıcaklık değişimlerine karşı otomatik olarak düzeltme yapar. Şayet yapmıyorsa aynı düzeltme e.m.k./ sıcaklık tabloları kullanılarak sağlanabilir.

Ölçüm cihazı, değişiklikleri ister kompanse etsin ister etmesin normal olarak termokupldan belli bir uzaklıkta serin bir yere konur. Termokuplu ölçüm cihazına bağlamak için sıradan bir bakır tel kullanılmaz. Buna karşın çok uzun bir termokupl kullanılabilirdi. Fakat burada platin esaslı bir malzeme kullanıldığından çok pahalı bir çözümdür. Bunun yerine benzer e.m.k./sıcaklık karakteristiklerine sahip çok daha ucuz malzemeden yapılmış kompensasyon kabloları kullanılarak termokuplun soğuk ucu etkin bir şekilde ölçüm cihazının bağlantılarının yakınına getirilmiş olur.

Şekil 7.2 'de TR1 fırınında kullanılan bir termokuplun yapısı gösterilmiştir. Termokupl koruyucu bir kılıf içine alınmıştır. Bunun amacı, korrozif gaz kontemisyonunun veya havanın sıcak noktayı oksitlemesinin dolayısı ile kalibrasyonunun bozulmasının önüne geçmektir. Koruyucu malzeme olarak yumuşak çelik, çelik alaşım, platin ve silamanit alümina ve fused silika gibi belli seramikler kullanılırlar.



Şekil 7.2 Bir termokupl yapısı

Termokuplın esaslı farklı metallere oluşan bir bağlantı noktasının sıcaklık karşısında oluşturduğu voltaj veya e.m.k 'nın ölçümüdür.

Termokupl tarafından üretilen e.m.k 'yı ölçmek için iki cihaz kullanılabilir. Bunlardan biri ampermetre diğeri ise potansiyometredir. Her iki durumda da ölçüm cihazları direkt olarak sıcaklık okunacak şekilde kalibre edilebilirler.

Bir e.m.k. kaynağı iletken telle bağlandığında iletken üzerinde e.m.k. ile orantılı bir akım oluşur. Bu nedenle akım ölçülerek e.m.k bulunabilir. Bu prensip, genellikle serbest hareket eden bir iğne ucu bulunan akım ölçer, sıcaklık göstergelerinin esasını teşkil eder. Belli e.m.k. için meydana gelen akım, devrenin direncine bağlı olduğundan, uzun bağlantılar ölçüm

cihazının artan dirençle birlikte daha düşük değerler göstermesine neden olur. Ölçüm cihazında bunu düzeltmek için gerekli ayarlanma yapılmalıdır.

Potansiyometreler ise e.m.k'ı direkt olarak okur. Bunu ayarlanabilir ve gayet hassasiyetle bilinen e.m.k. yaratarak yine bunu termokuplun e.m.k'i ile karşılaştırarak yapar. Potansiyometrenin e.m.k'i ile termokuplun e.m.k'i birbirine eşit olduğundaki devredeki galvanometrede '0' değeri okunur ve devrede hiç bir akım yoktur.

Ölçme teli hassas olarak kalibre edilmiş bir dirençtir ve kontaktör bu tel üzerinde hareket ettirilerek ihtiyaç duyulan seviyede e.m.k oluşturulabilir ve hassas olarak bilinebilir.

Basit bir potansiyometre kolaylıkla taşınabilir ve elle kumanda edilebilir. Fakat endüstriyel cihazların kontaktörü, elektronik olarak algılanan devrede sıfır akım noktasına gelene kadar ölçme teli üzerinde hareket ettirilmesi için motorları vardır. Motorun ve elektronik sistemin çalışabilmesi için şebeke cereyanına ihtiyaç vardır.

7.2.2 TR1 Fırınında Mevcut Bulunan Termokupların Yerleştirilmesi

TR1 fırınında, fırın içindeki sıcaklık gradyenleri, yan bloklara, aşınma hızının en yüksek olduğu bölgede (cam seviyesi gibi) çeşitli derinliklere yerleştirilen termokuplar vasıtasıyla ölçülmektedir. Genelde 5 adet termokupl 5 cm aralıklarla tabandan eşit yükseklikte yanyana yerleştirilir. Gene aynı hizada bulunan bir kontrol termokuplu ile de refrakter cam yüzeyindeki camın sıcaklığı saptanır. Kampanya süresince değişik zamanlarda blok kalınlığının hesaplanması ile refrakter korozyon hızı eğrileri elde edilebilir.

Termokuplar genellikle fırın kemerindeki kilit bölgeye konulan ve özel olarak delinmiş bloklara, fırının içine doğru blok yüzeyinden yaklaşık 50 mm dışarı çıkacak şekilde yerleştirilirler. İyi bir ölçüm yapılabilmesi için sıcak bağlantı ucunun kemerin alt tarafına kadar sokulmuş olması gerekir. Termokuplun seramik koruyucu kılıfı alkaliler ve yüksek sıcaklık nedeni ile bir kere korozyona uğradıktan sonra fırın gazları termokupla etki eder ve kalibrasyonu bozar. Bu nedenle radyasyon pirometresi ile kontrol edilir. Uygulamada termokuplar genellikle direkt olarak alevlerin çarpmasını engellemek amacıyla ergitme havuzu kemerlerinde portlar arasına veya arka portla harman besleme bölgesi veya fırın bölme duvarı arasına yerleştirilir.

TR1 firmanın refrakter yüzeylerinde meydana gelen aşınmanın şeklini ve seviyesini belirlemek için radyasyon pirometreleri kullanılmaktadır. Bu pirometreler infrared pirometreleri olarak adlandırılmaktadır. TR1 firmı içinde bulunan bu cihazların çalışma prensibi; refrakter dış yüzeyinden gelen ısı radyasyonu algılanmakta ve yüzeyin her noktası bir sıcaklık ile tarif edilmektedir. Refrakterin cam ile temas içinde olan iç yüzeyinin sabit sıcaklıkta olduğunu düşünürsek dış yüzeyde gözlenen yüksek sıcaklıklar aşınmanın çok, düşük sıcaklıklar ise aşınmanın az olduğu yerleri, dolayısıyla refrakterin genel aşınma şeklini belirlemektedir.

Bu yöntemde olduğu gibi TR1 firmının refrakter iç yüzeylerinde cam sıcaklığının tespiti ile refrakterin istenilen herhangi bir noktasında kalınlık hesaplaması mümkün olabilmektedir. Bunun için refrakter yüzeyinden tespit edilmiş sıcaklıklar sonucu radyasyon ve konveksiyon ile olan ısı kayıpları hesaplanmakta ve bu miktar refrakter kalınlığında kondüksiyon ile olan ısı akımına eşitlenerek tek bilinmeyen refrakter kalınlığı bulunmaktadır. Refrakter yüzeyinin hava ile soğutulması halinde ısı iletim miktarları artmakta ve soğutulma miktarlarının (Lt hava/m sn.) bilinmesi gerekli olmaktadır.

Termokupl ile ölçüm metodu sadece kondüksiyon ile ısı iletimine dayandığından, (hava soğutma sonucu konveksiyondan doğan değişimlerden etkilenmediğinden) daha kesin sonuç verebilme avantajına sahiptir. Diğer taraftan termovizyon yönteminde refraktere hasar vermeden (refrakter içine termokupl yerleştirilmesi gerekli değil) ölçüm yapması, süratli olması ve aşınma şeklini görsel olarak belirlemesi gibi avantajları vardır.

Bu grup dışında cam fabrikalarında kullanılan çeşitli pirometre tipleri vardır. Bunlara kısaca değinirsek;

7.3 Portatif Test Pirometreleri

Bu grupta sıcaklığı uzaktan ölçmek için genelde uzun bir rodun ucuna yerleştirilmiş kontakt termometrelerden, girişin mümkün olmadığı yerlerdeki sıcaklıkları ölçmede kullanılan optik pirometrelere kadar uzanan bir grup pirometre yer alır.

Optik pirometreler genellikle 1000 °C 'ın üzerindeki sıcaklıkları ölçmek için kullanılır. Tümünün çalışma prensibi; biri sıcaklığı ölçülecek cisim, diğeri standart bir ışık kaynağı olmak üzere iki cismin renginin birbirine eşlenmesi prensibi ile çalışmaktadır.

Bu pirometreleri biri, lamba flamasının parlaklığının değiştirilmesi amacıyla akımın ayarlanması, diğeri ise sıcaklığı ölçülecek objenin transparan ayar kamasının kalınlığı ayarlanarak parlaklığının değiştirilmesi esasına göre çalışır.

7.4 Optik Pirometreler

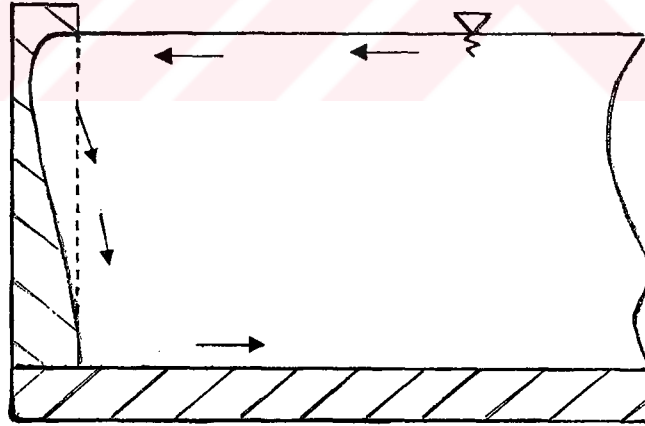
Optik pirometreler son gelişmelerden biri olan direkt okumalı INFRARED pirometreleridir. Burada operatör; cihazın optiğini, sıcaklığı ölçülecek cisme odakladıktan sonra sıcaklığı direkt olarak digital bir göstergeden okuyabilir.



8. FIRIN YAN BLOKLARININ HAVA İLE SOĞUTULMASI

Cam fırınlarının korozyonu uzun zamandan beri cam endüstrisinin önemli sorunlarından biridir. Kampanya (fırın ömrü) sonrasında fırınlarının iç kısmı incelendiğinde refrakterlerde meydana gelen aşınmanın belli bir karaktere sahip olduğu görülmektedir. Genel olarak fırın yan bloklarının aldığı şekil, cam üst seviyesinde taşınım akımlarının ve yüzey gerilim dağılımı (gradient) etkisi ile maksimum olan ve tabana doğru inildikçe azalan bir eğri ile gösterilmektedir. Bu eğrinin şekli cam yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık dağılımına, refrakterin cam sıcaklığındaki çözünme hızına, cam seviyesindeki akımlara ve sıcaklığa bağlı bir fonksiyondur.

Fırın yan duvarlarında oluşan bu korozyonun azaltılmasında kullanılan en etkin yol hava soğutma sistemidir. Buna göre fırın içinde ilk anlarda refrakterlerdeki aşınma çok hızlı olmaktadır. Fakat zamanla soğutma etkisinin önem kazandığı görülmektedir. Eğer kampanya başında refrakterler aşırı soğutulacak olursa artan termal akımlardan dolayı ilk anlardaki aşınma daha çok artacaktır. Ancak, aşınma oranı zamanla daha hızlı azalacağından refrakter ömrü hemen hemen aynı kalacaktır.

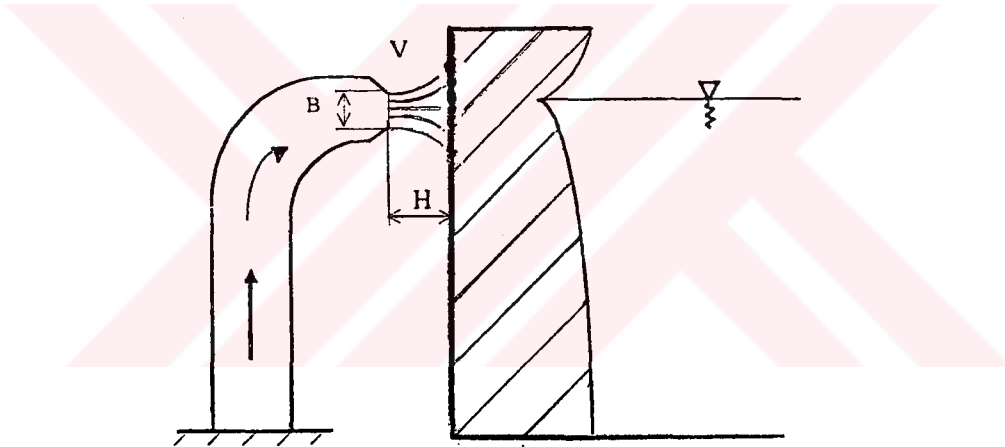


Şekil 8.1 TR1 fırını yan blokların yaygın aşınma profili

Fırının yan refrakter duvarlarının soğutulması büyük ısı kayıplarına yol açmasına rağmen aşınmanın azaltılması için kullanılan en temel yöntemdir. Sıvı cam seviyesinde refrakter aşınması ve ısıl gerilmelerin daha etkili olması nedeni ile, bloğa bu doğrultuda hava soğutması uygulanmaktadır.

Isı iletkenlikleri çok yüksek olan elektro refrakterlerin kullanılmaya başlanması ile fırınlardaki ısı kayıplarında büyük artış olmuştur. Bu yüzden gerekli izolasyon kullanımı sayesinde, dış duvar sıcaklıkları 440°C 'den çok katlı izolasyonlu bir fırında 110°C 'a kadar düşürülmüştür. Fakat cam yüzeyinde refrakter korozyonunu azaltabilmek için hava soğutmasına gerek duyulmuş ve refrakter bloklar 100-120 mm kalınlığa gelinceye kadar hava soğutmasından kazanç elde edilmediği görülmüştür. Ortalama bir düz cam fırında, bu safhaya gelinceye kadar soğutma kullanılmadığında, 1-1.5 milyon kWh elektrik enerjisi tasarrufu sağlanabilmektedir.

Bu yüksek aşınma hızına, aşırı soğutmadan kaynaklanan konveksiyon akımlarının sebebiyet verdiği sanılmaktadır. Bu gözlemler, yan bloklar belirli bir inceliğe geldikten sonra soğutma uygulanmasının, refrakter ömrünü arttırabileceğini göstermiştir.



Şekil 8.2 TR1 fırını yan duvarlarının dikdörtgen çıkış kesitine sahip nozul kullanılarak hava ile soğutulması

B: Nozul kesitinin dar kenarı (m)

H: Nozul çıkışının yüzeye dik olan mesafesi (m)

V: Havanın nozuldaki çıkış hızı (m/s)

8.1 TR1 Fırınında Kullanılan Fanların Özellikleri

Yüksek basınçlı hava soğutucu fanlarının özellikleri aşağıda belirtilmiştir. Bu fanlardan çıkan hava, cam üst seviyesinde cam dalgacıklarının refrakterleri en çok aşındırdığı yerlere nozullarla üflenmektedir. Fırın içersinde sıcaklıkların yüksek olduğu alevli bölgelere üfleme yapmaktadır. Bir tanesi çalışır, diğeri yedek olmak üzere 2 tane yüksek basınç fanı vardır.

Hava Debisi: 220.000 m³/ h

Hava giriş sıcaklığı: 25 °C

Motor Gücü: 238 kW

Fan Devir Sayısı: 990 dev/dak.

Basınç: 888 mmSS

Motor markası: Leroy Somer

Fan çıkış kesiti: 70 mm* 330 mm (dikdörtgen kesitli)

Fiili açıklık: 30 mm

Ana boru: Φ60 mm

Yüksek basınç fanlarının nozulları dik bir açı ile TR1 fırını yan duvarlarının 70 mm altına üfleme yapmaktadır. Cam seviyesi yan duvarların 50 mm altında bulunmaktadır.

TR1 fırını çevresi (throat duvarı hariç) yaklaşık olarak 85.44 metredir.

Alçak basınçlı hava soğutma fanları ise 2 tane olup bu fanlar TR1 fırınının alevsiz bölgelerine (daha soğuk bölgelere) ve kemer yataklarına (çelik) üflenmektedir.

Bu fanların özellikleri;

Hava Debisi: 125.000 m³/ h

Hava giriş sıcaklığı: 25 °C

Motor Gücü: 66 kW

Fan Devir Sayısı: 977 dev/dak

Basınç: 162 mmSS

Motor markası: VEB Wernigecrode

Fan çıkışı: 55 mm*320 mm

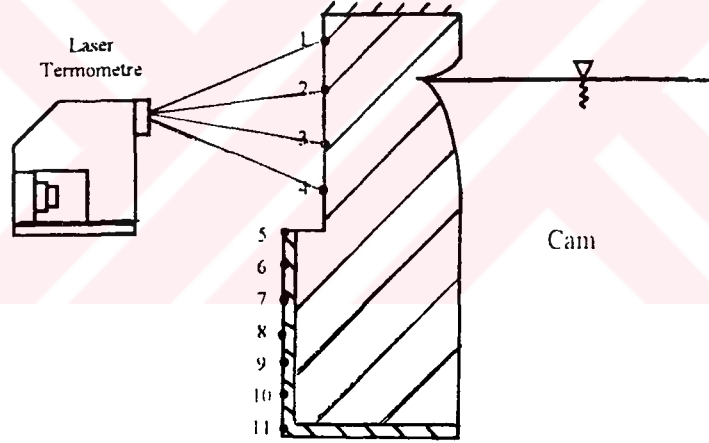
Fiili açıklık: 24 mm

Ana boru: Φ50 mm

TR1 fırını refrakter yan duvarlarının dış yüzeyinde oluşan sıcaklık değerleri, doğru bir soğutmanın yapılabilmesi ve uygulanacak soğutma tipinin belirlenmesi açısından son derece önemlidir. Bu sebeplerden ötürü, hava ile yapılan soğutma neticesinde fırın duvarlarının dış

yüzeyindeki sıcaklıklar azalma eğilimi göstererek, zamanla cam seviyesinde meydana gelen aşınmaların miktarı azalmıştır.

TR1 fırınında refrakter yan bloğunun dış yüzeyindeki sıcaklıklar laser termometresi kullanılarak (pirometre) ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümünde kullanılan pirometre ölçüm yapılacak yüzeyden yayılan infrared enerjisini lensleri vasıtası ile toplamakta ve bunu infrared dedektörü üzerine göndermektedir. Alınan enerji miktarına bağlı olarak dedektör tarafından bir voltaj üretilmektedir. Bu voltaj bir mikroprosesör tarafından okunmakta ve karşılığı olan sıcaklık değeri ekrandan gösterilmektedir. Bazı cisimler infrared enerjisi yayar ve yansıtırlar. Parlatılmış ve pürüzsüz yüzeylerin enerjisi yansıtma miktarı daha fazladır. Bu faktör yüzeyin yama katsayısı olarak isimlendirilir. Yüzeyin özelliğine göre yama katsayısı 0.1 ile 1.0 değerleri arasındadır. Yüzeydeki sıcaklıklar ölçülürken laser termometresine yama katsayısı (ϵ) tahmini bir değer olarak girilmiştir. Refrakter malzemesi için bu değer 0.8 olarak düşünülmüştür.



Şekil 8.3 TR1 fırın refrakteri üzerinde sıcaklık ölçüm noktaları

Şekil 8.3'de görülen ölçüm noktalarının mesafeleri (m) ve bu noktalarda ölçülen sıcaklık değerleri Çizelge 8.1'de verilmektedir.

Çizelge 8.1 TR1 fırını yan duvarlarının dış yüzeyinden ölçülen sıcaklık değerleri

Ölçüm No	Bloğun üst noktasından alınan ölçüm mesafesi (m)	Ölçülen sıcaklık değerleri (°C)
1	X =1.25, y =0.18	520
2	X = 1.20, y =0.18	498
3	X = 1.15, y =0.18	477
4	X = 1.10, y =0.18	430
5	X = 0.95, y =0.25	80
6	X =0.90, y =0.25	90
7	X =0.80, y =0.25	85
8	X =0.65, y =0.25	83
9	X =0.65, y =0.25	88
10	X =0.50, y =0.25	90
11	X =0.30, y =0.25	91

Fırın yan duvarlarında meydana gelen aşınma şekil 8.3'de görüleceği gibi tam cam seviyesinde olmakta yani 1,2,3 noktaları ile ifade edilmektedir. Bu sebepten ötürü uygulanacak soğutma türü ne olursa olsun bu noktaların olduğu yerlerde soğutma gerçekleştirilmelidir.

TR1 fırınında fanlar ile yapılan soğutma neticesinde termometre ile yapılan ölçümlerde, refrakter dış yüzeyindeki sıcaklıklar (1,2,3 noktaları) sırasıyla 280 °C , 257 °C ve 241 °C olarak ölçülmüştür.

9. FIRIN YAN DUVARLARININ SOĞUTULMASINDA KULLANILAN HAVANIN ÜFLEME ŞEKİLLERİNİN İNCELENMESİ

Fırın yan duvarlarının soğutulması bölüm 8’de görüleceği gibi refrakterlerin ömrünü arttırmak için uygulanan en temel yöntemdir. Özellikle fırın içinde cam seviyesindeki refrakter bloklarında meydana gelen aşınmalar sıcaklığın etkisiyle o kadar çok artarki, bu bölgelerdeki aşınma etkilerini en aza indirebilmek için fanlarla tahrik edilen hava soğutması uygulanır.

Cam fırınının ömrü cam seviyesindeki refrakterlerin ömrü ile sınırlıdır. O yüzden bu bölgelere soğutma havası uygulanması gerekmektedir. Yüksek ve alçak basınç fanlarından çıkan hava, cam üst seviyesinde, cam dalgacıklarının refrakterleri en çok aşındırdığı yerlere nozullarla üflenmektedir.

Yüksek basınç fanları yan duvarların korunması için alevli bölgelerin refrakterlerle temas ettiği yerlere üflenmektedir. Üflenen soğutma havasının debisi 220.000 m³/h, basıncı ise 888 mmSS’dir.

Alçak basınç fanları ise fırın içinde alevsiz bölgelere (daha soğuk yerlere) ve kemer yataklarına (çelik) üflenmektedir. Üflenen soğutma havasının debisi 125.000 m³/h, basıncı ise 162 mmSS’dir. Bu fanlardan birisi 24 saat sürekli soğutma yaparken diğeri yedek olarak tutulmaktadır.

Cam seviyesindeki refrakterlere (yan duvarlara) fanlarla yapılan soğutmada bu fanların hava çıkış ağzlarının (nozulların) yan duvarlara göre üfleme şekilleride önemli bir konudur. İncelediğimiz sistemde TR1 fırınında yüksek ve alçak basınçlı hava soğutma fanlarının çıkış nozulları yan bloklara dik olarak üfleme yapmaktadır. Soğutma havası olarak fabrika içindeki ortam havası kullanılmaktadır. Kullanılan ortam havası herhangi bir şekilde şartlandırma işlemine tabi tutulmamaktadır.

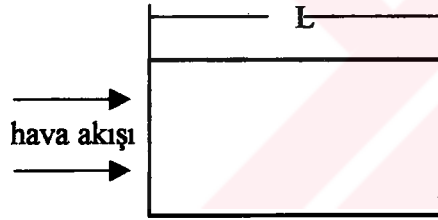
Bu bölümde, ayrıca fanların hava üfleme nozullarının, fırın yan duvarlarına yatay olarak üfleme yapması durumunda duvar boyunca meydana gelen ısı transfer miktarı, dikey olarak yapılan üfleme sonucunda meydana gelen ısı transfer miktarı ile karşılaştırılıp, sistem için hangisinin daha iyi ve daha ekonomik olduğunun sonucuna varılacaktır.

TR1 fırınında, fırın yan duvarlarının soğutulması için dikdörtgen kesitli nozullarla duvar yüzeyine dik olarak üfleme yapılmaktadır. Bu bölümde; duvar boyunca en iyi ısı transferinin gerçekleşmesi amaç edildiğinden, yuvarlak kesitli nozulların kullanılması durumunda elde edilecek ısı transferi miktarı, dikdörtgen kesitli nozullar ile elde edilen ısı transferinin sonuçları ile de karşılaştırılacaktır. Bu karşılaştırmada, üflenen soğutma havası debisi her iki akış kesiti için de sabit olup bu değer tüm fırın duvarları boyunca 125.000 m³/h olarak hesaplanmıştır.

$Q = A \cdot V$ formülüne göre hava debisi (Q) ve havanın duvar yüzeyine üfleme hızı (V) her iki akış şekli için aynı olacağından sadece nozulların dikdörtgen veya yuvarlak kesitli olması durumunda akış kesitlerinin m² cinsinden alanlarında meydana gelen farklılaşma dolayısı ile duvar boyunca oluşacak ısı transferini doğrudan etkileyecektir.

9.1 Havanın Fırın Yan Duvarlarına Yatay Olarak Üflenmesi

Düz bir duvardan geçen laminar bir akış için, tavsiye edilen yerel ve ortalama Nusselt korelasyonları aşağıda verilmiştir.



Şekil 9.1 Duvar boyunca havanın yatay olarak akışı

Laminar akım şekli için:

$$Nu_x = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{x mesafesindeki yerel Nusselt ifadesi}) \quad [\text{Incropera ve Dewitt, 1989}]$$

$$Nu_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{duvar boyunca L mesafesindeki Nusselt korelasyonu})$$

Bu bağıntılar aşağıdaki aralıklarda geçerlidir.

$$0.6 < Pr < 50$$

$$Re < Re_x < 5 \cdot 10^5$$

Gerçekte konveksiyonla olan ısı transfer miktarının akışkan hareketsiz kaldığında olabilecek kondüksiyonla olan ısı transfer miktarına oranını veren Nusselt (Nu) boyutsuz sayısının ifadesi;

$$Nu_x = (\alpha_x x) / \lambda$$

$$Nu_L = (\alpha_L L) / \lambda \quad \text{şeklindedir.}$$

Termik sınır tabaka kalınlığının hidrodinamik sınır tabaka kalınlığına boyutsuz anlamda oranını veren Prandtl (Pr) boyutsuz sayısının ifadesi;

$$Pr = (v \cdot \rho \cdot c_p) / \lambda \text{ şeklindedir.}$$

Hidrodinamik sınır tabaka alanını tanımlayan Reynolds (Re) boyutsuz sayısı ifadesi;

$$Re_x = (V_0 \cdot x) / \nu$$

$$Re_L = (V_0 \cdot L) / \nu \text{ şeklindedir.}$$

Bu bağıntılardaki ;

V_0 = Serbest akım bölgesindeki akışkanın hızı (m/s)

x = Akışkanın duvar ucundan itibaren akım yönündeki mesafesi (m)

ν = Akışkanın ortalama sınır tabaka sıcaklığındaki kinematik viskozitesi (m^2/s)

λ = Sınır tabaka sıcaklığındaki akışkanın konduksiyon ısı transfer katsayısı (kcal/ m h C)

ρ = Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)

c_p = Sabit basınçtaki akışkanın özgül ısısı (kcal/ kg C)

α = Konveksiyon ısı transfer katsayısı (film katsayısı) ($kcal/m^2 h C$)

Nu_x = x mesafesindeki duvar boyunca yerel Nusselt sayısı

Nu_L = Duvar boyunca ortalama Nusselt sayısı

Laminar akım şekli için kullanılan bir başka yerel Nusselt korelasyonu ise;

$$Nu_x = 0.339 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad [\text{Incropera ve Dewitt, 1989}]$$

Bu bağıntı aşağıdaki aralıklarda geçerlidir.

$$10 < Pr$$

$$Re < Re_x < 5 \cdot 10^5$$

Türbülanslı akım bölgesinde tavsiye edilen yerel ve ortalama Nusselt korelasyonları aşağıda belirtilmiştir.

$$Nu_x = 0.0296 Re_x^{0.8} Pr^{1/3} \quad [\text{Incropera ve Dewitt, 1989}]$$

$$Nu_L = 0.036 Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \quad [\text{Incropera ve Dewitt, 1989}]$$

Bu bağıntılar ise aşağıdaki aralıkta geçerlidir.

$$5 \cdot 10^5 < Re_x < 10^7$$

Türbülanslı akım bölgesi için tavsiye edilen bir başka yerel Nusselt korelasyonu ise,

$$Nu_x = 0.185 Re_x (\log_{10} Re_x)^{-2.584} Pr^{1/3} \quad (\text{Incropera ve Dewitt, 1989})$$

Bu bağıntı aşağıdaki aralıklarda geçerlidir.

$$Re_x > 10^7$$

$$0.6 < Pr < 60 \text{ olmaktadır.}$$

9.2 Havanın Fırın Yan Duvarlarına Dik Olarak Üflenmesi

Fırın duvarlarının soğutulması amacıyla dikdörtgen kesitli nozulların yan yana dizilmeleri halinde fırın duvarlarında meydana gelen ısı transferini hesaplayabilmek için aşağıdaki eşitlikler uygulanır.

$$Nu/Pr^{0.42} = 2/3 A_{r,0}^{3/4} [(2Re)/(A_r/A_{r,0} + A_{r,0}/A_r)]^{2/3} \quad (\text{Incropera ve Dewitt, 1989}) \quad (9.1)$$

$$A_{r,0} = [60 + 4 \{(H/2W) - 2\}]^2 \quad (\text{Incropera ve Dewitt, 1989}) \quad (9.2)$$

Bu denklemler aşağıdaki aralıklarda geçerlidir.

$$1500 < Re < 40000$$

$$2 < H/W < 80$$

$$0.008 < A_r < 2.5 A_{r,0} \text{ değerleri arasında olmaktadır.}$$

Burada,

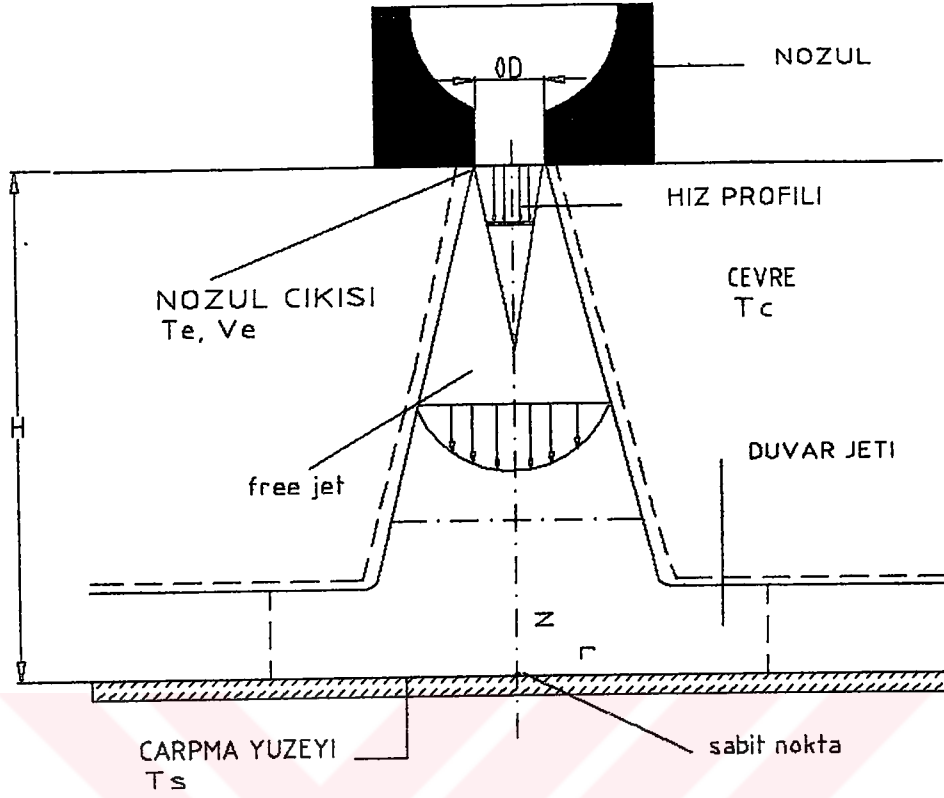
H= Nozul çıkış noktasının duvar yüzeyine olan mesafesi (m)

W=Dikdörtgen kesitli nozulun eni (m)

A_r : Birim hücre yüzey alanının, nozulun akış kesit alanına oranını veren ifadedir.

S: Duvar yüzeyine dik olarak yerleştirilen dikdörtgen kesitli nozulların eksenleri arasındaki mesafe (m)

$A_r = W/S$ olarak ifade edilir.



Şekil 9.2 Duvar yüzeyine dik olarak yapılan üfleme

9.3 Fırın Yan Duvarlarının Dış Yüzeyindeki Ortalama Sıcaklık Değerinin Sayısal Hesabı

Nozullarla yapılan üfleme sonucunda duvar boyunca meydana gelen ısı transferini hesaplayabilmek için, soğutma havasının nüfus ettiği tam cam seviyesi boyunca duvar dış yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerinin belirlenmesi gerekir. Fırın içinde termokuplar ile yapılan ölçümler sonucu cam seviyesindeki fırın duvarlarının iç yüzey sıcaklığı yaklaşık bir değer olarak tespit edilmiştir. Bu değer yaklaşık olarak 1524°C 'dir. Fırın yan duvarları boyunca portların olduğu noktalarda yapılan ölçümlerde sırası ile 1449°C , 1508°C , 1556°C , 1587°C , 1565°C , 1516°C sıcaklık değerleri tespit edilmiştir.

Duvar dış yüzey sıcaklığını bulabilmek için ilk önce; ergimiş camla duvar iç yüzeyinde sıcaklık farkından dolayı hava hareketlerine bağlı olarak oluşan konveksiyon ısı transferinin hesaplanması gerekir.

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \text{ denklemine göre} \quad (9.3)$$

$$\alpha = 15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K} \text{ (camın konveksiyon ısı transfer katsayısı)} \quad (\text{Nandı, 1991})$$

$$\Delta T = 1571^{\circ}\text{C} - 1524^{\circ}\text{C} = 47^{\circ}\text{C} \text{ (ergimiş camın yüzeyi ile duvar iç yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı)}$$

$A = 72.4 \text{ m} * 0.10 \text{ m} = 7.24 \text{ m}^2$ (ısı transferinin meydana geldiği duvar yüzeyi)

$Q = 15 * 47 * 7.24 = 5104.2 \text{ W/h}$ olarak cam yüzeyinden duvara konveksiyonla geçen ısı transferi hesaplanır.

Buna göre elde edilen bu Q değeri fırın yan duvarlarının iç yüzeyinden dış yüzeyine kondüksiyonla yayılan ısı transferi miktarına eşit olacaktır. Başka bir deyişle;

$$Q = (T_i - T_d) / (L/\lambda) \quad (9.4)$$

$T_i = 1524 \text{ }^\circ\text{C}$ (duvar iç yüzey sıcaklığı)

$T_d = ?$ (duvar dış yüzey sıcaklığı)

$L = 0.30 \text{ m}$ (AZS Tipi fırın duvarlarının kalınlığı)

$\lambda = 1.50 \text{ W/m.h.K}$ (duvar malzemesinin kondüksiyon ısı transfer katsayısı)
(Nandi, 1991)

Bütün bilinen bu değerler (9.4) denkleminde yerine konulursa,

$T_d = 502 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak fırın duvarlarının ortalama sıcaklık değeri hesaplanır.

9.4 Duvar Boyunca Dikdörtgen Kesitli Hava Soğutma Nozullarının Yan Yana Dizilmesi Halinde Meydana Gelen Isı Transferi Hesabı

TR1 fırınının duvarlarının soğutulması amacıyla dikdörtgen kesitli nozulların eksenleri arasında 50 cm mesafe olacak şekilde birbirleri ile yan yana dizilmeleri halinde fırın duvarlarında meydana gelen konveksiyon ısı transferinin sayısal hesabı aşağıda yapılmıştır. Buna göre bilinen sıcaklık değerleri:

$T_\varphi = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (ortalama bütün yıl boyunca dış ortam sıcaklığı)

$T_d = 502 \text{ }^\circ\text{C}$ (cam seviyesindeki fırın yan duvarlarının dış yüzey sıcaklığı). Bölüm 9.3'de hesabı yapılmıştı.

$T_F = (T_\varphi + T_d)/2$ formülü ile ortalama film sıcaklığı bulunur.

$$T_F = (25 + 502)/2 = 263.5 \text{ }^\circ\text{C} = 536.5 \text{ K}$$

Bu sıcaklık değerine bağlı olarak hava için verilen tablolardan

$$\rho = 0.65 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu=2.82 \cdot 10^5 \text{ kg/ (ms)}$$

$$c_p=1.035 \text{ kJ/kg } ^\circ \text{K}$$

$$v =42.83 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr= 0.68$$

$$\lambda = 0.042 \text{ W/(mK) değerleri okunur.}$$

Tam cam seviyesi boyunca uygulanan toplam soğutma havası debisi

$$Q=125.000 \text{ m}^3/\text{h' dir.}$$

$$Q=A_K \cdot V$$

(9.5)

denklemine göre üflenen havanın hızını (V) bulmak kolaydır.

Nozul çıkış kesiti dikdörtgen olduğundan hava akış kesiti $A=a \cdot b$ 'dir

$$a=2.4 \text{ cm (hava çıkış nozulunun eni)}$$

$$b=32 \text{ cm (hava çıkış nozulunun boyu)}$$

$$A_K= 0.32 \text{ m} \cdot 0.024 \text{ m}=0.0076 \text{ m}^2 \text{ olarak hesaplanır.}$$

Fırın duvarları boyunca toplam 194 adet nozul kullanıldığından ve tüm nozulların hava çıkış kesitleri birbirine eşit olduğundan, bir nozulun hava üfleme debisi (Q_n)

$$Q_n= 125.000/194=644.32 \text{ m}^3/\text{h olur.}$$

$$Q_n=0.178 \text{ m}^3/\text{s olarak bulunur.}$$

(9.5) denkleminde tüm değerler yerine konulursa nozuldan çıkan hava hızı $V=23.55 \text{ m/s}$ olarak hesaplanır.

Fırın duvarına dik olarak üflenen havanın nozuldan çıkış hızını (V) bulmak için uygulanan diğer bir hesaplama yöntemi (9.6) denklemi ile belirtilmiştir.

$$V=2000 \cdot P/\rho \cdot f \cdot \xi \text{ (m/s)[Schlnder,1970]}$$

(9.6)

Bu ifade de;

$$P=\text{Soğutma havasının basıncı (atm)}$$

$$\rho=\text{Havanın yoğunluğu (kg/m}^3\text{)}$$

f = Nozul çıkış kesit alanının nozul giriş kesit alanına oranını veren boyutsuz ifade

ξ = Basınç kayıp katsayısı olarak ifade edilir.

TR1 fırınında kullanılan alçak basınçlı hava fanının hava çıkış hızını bulmak için gerekli olan değerleri şöyledir.

$$P=1 \text{ atm} \quad T=25 \text{ C}$$

$$\rho = 1.17 \text{ kg/m}^3$$

$$\xi = 2$$

$$f=0.4$$

Tüm değerler (9.6) denkleminde yerine konulursa;

$$V=21.36 \text{ m/s} \text{ olarak bulunur.}$$

Hesaplamalarda ilk bulduğumuz hız değeri olan 23.55 m/s'lik hava hızı kullanılacaktır.

$H=10 \text{ cm}$ olarak kabul edilmiştir.

$W=2.4 \text{ cm}$ (dikdörtgen kesitli nozulun eni)

$$A_f = W/S = 0.024/0.50 = 0.048 \text{ olur.}$$

(9.2) denkleminde tüm bilinen değerler yerine konulursa

$$A_{r,0} = 0.129 \text{ olarak hesaplanır.}$$

$Re = (V_o * x) / \nu$ formülü uygulanırsa;

$x=2W$ ise [Incopera ve Dewitt, 1989]

$$Re = (23.55 \text{ m/s} * 0.048 \text{ m}) / 42.83 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re = 26392.7 \text{ olarak hesaplanır.}$$

(9.1) denkleminde tüm bilinen değerler yerine konulursa,

$$Nu = 81.2 \text{ olur.}$$

α (konveksiyon ısı transfer katsayısını) bulabilmek için;

$Nu = (\alpha * x) / \lambda$ formülü uygulanırsa

$$\alpha = (Nu * \lambda) / x \text{ haline gelir.}$$

$$\alpha = (81.2 \cdot 0.042 \text{ W/mK}) / 0.048 \text{ m}$$

$\alpha = 71.05 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesap edilir.

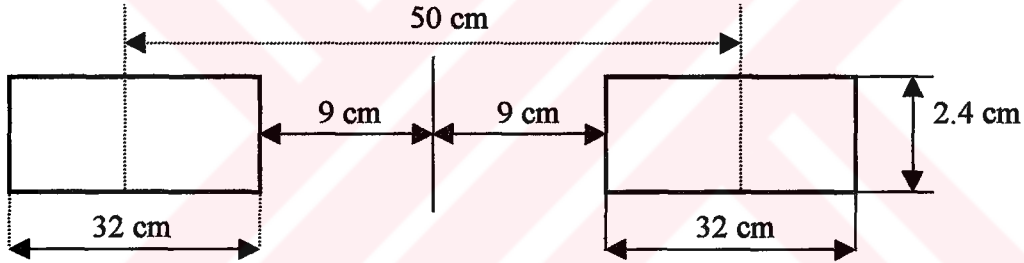
Fırın duvarı boyunca meydana gelen ısı transferi;

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \text{ formülüne göre}$$

$$Q = 71.05 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 0.1 \text{ m} \cdot (502 - 25)\text{K}$$

$$Q = 1694.5 \text{ W olur.}$$

Yukarıdaki formülde yüzey alanı olarak (A); bir nozulun duvar yüzeyini soğutmak için üflemiş olduğu soğutma havasının tatbik edildiği alan olarak göz önüne alınmıştır. Buna göre nozulların eksenleri arasındaki mesafe 50 cm olduğuna göre ve tam cam seviyesinin yaklaşık olarak 5 cm altına ve 5 cm üstüne soğutma havası etki ettiğinden $A = 0.5 \text{ m} \cdot 0.1 \text{ m}$ olarak alınmıştır.



Şekil 9.3 Dikdörtgen kesitli nozulların boyutları

9.5 Fırın Duvarlarına Yatay Olarak Havanın Üflenmesi Durumunda Elde Edilen Isı Transfer Miktarı Hesabı

Bölüm 9.4' de ifade edilen ortalama film sıcaklığına bağlı olarak hava için tablodan okunan değerler, fırın duvar yüzeyine yatay olacak şekilde hava üflenmesi durumunda da aynen geçerli olacaktır.

$$T_{\text{ç}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (bütün yıl boyunca dış ortamın ortalama sıcaklığı)}$$

$$T_{\text{d}} = 502 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (cam seviyesindeki fırın yan duvarlarının dış yüzey sıcaklığı)}$$

$T_{\text{F}} = (T_{\text{ç}} + T_{\text{d}}) / 2$ formülü ile ortalama film sıcaklığı bulunur.

$$T_{\text{F}} = (25 + 502) / 2 = 263.5 \text{ }^{\circ}\text{C} = 536.5 \text{ K}$$

Bu sıcaklık değerine bağlı olarak hava için verilen tablolardan

$$\rho=0.65 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu=2.82 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(ms)}$$

$$c_p=1.035 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

$$\nu =42.83 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr= 0.68$$

$$\lambda = 0.042 \text{ W/(mK)} \text{ değerleri okunur.}$$

Ayrıca uygulanan soğutma havasının debisi, akışkan hızı ve nozul akış kesiti bilindiği üzere,

$$Q=125.000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_n=0.178 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V=23.55 \text{ m/s}$$

$$A_K=0.0076 \text{ m}^2 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Bu bölümde tüm bu özellikler aynı kabul edilerek sadece üfleme şeklinin değiştirilmesi durumunda duvar yüzeyinde konveksiyon ısı transferinde ne gibi değişiklikler olduğunun etkileri incelenecektir.

$Re=(V_o \cdot L) / \nu$ formülü uygulanırsa;

L:Fırın duvarı yüksekliği

$$Re=23.55 \text{ (m/s)} \cdot 1.3 \text{ (m)} / 42.83 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$$Re=714802.7 \text{ olarak hesaplanır.}$$

$$5 \cdot 10^5 < 714802.7 < 10^7$$

$$5 \cdot 10^5 < Re_L < 10^7 \text{ sınır şartlarına uyduğuna göre,}$$

Türbilanslı akım koşulu için,

$$Nu_L=0.036 Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \text{ korelasyonu uygulanır. [Incopera ve Dewitt, 1989)}$$

Korelasyondaki bilinen tüm değerler yerine konulursa,

$$Nu=0.036 \cdot 714802.7^{0.8} \cdot 0.685^{1/3}$$

$$Nu=1529.77 \text{ olarak hesaplanır}$$

α (konveksiyon ısı transfer katsayısını) bulmak için

$$Nu= (\alpha \cdot L) / \lambda \text{ formülü uygulanırsa}$$

$\alpha = (Nu \cdot \lambda) / L$ haline gelir.

$$\alpha = (1529.77 \cdot 0.042 \text{ W/mK}) / 1.3 \text{ m}$$

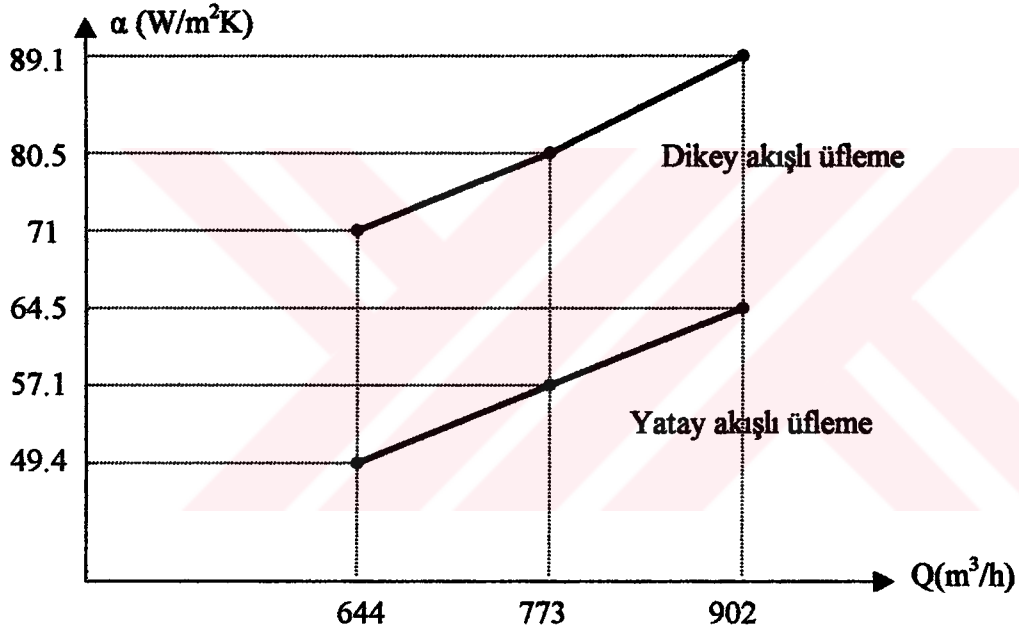
$\alpha = 49.42 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesap edilir.

Fırın duvarı boyunca konveksiyonla oluşan ısı transferi;

$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta T$ formülüne göre

$$Q = 49.42 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 0.5 \cdot 0.1 \cdot (502 - 25)$$

$Q = 1178.6 \text{ W}$ olarak hesap edilir.



Şekil (9.4) Dikey ve yatay akışlı üfleme tiplerinin karşılaştırılması

Şekil 9.4'deki sonuçları daha iyi görebilmek amacı ile fırın duvarlarını soğutmak için kullanılan nozulların farklı debi değerlerinde sahip oldukları α (konveksiyon ısı transfer katsayısı) değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Yatay akışlı üfleme için $Q = 773 \text{ m}^3/\text{h}$ debi değerinde

$$V = 28.2 \text{ m/s}$$

$$Re = 857763.2$$

$$Nu = 1769.9$$

$$\alpha = 57.1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$Q=902 \text{ m}^3/\text{h}$ debi değerinde

$V=32.9 \text{ m/s}$

$Re=998599.1$

$Nu=1998.9$

$\alpha=64.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak bulunmuştur.

Dikey akışlı üfleme için $Q=773 \text{ m}^3/\text{h}$ debi değerinde

$V=28.2 \text{ m/s}$

$Re=31671.2$

$Nu=92$

$\alpha=80.5 \text{ W/m}^2\text{K}$

$Q=902 \text{ m}^3/\text{h}$ debi değerinde

$V=32.9 \text{ m/s}$

$Re=36871.3$

$Nu=101.8$

$\alpha=89.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplanmıştır.

Yukarıdaki hesaplamalardan görüleceği gibi dikey olarak yapılan üfleme şekline bağlı olarak elde edilen ısı transfer miktarı, yatay akışlı üfleminin yaklaşık olarak 1.4 katına eşit olmaktadır. Yani %40 oranında daha iyi bir ısı transferi gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle TR1 fırın yan duvarlarının soğutulması için duvar yüzeyine dikey akışlı üfleminin en iyi üfleme tipi olduğu sonucuna çizelge (9.1) ile rahatlıkla varmamız mümkündür.

9.6 Yuvarlak Kesitli Nozul Kullanılması Durumunda Elde Edilen Isı Transfer Miktarı Hesabı

Bir başka karşılaştırma yöntemi olarak, şu an fırın duvarlarının soğutulması için kullanılan dikdörtgen kesitli nozulların yerine yuvarlak kesitli nozulların kullanılması halinde elde edilecek olan konveksiyon ısı transferinin mukayesidir.

Fırın duvarları boyunca yuvarlak kesitli nozulların yanyana dizilmeleri halinde fırın duvarlarında meydana gelen ısı transferini hesaplayabilmek için aşağıdaki eşitlikler uygulanır.

$$Nu/Pr^{0.42}=K(A_r, H/D) G(A_r, H/D)F_2(Re) \quad [\text{Incopera ve Dewitt, 1989}] \quad (9.7)$$

$$K=[1+ \{(H/D)/(0.6/ A_r^{1/2})\}^6]^{-0.05} \quad [\text{Incopera ve Dewitt, 1989}] \quad (9.8)$$

$$F_2=0.5 Re^{2/3} \quad [\text{Incopera ve Dewitt, 1989}] \quad (9.9)$$

$$G= \frac{D}{r} \frac{1-1.1D/r}{1+0.1(H/D-6)D/r} \quad [\text{Incopera ve Dewitt, 1989}] \quad (9.10)$$

$$G= 2A^{1/2} \frac{1-2.2A^{1/2}}{1+0.2(H/D-6)A^{1/2}} \quad [\text{Incopera ve Dewitt, 1989}] \quad (9.11)$$

Yukarıdaki denklemler aşağıdaki aralıklarda geçerlidir.

$$2000 < Re < 100.000$$

$$2 < H/D < 12$$

$0.004 < A_r < 0.04$ değerleri arasında olmaktadır.

D =Yuvarlak kesitli nozulun çapı (m)

r = Nozulun merkezinden çevreye radyal doğrultudaki uzaklık (m)

Buna göre yuvarlak kesitli nozullar ile yapılan üflemede de soğutma havası debisi ve havanın hızı önceki karşılaştırmalarda olduğu gibi aynı değerde alınmıştır.

$$Q=125.000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_n=0.178 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V=23.55 \text{ m/s}$$

$A_K=0.0076 \text{ m}^2$ olarak bulunmuştur.

Yuvarlak nozulun çapını (D) bulabilmek için,

$$A= (\pi * D^2)/4 \quad (9.12)$$

eşitliği uygulandığı takdirde

$D=0.0983 \text{ m}$ olarak bulunur.

$H=0.20$ m kabul edilmiştir.

$D=0.098$ m

$$A_r = (\pi * D^2) / 4S^2 = \pi * 0.098^2 / 4 * 0.50^2 = 0.030 \text{ olur.}$$

A_r : Birim hücre yüzey alanının, nozulun akış kesit alanına oranını veren ifadedir.

S : Duvar yüzeyine dik olarak yerleştirilen dairesel kesitli nozulların eksenleri arasındaki mesafedir. Bu değer 50 cm olarak belirlenmiştir.

(9.8) denkleminde bütün bilinen değerler yerine yazılırsa,

$K=1.002$ olarak hesaplanır.

$Re = (V_o * D) / \nu$ formülü uygulanırsa;

$$Re = (23.55 * 0.098) / 42.83 * 10^{-6} = 53885.12 \text{ olur.}$$

$F_2 = 0.5 Re^{2/3}$ denklemine göre,

$$F_2 = 713.26 \text{ olur.}$$

$$H/D = 20/9.8 = 2.04$$

(9.11) denkleminde tüm değerlerin yerine konulması neticesinde

$$G = 0.248 \text{ bulunur.}$$

(9.7) denkleminde bütün bilinen değerler yerine yazılırsa,

$$Nu = 150.65 \text{ olarak hesaplanır.}$$

α (konveksiyon ısı transfer katsayısını) bulmak için;

$$Nu = (\alpha * D) / \lambda \text{ formülü uygulanırsa}$$

$$\alpha = (Nu * \lambda) / D \text{ haline gelir.}$$

$$\alpha = (150.65 * 0.042 \text{ W/mK}) / 0.098 \text{ m}$$

$$\alpha = 64.56 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ olarak hesap edilir.}$$

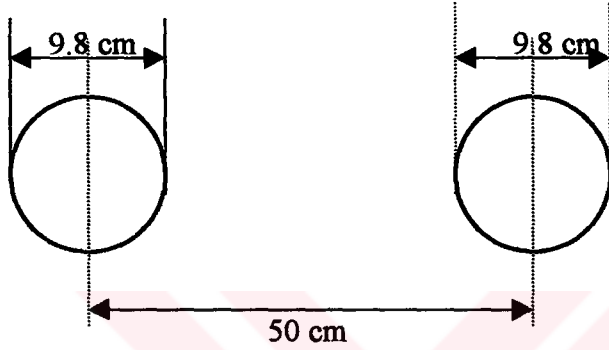
Fırın duvarı boyunca meydana gelen ısı transferi;

$$Q = \alpha * A * \Delta T \text{ formülüne göre}$$

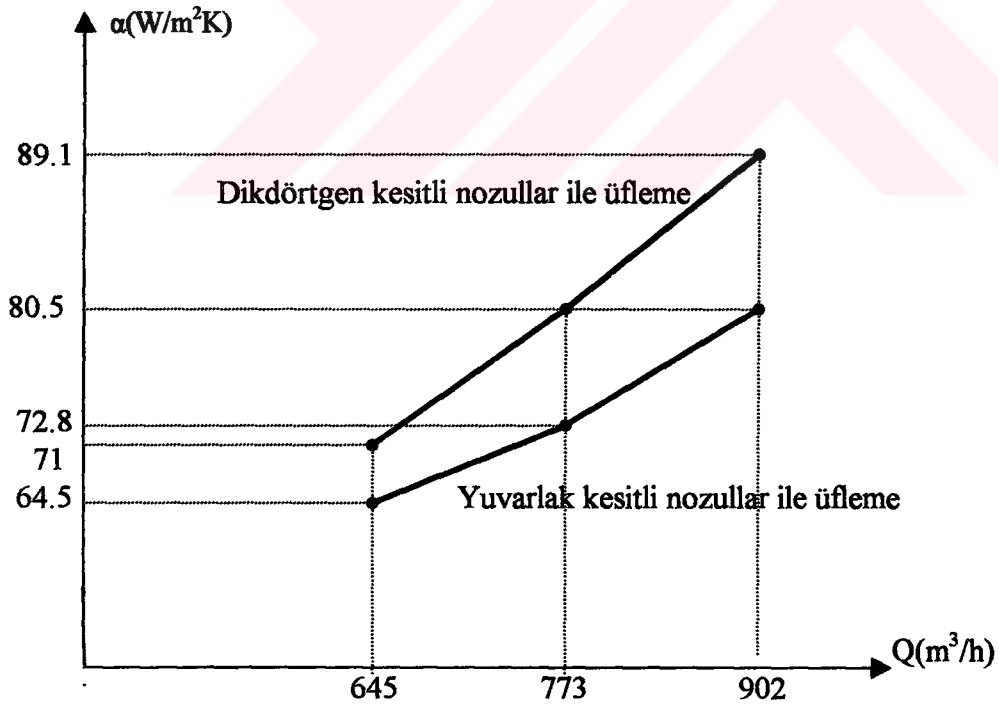
$$Q=64.56 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 0.3 \text{ m} \cdot 0.1 \text{ m} \cdot (502-25)\text{K}$$

$Q=923.85 \text{ W}$ olarak hesaplanır.

Yukarıdaki formülde yüzey alanı olarak (A); bir nozulun duvar yüzeyini soğutmak için üflemiş olduğu soğutma havasının tatbik edildiği alan olarak göz önüne alınmıştır. Buna göre nozulların eksenleri arasındaki mesafe 50 cm olduğuna göre ve tam cam seviyesinin 5 cm altına ve 5cm üstüne soğutma havası tatbik edilmiştir.



Şekil 9.5 Yuvarlak kesitli nozulların boyutları



Şekil (9.6) Dikdörtgen ve yuvarlak kesitli nozulların karşılaştırılması

Şekil 9.6'deki sonuçları daha iyi görebilmek amacı ile fırın duvarlarını soğutmak için kullanılan 2 farklı kesitli nozulun farklı debi değerlerinde sahip oldukları α (konveksiyon ısı transfer katsayısı) değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Buna göre yuvarlak kesitli nozul için $Q=773 \text{ m}^3/\text{h}$ debi değerinde

$$V=28.2 \text{ m/s}$$

$$Re=64524.8$$

$$F_2=804.3$$

$$Nu=169.8$$

$$\alpha=72.8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$Q=902 \text{ m}^3/\text{h}$ debi değerinde

$$V=32.9 \text{ m/s}$$

$$Re=75279$$

$$F_2=891.3$$

$$Nu=188.2$$

$$\alpha=80.6 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Yukarıdaki sonuçlardan görüleceği gibi dikdörtgen kesitli nozullar ile yapılan dik üfleme sonucu, yuvarlak kesitli nozullarla yapılan üfleme göre duvar boyunca elde edilen konveksiyon ısı transferinde yaklaşık olarak %9-10 oranında daha iyi bir sonuç elde edilir. Buna sonuçlara bağlı olarak fırın duvarlarının soğutulması için en uygun ve en verimli üfleme kesitinin seçildiği anlaşılmaktadır.

9.7 Dikdörtgen Kesitli Nozulların Eksenleri Arasındaki Mesafenin Değiştirilmesi Durumunda Duvar Boyunca Meydana Gelen Isı Transferi

Fırın duvarı boyunca dizilmiş olan dikdörtgen kesitli nozulların eksenleri arasındaki mesafenin değiştirilmesi (S), toplam ısı transferini hangi oranlarda değiştirebileceğinin hesabı da bu bölümde yapılmıştır. Buna göre daha önceki S mesafesi 50 cm olarak alınmıştır.

$$S=50 \text{ cm için}$$

$$Q=644.3 \text{ m}^3/\text{h} \text{ debi değerinde}$$

$$V=23.55 \text{ m/s}$$

$$A_{r,0}=0.129$$

$$A_r=0.024/0.50=0.048 \text{ olur.}$$

$$Re=26392.7$$

$$\text{Nu}=81.2$$

$$\alpha=71 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Q=1694.5 \text{ W olarak bulunmuştur.}$$

$$S=40 \text{ cm için}$$

$$Q=644.3 \text{ m}^3/\text{h debi değerinde}$$

$$V=23.55 \text{ m/s}$$

$$A_{r,0}=0.129$$

$$A_r=0.024/0.40=0.06 \text{ olur.}$$

$$\text{Re}=26392.7$$

$$\text{Nu}=90.3$$

$$\alpha=79 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Q=1884.1 \text{ W olur.}$$

$$S=60 \text{ cm için}$$

$$Q=644.3 \text{ m}^3/\text{h debi değerinde,}$$

$$V=23.55 \text{ m/s}$$

$$A_{r,0}=0.129$$

$$A_r=0.024/0.60=0.04 \text{ olur.}$$

$$\text{Re}=26397.2$$

$$\text{Nu}=73.8$$

$$\alpha=64.4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Q=1535.9 \text{ W olur.}$$

Dikdörtgen kesitli nozulların eksenleri arasındaki mesafe 50 cm'den 40 cm'e düşürüldüğü takdirde α katsayısında yaklaşık olarak %10 oranında bir iyileşme meydana gelmektedir.

10. SONUÇLAR(2)

TR1 fırın yan duvarlarında, özellikle tam cam seviyesinde yüksek sıcaklık nedeniyle meydana gelen korozyonları en aza indirebilmek için fırın çevresi boyunca yaklaşık olarak 85.5 metrelik bir hat boyunca fanlarla tahrik edilen hava soğutması uygulanmıştır. Fırın duvarı boyunca en iyi ısı transferinin meydana getirilebilmesi için soğutma havasının nozullarla üflenme şekillerine bağlı olarak elde edilen ısı transferi değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre yapılan hesaplamalar neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Tam cam seviyesinde, bir hat boyunca, duvar yüzeyine nozullarla havanın dik olarak üflenmesi sağlanmıştır (şu an TR1 fırın duvarlarında uygulanan soğutma şekli budur).
- 2) İkinci olarak fırın duvarlarına havanın duvar yüzeyine nozullarla yatay olarak üflenmesi sağlanmıştır.
- 3) Her iki tip üfleme pozisyonunda kullanılan toplam hava debisi aynı olup bu değer 125.000 m³/h'dir. Ayrıca üflenen havanın hızı da sabit tutulmuş olup bu değer 23.55 m/s'dir. Fırın duvarlarını soğutmak için 2.4 cm*32 cm ölçülerinde 194 adet dikdörtgen kesitli nozul kullanılmaktadır.
- 4) Dik olarak yapılan hava üflenmesi neticesinde elde edilen konveksiyon ısı transferi katsayısı (α) paralel akışlı hava üflenmesi ile elde edilen konveksiyon ısı transferi katsayısından yaklaşık olarak 1.4 kat daha büyüktür. Yani %40 oranında daha iyi bir ısı transferi gerçekleşmektedir. Bu şekilde fırın duvarı boyunca dik olarak yapılan hava üfleme ile en iyi ısı transferinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.
- 5) Bu sonuca bağlı olarak duvar boyunca nozullarla yapılan hava üfleme için kullanılan fanların elektrik sarfiyatı incelendiği takdirde, dik üfleme neticesinde fanların elektrik giderleri daha düşük olmaktadır. En iyi üfleme pozisyonunun seçildiğinin doğruluğu hem maliyet hemde ısı transferinin büyüklüğü ile ispat edilmiştir.
- 6) Trakya Cam Fabrikası fırın duvarlarının soğutulmasında kullanılan nozulların hava çıkış kesitleri dikdörtgen kesitlidir. Hesaplamalar neticesinde toplam 125.000 m³/h'lık hava debisine bağlı olarak duvar boyunca meydana gelen konveksiyon ısı transfer katsayısı $\alpha=71$ W/m²K olarak hesaplanmıştır.
- 7) Dikdörtgen kesitli nozul yerine karşılaştırma yapmak ve en iyi ısı transferini sağlamak amacıyla yuvarlak kesitli nozullar ile tam cam seviyesine, duvar yüzeyine dik olacak şekilde hava üflenmesi yapılmıştır. Hesaplamalar neticesinde toplam 125.000 m³/h'lık hava debisine bağlı olarak konveksiyon ısı transfer katsayısı $\alpha=64.5$ W/m²K olarak hesaplanmıştır.

- 8) Hesaplanan değerlerden, dikdörtgen kesitli nozul kullanılması halinde duvar boyunca yaklaşık olarak %9-10 oranında daha iyi bir ısı transferi gerçekleşeceği anlaşılmaktadır.
- 9) $Q=A*V$ formülüne göre Q ve V değerleri sabit olduğundan akış kesitinin (A) şekline bağlı olarak karşılaştırma yapılmıştır. Dikdörtgen kesitli nozulda akış kesit alanı $A=a*b$, yuvarlak kesitli nozul için akış kesit alanı $A=(\pi*D^2)/4$ olarak ifade edilir. Buna göre yuvarlak kesitli nozulun hava çıkış kesit çapı 9.8 cm olacak şekilde dizayn edilmiş olup, fırın duvarlarının soğutulması için bu ölçüler ile üfleme gerçekleştirilmiştir.
- 10) Dikdörtgen kesitli nozullar mevcut sistemde, eksenleri arasındaki mesafe 50 cm olacak şekilde yanyana dizilmiştir. Eksenleri arasındaki mesafe 40 cm'e düşürüldüğü takdirde duvar boyunca meydana gelen konveksiyon ısı transfer katsayısı $\alpha=79 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplanmıştır. Bu şekilde yaklaşık olarak %10 oranında daha iyi bir ısı transferi gerçekleşmektedir. Buna karşılık eksenler arasındaki mesafe 60 cm'e çıkarıldığında ise $\alpha=64.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ olduğundan ısı transferinde belirgin bir düşüş gözlenmiştir.
- 11) Fırın duvarlarının tam cam seviyesinde soğutulması için dikdörtgen kesitli nozul kullanılmasının çeşitli avantajları olabilmektedir. Çünkü ince bir hat boyunca soğutma uygulandığı için dikdörtgen kesitli nozullarla yapılan soğutma, soğutmanın istenildiği bölgeye daha iyi nüfus etmesi ve duvar boyunca zamanla meydana gelen aşınmalarda daha etkili olması sebebiyle tercih edilmiştir.
- 12) Fırın duvarlarına dik olarak konulan nozulların, soğutulacak yüzeye olan uzaklığı yani H mesafesinin değiştirilmesi duvar boyunca meydana gelen ısı transferini belli bir ölçüde değiştirmektedir. Yaklaşık olarak 8-10 cm'den yapılan üfleme en iyi ısı transferini sağladığı için en uygun H mesafesi olduğu sonucuna varılmıştır.
- 13) Sonuç olarak duvar boyunca dikdörtgen kesitli nozulların 50 cm ara ile yan yana yerleştirilmesi ile, duvar yüzeyinden elde edilen ısı transfer miktarı, yuvarlak kesitli nozulların 50 cm ara ile yan yana yerleştirilmesi sonucu elde edilen ısı transferinden yaklaşık olarak %9-10 oranında daha büyük olmaktadır. Bu sonuçlardan, şu an Trakya Cam Fabrikasında cam ergitme fırınlarında dikdörtgen kesitli nozullar ile soğutmanın gerçekleştirilmesinin uygun olduğu anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

Akgün, F. ve Çoban, Turhan., (1997), Cam Ergitme Fırınlarında Isıl Enerji Analizi, Tubitak-Mam Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze.

Alvi, S.H., Sridharan, K. ve Lakshmana, N.S., (1978), Loss Characteristics of Orifices and Nozzles, Journal of Fluids Engineering, 100:290-299, India

Badger, A.E., Fugman, V.C. ve Wormelker, H.I., (1992), Heat Balance of a Glass Tank, McGraw- Hill Book Company, New York

Barton, J.L. ve Merlin, A., (1993), "Innovation in Glass Melting", Glass Technology, Vol.34, No.5, Oct.1993.

Büyüktür, A.R., (1991), Termodinamik Cilt2 Uygulama Esasları , Uludağ Üniversitesi Basımevi, s:459-460.

Dikeç, F., (1982), Çözümlü Metalurji Termodinamiği Problemleri, İ.T.Ü. Metalurji Fakültesi Yayınları, Sayı:3, İTÜ Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, Maçka-İstanbul

Günceler, S. ve Kınılı, E., (1986), "Thermography in Flux- Line Cooling", XIV Intl. Congr. On Glass, Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş., 3:105-110, İstanbul

Günther, R., (1958), "Glass Melting Tank Furnaces", Society of Glass Technology, Almanca'dan İngilizce'ye Çeviri, Sheffield, pp:5.

Hrma, P., Blazek, J. ve Pelantova, V., (1981), An Analysis of the Cooling of Glass Furnace Sidewalls, 22/5:215-221, Czechoslovakia

Incropera, F.P. ve Dewitt, D.P., (1989), Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley-Sons, New York

Kakaç, S., (1998), Örneklerle Isı Transferi, Tıp Teknik Yayıncılık, Ankara

Kern, D.G., (1950), Process Heat Transfer, McGraw- Hill Book Company, New York

Kuşçuoğlu, S., Yücesoy, D. ve Engin, S., (1993), Cam Teknolojisine Giriş, I. Cilt, İstanbul

Kuşçuoğlu, S., Yücesoy, D. ve Engin, S., (1993), Cam Teknolojisine Giriş, II. Cilt, İstanbul

Manring, W.H. ve Baven W.C., (1964), Processing in the Glass Industry, NewYork, pp:43.

McQuiston, F.C. ve Parker, J. D., (1988), Heating, Ventilating and Air Conditioning Analysis and Design, John Wiley- Sons, New York

Nandi, D., (1991), Handbook on Refractories, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi

Özgen, Dr. S., (1984), "Cam Fırını Yan Bloklarında Korozyon ve Ölçümü", Türkiye Şişe Cam Fabrikaları A.Ş. Araştırma Merkezi Kütüphanesi, 151:1-12.

Pitts, D.R. ve Sissom, L.E., (1991), 1000 Solved Problems in Heat Transfer, McGraw- Hill Book Company, New York

Schlünder, E.U., Krötzsch, P. ve Hernecke, W., (1970), "Gesetzmässigkeiten der Wärme und Stoffübertragung bei der Prallströmung aus Rund und Schlitzdüsen", 6:333-428, Beyreuth

Sismey C.J., (1983), "Limitation affecting the performance of glass melting furnaces", Glass Technology, Vol.25, No.2, April 1984.

Tooley, F.V., (1953), Handbook of Glass Manufacture Volume1, Ogden Publishing Company, pp:57-68.

Topkapı Şişe Cam Sanayi A.Ş. Eğitim Müdürlüğü "Cam Eğitim Notları", İstanbul

Trier, W., (1985), Glass Furnaces Design Construction and Operation, Benham and Company Limited Colchester, Sheffield

Whichelow, V.E., (1988), Insulating, Noncooling, and Cooling of Sidewall Blocks, United Glass Ltd, St Albans

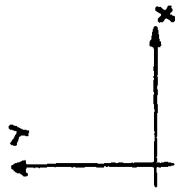


No.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
X	1. port +265	1. port +265	3. port +205	5. port +215	6. port +193	6. port +50	6. port -130
Y	-376	+391	0	0	0	0	0

TABAN T/C

No.	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
X	1. port eks.	2. port eks.	3. port eks.	4. port eks.	4. port eks.	4. port eks.	5. port eks.	6. port eks.	6. port eks.	6. port eks.	6. port eks.	6. port eks.
Y	0	0	0	+620	0	-620	0	0	0	0	0	0

KEMER T/C

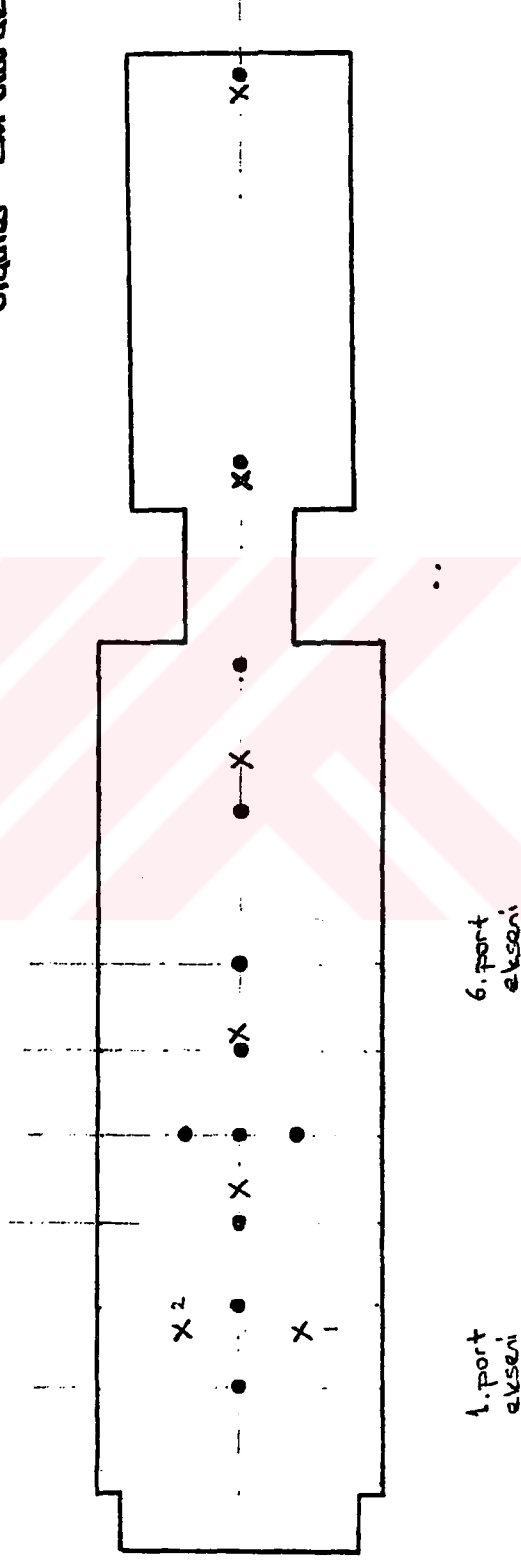


Fırın eksenleri

X Taban T/C

• Kemer T/C

Ölçüler cm olarak verilmiştir.



EK 1. TR1 TABAN VE KEMER TERMOKUPLARI YERLEŞİM PLANI

TARİH	BC	HY	K5T	CK	OY	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	YH	LO1	LO2
01.05.2000	675,5	0,25	58,7	25,78	150,77	1230	1210	850	960	730	256	54800	1449	1508
02.05.2000	676,7	0,24	77,2	25,97	151,29	1234	1214	854	964	734	253	55008	1446	1502
03.05.2000	665,8	0,25	70,0	26,14	153,45	1229	1209	849	959	729	233	54733	1446	1501
04.05.2000	630,5	0,18	52,3	25,90	160,42	1197	1177	817	927	697	269	52958	1447	1507
05.05.2000	621,7	0,12	35,2	25,99	161,28	1166	1146	786	896	666	338	51260	1447	1511
06.05.2000	627,8	0,11	44,0	26,12	159,07	1157	1137	777	887	657	372	50733	1444	1502
07.05.2000	625,5	0,10	44,3	26,20	159,60	1163	1143	783	893	663	376	51058	1440	1505
08.05.2000	678,0	0,09	36,8	26,04	158,49	1159	1139	779	889	659	340	50850	1449	1509
09.05.2000	579,2	0,11	43,6	25,35	167,78	1120	1100	740	850	630	354	48808	1441	1510
10.05.2000	499,7	0,09	40,8	26,14	186,56	1070	1050	690	800	570	245	46000	1450	1519
11.05.2000	503,8	0,09	54,8	25,85	184,61	1071	1051	691	801	571	260	46042	1448	1522
12.05.2000	519,3	0,11	49,9	26,95	179,93	1079	1059	699	809	579	279	46425	1455	1525
13.05.2000	593,0	0,10	38,3	27,56	164,26	1128	1108	748	858	628	317	49183	1449	1515
14.05.2000	625,7	0,10	35,4	26,87	158,54	1159	1139	779	889	659	318	50850	1448	1506
15.05.2000	629,7	0,11	41,4	27,21	157,95	1166	1146	786	896	666	331	51258	1443	1502
16.05.2000	655,3	0,19	54,9	27,04	153,88	1199	1179	819	929	699	306	53083	1448	1504
17.05.2000	673,0	0,18	50,5	26,92	151,17	1219	1199	839	949	719	299	54150	1452	1509
18.05.2000	677,5	0,19	58,9	26,79	150,57	1229	1209	849	959	729	263	54750	1447	1506
19.05.2000	675,2	0,31	65,1	27,3	151,11	1229	1209	849	959	729	277	54750	1459	1513
20.05.2000	678,2	0,23	55,4	27,16	149,08	1223	1203	843	953	723	290	54375	1453	1508
21.05.2000	677,5	0,23	52,0	26,79	149,81	1227	1207	847	957	727	287	54608	1450	1510
22.05.2000	675,8	0,29	63,7	27,01	150,76	1232	1212	852	962	732	257	55133	1448	1512
23.05.2000	676,3	0,32	59,7	27,11	150,12	1228	1208	848	958	728	266	55150	1446	1510
24.05.2000	678,5	0,34	65,1	26,94	151,59	1234	1214	854	964	734	302	55450	1445	1506
25.05.2000	673,8	0,38	46,5	25,48	153,04	1237	1217	857	967	739	317	55609	1440	1510
26.05.2000	652,3	0,37	62,3	24,93	153,82	1225	1205	845	955	725	296	55000	1451	1512
27.05.2000	641,0	0,47	65,4	25,12	157,67	1213	1193	833	943	713	278	54317	1451	1518
28.05.2000	641,3	0,48	64,8	24,90	157,52	1216	1196	836	946	716	273	54467	1455	1514
29.05.2000	642,5	0,39	51,1	24,85	156,98	1215	1195	835	945	715	277	54450	1455	1514
30.05.2000	639,3	0,41	58,9	25,34	158,07	1213	1193	833	943	713	318	54300	1449	1511
31.05.2000	641,7	0,44	59,8	25,04	157,49	1209	1189	829	939	709	292	54108	1449	1511

BC= Brüt cam çekişi(ton/gün)

YH=Yanma havası(Nm³/h)

CK=Cam kırığı oranı(%)

OY=Özgül yakıt tüketimi(gr.doğalgaz/kg.cam)

Y1= 1. Port yakıtı(Nm³/h)Y2= 2. Port yakıtı(Nm³/h)

EK3= TR1 FIRINI DEĞERLERİNİN GÜNLÜK MİKTARLARI

Y3= 3. Port yakıtı(Nm³/h)Y4= 4. Port yakıtı(Nm³/h)

LO1-L06= Sol optik sıcaklıklar(°C)

Y5= 5. Port yakıtı(Nm³/h)Y6= 6. Port yakıtı(Nm³/h)

LO3	LO4	LO5	LO6	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11
1556	1587	1565	1516	1400	1466	1528				1526	1467	1384	1389	983
1555	1587	1563	1512	1397	1466	1527				1526	1463	1380		979
1561	1586	1564	1508	1400	1467	1527				1528	1467	1382	1335	975
1562	1582	1557	1509	1399	1469	1530	1544			1525	1469	1384	1338	976
1560	1581	1555	1514	1397	1468	1528	1543			1524	1473	1387	1341	980
1555	1557	1557	1516	1393	1460	1523	1537			1521	1474	1386	1340	980
1554	1558	1558	1512	1391	1459	1523	1535			1519	1473	1385	1339	980
1553	1578	1559	1516	1398	1462	1524	1535			1520	1471	1386	1341	981
1554	1576	1555	1514	1401	1467	1531	1533			1517	1471	1387	1344	980
1563	1575	1552	1508	1407	1476	1538	1529			1509	1462	1385	1342	982
1563	1574	1552	1508	1409	1477	1537	1528			1509	1461	1384	1340	985
1562	1576	1552	1503	1408	1475	1538	1531			1512	1463	1384	1340	987
1560	1581	1554	1514	1405	1467	1531	1536			1520	1469	1386	1342	986
1558	1579	1552	1514	1402	1462	1524	1534			1519	1468	1383	1338	982
1552	1578	1550	1513	1394	1459	1524	1531			1517	1466	1382	1338	980
1553	1581	1554	1514	1397	1461	1523	1534			1521	1466	1381	1336	979
1555	1583	1563	1510	1394	1457	1520	1535			1520	1464	1379	1334	979
1555	1584	1557	1511	1400	1458	1521	1537			1521	1462	1378	1333	979
1556	1586	1559	1509	1406	1461	1524	1535			1518	1462	1378	1333	978
1560	1586	1555	1507	1404	1458	1521	1532			1516	1461	1377	1333	979
1550	1583	1553	1506	1398	1460	1522	1532			1517	1460	1377	1332	979
1557	1586	1555	1510	1402	1464	1526	1537			1521	1461	1378	1332	980
1558	1587	1560	1514	1399	1464	1523	1537			1523	1463	1378	1332	980
1552	1587	1562	1508	1394	1459	1518	1537			1524	1466	1380	1332	979
1556	1587	1561	1512	1397	1462	1521	1539			1526	1470	1384	1336	982
1564	1588	1562	1511	1399	1466	1525	1540			1524	1466	1382	1336	987
1564	1586	1558	1509	1399	1465	1524	1536			1519	1461	1377	1334	990
1562	1586	1560	1512	1404	1467	1525	1538			1521	1461	1378	1334	991
1562	1586	1562	1512	1404	1467	1529	1537			1519	1462	1379	1334	992
1560	1587	1561	1509	1401	1465	1527	1539			1522	1464	1380	1334	993
1560	1587	1562	1513	1403	1465	1529	1541			1524	1466	1382	1335	992

K1-K12= Kemer sıcaklıkları (°C)

K12	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	EC	DC	EB	DB
927	1180	1212	1249		1249	1169	1015	1425	1104	0,21	1,20
924	1175	1208	1246		1248	1167	1011	1421	1100	0,20	1,24
922	1173	1213	1247		1247	1164	1009	1420	1099	0,24	1,19
923	1183	1223	1257		1249	1164	1008	1425	1099	0,24	1,17
924	1190	1231	1264		1252	1168	1011	1428	1100	0,22	1,12
924	1187	1228	1261		1253	1169	1012	1428	1100	0,26	1,20
924	1200	1227	1261		1251	1168	1011	1428	1100	0,26	1,23
924	1184	1227	1260		1252	1169	1012	1428	1100	0,26	1,25
927		1235	1267		1252	1168	1011	1429	1100	0,26	1,22
930		1261	1290		1251	1165	1008	1430	1100	0,28	1,12
931		1261	1290		1253	1166	1009	1430	1100	0,31	1,08
929		1260	1289	1304	1254	1168	1010	1430	1100	0,32	1,21
925		1246	1276	1295	1256	1171	1012	1430	1100	0,31	1,21
923		1235	1266	1285	1256	1171	1013	1426	1100	0,27	1,16
924		1229	1260	1280	1255	1170	1013	1425	1100	0,23	1,15
923		1224	1255	1276	1253	1170	1013	1423	1100	0,21	1,14
923		1219	1250	1270	1249	1170	1013	1422	1100	0,24	1,11
923		1215	1247	1268	1247	1169	1012	1420	1100	0,25	1,08
923		1216	1249	1269	1247	1169	1012	1420	1100	0,23	1,09
923		1215	1247	1267	1246	1168	1012	1420	1100	0,29	1,12
923		1212	1246	1266	1245	1168	1012	1420	1100	0,32	1,18
924		1214	1248	1266	1245	1167	1011	1420	1100	0,28	1,22
924		1214	1249	1266	1244	1167	1010	1420	1100	0,22	1,21
923		1213	1246	1264	1243	1166	1010	1421	1100	0,20	1,19
924		1218	1251	1268	1246	1169	1011	1424	1102	0,31	1,10
929		1223	1256	1273	1246	1172	1016	1424	1108	0,31	1,13
933		1226	1259	1275	1244	1174	1020	1422	1110	0,25	1,14
933		1230	1262	1278	1246	1175	1021	1422	1110	0,21	1,19
933		1230	1262	1278	1246	1176	1021	1422	1110	0,23	1,26
934		1228	1260	1277	1247	1177	1022	1422	1110	0,25	1,27
932		1226	1259	1277	1245	1175	1020	1422	1108	0,24	1,23

T1-T7= Taban sıcaklıkları (°C)

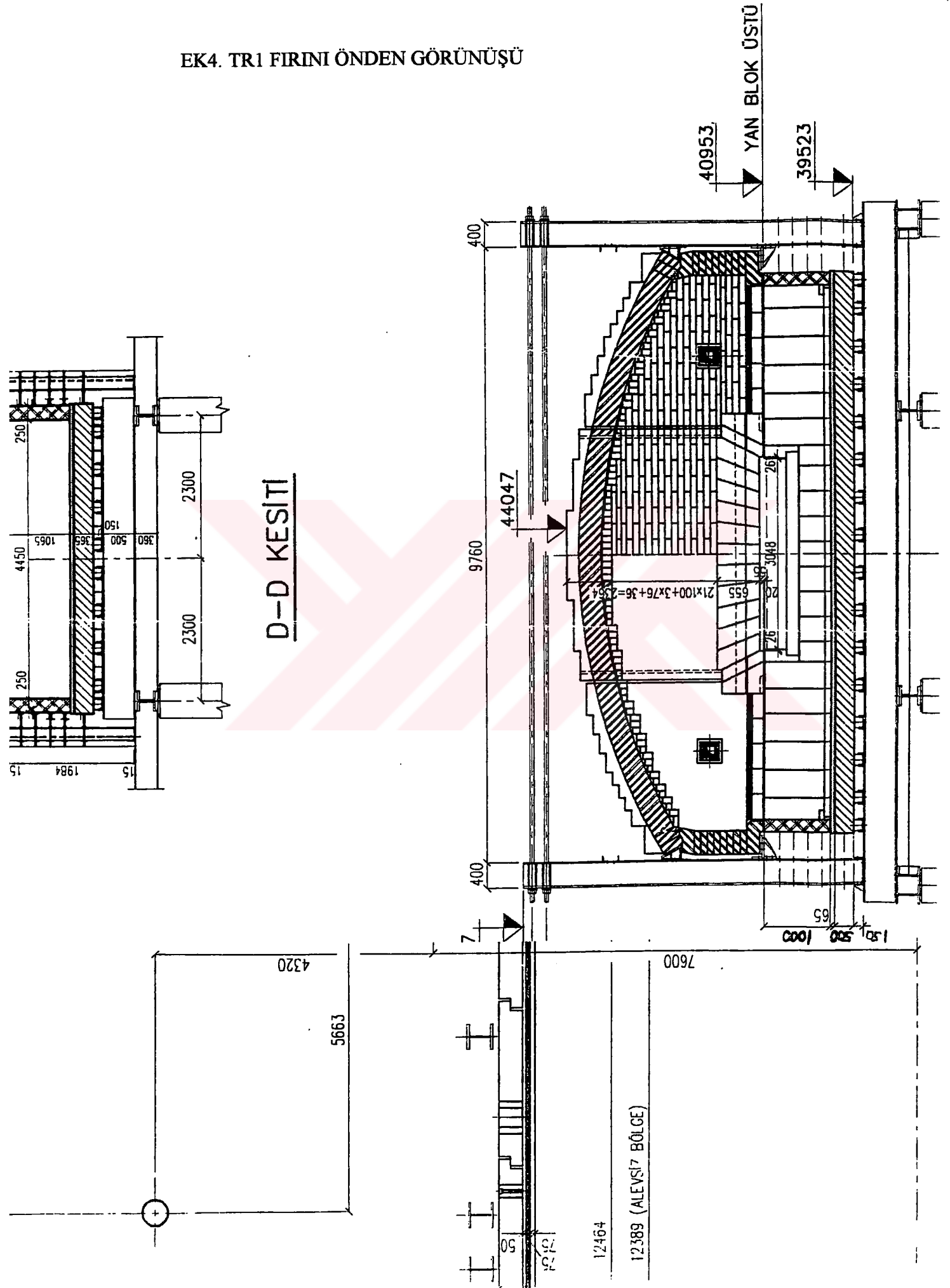
EC=Ergitme sonu cam sıcaklığı (°C)

DC= Dinlendirme sonu sıcaklığı (°C)

EB=Ergitme iç basıncı(mmSS)

DB= Dinlendirme iç basıncı(mmSS)

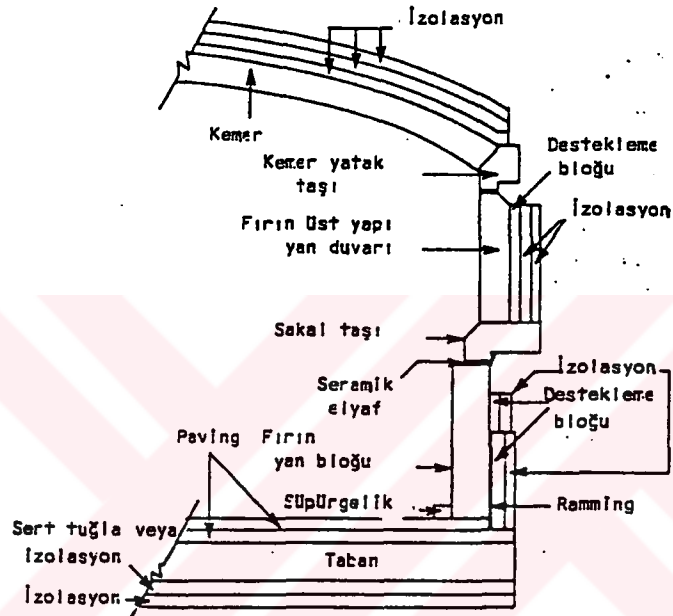
EK4. TR1 FIRINI ÖNDEN GÖRÜNÜŞÜ



CAM ÇEŞİTLERİ

Cam Tipi	Kodu	HARMAN (İçeriği) (%)									
		CaCO ₃	Na ₂ CO ₃	SiO ₂	Felspat	SiO ₂	K ₂ (Na ₂ O)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃		
Float (Düz) Cam	1	16,60	20,20	55,30	7,90	5,45	1,03	1,42	0,00		
Fiat	2	4,34	18,02	56,45	6,53	4,51	0,85	1,18	0,08		
Flint Ambalaj	3	16,74	19,01	56,64	7,57	5,22	0,98	1,36	0,04		
Bal Rengi Ambalaj	4	15,26	19,62	55,91	9,02	6,22	1,17	1,62	0,19		
Yeşil Ambalaj (Şişe vs.)	5	8,23	20,60	57,09	5,14	3,55	0,67	0,93	0,81		
Borosilikat	6	0,17	0,00	68,40	14,05	9,69	1,83	2,53	0,07		
Ampul (Opal) Camı	7	0,00	23,74	44,09	17,54	12,10	2,28	3,16	0,05		
Kurşun Oranı Çok Kristal	8	0,00	0,00	49,40	0,50	0,35	0,07	0,09	0,02		
Kurşun Oranı Az Kristal	9	0,00	0,00	52,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02		
Cam Elyafı, "A" Tipi	10	11,95	17,91	53,65	11,90	8,21	1,55	2,14	0,43		
Cam Elyafı, "F" Tipi	11	17,15	0,00	43,09	3,13	2,16	0,41	0,56	0,25		
Renkli Televizyon Tüpü	12	0,41	14,25	42,55	15,45	10,66	2,01	2,78	0,00		
Alüminasilikat Camı	13	0,00	1,54	51,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01		
Diğer	14										
?											
?											
Seçilen Camın Kodu	1	16,60	20,20	55,30	7,90	5,45	1,03	1,42	0,00		

EK5. ÇEŞİTLİ CAMLARIN HAMMADDE MİKTARLARI



Şekil 21 Refrakter ve diğer malzemelerden yapılmış parçaların birleşiminden oluşan fırın yapısının kesiti
EK 6.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 10.05.1975

Doğum Yeri İstanbul

Lise 1989-1992

Davutpaşa Lisesi

Lisans 1992-1997

Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak.
Makina Mühendisliği Bölümü (Isı Proses)

İngilizce Hazırlık 1997-1998

Yabancı Diller Bölümü

Yüksek Lisans 1998-2001

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

Çalıştığı Kurumlar

1998-1999

Şen Ocak Soğutma San. A.Ş. (Şantiye Müh.)

2000-Devam Ediyor

Ermis Proje ve Taahhüt A.Ş. (Proje Müh.)