

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇELİK BORU İMALATINDA KULLANILAN ISIL
İŞLEM FIRINI MODELLENMESİ VE TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh. Sertan GENÇ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. ÜNAL UYSAL

Nisan 2010

**ÇELİK BORU İMALATINDA KULLANILAN ISIL
İŞLEM FIRINI MODELLENMESİ VE TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

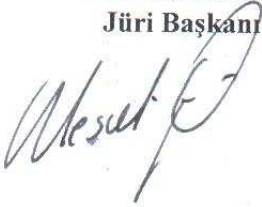
Mak.Müh. Sertan GENÇ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

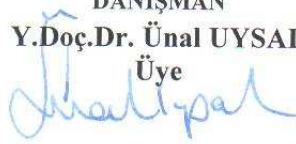
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 01/ 09/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Mesut GÜR
Jüri Başkanı



DANIŞMAN
Y.Doç.Dr. Ünal UYSAL
Üye



Y.Doç.Dr Vedat ARI
Üye



ÖNSÖZ

Günümüzde bir çok firma rekabette öne geçmek adına diğer firmalardan farklı bazı özelliklere sahip olmak zorunda.Sanayi sektöründe bu farklılığı yaratan en büyük olanak makine parkurunda ki genişlik ve çeşitliliğidir.Bu bağlamda malzeme üzerine çalışan ve başarılı olmak isteyen önemli firmalarda ısıl işlem fırını bulunmak zorundadır.Böylece daha iyi hizmet kalitesi sağlanacaktır.

Bu derece önemli fark yaratan ısıl işlem fırınları hakkında bilgi sahibi olan personel de bu artısını çalıştığı sektörde mutlaka görecektir.

Bu projeyi yapmamda en büyük pay sahibi olan Tutku İLKAKIN'a ; desteklerini hiç bir zaman esirgemeyen aileme,özellikle İpek GENÇ'e;beni bu konuda çalışmaya teşvik eden değerli hocam Prof. Dr. Mesut Gür'e ; yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Ünal UYSAL' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xvi
SUMMARY.....	xvii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	2
BÖLÜM 3.	
ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER.....	4
3.1. Isıl İşlemlerin Tanımı ve Uygulamaları.....	4
3.2. Isıl İşlem Çeşitleri.....	4
3.2.1. Normalizasyon.....	4
3.2.2. Sertleştirme.....	6
3.2.3. Menevişleme.....	6
3.2.4. Islah etme.....	7
3.2.5. Tavlama.....	7
3.2.5.1. Gerginlikleri giderme tavlı (temperleme).....	8
3.2.5.2. Difüzyon (yayınma) tavlaması (homojenleştirme tavlaması).....	9
3.2.5.3. Tane irileştirme tavlaması (kaba tane tavlaması)	10
3.2.5.4. Yeniden kristalleştirme tavlaması (rekristalizasyon tavlaması).....	11

3.2.5.5. Yumuşatma tavlaması (yumuşak tavlama, küreleştirme tavlaması.....	13
3.3. Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (Z-S-D) Diyagramları.....	15
3.3.1. Zaman –sıcaklık –dönüşüm diyagramları çeşitleri.....	16
3.3.1.1. Sürekli soğuma için z-s-d diyagramları.....	16
3.3.1.2. Sabit sıcaklık (izotermik) z-s-d diyagramları.....	18
3.3.2. Tavlama olayı ve Z-S-D diyagramları.....	20
3.4. ZSD Diyagramı Terimleri.....	23
BÖLÜM 4.	
ISIL İŞLEM FIRINLARI VE YAPI ELEMENLARI.....	27
4.1. Metal Malzemeler İçin Isıl İşlem Fırınları.....	27
4.1.1. Boru ısıtım işlem fırını.....	28
4.1.2. Hücre (muffle) ısıtım işlem fırınları.....	29
4.2. Fırın Yapı Malzemeleri.....	32
4.2.1. Refrakter malzemeler.....	32
4.2.1.1. Şamot tuğla.....	32
4.2.1.2. İzolasyon malzemeleri.....	33
4.2.2. Metal Yapı Malzemeleri.....	33
4.2.3. Direnç Malzemeleri.....	33
4.3. Malzemelerin Kullanılması.....	33
4.4. Isıl İşlem Fırınının Bölümleri.....	35
4.4.1. Fırın duvarları.....	35
4.4.2. Tavan inşası ve kemer.....	37
4.4.3. Fırın tabanları.....	38
4.4.4. Fırın kapakları.....	39
4.4.5. Fırınlarda gaz sızdırmazlığı temini.....	40
4.4.6. Fırında çelik konstrüksiyon.....	41
BÖLÜM 5.	
ISIL İŞLEM FIRINLARINDA ISI TRANSFERİ.....	42
5.1. Yakıtla Isıtılan Fırınlarda Isı Üretimi.....	42
5.1.1. Gaz formundaki yakıtlar.....	42
5.2. Fırında Isının Yayılması ve Isı İhtiyacı.....	50

5.2.1. Isı bilançosu.....	50
5.2.2. Verim.....	54
5.2.2.1. Isıl verim.....	54
5.2.2.2. Fırın kalite derecesi.....	59
5.2.2.3. Toplam verim.....	63
5.2.2.4. Yakıt sarfiyatı.....	63
5.2.2.5. Fırında gaz konsantrasyonu ve verim.....	65
5.3. Fırın İçerisinde Isı Transferi.....	67
5.3.1. Teorik esaslar.....	67
5.3.1.1. Konveksiyonla ısı transferi.....	67
5.3.1.2. Radyasyonla ısı transferi.....	76
5.3.1.3. İletimle ısı transferi.....	84
5.3.2. Fırın içerisinde ısı transferi.....	84
5.3.2.1. Direkt ısıtma ısı transferi.....	86
5.3.2.2. İndirekt ısıtmada ısı transferi.....	92
5.3.3. Parçanın ısınma süresi.....	95
5.4. Isı Kayıpları.....	97
5.4.1. Duvar kayıpları.....	98
5.4.1.1. Sürekli çalışan fırınlarda ısı iletimi.....	99
5.4.1.2. Kenar ve köşelerde duvar kaybı.....	101
5.4.2. Isınma ısı ve kesintili çalışmada duvar ısı kayıpları.....	102
5.4.3. Aralık ve kapak açma-kapama kaybı.....	107
5.4.4. Baca kaybı.....	108
5.5. Faydalı Isının Hesaplanması.....	108
BÖLÜM 6.	
TEORİK MODEL, FIRININ BOYUTLANDIRILMASI VE TERMAL ANALİZ.....	110
6.1. Isıl İşlem Fırını Katı Modellenmesi.....	110
6.2. Tünel Tipi Boru Gerilme Giderme Fırını.....	113
6.3. Termal Sistemler Analizi.....	115
6.3.1. Muffle kontrol hacmi.....	115
6.3.2. İzolasyon kontrol hacmi.....	117
6.3.3. Gaz kontrol hacmi.....	120

6.4. Bilgisayarda Termal Sistem Analizi.....	125
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	134
KAYNAKLAR.....	135
ÖZGEÇMİŞ.....	136

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

α	:Açı gradı
α	:Isı geçiş katsayısı $W/(m^2.K)$
α_{dd}	:Dış duvar ısı geçiş katsayısı
α_{id}	:İç duvar ısı geçiş katsayısı
α_k	:Konveksiyonla ısı geçiş katsayısı
α_p	:Parça yüzeyi ısı geçiş katsayısı
α_{top}	:Toplam ısı geçiş katsayısı
B	:Yakıt miktarı $kg.Nm^2$
b	:Genişlik m
C	:Radyasyon katsayısı $kJ/m^2.h.K^4$
c	:Özgül ısı $kJ/(kg.K)$
γ	:Özgül ağırlık kg/m^3 t/m^3
D,d	:Çap m
E	:Enerji W
ϵ	:Absorbsiyon katsayısı
f	:Katsayı
F	:Yüzey alanı m^2
F_d	:Duvar yüzey alanı
F_p	:Parça ısınan yüzey alanı
G	:Ağırlık kg
H	:Magnetik alan şiddeti A/m
η	:Verim
η_1	:Isıl verim
η_0	:Fırın kalite derecesi
η_t	:Toplam verim
I	:Akım şiddeti

i	:Isı miktarı kj/kg kJ/Nm ³
k	:Isı geçiş katsayısı W/(m ² K)
l	:Boy m
λ	:Isı iletme katsayısı
μ	:Permeabilite
n	:Hava sayısı
γ	:Yüzey yükü W/cm ² kj/ cm ²
P	:Kuvvet mm ² /m
ρ	:Özgül Direnç
Q	:Isı miktarı kJ
q	:Birim ısı miktarı
Q _a	:Kapak Açma-Kapama kaybı
Q _b	:Baca kaybı
Q _d	:Duvar kaybı
Q _f	:Faydalı ısı
Q _ı	:Isınma kaybı
Q _o	:Aralık kaybı
Q _r	:Rekuperatör ısısı
Q _v , Q _e	:Verilen ısı
q _d	:1 m ² duvarda ısı kaybı
R	:Direnç
s	:Kalınlık m
T	:Sıcaklık K
t	:Sıcaklık °C
t ₁	:İlk Sıcaklık
t _d	:Duvar sıcaklığı
t ₂	:Isıtma sıcaklığı
t _{dd}	:Dış duvar sıcaklığı
t _{id}	:İç duvar sıcaklığı
t _f	:Fırın sıcaklığı
t _g	:Gaz sıcaklığı
t _p	:Parça sıcaklığı
t _o	:Ortam sıcaklığı

U :Gerilim W
Z :Zaman h
V :Hacim m³

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Ferrit hattı - sementit hattı.....	8
Şekil 3.2.	Yavaş soğutma eğrisi.....	9
Şekil 3.3.	Yavaş soğutma eğrisi.....	11
Şekil 3.4.	Yavaş soğutma eğrisi.....	12
Şekil 3.5.	Yeniden kristalleştirme tavlaması parça iç yapıları.....	12
Şekil 3.6.	Yumuşatma tavlaması yapısı.....	14
Şekil 3.7.	TTT Diyagramı (Time-Temperature-Transformation).....	15
Şekil 3.8.	Çeliğin yapı çeşitleri.....	16
Şekil 3.9.	Östenitleme sıcaklığından sürekli soğuma eğrileri.....	17
Şekil 3.10.	Fe-C Denge Diyagramının Çelik Kısmı.....	17
Şekil 3.11	%0,45 C’li Çeliğin Sürekli Soğuma ZSD Diyagramı.....	17
Şekil 3.12.	%0,45 C’li çeliğin sabit sıcaklık ZSD diyagramı.....	18
Şekil 3.13	Fe-C denge diyagramı ile ZSD diyagramının karşılaştırılması.....	19
Şekil 3.14.	Ötekdoid (Perlitik) çeliğin (%0,8 c’li) izotermik ZSD diyagramı...	19
Şekil 3.15.	Bir çeliğin tavlama sırasında olaylar.....	20
Şekil 3.16.	Ötektoidaltı ve ötektoidüstü çeliklerin yapısı.....	22
Şekil 3.17.	Diyagramda tavlama çeşitlerinin gösterilmesi.....	22
Şekil 3.18.	ZSD diyagramı.....	23
Şekil 4.1.	Boru ısıtma fırını.....	26
Şekil 4.2.	Hücre tipi ve radyasyon borulu fırınlarda fırın boyutlarının karşılaştırılması.....	29
Şekil 4.3.	Radyasyon borulu fırınlarda hava sirkülasyonu.....	29
Şekil 4.4.	Boyuna çift hava dolaşımli fırın.....	30
Şekil 4.5.	Hava dolaşım yönü değiştirilebilen fırın.....	31
Şekil 4.6.	Elektrikli, direkt gaz yada akaryakıtlı ve indirekt gaz yada akaryakıtla ısıtılan radyasyon borulu fırınlar.....	31
Şekil 4.7.	Genleşme boşluklarında sızdırmazlık temini.....	31

Şekil 4.8.	Genleşme boşluklarında sızdırmazlık temini.....	36
Şekil 4.9.	Fırın duvarlarında normal tuğlaların örülme şekilleri.....	36
Şekil 4.10.	Fırınlarda düz duvar örme şekilleri.	37
Şekil 4.11.	Fırın kemeri.....	37
Şekil 4.12	Kemer yarıçapı ve açısı.....	38
Şekil 4.13.	Sıcağa mukavim çelikten taban plakaları.....	39
Şekil 4.14.	Ondüle taban.....	39
Şekil 4.15.	Raylı hücre.....	39
Şekil 4.16.	Zincir bağlantılı düşey hareket eden kapak.....	40
Şekil 4.17.	Eğik kapakta baskı kuvvetleri.....	40
Şekil 4.18.	Menteşeli kapama düzeni.....	40
Şekil 4.19.	Alışılmış tip kum salmastra sistemi.....	41
Şekil 4.20.	Fırınlarda kullanılan birleşik profiller.....	41
Şekil 4.21.	Profillerde birleştirme örnekler.....	41
Şekil 5.1.	Şematik olarak, endüstri fırınında ısı akış durumu.....	51
Şekil 5.2.	Rekuperatörlü fırında ısı akışı.....	52
Şekil 5.3.	İç rekuperatörlü fırında ısı akışı.....	54
Şekil 5.4.	(5.4) formülüne göre ve $Q_0 = 0$ olduğunda ısı verim.....	56
Şekil 5.5.	(5.4) formülüne göre ve $Q_0 = 0$ olduğunda ısı verim.....	56
Şekil 5.6.	Bir sıcak duvarda konveksiyon kolonu teşekkülü.....	71
Şekil 5.7.	Konveksiyon kolonları kesitleri, α ve b- boru c- kanal.....	71
Şekil 5.8.	Değişik boru başlangıç formları.....	75
Şekil 5.9.	Boru demetinde boru düzenlemesi (Tablo 5.16).....	75
Şekil 5.10.	Boru demetinde boru düzenlemesi (Tablo 5.16).....	76
Şekil 5.11.	Cisme gelen radyasyon enerjisinin dağılımı.....	77
Şekil 5.12.	Radyasyonun değişik çeşitleri.....	79
Şekil 5.13.	Fırın tavanı ve ısıtılan parça arasında radyasyon.....	82
Şekil 5.14.	Direkt ısıtmalı fırında ısı transferi.....	86
Şekil 5.15.	Kok fırın gazı ile ısıtılan fırınlarda toplam ısı geçiş katsayısı.....	88
Şekil 5.16.	Değişik yakıtlarda emisyon sayıları.....	91
Şekil 5.17.	Baca çıkışının üstte (a) yada altta (b) olmasında, ısıtılan parça etrafındaki ve fırında gaz hareketi.....	92
Şekil 5.18.	Isıtma süresinin hesaplanmasında yararlanılan diyagram.....	96

Şekil 5.19.	Çeşitli formda parçaların ısınma sürelerinin hesaplanmasında yararlanılan diyagram.....	96
Şekil 5.20.	İki tabakalı fırın duvarı.....	99
Şekil 5.21.	İnce duvarda, duvar sıcaklığının, çizimle bulunması.....	99
Şekil 5.22.	Kenar ve köşelerin duvar kaybına etkisi.....	101
Şekil 5.23.	Kenarların duvar kaybına etkisi.....	102
Şekil 5.24.	Şamot ve hafif tuğlalarda fırının ilk ısınmasında zamana bağlı duvar kayıplarının, sürekli duvar kaybına oranı.....	104
Şekil 5.25.	İzolasyonsuz şamot duvarlarda tam ısınmış halde, duvarın ihtiva ettiği ısınma ısısı.....	104
Şekil 5.26.	Şamot ve hafif tuğlalarda, fırının ilk ısınmasında zamana bağlı ısınma ısısının, tam ısınmış haldeki ısınma ısısına oranı.....	104
Şekil 5.27.	Helligenstaedt'e göre ısıtma başlangıcından itibaren duvar kaybının, sürekli duvar kaybına oranı.....	105
Şekil 5.28.	Helligenstaedt'e göre ısıtma başlangıcından itibaren ısınma ısısının, tüm ısınmış duvardaki ısı miktarına oranı.....	105
Şekil 5.29.	Şamot ve hafif şamotları yapılan iki izolasyonlu duvarda duvar sıcaklıkları.....	106
Şekil 5.30.	İzolasyonun duvar kaybı ve ısınma kaybına etkisi.....	107
Şekil 6.1	Isıl işlem fırını katı modeli.....	110
Şekil 6.2.	Isıl işlem fırını katı modeli.....	111
Şekil 6.3.	Isıl işlem fırını katı modeli.....	111
Şekil 6.4.	Isıl işlem fırını katı modeli.....	112
Şekil 6.5.	Isıl işlem fırını muffle.....	112
Şekil 6.6.	Isıl işlem fırını muffle.....	112
Şekil 6.7.	Isıl işlem fırını teknik resim.....	113
Şekil 6.8.	Termal sistem gösterimi.....	115
Şekil 6.9.	Muffle kontrol hacmi.....	116
Şekil 6.10.	İzolasyon kontrol hacmi.....	117
Şekil 6.11.	Gaz kontrol hacmi.....	120
Şekil 6.12.	Muffle sıcaklığının zamanla değişimi.....	122
Şekil 6.13.	Zamana göre izolasyon sıcaklığı değişimi.....	123
Şekil 6.14.	Zamana göre m_y değerleri değişimi.....	123
Şekil 6.15.	Zamana göre Q_m değerleri değişimi.....	124
Şekil 6.16.	Zamana göre Q_i değerleri değişimi.....	124
Şekil 6.17.	Ansys'de fırının katı modeli.....	125
Şekil 6.18.	Ansys'de fırının katı modeli ön görünüş.....	125

Şekil 6.19.	Ansys’de fırının katı modeli üst görünüş.....	126
Şekil 6.20.	Fırın önden kesitinden katmanlar.....	126
Şekil 6.21.	Sac katman.....	127
Şekil 6.22.	Cam elyaf battaniye.....	127
Şekil 6.23.	İzolasyon tuğla katmanı.....	128
Şekil 6.24.	Hava katmanı.....	128
Şekil 6.25.	Muffle katmanı.....	129
Şekil 6.26.	Fırının Mesh’lenmesi.....	129
Şekil 6.27.	300 ⁰ C’ de sıcaklık dağılımı.....	130
Şekil 6.28.	500 ⁰ C’ de sıcaklık dağılımı.....	130
Şekil 6.29.	600 ⁰ C’ de sıcaklık dağılımı.....	131
Şekil 6.30.	850 ⁰ C’ de sıcaklık dağılımı.....	131

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1.	Isıtma gruplarına göre çelik çeşitlerinin sınıflandırılması.....	28
Tablo 5.1.	Ticari propanın karakteristik değerleri.....	44
Tablo 5.2.	Isı taşıyıcı duman gazlarının h_a değerleri.....	45
Tablo 5.3.	Gerçek yanma sıcaklıkları.....	47
Tablo 5.4.	Sabit basınçta $\text{kJ/Nm}^0\text{C}$ olarak ortalama özgül ısılar.....	48
Tablo 5.5.	Yakıtların duman gazlarının $\text{kJ/Nm}^0\text{C}$ olarak sabit basınçta ortalama özgül ısıları.....	49
Tablo 5.6.	% olarak Metan için ısı verim η_1 değerleri	58
Tablo 5.7.	Metal ve alaşımların özgül ısı ve ihtiva ettikleri ısı miktarları.....	61
Tablo 5.8.	Tuz banyolarında kullanılan tuzların özgül ısı ve ihtiva ettikleri ısı miktarları.....	62
Tablo 5.9.	Hava sayısı ve yakıtı bağli olarak ısı verim değerleri.....	66
Tablo 5.10.	Hava duman gazlarının laminar akımından değerleri ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)...	69
Tablo 5.11.	Laminar akımda, boru girişinde hesaplanmış, x boru boyu için ortalama Nusselt sayıları.....	70
Tablo 5.12.	0^0C sıcaklıkta borular için α_k değerleri.....	73
Tablo 5.13.	α_k değerini bulmak için α_k sayılarının çarpılacağı faktörler.....	73
Tablo 5.14.	Örölmüş parlak yüzeyli kanallar için, α_k değerleriyle çarpılacak faktör sayılar.....	74
Tablo 5.15.	Şekil 5.8.'de verilen değişik giriş formlarında C_m ve C değerleri...	74
Tablo 5.16.	0^0C 'deki boru demetleri için α_{ko} değerleri.....	76
Tablo 5.17.	α_{ko} değerlerini bulmak için, α_{ko} değerleri ile çarpılacak sıcaklığa bağımlı faktör sayılar.....	76
Tablo 5.18.	Akım doğrultusundaki boru sayısına göre çarpım faktörü.....	76
Tablo 5.19.	Malzemelerde sıcaklığa bağıli ε ve $\varepsilon \cdot C$ sayıları.....	80
Tablo 5.20.	Sıcaklık t'ye göre hesaplanmış, $(T/100)^4$ değerleri.....	81
Tablo 5.21.	Paralel yüzeyler için k değerleri.....	81
Tablo 5.22.	Değişik gaz kütlelerinin ortalama tabaka kalınlığı.....	83

Tablo 5.23.	Baca gazı ve kok fırın gazı duman gazlarının havaya doymuş yanmada radyasyonu.....	83
Tablo 5.24.	İşık veren alevlerle gaz radyasyonunun artışı.....	92
Tablo 5.25.	Fırınlarda yapı malzemesi olarak kullanılan malzemelerin özgül ısı değerleri.....	103
Tablo 5.26.	Önemli malzemelerin ısıtılmasında ısıl değerler.....	109
Tablo 5.27.	Önemli malzemelerde sıcaklığa bağımlı olarak ihtiva ettikleri ısı miktarları.....	109
Tablo 6.1.	Muffle kontrol hacminde zamanla sıcaklık değişimi.....	117
Tablo 6.2.	İzolasyon kontrol hacminde zamanla sıcaklık değişimi.....	119
Tablo 6.3.	İzolasyon kontrol hacminde zamanla ısı değişimi.....	119
Tablo 6.4.	Gaz kontrol hacminde zamanla yakıt miktarı değişimi.....	121
Tablo 6.5.	Gaz kontrol hacminde zamanla sıcaklık değişimi.....	122
Tablo 6.6.	Zamana göre izolasyon sıcaklığı.....	122
Tablo 6.7.	Zamana göre my değerleri.....	123
Tablo 6.8.	Zamana göre Qm ve Qi değerleri.....	124

ÖZET

Anahtar kelimeler: Isıl işlem,metal

Fırınlardemir ve diğerk metal ve alaşımlarının ergitme ve rafinasyonunda;metallerin sıcak şekillendirilmesinde;ısıl işlemlerinde;cevher hazırlamada zenginleştirme, topaklamada;seramik, çimento, tuğla vb. üretiminde;emaye vb. diğerk kaplama yöntemlerinde;cam endüstrisinde;kimyasal tesislerde ve plastik üretiminde;laboratuar fırınları;kağıt, tekstil ve diğerk endüstri dallarında;kok, havagazı gibi yakıt üretiminde kullanılır.

Fırınlard ısıl işlem için çok önemlidir.Isıl işlem;METAL ve alaşımlarının özelliklerini değiştirmek için katı halde iken uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleridir. Gereken ısıtma ve soğutma işlemleri belirli bir kontrol altında olmalıdır.

ISIL İŞLEMLER aşağıdaki amaçları gerçekleştirmek için uygulanır.Sıcak ve soğuk biçimlendirme gerginliklerini gidermek;talaş çıkaran işçilikleri kolaylaştırmak;sertlik ve dayanım kazandırmak;darbelere direnç'i yükseltmek;elektrik ve magnetit özellikleri yükseltmek;kristal yapıyı ayarlamak;ısı ve korozyon direncini yükseltmek;kimyasal bileşimi değiştirerek özellik kazandırmak;zamanla sertleşmeyi sağlamak;metal ve alaşımların gazlarını uzaklaştırmak için uygulanır.

MODELING AND DESIGN OF THE HEAT TREATMENT FURNACE WHICH USING FOR PRODUCING STEEL PIPES

SUMMARY

Keywords : Thermal Processing, Metals

Industrial Ovens are commonly used in smelting and refining of iron, various types of metal and their alloys; thermal processing in metals; enrichment or preparation of metal ores; manufacturing of ceramics, bricks, cement etc. ; glazing, chemical and plastic industry and some overcasting methods. Laboratory ovens are commonly used in packaging and fabric industry and also used to product fuel like coke and coal gas.

Industrial ovens are so important for thermal processing. Thermal processing is a heating and cooling process to transform metals and other alloys physical properties in their solid phase. Required heating and cooling process must due to a specific control.

Thermal Processing is used to achieve that given below.

To overcome defects of hot and cool moulding, to simplify non-trimming operations, to gain strength and stiffness for metals, to upgrade impact resistance, to increase electrical and magnetic properties, to adjust crystal structure, to raise thermal and corrosion resistance, to gain intended properties by changing the chemical composition and to suspend the gases that metals and other alloys have.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bu çalışmada çelik boru imalatı esnasında meydana gelen gerilmelerin giderilmesi için kullanılan bir ısıtma fırınının dizaynı yapılmıştır. Çelik boru imalatı sırasında soğuk haddeleme yapılmaktadır ve bu işlem sırasında malzemenin içindeki kılcal liflerde gerilmeler ortaya çıkmaktadır. Bu liflerin gerilmesi sonucunda malzeme sertleşerek kırılabilir bir yapı oluşturur. Malzemenin kullanılabilirliği kısıtlanmış olur.

Gerilmiş lifleri eski haline getirmek veya gerilimini azaltmak için ısıtma işlemi uygulanır. Gerilim giderme olayında sıcaklık-zaman dönüşüm değerleri önemlidir. Malzemeye göre belirlenmiş olan zaman-sıcaklık-dönüşüm grafikleri göz önüne alınarak malzeme ısıtılır ve soğutulur. Bu ısıtma ve soğutma işlemleri ısıtma fırınının görevidir. Malzemenin istenilen yapıda olması için ısıtma fırınının optimum şekilde ayarlanmış olması ve görevine göre tasarlanmış olması önemlidir.

Isıtma fırınının modellenmesini yaparken ısıtma işleminin çok iyi bilinmesi gerekir. Bu nedenle bu çalışmanın başlangıcında ısıtma işleminin hangi durumlarda uygulandığı, hangi sıcaklıklarda malzemenin yapısı değiştiği anlatılmaktadır. İleriki bölümlerde ise ısıtma fırınında kullanılan malzemeler ve özelliklerine değinilmektedir. Çalışmanın sonunda ise fırın içerisindeki ısı transferleri, ısı dengeleri ve bilgisayar ortamında termal analizinden bahsedilmektedir.

Isıtma fırınının üç boyutlu resmi ve teknik resmi CATIA programında çizilmiş olup, termal analizinde ANSYS programından da yararlanılmıştır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

O. Macchion , S. Zahrai , J.W. Bouwman 'nin 10 Ekim 2005 tarihinde;yazdıkları “Heat transfer from typical loads within gas quenching furnace” adlı makalede gaz ısıtmalı bir su verme fırınında parçaların tabaka halinde konulması ile silindir halinde konulması arasındaki farklar belirtilmiştir. Malzemelerin dizim şeklinin ısıtmayı nasıl etkilediği görülmüştür. Malzemelerin homojen ısınması için parçaların aralıklı konulması ve her yüzeyden sıcaklığa direkt maruz kalması daha faydalıdır.

Jinwu Kang, Yiming Rong'un yazdığı “Modeling and simulation of load heating in heat treatment furnaces” (20 Aralık 2004)başlıklı makalede bir ısıtım fırınının modellenmesi ve simülasyonu matematiksel ifadeler yardımıyla yapılmıştır. Nümerik metodla ısıtım işlemi açıklanmış ve bilgisayar ortamında matematiksel ifadeler ispatlanmıştır.

B.L. Ferguson , Z. Li, A.M. Freborg adlı 3 kişinin derlediği “Modeling heat treatment of steel parts” (15 Şubat 2005) makalede DANTE adlı program kullanılarak çelik parçaların ısıtım işlemi gördükleri nasıl sertliğe ve yumuşaklığa getirildiği gösterilmiştir. Isıtım işlemi sonrası malzemede oluşan gerginlikler veya gerginlik giderimleri belirtilmiştir.

Xiaowei Hao , Jianfeng Gu, Nailu Chen, Weimin Zhang, Xunwei Zuo isimli 4 bilim adamınının 6 Aralık 2007 tarihinde yazdıkları “3-D Numerical analysis on heating process of loads within vacuum heat treatment furnace” isimli makalede PID sıcaklık kontrollü bir fırının nümerik ısı transferi modeli entegre edilmiştir. Isıtım işlemi fırınında ısı transferi simüle edilmiştir. Matematiksel ifadelerle ilgili olarak 3 boyutlu bir CAD programında da çalışma desteklenmiştir.

“Numerical simulation and experimental analysis of an industrial glass melting furnace” isimli; 16 Mayıs 2007 tarihinde A. Abbassi ve Kh. Khoshmanesh

tarafından yazılmış olan makalede ise endüstriyel cam ergitme fırınının Ansys programında simulasyonu yapılmıştır. Yanma odası,cam tankı ve battaniyenin içinde olduğu bir model tasarlanmıştır. Basit nümerik hesapları yapıldıktan sonra bilgisayar ortamında analizi sonuçlandırılmıştır.

Unal Çamdali,Murat Tunç,Ahmet Karakaş 20 Mart 2002 tarihinde yazdıkları “Second law analysis of thermodynamics in the electric arc furnace at a steel producing company” makalesinde çelik üretim prosesinde fırınların önemini anlatmış ve fırınların çalışma prensibini matematiksel olarak açıklamış. Termodinamiğin yasalarından faydalanarak yazdıkları bu makalede ısı kayıplarından ve verimden bahsedilmiş.

A. Mochida, K. Kudo, Y. Mizutani, M. Hattorp Ve Y. Nakamura ‘Nın “Transient Heat Transfer Analysis In Vacuum Furnaces Heated By Radiant Tube Burners” adlı 5 Aralık 2003’te ki makalesinde radyasyonla,iletimle ve taşınım ile olan ısı geçişleri açıklanmış ve grafiklerle değişimleri ortaya konmuştur.

BÖLÜM 3 . ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

3.1. Isıl İşlem Tanımı Ve Uygulamaları

Metal ve alaşımlarının özelliklerini değiştirmek için katı halde iken uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleridir. Gereken ısıtma ve soğutma işlemleri belirli bir kontrol altında olmalıdır.

Isıl işlemler aşağıdaki amaçları gerçekleştirmek için uygulanır.

- 1) Sıcak ve soğuk biçimlendirme gerginliklerini gidermek.
- 2) Talaş çıkaran işçilikleri kolaylaştırmak.
- 3) Serlik ve dayanım kazandırmak.
- 4) Darbelere direnç'i yükseltmek.
- 5) Elektirik ve magnetit özellikleri yükseltmek.
- 6) Kristal yapısını değiştirmek.
- 7) Isı ve korozyon drencini yükseltmek.
- 8) Kimyasal bileşimi değiştirerek özellik kazandırmak.
- 9) Zamanla sertleşmeyi sağlamak.
- 10) Metal ve alaşımların gazlarını uzaklaştırmak.

Yukarıdaki sıralamadan da anlaşılacağı üzere, ısıl işlemler çok defa hemen akla geliverdiği gibi sertleştirmeden ibaret değildir.

3.2. Isıl İşlem Çeşitleri

3.2.1. Normalizasyon

Herhangi bir nedenle dokusu bozulmuş malzemenin bu dokusunu normalleştirmek için yapılır. Sıcak dövülmüş ve döküm malzemeler bu sınıfa girer.

Malzeme ostenit (a) bölgesine ısıtılır. Belirli bir süre burada tutulur. Tavlanması tamamlanınca havada soğutulur. Sonuç dokuda anormal taneler yoktur. İri taneler ufalır. Yapı itibari ile ferrit (a) ve perlitten ibarettir. Normalize edilmiş doku sertleştirme öncesi en uygun dokudur. Bu sebeple sıcak dövülmüş veya çelikler sertleştirme öncesi normalize edilirler.

Sertleştirme ve tavlamadan farklı olarak, normalleştirme sıcaklıklarının; çeliğin tamamen östenit hale gelmesi ve gerilimsiz olmasını temin için, A3-A cm çizgisinin üzerinde uzandığı görülmektedir. Normalleştirme işlemlerinde soğutma oranlarının daha hızlı olması, kristaller etrafında sementit (demir-karbür) ağına benzer yapının oluşumunu ve çeliğin mekanik özelliklerinin zayıflamasını önlemektedir.

Normalleştirmede, soğutma oranının hızlaştırılması, iş parçasının fırından alınıp serbest olarak havada soğutulmasıyla yapılır. Hava ile soğutmada havanın serbest olarak sirkülasyonu sağlanmalı; fakat hava cereyanı önlenmelidir. Daha hızlı neticesinde ince taneli yapının fiziksel özellikleri iyileştirilir ve talaşlı imalat neticesinde kaliteli bir yüzey elde edilir. Bununla birlikte, şiddetli soğuk sekilendirme işlemi için süneklik yeterli değildir. Normalleştirme, büyük parçaların kaba ve ince talaş kaldırma işlemleri arasında, gerilim giderme işlemlerinde kullanılır. Böylece parça üzerinde ardışık hareketlerin oluşumu ve ölçü ve ölçü hassasiyeti kaybı önlenir.

Normalleştirme işlemi sonunda çelikteki dövme, haddeleme, presleme ve yüksek sıcaklıktaki tavlama sonunda yapıda meydana gelen kabalaşmalar giderilir. Çeliğin yapısı her yerde aynı olur, tane büyüklükleri eşleştirilmiş olur. Yapının düzenlenmesi yanında malzemenin özellikleri de iyileştirilmiş olur. Malzeme biçimlendirmeye karşı daha elverişli olur.

Normalleştirme işlemi sonunda, soğuk biçimlendirme ile kırılan kristallerde onarılmış olur. Normalleştirme %0,60 tan az karbonlu çeliklere uygulanır. Bununla beraber bileşiminde %0,80 karbon bulunan testere çeliği ile %1,30 C bulunan eğe çeliklerine de uygulanır.

Soğuk biçimlendirme esasında çabuk soğuyan tel, erit, çubuk ve ince saç gibi malzemeler normalleştirmeye imkan bulamayacakları için piyasaya normalleştirme işleminden sonra verilirler. Normalleştirme işlemi görmeden piyasaya verilen malzemeler sert olur. Normalleştirme ile çeliklerdeki iç gerginlikler giderilir ve yumuşaklık sağlanarak biçimlendirmeye karşı elverişlilik sağlanır.

- Sıcak haddeleme sonucunda oluşan bantlı içyapının giderilmesi ,
- Kaynaklı parçalarda, (tane büyüklüğü farklı olan hadde yapısı ve döküm içyapısının bir arada olduğu durumlarda)
- Difüzyon tavlama sonucunda irileşmiş tanelerin inceltilmesi,
- Tavlama işlemi sonucunda, malzemenin mekanik özelliklerinde, özellikle de toklukta
- artış sağlanır.
- Tav süresi, et kalınlığına göre 30-60 dak arasındadır.
- Basınçlı kaplara mutlaka bu tavlama işlemi uygulanmalıdır.

3.2.2. Sertleştirme

Malzemeye sertlik diğer bir deyimle mukavemet kazandırmak için yapılır. Malzeme östenit (a) bölgesinde ısıtılır. Burada bir müddet tutulur sonra hızla soğutulur. Bu soğutma çeliğin cinsine göre su veya yağla olabilir. Hava çeliklerinde havada soğutma yeterli olur. Sonuç dokumartenzittir. Bu doku ise çok kırılmandır. Bu vaziyette kullanılamaz. Menevişlenmesi gerekir.

3.2.3. Menevişleme

Kırılğan olan martenzittin gerilmelerini alıp rahatlatmak için yapılır. Su verilen malzeme 100 0C – 600 0C arasına ısıtılır. Belirli bir süre havada tutulduktan sonra soğutulur. Soğutma hava, su veya yağda yapılabilir. Fakat çok ince karbürler çökelmeğe başlar Sertlik az düşer. Meneviş sıcaklığı yükseldikçe, meneviş süresi de uzadıkça karbürler belirginleşir. Ferrit ana doku görünmeye başlar. Daha sonra karbürler yuvarlaklaşırlar ve ferrit ana dokusu hakim olur. Dolayısı ile sertlikte gittikçe düşer. Süneklik artar.

3.2.4. Islah etme

Malzemeye yüksek tokluk kazandırmak için yapılır. Malzeme su verildikten sonra yüksek sıcaklıklarda menevişlenir. Bu sıcaklık 500 0C – 700 0C kadardır. Malzeme taneli sementit yapıya sahiptir. Ana doku ferrittir.

3.2.5. Tavlama

Isıl işlemlerin önemli bir bölümünü teşkil eder. Çok çeşitleri vardır. Tavlama maksat, çeliğin bünyesinde gerek ayarlamayı yaparak mütakip işlemler için, örneğin talaş kaldırmayı veya sertleştirme de en iyi durumu yaratabilmektir. Gayelerden en önemlileri şöyle özetlenebilir:

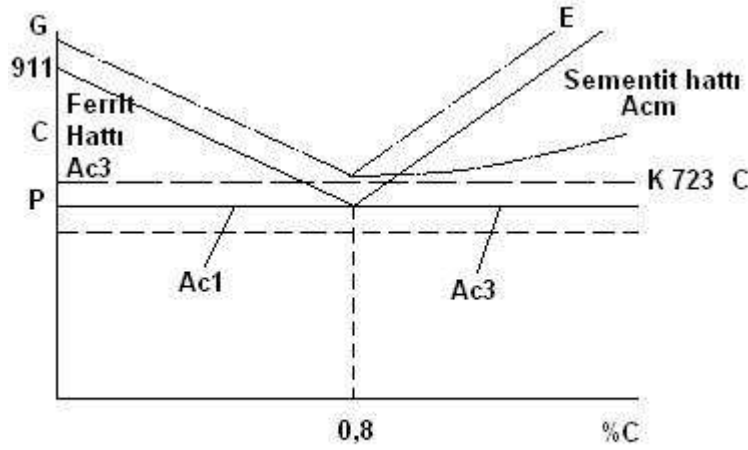
- Bünye içi gerginlikleri giderme
- Özel olarak dövülmüş ham parçaların sert ve zor işlenen yerlerini özel olarak yumuşatmak
- Doğrultma veya işleme veya sertleştirmede meydana gelebilecek çatlakları önlemek
- Sertleştirme tesirlerini tekrardan yok etmek
- Kaba bünyenin değiştirilmesi (yüksek sıcaklıkta ve uzun süre ısıtılmadan)

Çeşitleri :

1. Gerginlikleri giderme tavlı (temperleme)
2. Difüzyon (yayınma) tavlaması (homojenleştirme tavlaması)
3. Tane irileştirme tavlaması (kaba tane tavlaması)
4. Yeniden kristalleştirme tavlaması (rekristalizasyon tavlaması)
5. Yumuşatma tavlaması (yumuşak tavlama, küreleştirme tavlaması)

Bir parçanın belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması bu sıcaklıkta bir müddet bekletilmesi ve yavaş olarak soğutulmasıdır. Tavlama maksatına göre (a ile d) parça istenen tavlama sıcaklığına eriştikten sonra yavaş soğutulmalıdır. Mesela ağaç kömürü külü ile paketlenerek yüksek alaşımlı çeliklerde (a hali) 24 saat sürmelidir. Tavlama esnasında çelik katoloğunda verilen verilere dikkat edilmelidir, aksi halde iyi netice

alınmaz. Sıcaklı ölçme cihazlarının doğruluğu kontrol altında tutulmalı ve zaman takip edilmelidir.



Şekil 3.1. Ferrit hattı - sementit hattı

Bu çalışmada gerginlik giderme tavlaması işlendiği için bu konuda daha geniş bir bilgi verilecektir.

3.2.5.1. Gerilim giderme tavı (temperleme)

Karbonlu çeliklerde 100–300 °C arasında, düşük alaşım çeliklerde 200–400 °C arasında, yüksek alaşımlarda ise 400–600 °C arasında gerçekleştirilir.

Herhangi bir nedenle gerilim altında kalmış yapıda gerilimleri alıp malzemeyi rahatlatmak için yapılır. Kaynak edilmiş, doğrultulmuş. Dökülmüş, sıcak dövülmüş, taşlanmış veya benzeri işlem görmüş malzemeler gerilim gidermeye tutulur. Malzeme 400 – 600 0C’de tavllanır ve genellikle tavlama sonrası bir müddet fırında soğutulur. Daha sonra açık havaya bırakılır. Gerilim gidermeye tabi tutulan iş parçasından istenmeyen gerilimler ortadan kalkar. Malzeme rahatlar. Kendi kendine çalışmaz.

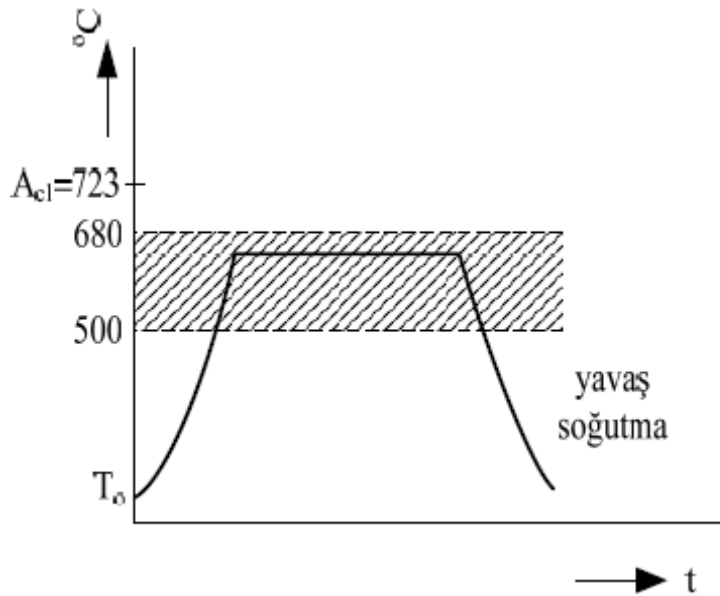
Üniform olmayan ısıtma-soğutma işlemleri (döküm, kaynak, sertleştirme), üniform olmayan şekil değişimi (eğme, soğuk şekillendirme), talaşlı işleme (frezeleme,

planyalama, tornalama vb) ve dönüşüm olayları sırasında parça içinde oluşan gerilmelerin giderilmesi amacıyla uygulanır.

İşlem sıcaklığı malzemenin kimyasal bileşimine göre, alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerde 500-680°C arasındadır.

Tav süresi ise 0,5-1 h arasındadır.

İşlemin başarılı sonuç verebilmesi için, soğuma işleminin yavaş yapılması gerekir. Aksi takdirde soğuma farkı nedeniyle, malzeme içinde tekrar iç gerilmeler oluşabilir.



Şekil 3.2. Yavaş soğutma eğrisi

3.2.5.2. Difüzyon (yayınma) tavlaması (homojenleştirme tavlaması)

-Birincil kristalleşme sonucunda oluşan kimyasal bileşim farklılıklarını (mikrosegregasyonu) gidermek için yaklaşık 1100⁰- 1300⁰ arasında 6-12 h veya 50 h süre ile uygulanır.

-Böylelikle ikincil kristalleşmede (örneğin sıcak şekillendirmede) ortaya çıkacak bantlı içyapının oluşması önlenir.

-Genellikle haddeleme öncesinde tav çukurlarında ingotlara uygulanan ısıtma işlemidir. Malzeme içerisinde bulunan gevrekleştirici katışkıların bazıları çözünebilir ve tane sınırlarından tane içine yayılır. Oksitler, karbürler, nitürler vb . gibi katışkılar ise

çözünemez ve küresel bir şekil alırlar. Isıl işlem sürecunda , yassı mamullerin yarı mamulü olan ingotların şekillendirilmesi iyileştirilmiş olur .

-Sıcaklığın yüksek ve işlem süresinin uzun olması nedeniyle, pahalı bir işlemdir.

-İşlem sonunda genellikle tane büyümesi meydana geldiğinden gerektiğinde uygulanan bir yöntemdir.

Mikrosegregasyon, katılma aralığı büyüdükçe, soğuma hızı arttıkça ve alaşımı oluşturan elementlerin yayılma katsayıları küçüldükçe daha fazla ortaya çıkar.

Yoğunluk farkından dolayı olan bileşim farklılığı makrosegregasyon, kimyasal bileşim farklılığı ise mikrosegregasyon olarak isimlendirilir

3.2.5.3. Tane irileştirme tavlaması (kaba tane tavlaması)

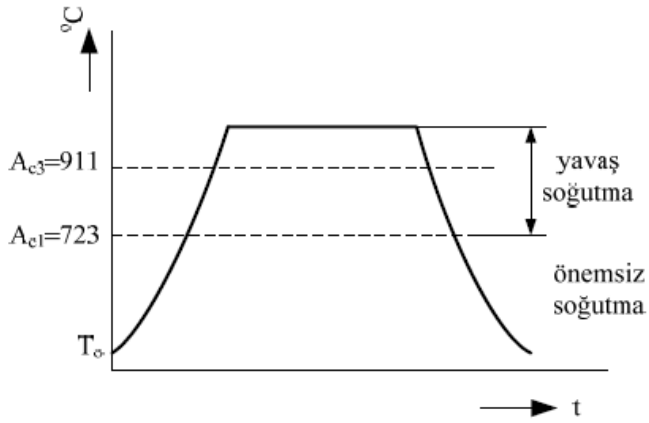
Düşük karbonlu çeliklerde ($\%C < \%0,2$), talaşlı işleme kabiliyetini iyileştirmek amacıyla uygulanır.

Tav sıcaklığı 950-1100°C arasında seçilir, tav süresi ise yaklaşık 3-5 h'dir.

Tanelerin irileşmesi ile kısa, kırılğan talaş elde edilir.

Tavlama sonucunda gevrek ve kaba taneli bir içyapı elde edilerek, talaşın sürekliliği engellenir. Bu durumda malzeme takım üzerine sıvanmaz ve özellikle kısa talaş elde edildiğinden, otomat tezgahlarda malzeme işlenebilir.

Yüksek sıcaklıkta yapılan bu tavlama sonucunda, malzemenin tokluk değeri düştüğünden, seyrek uygulanan tavlama türüdür.



Şekil 3.3. Yavaş soğutma eğrisi

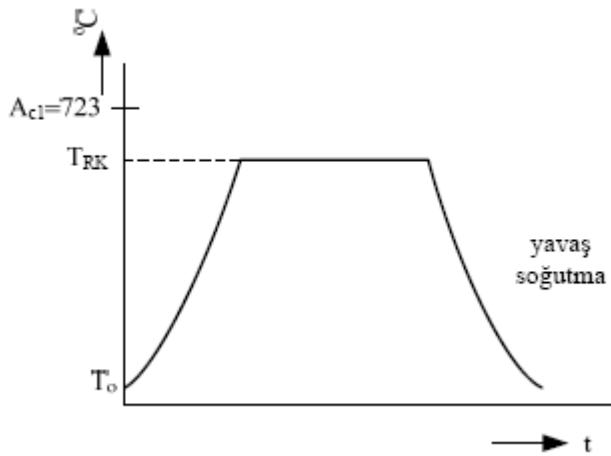
3.2.5.4. Yeniden kristalleştirme tavlaması (rekristalizasyon tavlaması)

Soğuk şekil verme sonucunda pekleşen malzemenin özelliklerini (örneğin yüksek dayanım, düşük süneklik ve tokluk gibi) başlangıç durumuna getirmek amacıyla yapılır.

Tavlama sıcaklığı $600-700^{\circ}\text{C}$ 'dir. Yaklaşık 1 h'lik sürede gerçekleşir.

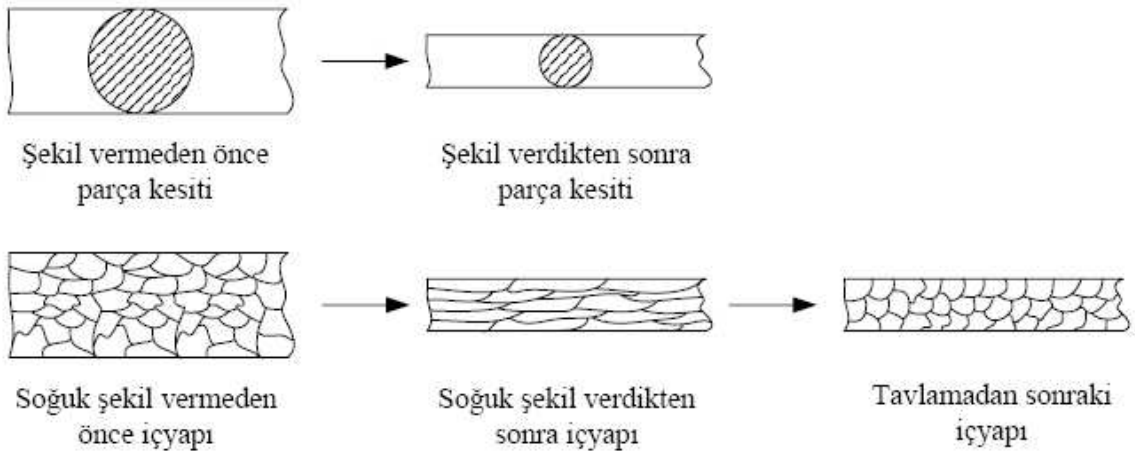
Bu tavlamanın uygulanabilmesi için malzemenin en az %10 oranında soğuk şekillendirilmiş olması gerekir.

Böylece metalik malzemenin, katı halde bozulmadan yeniden kristalleşmesi sağlanır ve soğuk şekillendirme sonucunda oluşan pekleşme, sertleşme giderilerek malzemeye daha sonraki soğuk şekillendirme işlemleri için gerekli olan süneklik kazandırılır.



Şekil 3.4. Yavaş soğutma eğrisi

$$T_{RK} = T_{YK} \cong 0,4T_e \quad (K)$$



Şekil 3.5. Yeniden kristalleştirme tavlama parça iç yapıları

Soğuk şekil verdikten sonra içyapı

İç gerilme yüksek

Taneler uzamış

Yapıda homojenlik yok

Dislokasyon yoğunluğu yüksek

Tavlama sonrası içyapı

İç gerilme azalmış

Taneler küçük ve eş eksenli

Yapıda homojenlik var

Dislokasyon yoğunluğu azalmış

Tavlama sonrasında oluşan tane boyutu, malzemeye uygulanan soğuk şekil değiştirme oranına bağlıdır.

Soğuk şekil değiştirme oranı fazla ise ince taneli, az ise iri taneli içyapı oluşur.

Tane büyüklüğünü, tav sıcaklığı da etkiler; rekristalizasyon sıcaklığı yüksek tutulursa kaba taneler oluşur.

Yeniden kristalleşmede tav süresi, tavlama sıcaklığı ve şekil değiştirme oranına uygun olarak seçilir.

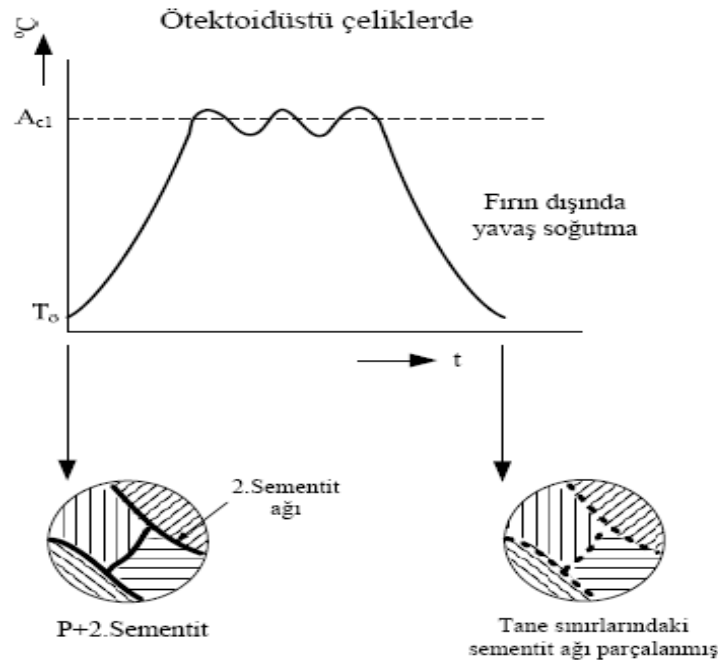
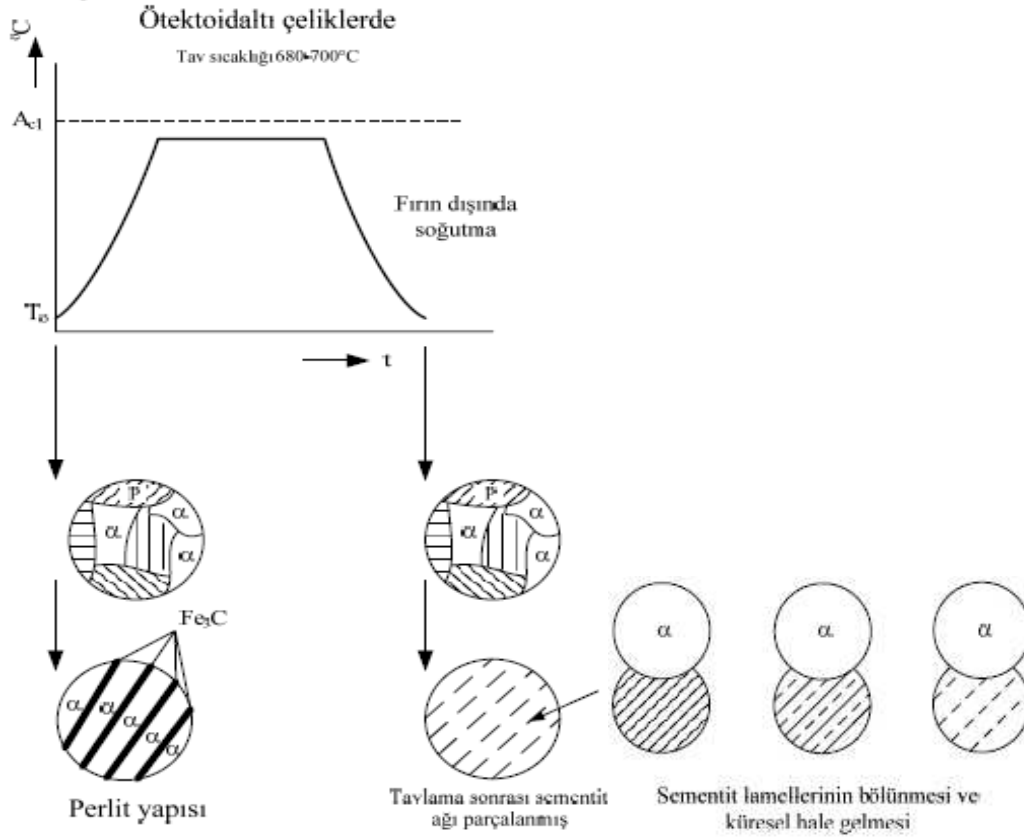
Tavlama sonucunda, malzemenin dislokasyon yoğunluğu azaldığından, malzeme başlangıç sünekliğine kavuşur.

Yüksek alaşımlı çelikler gibi dönüşüm göstermeyen çeliklerde tane boyutu küçültme işlemi rekristalizasyon tavlama ile yapılır

3.2.5.5. Yumuşatma tavlama (yumuşak tavlama, küreleştirmetavlama)

$\%C \geq \%0.4$ olan çeliklerde talaşlı işlemeyi, $\%C < \%0.4$ olan çeliklerde soğuk şekillendirmeyi kolaylaştırmak amacıyla uygulanır. Tavlama sıcaklığı çeliğin ötektoidaltı ya da ötektoidüstü olmasına göre değişir. Tavlama süresi ise 5 h'den az olmamalıdır. Bazen 100 h olabilir.

Yumuşatma tavlama; ötektoidaltı çeliklerde sert perlit tanelerindeki sementit lamellerini parçalamak, ötektoidüstü çeliklerde ise hem perlit tanelerindeki sementit lamellerini hem de tane sınırlarındaki 2.sementit ağını parçalamak amacı ile uygulanır.



Şekil 3.6. Yumuşatma tavlama yapıları

ötektoidaltı çeliklerde; sert perlit tanelerindeki sementit lamellerini parçalamak amacı ile uygulanır.

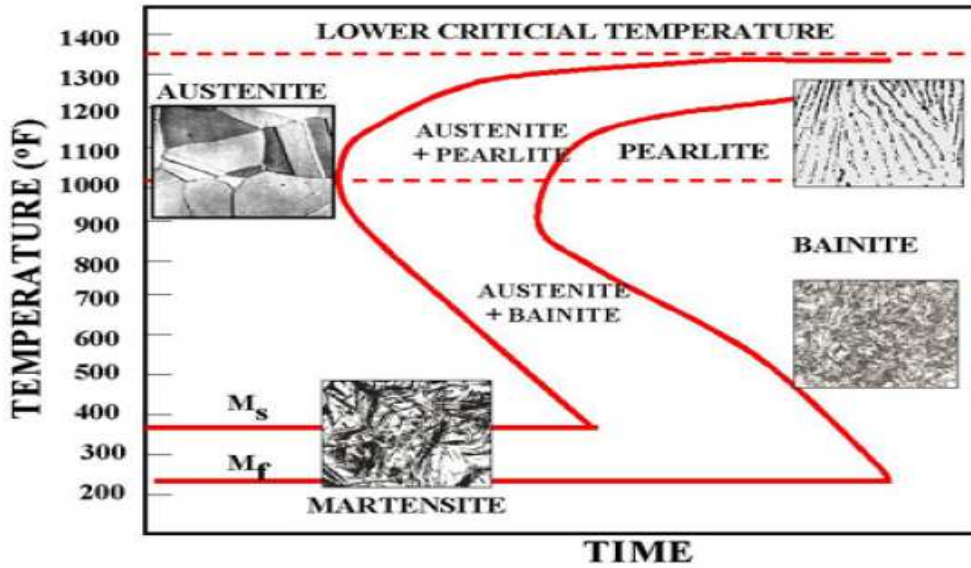
Ötektoidüstü çeliklerde; hem perlit tanelerindeki sementit lamellerini hem de tane sınırlarındaki 2.sementit ağını parçalamak amacı ile uygulanır.

3.3. Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (Z-S-D) Diyagramları

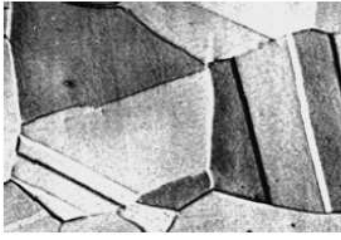
Çelik üreticileri, ürettikleri her çelik için bu diyagramları kataloglarında verirler. Çelikte istenilen içyapının elde edilebilmesi için, soğuma zamanı çok önemlidir. Bu nedenle de ısıl işlem için sadece Fe-C denge diyagramı yeterli olmadığından, ZSD diyagramına ihtiyaç duyulur.

Z-S-D diyagramları, östenit dönüşümü sırasında görülen ve öncelikle dönüşüm ürünü (örneğin perlit, sorbit, trostit, beynit, martenzit gibi) özelliklerinin belirlenmesindeki olayları inceler. Bu incelemede denge durumundaki olaylar dikkate alınır.

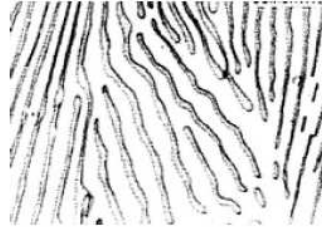
Kısaca Z-S-D diyagramları, dönüşüm olaylarını zamana ve sıcaklığa bağlı olarak gösterirler. Olaylar bazen çok uzun süreceğinden, zaman eksenini logaritmik bölümlüdür.



Şekil 3.7. TTT Diyagramı (Time-Temperature-Transformation)



Östenit



Perlit



Martenzit



Beynit

Şekil 3.8. Çeliğin yapı çeşitleri

3.3.1. Zaman –sıcaklık –dönüşüm diyagramları çeşitleri

Sürekli Soğuma İçin Z-S-D Diyagramları

Sabit Sıcaklık (İzotermik) Z-S-D Diyagramları

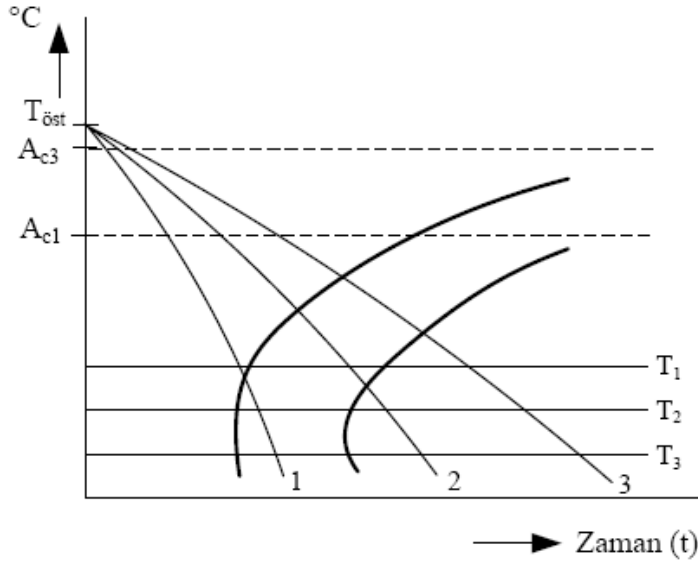
olarak 2 grupta incelenebilir.

3.3.1.1. Sürekli soğuma için z-s-d diyagramları

Östenitleme sıcaklığından başlayarak, sadece çizilen soğuma eğrileri doğrultusunda okunabilen diyagramlardır. Diyagramlardan dönüşüm davranışları dışında, şu bilgiler de elde edilebilir.

Değişik dönüşüm alanlarında oluşan içyapı bileşenlerinin miktarı (soğuma eğrisiyle alan alt sınırının kesim noktasında % olarak).

Elde edilen içyapının sertliği (soğuma eğrisi sonunda HV ya da HRC olarak).

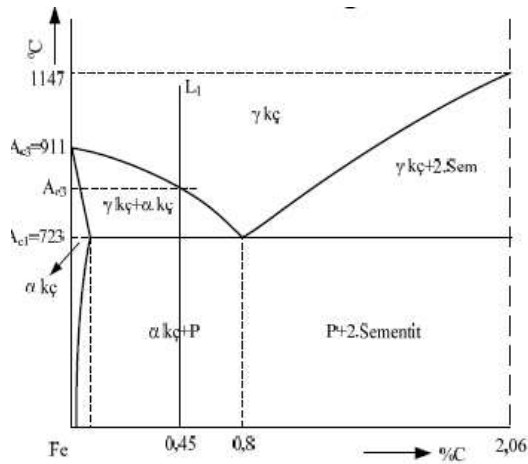


Şekil 3.9. Östenitleme sıcaklığından sürekli soğuma eğrileri

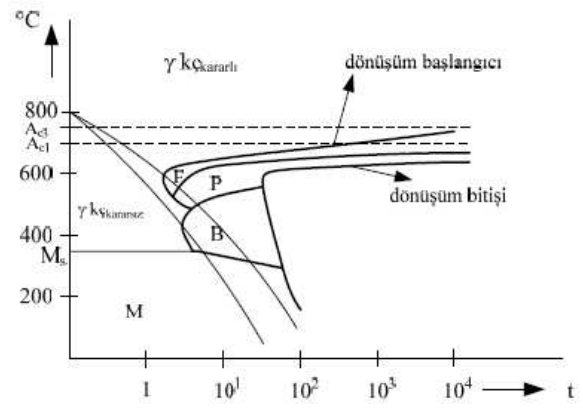
Töst: Östenitleme sıcaklığı $A_{c3}+(30^{\circ}-50^{\circ}C)$

1, 2, 3: Östenitleme sıcaklığından sürekli soğuma eğrileri

T1, T2, T3: Sabit sıcaklık



Şekil 3.10. Fe-C Denge Diyagramının Çelik Kısmı



Şekil 3.11. %0,45 C'li Çeliğin Sürekli Soğuma ZSD Diyagramı

Ortaya çıkan içyapılar çoğunlukla metalografik olarak incelenir.

Dönüşüm sıcaklıkları ise dilatometrik olarak saptanır. Örneğin, perlit ve beynit oluşumuna ait başlama ve bitiş noktaları birleştirildiğinde, östenitin farklı koşullardaki dönüşüm davranışı diyagram haline getirilmiş olur.

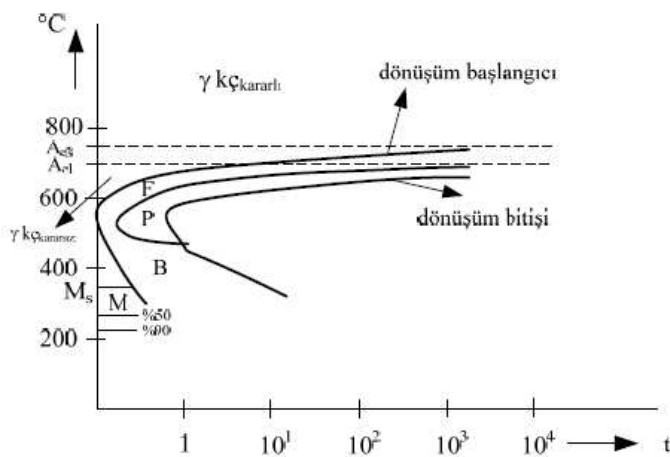
3.3.1.2. Sabit sıcaklık (izotermik) z-s-d diyagramları

Östenit bölgesine ısıtılan parça seçilen bir sıcaklığa hızla soğutularak, burada dönüşüm tamamlanmaya kadar tutulur. Sürekli soğuma diyagramında olduğu gibi, belirli bir bekleme süresinden sonra östenit dönüşümü başlar.

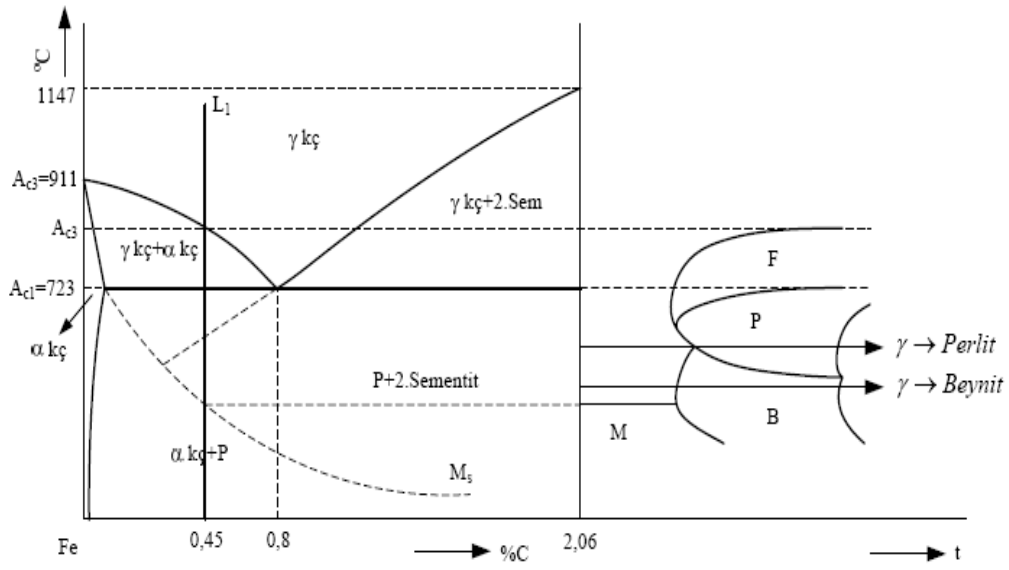
Aşırı soğumanın küçük olması halinde dönüşüm eğilimi azdır ve uzun bekleme süresi gerekir. Büyük aşırı soğumada ise, dönüşüm eğilimi kuvvetle artar. Ancak dönüşüm sıcaklığı düştükçe, C atomlarının hareketliliği engellendiğinden bekleme süresi tekrar uzar. Bu iki ters etkinin yarattığı burun oluşumu, sürekli soğumadan daha belirgindir.

İzotermik diyagram sadece dönüşümün türüne bağlı olarak zaman eksenine paralel doğrular yönünde (izoterm yönünde) okunabilir. Yani sürekli soğumanın tersine sabit sıcaklık dönüşüm, sıcaklığa bağlı olarak, perlit ya da beynit alanında oluşabilir.

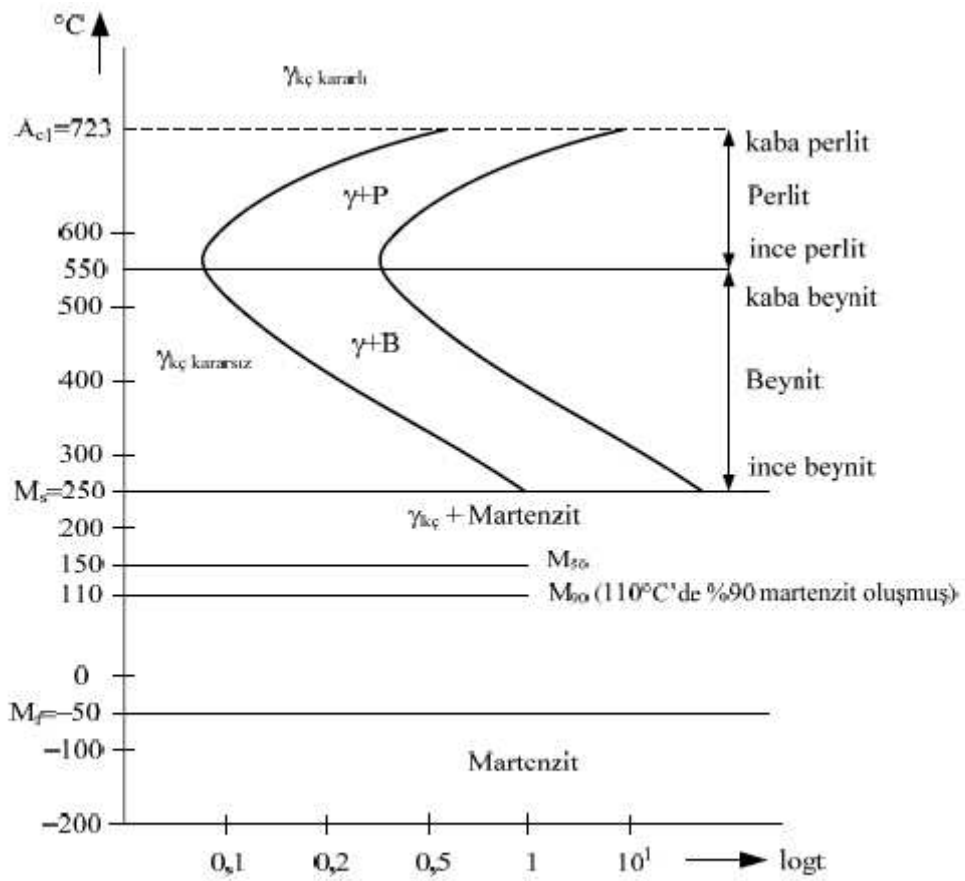
Çeliğin türü ne olursa olsun, sabit sıcaklık dönüşümü ile %100 beynit yapısı elde edilir.



Şekil 3.12. %0,45 C'li çeliğin sabit sıcaklık zsd diyagramı



Şekil 3.13 Fe-C denge diyagramı ile ZSD diyagramının karşılaştırılması



Şekil 3.14. Ötekdoid (Perlitik) çeliğin (%0,8 c'li) izotermik ZSD diyagramı..

Sertleştirme işlemi sonunda; yapı tümüyle martenzite dönüşmez ve artık östenit kalırsa malzeme tekrar ısıtıp hızla soğutularak tümüyle martenzit yapı elde edilir.

$M_s = f(C, Mn, \text{diğer alaşım elementleri})$

$M_f = f(C, Mn, \text{diğer alaşım elementleri})$

Soğuma hızı : $v_{soğ} = \frac{\text{Firin çıkış sıcaklığı} - M_s}{\text{Zaman}}$

3.3.2. Tavlama olayı ve Z-S-D diyagramları

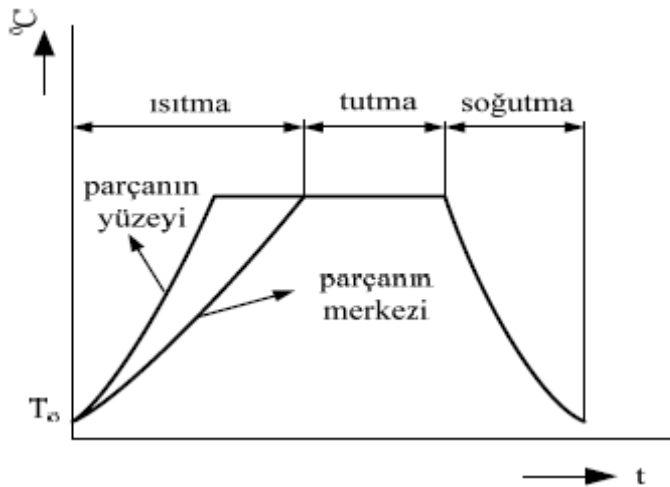
Bu çalışmada uygulanan ısıl işlemler tavlama ve normalizasyon ile ilgili olarak hazırlandığından ötürü bu bölümde tavlama ve normalizasyon kavramlarını kısaca hatırlayarak bu işlemlerle ilgili Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramlarına da bakacağız.

Parçanın fırında tutma süresi $t_T = 20 + \frac{s}{2}$ eşitliği ile basitçe hesaplanabilir.

t_T = Tutma süresi

s: iş parçası levha ise et kalınlığı, boru ise çap

Parçanın istenilen sıcaklığa getirilmesi temas ya da radyasyon yoluyla (yani bir dış kaynaktan taşıma yoluyla) olur. Veya ısı doğrudan elektrik akımı geçirerek ya da indüksiyon yoluyla direkt olarak parça üzerinde oluşturulur. Alaşım elementi yüzdesi arttıkça, ısı iletimi zorlaşır. Parçanın soğuma hızı; parça kalınlığı ve malzemenin ısı iletimi katsayısı ile orantılıdır



Şekil 3.14. Sıcaklık zaman grafiği

Tavlama ısı işlemlerin önemli bir bölümünü teşkil eder. Çok çeşitleri vardır. Tavlama maksat, çeliğin bünyesinde gerek ayarlamayı yaparak müteakip işlemler için, örneğin talaş kaldırmayı veya sertleştirme de en iyi durumu yaratabilmektir. Gayelerden en önemlileri şöyle özetlenebilir:

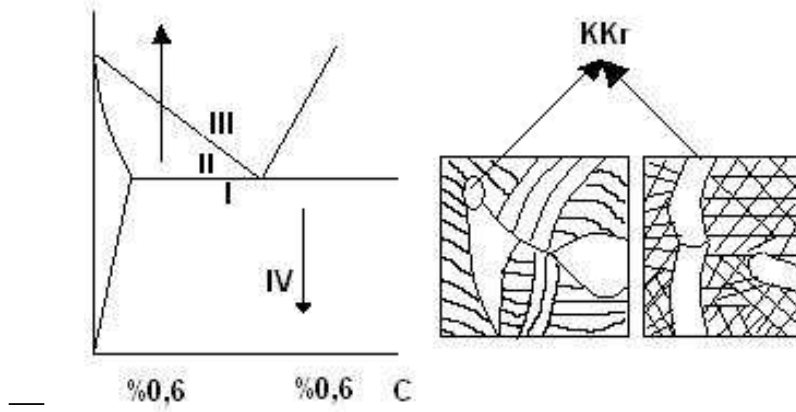
1. Bünye içi gerginlikleri giderme
2. Özel olarak dövülmüş ham parçaların sert ve zor işlenen yerlerini özel olarak yumuşatmak
3. Doğrultma veya işleme veya sertleştirmede meydana gelebilecek çatlakları önlemek
4. Sertleştirme tesirlerini tekrardan yok etmek
5. Kaba bünyenin değiştirilmesi (yüksek sıcaklıkta ve uzun süre ısıtılmadan)

Buna göre:

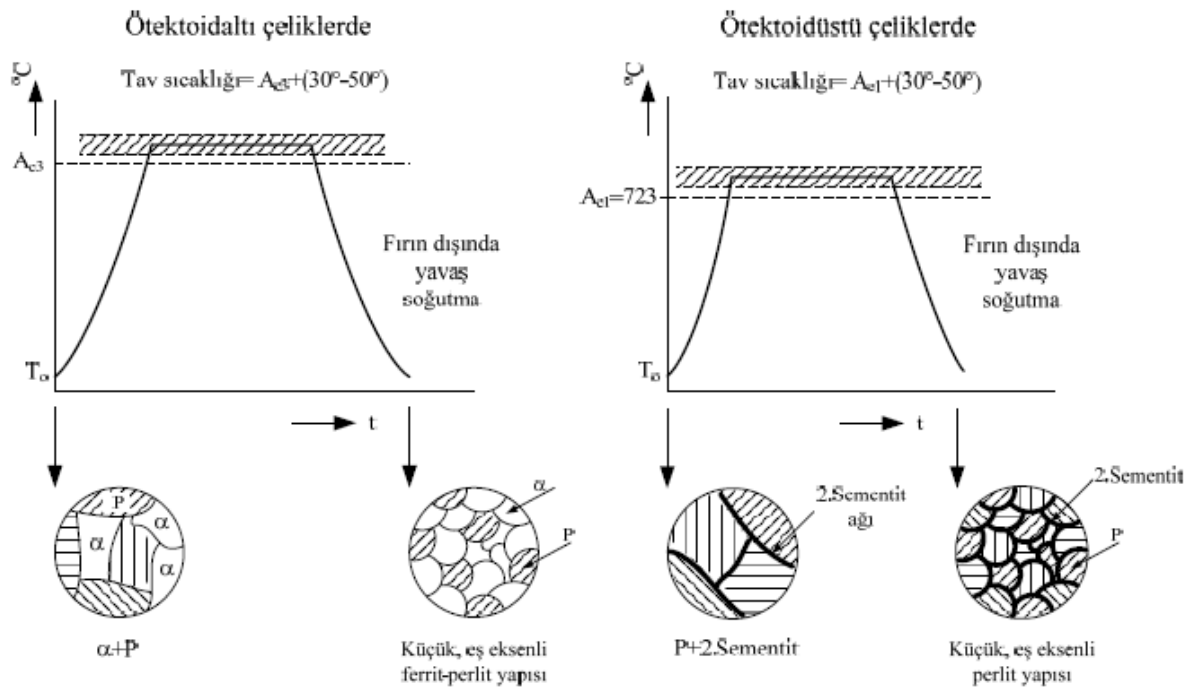
- Perlit altı çeliklerde tam tane dönüşümlü yumuşak ve normal tavlama
- Perlit üstü çeliklerde kısmi tane dönüşümlü yumuşak ve normal tavlama
- Perlit üstü çeliklerde tam tane dönüşümlü normal tavlama
- Bilyalı sementit tavlama
- Tane dönüşümsüz yumuşak tavlama

Kombinasyonlar:

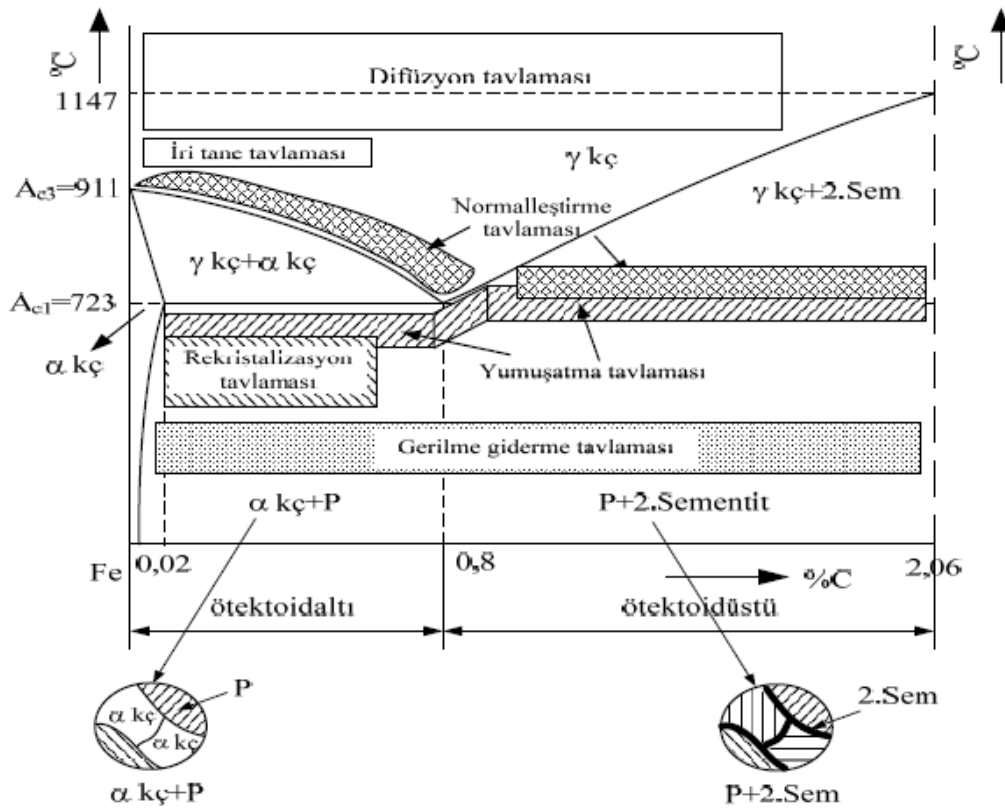
- Normalize ve müteakiben menevişleyerek yumuşak tavlama
- Tane değişimli yumuşak tavlama müteakiben bilyalı sementit tavlama



Şekil 3.15. Bir çeliğin tavlınmasında olaylar



Şekil 3.16. Ötektoidaltı ve ötektoidüstü çeliklerin yapısı



Şekil 3.17. Diyagramda tavlama çeşitlerinin gösterilmesi

3.4. ZSD Diyagramı terimleri

Ferrit

Çok yumuşak ve sünektir. 769°C nin altında manyetiktir. Hacim merkezli kübik yapıya sahip olduğundan atomlar arası boşluk çok azdır ve küçük karbon atomlarını arasına rahatlıkla alamaz. Bu nedenle karbon eritebilirliği çok azdır. 910°C de östenite dönüşür.

Sementit

Fe_3C kimyasal bileşenlerdir. % 93.33 ferrit ile % 6.67 karbonun bir bileşimidir. Özgül ağırlığı düşük, sert, kırılğan, 215°C sıcaklıkta mıknatıslanma özelliğini

kaybeden bir yapıya sahiptir. Biçimlendirilebilme özelliği yoktur ve çelik içerisinde bulunduğu zaman sertlik ve dayanım verir.

Perlit

% 87 ferrit ve % 13 sementit yaptığı bir ötektiktir. Ancak meydana geldiği sıcaklıkta çelik katı olduğundan ötektoit olarak isimlendirilir. Mikroskop altında incelendiği zaman inci gibi parlak ve parmak izi şeklinde görülür. Bu sebeple perlit adı verilmiştir. (İngilizce pearl, inci anlamındadır)

Ötektik

Ötektik, Yunanca da iyi eriyen, alçak sıcaklıkta eriyen, homojen anlamına gelen bir kelimedir. Mekanik karışım verilen bu alaşımlar, kendisini meydana getiren alaşım elemanlarının oranlarına bağlı olarak özellik gösterirler. Ötektik alaşımlarda alaşımının özelliği bu sebeple büyük farklılık göstermez. Alaşım meydana getiren elemanların ortak özelliklerine sahip bir alaşım elde edilir.

Çelik, içerisinde karbon oranını göre, karbonun meydana getirdiği sementit ile, saf demir ferritin alaşımıdır. Çelikte karbon fazla ise, karbonun demirle yapacağı kimyasal bileşik olan sementitte fazla olacağından, sementit etkisi ile çelik sertleşecektir. Çünkü sementit sert, kırılğan ve biçimlendirilme özelliği olmayan bir fazdır. Çelikte karbon az ise bu defa ferrit fazla olacağından çelik yumuşak ve biçimlendirme özelliği fazla olur.

Ötektoit

Ötektoitler, katı eriyiklerin yapmış olduğu bir ötektikten ibarettir. Katı eriyikler sıcaklık değişimi ile başka yapılara dönüşürler. Bu dönüşme katı durumdan meydana geldiğinden aradaki farkı belirtebilmek için bu gibi ötektiklere ötektoit adı verilmiştir.

Austenit

14 atomlu, yüzey merkezli gama karışık kristallerine verilen bir isimdir. Sıcaklık yükselmesi ile karbon eritkenliği artarak % 1.7'ye kadar yükselir. Atomlar arası mesafe YMK kristalde daha büyük olduğundan ferrit fazından çok yüksek karbon çözebilir. Saf veya karbon eritmiş halde mıknatıslanmaz. Nikel ve manganez ile elde edilen, alçak sıcaklıklarda da austenit yapılı çelikler elde edilmektedir. Bu çelikler de mıknatıslanmazlar. Austenitler özlü olup biçimlendirilebilme özelliği çok yüksektir. Isı ve elektriği iyi iletmezler.

2.Sementit

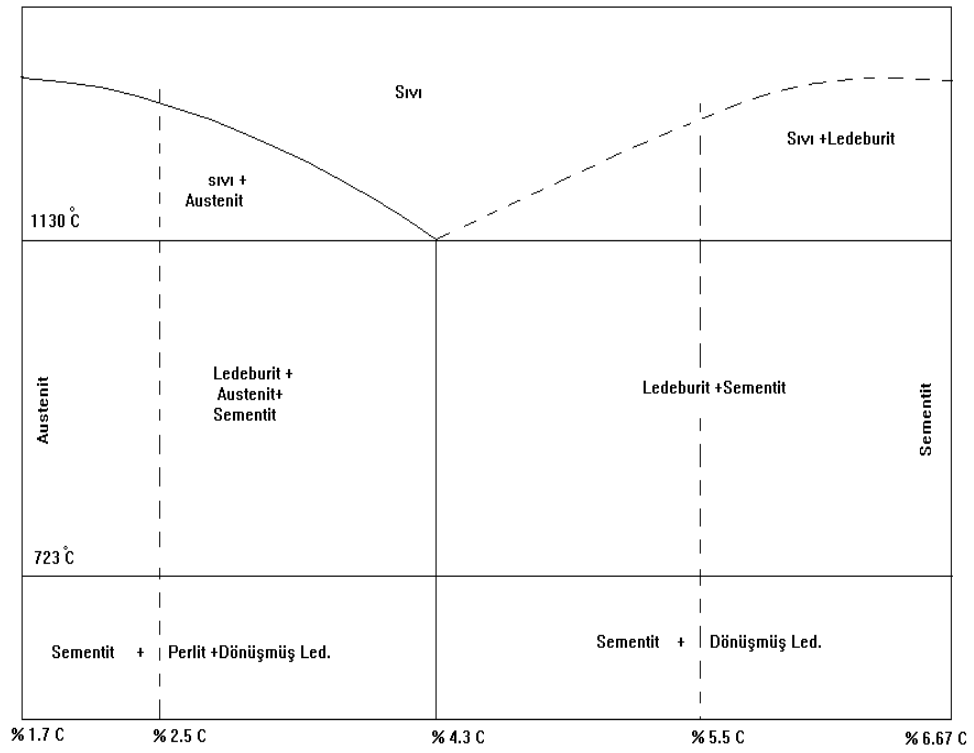
Yapı olarak 1.sementitin aynıdır. Yalnız katı fazdan yani austenitten çökeldiği için 2.sementit adını almıştır. Yapıda tane sınırlarında sürekli tabaka oluşturacak şekilde bulunur.

Ledeburit

Sementit ile austenitin yapmış olduğu bir ötektiktir. Ötektik sıcaklık 1130°C olup % 4.3 karbon (aslında karbonun yapmış olduğu bileşik sementit) ile, % 95.7 ferritin yapmış olduğu bir ötektiktir. Ötektik sıcaklık altında austenit ve sementitten meydana gelmiş olmakla beraber sıcaklık düştükçe austenit dönüşmeye uğrayarak sementi meydana getirmeye devam eder. 723°C sıcaklık altında austenit bulunamayacağından yapı tamamen sementit ve perlite dönüşür. Ledeburit, yüksek sıcaklıklarda ile sementitin, oda sıcaklığında ise perlit ile sementitin meydana getirdiği bir ötektiktir.

Üç önemli bileşimde oluşan faz ve dönüşüm ürünleri, yapıda bulunuş oranlarına göre iç yapının görünüşü ve alaşımın özelliklerini etkilemektedir.

- a) 0.8 karbonlu sınır : % 100 perlit içerir (ötektit bileşim)
- b) 4.3 karbonu sınır : iç yapıda % 100 ledeburit vardır (Ötektik bileşim)
- c) 6.67 karbonlu sınır : iç yapıda % 100 sementit vardır (Fe₃)



Şekil 3.18. ZSD diyagramı

BÖLÜM 4. ISIL İŞLEM FIRINLARI VE YAPI ELEMANLARI

4.1. Metal Malzemeler İçin Isıl İşlem Fırınları

Bu fırınlarda ısıtma, müteakiben yapılacak sıcak şekillendirme için tavlama yada sertleştirme, meneviş, ıslah, yumuşak tavlama, normal tavlama, gerilim giderme tavlama, sementasyon, nitrasyon, temperleme gibi ısıtma işlemlerinin gerçekleştirilmesi için yapılır. Amaca bağlı olarak, fırınlar birbirlerine göre büyük konstrüktif farklılıklara sahiptirler. Fırın tipinin belirlenmesinde; amacın gerçekleşmesi için, işlem sıcaklığına ısıtılacak parçaların formu, büyüklüğü ve miktarı, fırın kapasitesi, tavlama hatalarını en aza indirmek, ekonomik çalışma gibi, birçok faktörün bir arada düşünülmesi gerekir.

Müteakiben yapılacak sıcak şekillendirme (Plastik şekil verme) için tavlama fırını olarak, büyük kapasitelerde kuyu tipi fırınlar ve itme fırınlar, daha az kapasitelerde ise arabalı, tamburlu, döner tabanlı ve çan tipi fırınlar kullanılmaktadır. Ayrıca, hızlı ısıtma yapan özel fırınlar ve indüksiyon ısıtma da yapılabilmektedir.

Isıl işlem fırınlarında, fırın atmosferi çok önemlidir. Sertleştirme için tavlama işleminde, fırın atmosferini kaldırdığı için daha çok tuz banyosu fırınları kullanılmaktadır. Diğer ısıtma işlemlerinde ise, ısıtma esnasında fırın atmosferinin zararlı etkilerinden parçayı koruyacak tarzda, nötr atmosferde yada vakum içerisinde ısıtma yapılmalıdır. Ayrıca, fırında kontrollü difüzyon sağlanarak sementasyon, nitrasyon gibi ısıtma işlemleri de yapılabilir.

Isıtma fırınlarında ısıtma hızı, ısıtma süresi ve ısıtma sıcaklığı, malzemenin analizine, formuna, üretim tarzına, boyutlarına, ısıtma tarzına ve ısıtma amacına göre değişmektedir. Malzemenin dış yüzeyinde ve yapısında, tahribat meydana

gelmemelidir. Malzeme analizine bağı olan ısı iletme kabiliyeti ne kadar düşük, parça boyutları ne kadar büyük ise, ısıtma hızı o kadar yavaş seçilmelidir.

Sıcaklığın parça içerisinde dengelenmesinde de aynı kural geçerlidir. Metal malzemelere örnek olmak üzere, tablo 3.1'de değişik konsantrasyonlu çeliklerin ısıtılmasında ısıtma grupları verilmiştir.

Çelik grubu	Çelik çeşidi	Isıtma tarzı
1	Karbon miktarı %0,4'e kadar alaşımsız çelikler, alaşımlı sementasyon çelikleri	Isıtma hızı yüksekçe, iç ısıtmada diğerlerine nisbeten daha kısa süre
2	Karbon miktarı %0,4-0,7 arasında alaşımsız çelikler. Karbon miktarı %0,4'e kadar düşük ve orta alaşımlı imalat çelikleri	Isı iletme kabiliyetleri ve plastiklikleri düşüktür. 600 ⁰ C'ye kadar 1.gruba girer daha uzun süre, daha yüksek sıcaklıklarda aynı ısıtma hızı. Dengeleme süresi daha uzun.
3	Ötektoid ve ötektiki üstü alaşımsız çelikler, düşük ve orta alaşımlı takım çeliği	Isı iletme kabiliyeti ve plastikliğin düşüklüğünün yanında, karbon azalma tehlikesi vardır. 600 ⁰ C'ye kadar yavaş, daha sonra hızlı ısıtma. Sıcaklık dengelemesi kısa tutulmaya çalışılır.
4	Yüksek alaşımlı imalat ve takım çelikleri, ancak iş takım çelikleri, ferritik ve fazla alaşım elemanı ihtiva etmeyen östentik çelikler	Isıtma koşulları 3.gruba benzer, ancak kötü şekil değişebilirlik nedeniyle daha uzun dengeleme süresi
5	Hız çelikleri, alaşım elemanı ihtiva eden ferritik, östentik ve martenzitik paslanmaz çelikler, subap çelikleri, ısıya dayanıklı çelikler, döküm mangan sert çeliği	Isıtma koşulları 4.gruba benzer, daha uzun dengeleme süresi

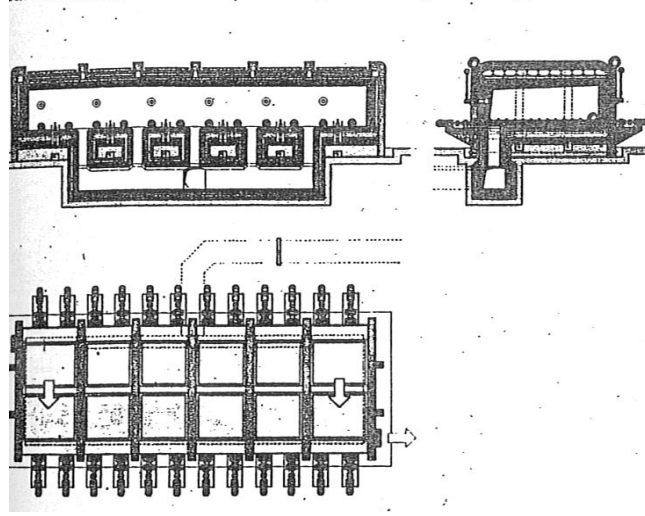
Tablo 4.1: Isıtma gruplarına göre çelik çeşitlerinin sınıflandırılması

Çelik boru imalatında kullanılan bazı fırın çeşitleri şu şekildedir:

4.1.1. Boru ısıtma fırını

Makara tabanlı fırınlar boru ısıtılmasında başarıyla kullanılabilir gibi, bu sistemi geliştirerek daha kullanışlı duruma getirmek mümkündür. Şekil 3.2'de görülen boru ısıtma fırını, makara tabanlı ve kaldırma kirişli fırınların bir karışımıdır. Borular ok doğrultusunda fırına sevk edilir ve müteakiben kaldırma manivelalarıyla dik doğrultuda her seferinde bir çentik ileri sürülür. Borular fırın sonuna geldiğinde ok yönünde dışarıya alınır. Böyle bir tesiste, fırın 1500⁰C'ye, yani kaynak sıcaklığına ısıtılabilir. Bu suretle dikişli boru imalatında da bu fırından yararlanılabilir. Ancak,

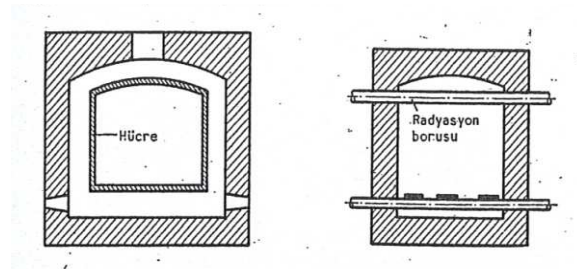
bu yüksek sıcaklıkta makaralar kısa zamanda bozulacağından mutlaka su ile soğutulmalı ve sık sık değiştirilmelidir.



Şekil 4.1. Boru ısıtma fırını

4.1.2. Hücre (muffle) ısıtma fırınları

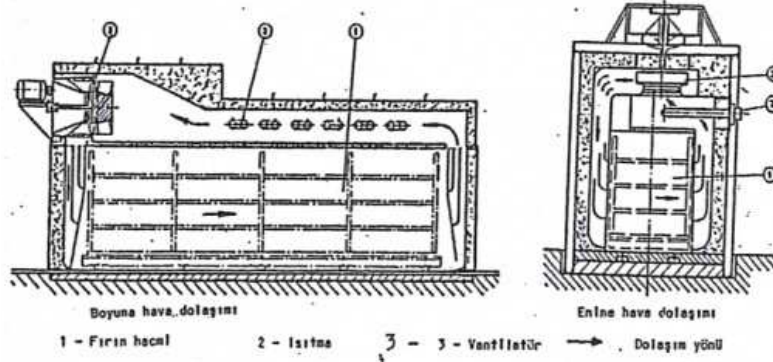
Sementasyon, nitrasyon gibi ısıtma işlemlerinde ısıtma prosesi için reaktif gaz ortama, diğer bazı ısıtma işlemlerinde ise nötr ortama ya da koruyucu gaz ortama gerek vardır. Böyle durumlarda hücre fırınları ve radyasyon borulu fırınlar kullanılabilir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, hücreler dıştan beklerle ya da elektrik direnç elemanlarıyla ısıtılır. Radyasyon borulu fırınlarda ise içerisinden sıcak gaz geçen borular fırın hacmi içerisine döşenmiştir.



Şekil 4.2. Hücre tipi ve radyasyon borulu fırınlarda fırın boyutlarının karşılaştırılması

Aynı fırın faydalı hacmi için, hücre tipi fırınların dış hacmi, radyasyon borulu fırınlara nazaran oldukça fazladır. Her iki tip fırında atmosfer önemli olduğu için, atmosferin kontrolü ve ayarlanması genel olarak otomatik yapılır. Ayrıca gaz kaçmasını önleyecek tarzda sızdırmazlık sağlanır. Fırın hacmi içerisinde homojen

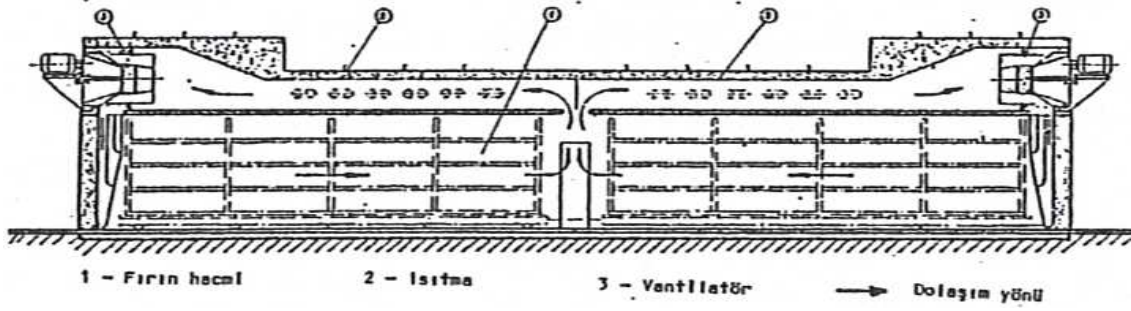
sıcaklık dağılımı sağlamak için ayrıca hava sirkülasyonu yapılmalıdır. Bu fırınlarda basınç ayarlaması yapmak suretiyle vakum altında parlak tavlama da yapılabilir. Şekillerde görülen radyasyon boruları ile ısıtılan makara tabanlı fırınlarda hava sirkülasyonu yapılmak suretiyle konveksiyonla ısı geçmesi önemli ölçüde artırılmıştır. Hücre tipi fırınlarda parçaların konulduğu hacmin dışında bulunan yanma hacmi gaz yada akaryakıtla ısıtıldığında, yanmış gazlar türbülanslı olarak dolaşır ve ısıdan yüksek verim sağlama yoluna gidilir. Elektrikli ısıtmada hava türbülansı mutlaka gereklidir. Radyasyon borulu fırınlarda, borular içerisinden 300°C 'ye kadar olan düşük sıcaklıklarda kızgın yağ, yüksek sıcaklıklarda baca gazı, jeneratör gazı yada reküperatörlerde ısıtılmış hava dolaştırılır. Yeni yapılan uygulamalarda radyasyon borusu yanma hacmi olarak geliştirilmiştir.



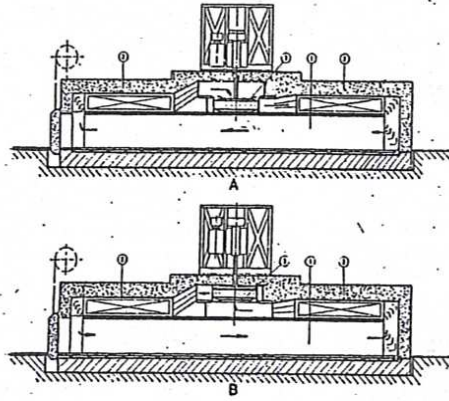
Şekil 4.3. Radyasyon borulu fırınlarda hava sirkülasyonu

Her ne kadar, enine hava dolaşımında, boyuna hava dolaşımına nazaran sıcaklık sahasına daha çabuk ulaşırsa da 7 m'ye kadar uzunluktaki profillerin ısıtılmasında boyuna hava dolaşımı kullanılır. Sıcaklık dağılımındaki fark, 200°C 'ye kadar fırın sıcaklıklarında $\pm 2 - 3^{\circ}\text{C}$, daha yüksek sıcaklıklarda $\pm 5^{\circ}\text{C}$, kadardır. (Şekil 3.4) 7m'den daha uzun profillerde fırın içerisindeki hava akımı, şekil 3.5'de görüldüğü gibi çift yönlü olarak düzenlenir. Hava sirkülasyonlarında vantilatörün emme tarafının ısıtıcılardan olmasına yani ısıtılan parçalardan emme yapılmasına dikkat edilmelidir. Şekil 3.6'da görülen fırında hava dolaşımı, vantilatör kanatlarının aşağı-yukarı değiştirilmesiyle yön değiştirebilmektedir. 5 ilâ 20 dakikada bir yapılan yön değiştirme ile ısıtıcılardan daha yüksek verim alınabilmektedir. Şekil 3.7'de ise elektrikli, gaz yada akaryakıtla direkt ısıtılan ve radyasyon borulu fırınlarda hava

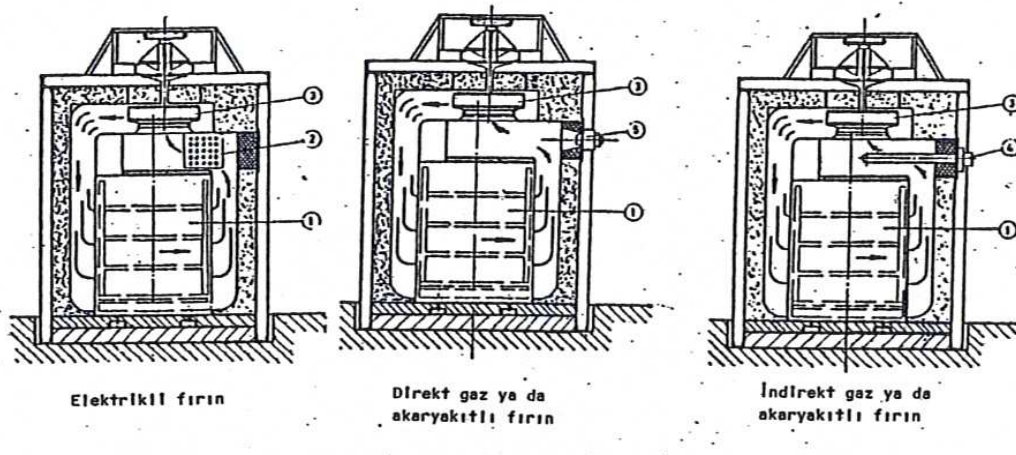
dolaşımı örnekleri verilmiştir. Her üç yöntemde de fırında çok iyi sıcaklık dağılımı sağlanabilmektedir.



Şekil 4.4. Boyuna çift hava dolaşimli fırın



Şekil 4.5. Hava dolaşım yönü değiştirilebilen fırın



Şekil 4.6. Elektrikli, direkt gaz yada akaryakıtlı ve indirekt gaz yada akaryakıtlı ısıtılan radyasyon borulu fırınlar

4.2. Fırın Yapı Malzemeleri

Endüstri fırınlarında yapı malzemesi olarak, refrakter malzemeler ve sıcağa dayanıklı metal alaşımları kullanılır. Oldukça yüksek sıcaklığa, sıcaklık değişimlerine, fırın atmosferi ve ergiyik tahribine karşı dayanıklıdırlar.

Metal malzeme olarak ise, sıcağa dayanıklı çelik, dökme demir, bakır ve alaşımları ve direnç malzemeler kullanılır. Bakır ve alaşımları, sıcağa dayanıklı olmadığından, kullanma esnasında mutlaka soğutulmalıdır. Sıcaklığın fazla yüksek olmadığı, fırının dış kısımlarında ise, alaşımsız çelikler de konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılır.

4.2.1. Refrakter malzemeler

Yüksek sıcaklığa dayanıklı malzeme olarak kullanılırlar.

Kullanma yerine göre seçim yapılırken, şu sorulara yanıt aranmalıdır:

1. Refrakter malzeme nerede kullanılacaktır?
2. Tesis sürekli mi, yoksa kesintili mi çalışmaktadır?
3. Kullanılacak yakıt çeşidi nedir ve refrakter malzeme üzerine etkisi nasıldır?
4. Fırının işletme sıcaklığı ve refrakter malzemenin bulunduğu yerde sıcaklık nedir? Kesintili çalışmada, en yüksek ve en düşük sıcaklıklar ve çalışma periyodu nedir?
5. Ergitilen madde, fırın atmosferi, cüruf ve uçucu külerin, refrakter malzeme üzerindeki kimyasal etkileri nedir?
6. Olabilecek mekanik zorlamalar ve büyüklükleri nedir?
7. Bugüne kadar, hangi refrakter malzeme kullanılmıştır? Daha önce kullanılan refrakter malzemelerden, işletme koşullarına bağlı olarak, hangi sonuçlar alınmıştır?

4.2.1.1. Şamot tuğla

Şamot malzemeler, fırında sıcaklık değişimine karşı dayanıklıdır. Bazik maddelere ve oksidleyici atmosfere, redükleyici atmosfere, ergiyik metale oldukça dayanıklıdır. Yük taşıma kabiliyeti yüksektir. Diğer refrakter malzemelere nazaran ucuzdur.

4.2.1.2. İzolasyon malzemeleri

Endüstri fırınlarında izolasyon malzemesi olarak, hafif şamot tuğla, özel izolasyon tuğlaları, Vermikulit, Klezelgur, cüruf yünü, asbest ve hava tabakalı alüminyum folye (Alfol) kullanılır.

4.2.2. Metal Yapı Malzemeleri

Fırınlarda kullanılan metal yapı malzemeleri olarak, yüksek sıcaklığa dayanıklı dökme demir, çelik döküm, çelik ve bakır söylenebilir.

4.2.3. Direnç Malzemeleri

Direnç malzemesi olarak daha çok özgül direnci yüksek metal ve elektrik iletken metal olmayan malzemeler kullanılır. Fırınlarda, direnç malzemelerin yatakladığı refrakter malzeme seçimine, yüksek sıcaklıklarda refrakter malzemeler de iletken olabildiği için dikkat edilmelidir. Ayrıca sıcaklığa bağımlı olarak direnç yüzey yükünün de (birim direnç dış yüzeyindeki yük) göz önünde tutulması gerekir.

Direnç elemanlar fırında kanallar içerisinde çok iyi yataklanmalı ve sarkma olmamalıdır. Elemanların, elektrik devresine bağlantıları ve birbirlerine olan bağlantıları sıkı bir şekilde, mümkünse kaynaklı olarak yapılmalıdır.

Bu malzemeler, her şeyden önce yüksek akım şiddeti gerektirirler ve transformatör kullanılması lazımdır. Bir diğer direnç malzemesi de kömür boru, grafit çubuk ve kömür tortusu olarak çok yüksek fırın sıcaklıklarında (direnç yüzey sıcaklığı 2500°C) kullanılabilir. Yanmaya karşı ayar transformatörü gerekli değildir. Bundan başka, birçok direnç malzeme için uygun olmayan, karbon ihtiva eden atmosfere de uygundur.

4.3. Malzemelerin Kullanılması

Fırın konstrüktörü, fırının inşasında şu noktalara dikkat etmelidir.

1. Ateşe dayanıklı refrakter malzemenin seçiminde şu karakteristikler göz önünde tutulmalıdır.

- a) Ateşe dayanıklılık
- b) Basınçta ateşe dayanıklılık
- c) Refrakter malzemenin ısınma ısısı
- d) Malzemelerin ısı iletme katsayıları
- e) Kimyasal etkilere ve cürufa karşı dayanıklılık. Bu konuda ısıtılan parça, baca gazları, ısıl işlemde kullanılan diğer gazlar ve bitişik refrakter malzemenin kimyasal etkileri de düşünülür.
- f) Sıcaklık değişmelerine dayaklılık
- g) Değişik sıcaklıklarda ısıl genleşme katsayısı
- h) Çok yüksek sıcaklığa ısıtmada kalıcı genleşme durumu
- i) Mekanik dayanıklılık
- j) Mekanik aşınmaya karşı dayanıklılık
- k) Gaz geçirgenliği
- l) Ömür
- m) Fiyat

2. Fırın tamiratu kolay ve kısa zamanda olabilecek şekilde projelendirilmelidir. Fazla zorlanan ve kısa zamanda kırılabilen, bozulan tuğlalar tüm fırın sökülmeden değiştirilebilmelidir.

3. Eğer değişik malzemeler direkt temas halinde bulunulursa, kimyasal reaksiyon meydana getirebilirler. Böyle durumlarda araya izolasyon tabakaları konmalıdır.

4. Fırının inşasında Standard tip ve kolay temin edilebilen tuğla formları seçilmelidir. Özel tuğlalar hem pahalıdır, hem de temin süresi fazladır. Özel formlar gerektiğinde fırında sıkıştırma ile toz malzemedan yararlanmak yardımcı bir çözüm olabilir.

5. Ateşe dayanıklı malzemelerin tam desteklenmesi gerekir. Tuğlaların bir kısmı boşlukta asılı olarak kesinlikle durmamalıdır. Bu durumda hava etkilerine karşı çok hassas olurlar.

6. Harç malzemesi olarak, ya tuğla malzemesinden yada bu tuğlaya uygun tozlardan yararlanılmalıdır.

7. Tuğlalar, kesilerek yada yontularak boyut değişikliğine uğratılmamalı, standart tuğla boyutlarına göre hesaplama tam ölçekli yapılmalıdır. Mümkün olduğu kadar özel form ve boyuttan kaçınılmalıdır.

8. Fırın duvarlarının örülmesi itina ile yapılmalıdır. Araya konan harç çok ince olmalıdır. Tuğlalar arasında boşluk kalacak şekilde birleştirme yapılmalı, bu boşluklara harç bırakılmamalıdır.

9. Genleşme hacmi ve genleşme boşlukları mutlaka düşünülmelidir.

10. Yeni fırının ısıtılmasında dikkatli sıcaklık artımı yapılmalıdır. Bağlama ve germe çubukları belirli zaman aralıklarıyla kontrol edilerek, genleşmeye uygun gevşetilmelidir. Özellikle silika tuğlalarda bu duruma daha çok itina gerektir.

Fırın yapı malzemesinin seçiminde sadece ısıtılan parçanın çeşidi ve fırın sıcaklığının yüksekliği değil, aynı zamanda fırının değişik kısımları için de farklı malzemeler göz önünde tutulur. Örneğin, cam yada çelik gibi malzemelerin ergitilmesinde taban malzemesi, tavan malzemesinden farklı seçilir. Bundan dolayı, yeni bir fırının inşasında konstrüktör, hangi malzemenin mevcut koşullarda tavsiye edildiğini araştırarak ateşe mukavim refrakter malzeme yada sıcağa mukavim çelik tercihini yapmalıdır. Isıtma sistemi ve yakıt cinsi de bu tercihte rol oynar.

Şamot cinsi malzemeler, fırın inşasında, fırının hemen hemen dörtte üçünde kullanılabilir. Silika tuğla, yüksek alüminyumoksitli yada bazik tuğlalar ve ateşe mukavim özel malzemeler sadece zor koşullarda kullanılır. Bu konularda mevcut tavsiyelere uyulması, tesis inşa masrafları ve bakım açısından büyük ekonomi sağlar

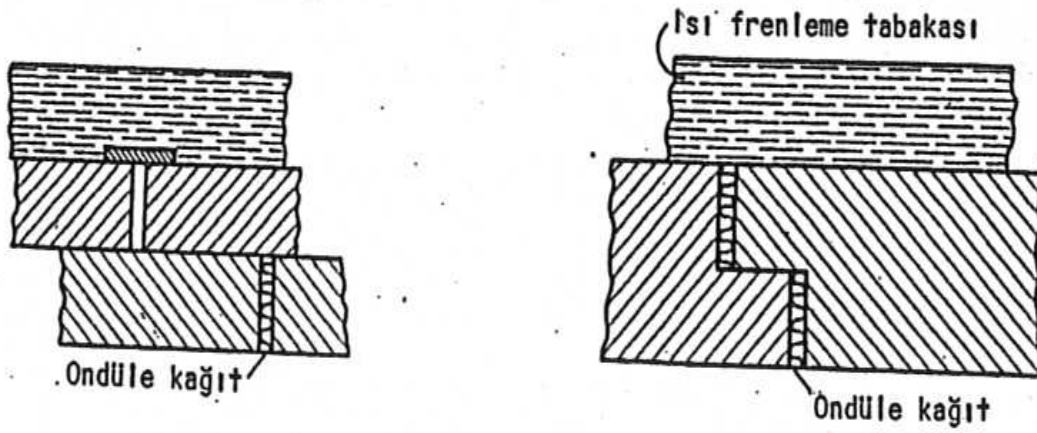
4.4. Isıl İşlem Fırınının Bölümleri

4.4.1. Fırın duvarları

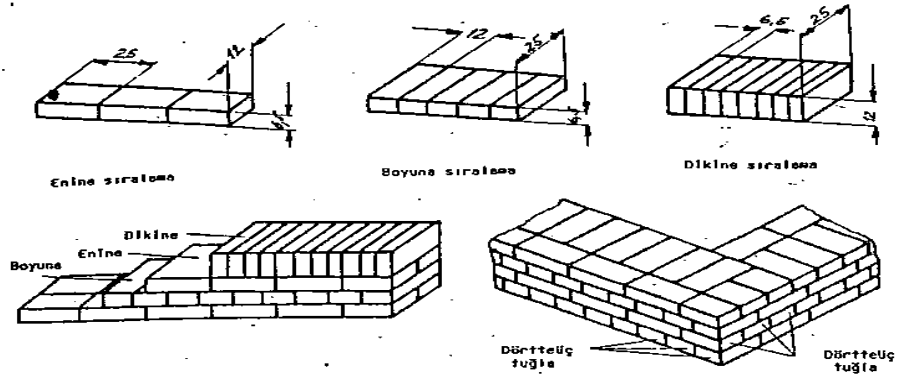
Yüksek sıcaklıklardaki fırınlarda, fırın duvar kalınlığı şöyle olabilir:

Duvar boy yada yüksekliği (m)	Duvar kalınlığı (mm)
1	120
2	230
3	350

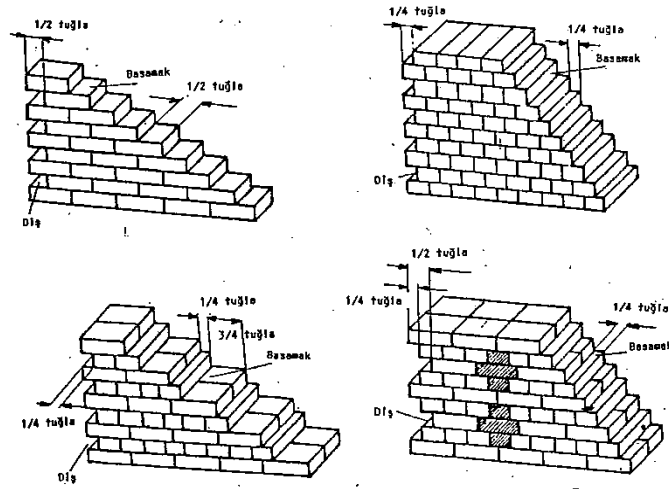
Genleşme boşluğu bırakılmasına özellikle dikkat etmelidir. Sızdırmazlık temini için ayrıca tedbir alınmalıdır (Şekil 4.7 ve 4.8).



Şekil 4.7. ve 4.8. Genleşme boşluklarında sızdırmazlık temini



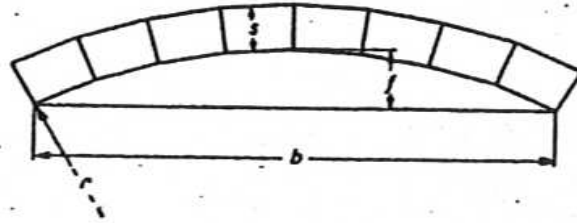
Şekil 4.9. Fırın duvarlarında normal tuğlaların örülme şekilleri



Şekil 4.10. Fırınlarda düz duvar örme şekilleri

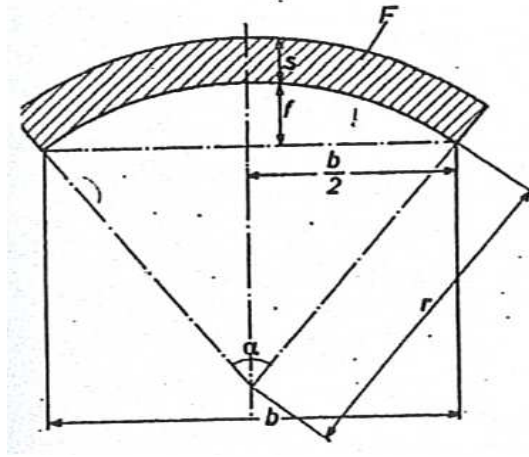
4.4.2. Tavan inşası ve kemer

Fırın tavanları, fırının en önemli ve en hassas kısımlarıdır. Tavan, düz yada kemer olarak yapılabilir. Yan duvarlar üzerine oturur, ayrıca çekme ve germe çubuklarıyla bağlanırlar.



Şekil 4.11. Fırın kemeri

Genellikle daire yayı kemerler kullanılır. Kemerde (Şekil 4.11) yarıçap r , kalınlık s ve kemer açısı α 'dır. Kemer yapımında, temini kolay olan konik standart tuğlalar kullanılmalıdır.



Şekil 4.12 Kemer yarıçapı ve açısı

Yarıçap r şöyle hesaplanabilir (Şekil 4.12):

$$r^2 = \left(\frac{b}{2}\right)^2 + (r - f)^2 \quad (4.1)$$

Basıklık oranı $= \frac{f}{b} = S$ alınır ;

$$r = \left(\frac{b}{2}\right) \left(S + \frac{1}{4S}\right) \quad (4.2)$$

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{b}{2} \frac{1}{r} = \frac{1}{S + \frac{1}{4S}} \quad (4.3)$$

Kemer kalınlığı s için şu değerler önerilmektedir:

Kemer genişliği b (m) : 1,25 3,6 5,5 7,25

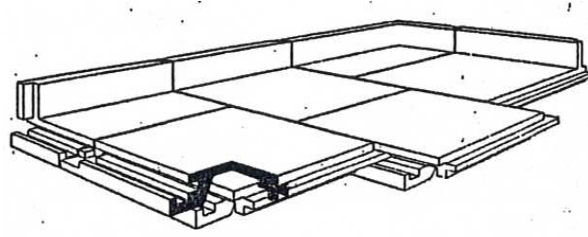
Kemer kalınlığı s (m) : 0,115 0,23 0,345 0,46

5.5 m'den daha uzun kemer genişlikleri kullanışlı değildir.

4.4.3. Fırın tabanları

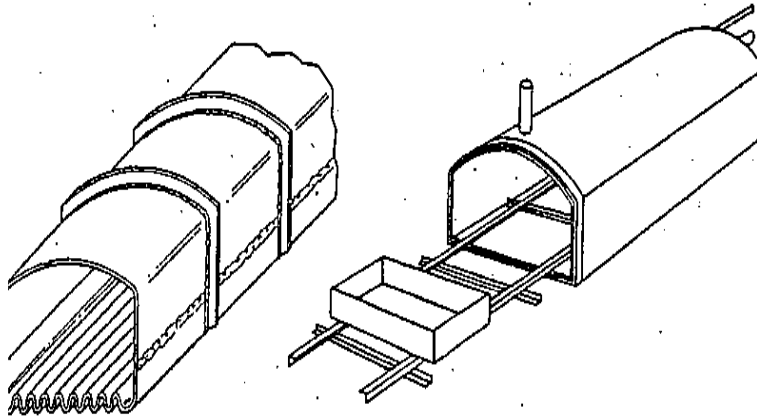
Isıtılan parçalar taban üzerinde oturtularak ısınır. Bu ısınmada tabandan da ısı alındığından, bu duruma özellikle dikkat etmelidir. Dolayısıyla, taban malzemesinin öncelikle yüksek ısı iletkenliğinde ve ikinci olarak yeterli aşınma mukavemetine sahip olması gereklidir. Refrakter malzeme olarak, bu özellikleri iyi olan

silisyumkarbür kullanılabilir. Ancak dökme demir plakalar yada ray kullanarak refrakter malzemenin korunması yararlı olur.



Şekil 4.13. Sıcağa mukavim çelikten taban plakaları

Isıtılan parçaların sıcak gazlardan korunması gerektiğinde hücrelerden (mufle) yararlanılır. Hücrelerin koruyucu yada reaktif gazla doldurulması da mümkündür. Isı hücrenin dışından sağlandığından, hücre malzemesinin mümkün olduğu kadar yüksek ısı iletme kabiliyetinde olması gerekir.



Şekil 4.14. Ondüle taban

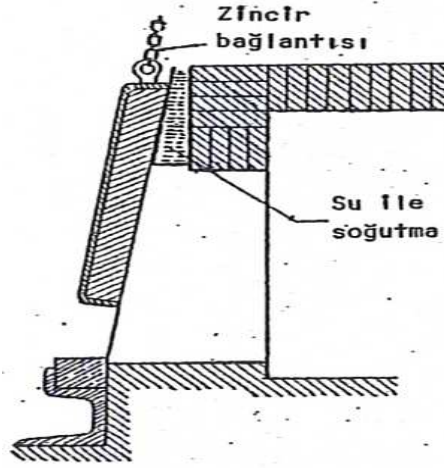
Şekil 4.15. Raylı hücre

İtme fırınlarda olduğu gibi parçaların fırın içerisinde ilerlemesi sürtünme ile olduğunda yada parçalarda hem üstten hem de alttan ısıtma yapılmak istendiğinde, yüksek sıcaklıkta çalışan fırınlarda da boydan boya ray döşenebilir.

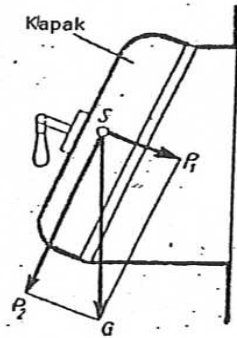
4.4.4. Fırın kapakları

Fırın kapakları, yalnızca ısıtılacak parçaların fırına alınması ve boşaltılması için değil, aynı zamanda fırın hacminden sıcak gaz ve ısı kaybını mümkün olan en az seviyede tutacak tarzda inşa edilmelidir. Akaryakıtla ısıtılan fırınlarda ısı gereksinmesi, kapaktan fırına sızan hatalı havadan dolayı artar. Her fırın türünde bu

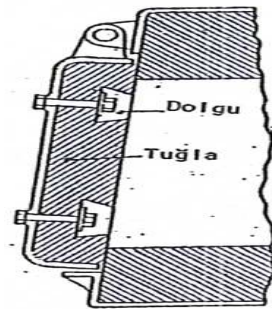
durum fırın atmosferini ve fırın hacmindeki sıcaklık dağılımını bozar. Fırın kapağındaki kötü izolasyon, duvar ve aralık ısı kayıplarını da önemli ölçüde artırır.



Şekil 4.16. Zincir bağlantılı düşey hareket eden kapak



Şekil 4.17. Eğik kapakta baskı kuvvetleri

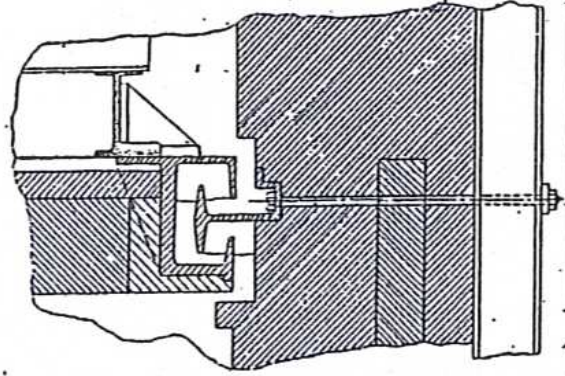


Şekil 4.18. Menteşeli kapama düzeni

Fırın kapakları genellikle düşey hareket ederler, zincir yada çelik halatlarla üstten asılır ve karşı ağırlıkla dengelenirler. Küçük fırınlarda ise kapaklar, düşey yada yatay bir eksen etrafında dönebilir. Kapaklar menteşelerle taşınır. Kapak yan çerçevesinin konik olarak yapılması, iyi sızdırmazlık sağlar.

4.4.5. Fırınlarda gaz sızdırmazlığı temini

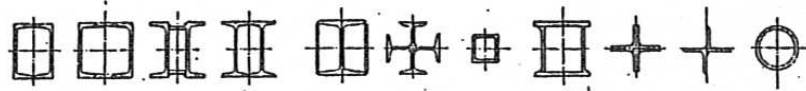
Fırın kapakları alt tarafından, bir kanala konulmuş kum içerisine gömülürse, alt kısımdan tam sızdırmazlık sağlanabilir.



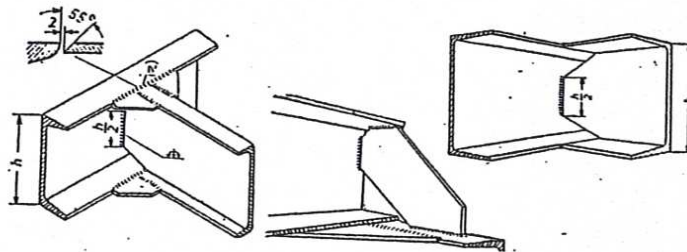
Şekil 4.19. Alışılmış tip kum salmastra sistemi

4.4.6. Fırında çelik konstrüksiyon

Çelik profil malzemeler fırında taşıyıcı elemanlar olarak dış kısımda kullanılırlar. Profiller boyuna kaynak edilerek yeni formlar oluşturulabilir. Bu profiller daha çok, kaynak kabiliyeti yüksek olan Fe 37 (St 37) ve Fe 42 (St 42) çeliklerinden yapılır. Birleştirilmelerinde önce dikkatlice puntalanır ve çarpılma olmadan çift taraflı kaynak edilir. Bu profillerin bulunduğu bölgede sıcaklık genellikle 200°C 'yi geçmez.



Şekil 4.20. Fırınlarda kullanılan birleşik profiller



Şekil 4.21. Profillerde birleştirme örnekler

BÖLÜM 5. ISIL İŞLEM FIRINLARINDA ISI TRANSFERİ

5.1. Yakıtla Isıtılan Fırınlarda Isı Üretimi

Katı yakıtlardan odun ve odun kömürü, fiyatının yüksek, buna karşılık ısıl değerinin düşük olması nedeniyle endüstri fırınlarında pek kullanılmazlar. Fırında, daha iyi sıcaklık dağılımı ve otomatik kontrolün sağlanması için, diğer katı yakıtlar tercih edilir. Ayrıca; kule tipi düşey ergitme fırınlarında, bir tabaka cevher, bir tabaka katı yakıt doldurma ve basınçlı hava üfleme ile de (Yüksek fırın, kupol ocağı, kalker pişirme fırını) katı yakıt kullanılabilir. Toz haline getirilmiş kömürle de, iyi ayarlama ve otomatik kontrol sağlanabilir. Özellikle, çimento fırını gibi kül miktarının sorun olmadığı fırınlarda, toz kömür tercih edilebilir.

Gaz yada akaryakıt kullanılmasında, fırın işletiminde şu üstünlükler sağlanır:

- Basınç altında, boru ile kolay taşıma;
- Yakıt ve hava çok iyi karıştırılabildiği için, daha düşük hava sayısı (n) ile çalışma;
- Isı teminini, daha çok sayıda yakıcı kullanarak sağlama;
- Fırın özelliklerine bağlı olarak daha uygun alev formu sağlayabilme;
- Yanmanın ve yakıt sevkini daha iyi ayar edilebilmesi;
- Gaz halindeki yakıtların tamamen, akaryakıtın ise kısmen külsüz olmaları.

5.1.1. Gaz formundaki yakıtlar

Endüstri fırınlarının ısıtılmasında daha çok kok fırın gazı, jeneratör gazı, akaryakıt gazı, baca gazı, doğal gaz ve likid petrol gazından yararlanılır.

Kok fırın gazı (havagazı) : Üst ısıl değeri $H_{ü} = 19000 \text{ kJ/Nm}^3$ ve alt ısıl değeri $H_a = 17000 \text{ kJ/Nm}^3$ dür. Yoğunluk oranı 0.378

Jeneratör gazı : Bu gaz, kokun gazlaşmasından (yada ABD gibi, antrasiti zengin ülkelerde antrasitten) üretilir. Yalnızca, gaz fırınları, kok fırınları, Siemens-Martin fırınları ve cam ergitme fırınlarında değil, ayrıca diğer endüstri fırınlarında da kullanılır. Üretim durumu, fırında kullanma koşullarına göre belirlenir.

Akaryakıt gazı: Yakın tarihlerde geliştirilmiş bu tesislerde, sıcak petrol ürünü, gaz içerisine verilir. Bu teçhizatla, karışık detaya gidilmeksizin yüksek randıman elde edilir ve 10 ilâ 1500 kg petrol/h güçte çalışabilir. Bu gazdan da, endüstri fırınlarında yararlanılması, genellikle büyük yararlar sağlar.

Doğal gaz: Bu gazın esas bileşeni metan (CH₄)'dır. Konsantrasyonu ve ısıl değeri, bulunduğu yere göre değişir. Kullanılabilir tipik iki konsantrasyon şöyledir:

	A	B	
Metan CH ₄	%92,1	%81,9	Alt Isıl Değeri A-H _a = 32000 kJ/Nm ³ B-H _a = 28800 kJ/Nm ³
Etan C ₂ H ₆	%1,6	%2,71	
Propan C ₃ H ₈	%0,5	%3,8	Yoğunluk (Hava=1) A-0,61 B-0,641
Butan C ₄ H ₁₀	%0,1	%0,13	
Pentan C ₅ H ₁₂	%0,1	%0,04	
Yüksek hidrokarbon	%0,05	%0,04	
CO ₂	%2,0	%0,8	
O ₂	%0,2	-	
N ₂	%3,3	%14,0	

Likid petrol gazı (LPG) : Basınç altında tutulduklarında, normal oda sıcaklığında sıvı fazla bulunurlar. Basıncın düşmesi ile gaz fazına geçerler.

Tanıyan likid yanıcı gaz, butan ve Propan'dır. 20⁰C'de buharlaşma basıncı, saf butanda 2.10⁵N/m² ve saf propanda 8.10⁵N/m²'dir. Yani bu basınç değerinin üzerinde her ikisi de sıvı fazdadır. 20⁰C'de butan için 3.10⁵N/m² ve propan için 10.10⁵N/m² teorik olarak yeterlidir. Depolanmasında, daha yüksek basınçlar ve 50⁰C sıcaklık göz önünde tutulmalıdır. Endüstride depolama ve taşıma için 150.10⁵N/m² emniyetli olarak öngörülmektedir.

Likid gazlar, sıvı halde depolanabildiği ve taşınabildiği için, diğer gaz yakıtlara nazaran daha yararlıdır. Ayrıca, butan ve propanın ısıl değeri oldukça yüksektir. Buna karşılık, temini diğer yakıtlara nazaran daha zordur ve laboratuvar tipi küçük fırınlarda ancak ekonomik olabilmektedir.

Kokil dökümde kalıpların ısıtılmasında, ekstrüzyon ve pres dökümde, Bunzen bekleri ile likid gazların kullanılması oldukça yaygındır. Havaya göre yoğunluk oranı $D=1.5$ olarak ağır olduğundan dibe çökerek, birikme yapabilir. Böyle bir birikimde, ateş karşısında ani parlama tehlikesi vardır.

Sıvının yoğunluğu (kg/l)			
0,542	-10	0,494	20
0,526	10	0,478	30
0,510	+10	0,462	40
0,502	15	0,446	50

Tablo 5.1. Ticari propanın karakteristik değerleri

15°C 'de ve 1.10^5 N/m^2 basınçta her kg sıvı, 544 1 gaz
 15°C 'de ve 1.10^5 N/m^2 basınçta her 1 sıvı, 273 1 gaz

1.10^5 N/m^2 basınçta 1 kg gazın doymuş hava ile yanmasında gerekli hava miktarı

$12,1 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

Alt ısı değerleri 46000 kJ/kg

15°C 'de buharlaşma ısısı 350 kJ/kg

Kritik sıcaklık 94°C

Kritik basınç 46.10^5 N/m^2

Buhar yoğunluğu 15°C ve 1.10^5 N/m^2 basınçta $1,84 \text{ kg/m}^3$

Üst ısı değeri $H_{\bar{u}}$ (yanma ısısı olarak da adlandırılır), 1 kg katı yada sıvı yakıtın veya 1 Nm^3 gaz yakıtın tam yanması ve yanma ürünlerinin çevre sıcaklığına kadar soğumasında açığa çıkan ısı miktarıdır. Yanmada meydana gelmesi gereken ve sıvı su olarak yoğunlaşan su buharı da, kondensasyon ısısı olarak, üst ısı değerinin içerisinde bulunur. Duman gazlarının sıcaklığı, su buharının kondensasyonu olmayacak kadar yüksekte kaldığında, **alt ısı değeri H_a** bulunur. Teknik hesaplamalarda, örneğin endüstri fırınının etki derecesinde, hem üst ve hem de alt ısı değeri kullanılır. Fakat daha çok, bu ikisinden en uygun olanı seçilir.

Eğer yakıtın konsantrasyonu biliniyorsa, tablo 5.2 yardımıyla H_a hesaplanabilir. En emniyetli tesbit işlemi, fırının kalorimetre ile kontrolünde ısı değeri belirlenmesidir.

Yakıt	H _a (kJ/Nm ³ veya kJ/kg)
Karbonmonoksit.....CO	12770 kJ/Nm ³
Hidrojen.....H ₂	10720 kJ/Nm ³
Metan.....CH ₄	35840 kJ/Nm ³
Ağır hidrokarbon.....C _n H _m	71175 kJ/Nm ³
Asetilen.....C ₂ H ₂	54430 kJ/Nm ³
Etilen.....C ₂ H ₄	59955 kJ/Nm ³
Amorf karbon.....C	34120 kJ/kg
Kükürt.....S	9060 kJ/kg

Tablo 5.2 Isı taşıyıcı duman gazlarının h_a değerleri

Alt ısıl H_a olan 1 kg yada 1 Nm³ yakıtın doymuş havada yakılmasında, V_{rt} Nm³ duman gazı meydana gelir ve yanma anında 1 Nm³ duman gazının ısı miktarı H_a/V_{rt}(kJ/Nm³)'dür. Bu ısı miktarı, teorik hava miktarlı yanmada en büyüktür ve saf oksijen ile yanmada açığa çıkan ısı pek az miktardaki duman gazı tarafından taşınacağından, daha da büyüktür. Eğer, hava fazlası büyük ise, bu durumda duman gazı miktarı artacağından, birim hacimdeki ısı miktarı en azdır. Eğer yanma mükemmel değilse, tüm H_a ısı miktarı açığa çıkmaz ve böylece duman gazlarındaki birim hacimdeki ısı miktarı H_a/V_{rt} değerine ulaşamaz.

Birim hacimdeki ısı miktarı, elbetteki C_{pm}.t_{vt} (kJ/Nm³) olarak belirtilebilir. Burada, C_{pm}.0⁰C'den teorik yanma sıcaklığı t_{vt}(0⁰C)'ye kadar sıcaklık sahasında, **sabit basınçta ortalama özgül ısıdır.**

Buradan $\frac{H_a}{V_{rt}} = c_{pm} \cdot t_{vt}$ yazılabilir ve böylece, teorik yanma sıcaklığı:

$$t_{vt} = \frac{H_a}{v_{rt} \cdot c_{pm}} \quad (0^{\circ}C) \text{ olur.}$$

Teorik yanma sıcaklığı t_{vt}, en basit olarak grafikte belirlenebilir. Belirlemede, duman gazlarının birim hacmindeki ısı miktarı değil, aksine, 1 kg yada 1 Nm³ yakıttan elde edilen toplam duman gazı miktarı V_{rt}Nm³ değeri esas alınır. t_{vt}'ye göre diğer sıcaklıklar için de bu ısı miktarı belirlenebilir. Genel olarak, I = v_{rt} . c_{pm} . t (kj) değeri 1 kg yada 1 Nm³ yakıtın duman gazının ısı miktarıdır.

Belirli bir yakıt için t'ye bağımlı I değerlerinin grafik olarak gösterilmesine, I-t diyagramı adı verilir. Bu diyagram, çoğu fırın hesaplamalarında ve ayrıca yanma sıcaklığının belirlenmesinde rahatlıkla kullanılabilir.

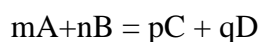
Belirli bir yakıt için I-t diyagramının çizilmesi amacıyla, önce V_{rt} değeri, teorik yanmada ($n=1$) duman gazı için hesaplanır. Sonra, 200, 400, 600, ... °C sıcaklıkları için I değeri, C_{pm} değerleri tablo 5.3 ve 5.4'den alınarak hesaplanır. I'nın bu değerleri ordinat ve t değerleri apsiste gösterilecek şekilde taşınır. Daha sonra, hava sayısı $n=2$ olduğuna göre, t'nin değişik değerleri için de I hesaplanır. Burada, $n=1$ için hesaplanan I değerleri ve fazla havadaki ısı miktarı göz önünde tutularak hesaplama yapılır, n'nin diğer değerleri için de I hesaplanır ve I diyagramına çizgi olarak işaretlenir. Yatay bir çizgi olarak da, söz konusu yakıtın H_a değeri, $I = H_a$ olarak çizilir. Bu çizilen I hattı, kesiştiği hava sayısı ile yanmada teorik yanma sıcaklığını verir.

Yanma esnasında ısının radyasyonundan dolayı, gerçek yanma sıcaklığı bu değerlerin %80'i kadardır. Yakıt ve hava, ne kadar iyi karışırsa, yanma o kadar çabuk olur. Böylece, yanma esnasında radyasyonla yayılan ısı miktarı da azalır ve yanma sıcaklığı daha yüksek olur.

Tablo 5.3, değişik gaz konsantrasyonlarında H_2 , CO ve CH_4 için ölçülen gerçek yanma sıcaklıklarını göstermektedir. Buradan da, oksijen ile yanma sıcaklığı, havaya nazaran önemli ölçüde yüksektir. Dikkati çeken bir nokta da, en yüksek yanma sıcaklığının stoklometrik karışımda olmadığı, aksine oksijenin eksik olduğu durumda görüldüğüdür. Bundan dolayı, kullanılabilir yanmalı motorlar eksik oksijenli çalıştırılırlar, böylece mükemmel olmayan yanma ve atmosferin CO ile zehirlenmesi meydana gelir.

Teorik yanma sıcaklığının belirlenmesinde, 1500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda duman gazındaki CO_2 'nin CO ve O_2 keza H_2O , H_2 ve O_2 ile H_2 ve OH olarak parçalandığının, unutulmaması gerekir. Bu dissosiasyon ile sıcaklık hesaplanan I-t diyagramında verilen değerlere göre daha düşük olur.

Dissosiasyon kavramı, şu düşüncüyü akla getirir: m molekül A yakıtı, ne molekül Be oksijeniyle birleşerek, p ve q molekül C ve D yanma ürünlerini meydana getirir. Buna göre:



Yanma gazı	Oksijen ile yanmada			Hava ile yanmada		
	Sıcaklık °C	Gaz konsantrasyonunda %	Stoklometrik konst. %	Sıcaklık °C	Gaz konsantrasyonunda %	Stoklometrik konst. %
Hidrojen	2487	67	66,6	2045	31,6	29,6
	2527	73				
	2660	78				
	2427	82				
Karbon monoksit	1650	20	66,6	1650	20	29,6
	2400	30		1930	25	
	2680	40		2100	32	
	2905	60		2000	37	
	2925	70		1850	45	
	2805	80				
Metan	2737	33,3	33,3	1875	10	9,45

Tablo 5.3. Gerçek yanma sıcaklıkları

Reaksiyon hızı $v_t = k_t |A|^m \cdot |B|^n$ 'dir. Burada k_t hız sabiti sıcaklığa bağlıdır ve $|A|$ ve $|B|$, A ve B maddelerinin molar konsantrasyonlarıdır.

Fakat yükselen sıcaklıkla birlikte, daima daha çok artan geriye dönen reaksiyonlar meydana gelir ve nihai maddelerden tekrar yanma ürünleri teşekkül eder. Bu olay, dissosyasyon olarak adlandırılır.

Yeniden teşekkül hızı $v_2 = k |C|^p \cdot |D|^q$ olur.

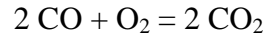
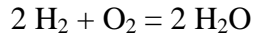
Yükselen sıcaklıkta, v_2 artar, v_t azalır. Her sıcaklıkta bir denge mevcuttur ve bu esnada

$v_1 = v_2 = k_1 \cdot |A|^m \cdot |B|^n = k_2 \cdot |C|^p \cdot |D|^q$ olur.

Denge sabiti $K = k_2 / k_1 = (|A|^m \cdot |B|^n) / (|C|^p \cdot |D|^q)$ her sıcaklık için değişiktir ve yükselen sıcaklıkla artar. Genellikle, reaksiyona iştirak edenlerin kısmi basıncı alınarak, denge sabiti şöyle belirtilebilir:

$$K_p = \frac{pA^m \cdot pB^n}{pC^p \cdot pD^q}$$

O halde, hidrojen ve karbonmonoksidin yanma olayları şöyle yazılabilir:



$$K_{p\text{H}_2\text{O}} = \frac{p^2\text{H}_2 \cdot p^2\text{H}_2}{p^2\text{H}_2\text{O}}$$

$$K_{p\text{CO}_2} = \frac{p^2\text{CO} \cdot p\text{O}_2}{p^2\text{CO}_2}$$

Yanmada yeniden olan reaksiyonda, yanma ısısının bir kısmı buna harcanır ve denge halinde sıcaklığın yükselmesi en uygun ısı bağlayıcı reaksiyonla kayması genellikle geçerli olduğundan, yüksek sıcaklıklardaki dissosiasyon, düşük sıcaklıklara nazaran daha yüksektir ve düşük sıcaklıkta olan durum genellikle ihmal edilir.

t ⁰ C	N ₂	H ₂ O	CO ₂	Hava
0	1,298	1,486	1,616	1,302
200	1,302	1,516	1,796	1,310
400	1,319	1,557	1,943	1,331
600	1,344	1,608	2,056	1,356
800	1,369	1,658	2,144	1,382
1000	1,394	1,712	2,219	1,407
1200	1,415	1,763	2,273	1,428
1400	1,436	1,809	2,315	1,449
1600	1,453	1,855	2,357	1,465
1800	1,469	1,897	2,395	1,482
2000	1,482	1,934	2,424	1,465

Tablo 5.4. Sabit basınçta kJ/Nm⁰C olarak ortalama özgül ısılar

t ⁰ C	Katı yakıt	Akaryakıt	Jeneratör gazı	Kok fırın gazı	Baca gazı
200	1,411	1,407	1,411	1,394	1,432
400	1,453	1,444	1,453	1,428	1,478
600	1,495	1,474	1,495	1,465	1,520
800	1,528	1,516	1,528	1,499	1,561
1000	1,561	1,549	1,561	1,536	1,599
1200	1,595	1,587	1,595	1,566	1,633
1400	1,624	1,616	1,624	1,599	1,662
1600	1,649	1,633	1,649	1,624	1,687
1800	1,679	1,654	1,679	1,641	1,717
2000	1,691	1,675	1,691	1,662	1,725

Tablo 5.5. Yakıtların duman gazlarının kJ/Nm⁰C olarak sabit basınçta ortalama özgül ısıları

Eğer yakma havası, yakıtın kendi yada her ikisi ön ısıtılırsa, aynı miktardaki duman gazında yanma sıcaklığı yükseleceğinden, duman gazlarının ısı miktarı da yüksektir. Yüksek sıcaklıkların gerekli olduğu bazı endüstri fırınlarında (Örneğin Siemens-Martin) yalnızca, ön ısıtma ile gerekli olan sıcaklığa çıkılabilir, diğer koşullarda gerekli sıcaklığa ve ekonomik çalışmaya ulaşmak olanaksızdır. Yakıttaki hidrokarbonların ısıtılması büyük bir yarar sağlamadığından, çoğu zaman yalnızca yanma havasında ön ısıtma yapılır. Yakıtın ön ısıtılmasının hesaba katılması için, ön ısıtılan yakıtın ısı miktarı I_B 'nin, ısı değeri H_a 'ya ilave edilmesi gerekir. Örnek olarak, n=1,2 hava sayılı akaryakıt için, ön ısıtma sıcaklığı $t_1 = 300^0C$ ve yanma sıcaklığı $t_{vt} = 2000^0C$ 'dir. Bu esnada duman gazlarındaki ısı miktarı $I = 46000$ kJ/kg yakıt olur. Hava ön ısıtması olmadığında $t_{vt}=1800^0C$ 'dir.

n=15 ile yanan 1 kg taş kömürünün duman gazları, örneğin 500^0C 'ye soğutulursa, yanmada $I=29300$ kJ/kg yakıt ve $t_{vt} = 1620^0C$ olduğundan 500^0C 'de $I_{500} = 8370$ kJ/kg yakıt ve duman gazları $29300-8370 = 20930$ kJ/kg yakıt verirler. Duman gazları bu sıcaklıkta fırını terk ederse, baca kaybı $I_{500} = 8370$ kJ/kg yakıttır. Baca kaybı, her kg yakıt için değil de, her Nm³ duman gazı için bilinmek istenirse, $I_{500}/V_{rt} = 8370/8,3 = 1008,4$ kJ/Nm³ bulunur.

Çeliklerin ısı işleminde kullanılan endüstri fırınlarında kısmen tufallaşma olabilir ve tufal hesaplanırsa, her kg tufal için $0,227.4,76 = 1,08$ Nm³ hava gerekir ve 5650 kJ/kg yanmış çelik, meydana gelir. Yanma hesaplarında ve duman gazlarının kontrolünde, keza bunun da göz önünde tutulması gerekir.

5.2. Fırında Isının Yayılması ve Isı İhtiyacı

Endüstri fırınlarında enerji temini, elektrikten fiziksel enerji olarak yada yanma sonucu kimyasal enerji olarak sağlanabilmektedir. Elektrikten enerji sağlama, direnç malzemelerle, arkla, indüksiyonla yada diğer özel yöntemlerle olabilir. Yakıtle ısıtılan fırında ise, kimyasal enerji ısı enerjisine dönüşür, sıcak gazlar tarafından yüklenir, direkt yada indirekt olarak, ısıtılacak maddeye **faydalı ısı** olarak taşınır. Isının bir kısmından faydalı enerji olarak yararlanılırken, bir kısmı da yararlanılmaksızın dışarı gider.

Gaz sıcaklığı, gazlar fırını terk ederken, ısıtılan madde sıcaklığından daha az olmaması gerekir. Dolayısıyla, çevre sıcaklığından çok yüksek olan sıcaklıkta, gazların fırından dışarıya atılması söz konusudur. Bu baca gazlarının taşıdıkları enerji miktarı kayıp olmaktadır. Elektrikle ısıtmada baca kaybı yoktur, ancak her iki enerji temin yönteminde de, tamamen önlenemeyen diğer ısı kayıpları vardır.

5.2.1. Isı bilançosu

Fırında yakıtın yanmasıyla yada elektrikten elde edilen ısının bir kısmı **faydalı ısı** olmak üzere kullanılmaktadır. **Verilen ısı**'dan geriye kalan kayıp ısılar, **ısı bilançosu** içerisinde değerlendirilir.

Yakıtta mevcut olan ısı, yanma ile tam (mükemmel yanma) yada kısmi (mükemmel olmayan yanma) olarak serbest hale geçer ve enerji halinde fırına verilir. Bu enerji, gazlarla taşınır ve bir kısmı bacadan dışarı atılırken, bir kısmı da fırın içerisinde kalır. Isıda yok olma söz konusu olmadığına göre, dışarı kaçan ve fırında kalan ısı miktarlarının toplamı, fırına verilen ısıya eşittir.

$$Q_v = \text{Verilen ısı}$$

$$Q_0 = \text{Aralıklardan kaçan ısı kaybı}$$

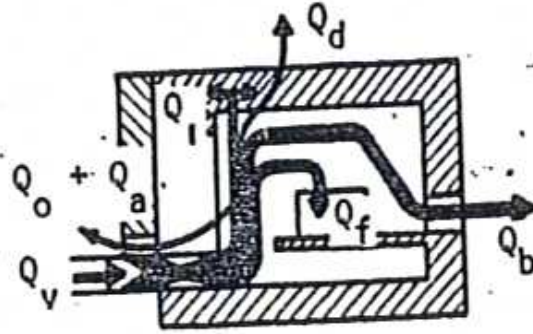
$$Q_a = \text{Kapak açma-kapamada kaçan ısı kaybı}$$

$$Q_b = \text{Baca kaybı}$$

$$Q_d = \text{Duvar kaybı}$$

$$Q_t = \text{Isınma ısı kaybı}$$

$$Q_f = \text{Faydalı ısı}$$



Şekil 5.1. Şematik olarak, endüstri fırınında ısı akış durumu

Şekil 5.1’de, fırına verilen ve diğer ısılar, basit halde şematik olarak görülmektedir. Yakma sisteminde mükemmel yanma ile Q_v ısı miktarı serbest hale gelir ve sıcak gazlar tarafından alınır. Bu gaz akımının, bir kısmı, tam kapanmayan kapağın aralığından ve gözlem deliğinden dışarı kaçar. Böylece, Q_0 **aralık kaybı** meydana gelir. Kapaktan kaybolan diğer bir ısı da kapağın açılıp kapanmasında gaz kaçması ve radyasyon ısısı olarak, Q_a **açma-kapama kaybı** değerindedir. Fırının ilk ısıtılmasında, refrakter malzeme ve diğer yapı elemanlarının ısınması için harcanan ısı da kayıptır ve Q_1 **ısınma ısısı** olarak hesaplanabilir. Bir kısım ısı ise, fırın cidarlarından dışarı kaçar. Bu ısı da, Q_d **duvar kaybı**’dır. Gazlardaki ısı miktarının yalnızca bir kısmı, fırın içerisinde ısıtılan madde ve Q_f **faydalı ısı** olarak geçer. Sıcak gazların fırını terk edip bacaya gitmesinde, taşıdıkları ısı miktarı da, Q_b **baca kaybı**’dır. Buna göre, fırında ısı bilançosu:

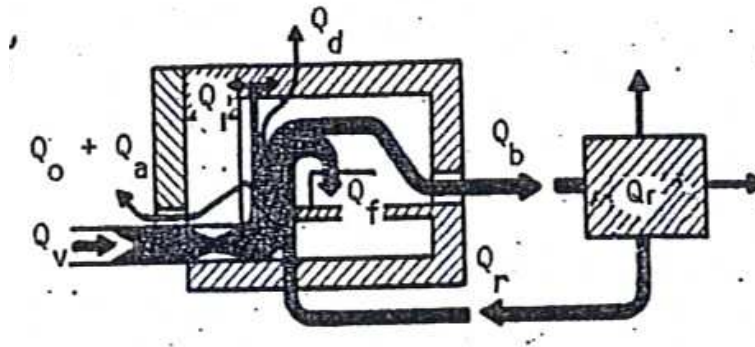
$$Q_v = Q_0 + Q_a + Q_b + Q_d + Q_1 + Q_f \quad (5.1)$$

Birçok durumlarda, yukarıda belirtilenlerin dışında da, ısının harcandığı yerler olabilir. Örneğin, sıcaktan tahrip olması istenmeyen kısımlarda su ile soğutma yapıldığında, ısı kaybı artar. Ayrıca, ısıtılan parça ile birlikte fırına konan araba, sepet ve benzeri kısımlarla, band ve diğer taşıma, paketleme düzenleri de ısı kaybına sebep olurlar. Isıtılan parçaların sıcak olarak fırından çıkarılmasında taşıdıkları ısı da göz önünde tutulmalıdır. Bu ısıların, ısı kaybı olarak hesaplanması gerekir.

Diğer taraftan, parçaların ısıtılmasında, fırın içerisinde ısı açığa çıkabilir. Örneğin, 1 kg çeliğin oksidasyonu ile 5650 kJ açığa çıkar. Bu ısı, fırın için gelir hanesine yazılabilir. Ancak, çelik verdiği pek az ısıya karşın, çok pahalı bir yakıt

olabileceğinden oksidasyonu istenmez, aksine tedbir alınması istenir. Buna karşılık, ergiyik çeliğin rafinasyonunda, bazı yabancı elementlerin (Mn, Si, P, S,...) oksidasyonu, rafinasyon için yeterli ısıyı sağlayabilir. İlave enerji gerekmez.

Bacadan çıkan gazlardaki ısı miktarı, bacaya bir ısıtma kazanı koymak suretiyle değerlendirilebilir. Böylece, sıcak su yada buhar elde etmek mümkündür. Fırın tesisi için en iyi yararlanma ise, yakma için kullanılan havanın, baca gazları ile ısıtılan reküperatör yada rejenaratörlerde ısıtılmasıdır. Şekil 5.2’de, fırında reküperatör kullanıldığında, baca gazlarından dışarıya atılan ısının bir kısmının tekrar kazanıldığı görülmektedir.



Şekil 5.2. Reküperatörlü fırında ısı akışı

Fırın ve reküperatöre, iki ayrı sistem olarak bakmak mümkündür. Reküperatörden sağlanan Q_r ısı, yakma havasıyla taşınarak Q_v ısısına yardımcı olur. Baca gazlarından gelen kayıp olarak ise, fırını terk eden gazların Q_b ısı alınır. Bu durumda ısı bilançosu:

$$Q_v = Q_r + Q_o + Q_a + Q_b + Q_d + Q_i + Q_f \quad (5.2)$$

Isı bilançosunun bu tarzda düzenlenmesinin yararı, reküperatörün fırın üzerkine etkisinin daha iyi görülebilmesi ve baca gazlarındaki ısının bir kısmının tekrar kazanıldığıının daha iyi belirtilebilmesidir. (5.1) ve (5.2) formüllerinin karşılaştırılmasında, aynı gaye için öngörülen eşit kapasiteli fırınlarda, aynı Q_f faydalı ısı için, reküperatörlü sistemde daha az yakıt gerektiği görülür.

Isı bilançosunun düzenlenmesinde dikkat edilecek nokta, ısı miktarlarının tam belirlenmesi gerektiğidir. Verilen ısı Q_v , yakılan yakıttan bir saatte elde edilen ısıdır ve kayıplar da, bir saat için göz önünde tutulur.

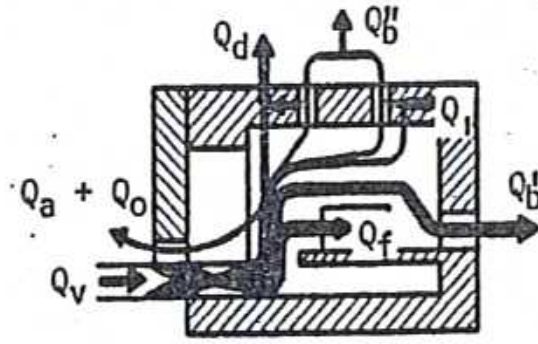
Eğer, fırındaki açıklıklardan kaçan duman gazlarının sıcaklığı, baca gazları ile aynı ise, bu durumda Q_0 aralık kaybını hesaplamaya gerek yoktur. Çünkü, aynı sıcaklıkta tek baca kanalından yada çok sayıdaki delikten dışarıya atılan gazların, birim hacmindeki ısı miktarı aynıdır. Böyle durumlarda saatte yakıttan elde edilen baca gazlar hacminin toplam ısı miktarı, Q_0 , kaybını da içine alacak şekilde, baca kaybı olarak alınır.

Eğer, hatalı aralıklardan dışarıya kaçan duman gazlarının sıcaklığı, baca gazlarına nazaran yüksekse, bu durumda Q_0 aralık kaybının tam hesaplanması gerekir. Bu durum, özellikle yakıcı yakınlarında aralıklar olması halinde, daha da önemlidir.

İç reküperatörlü fırınlarda, duman gazları kısmen, hatta bazı hallerde tamamen, baca kanalı yerine, fırın duvarlarına yapılmış poröz yada kapilar kanallardan ve sıcaklığı baca gazlarına nazaran daha düşük olacak şekilde olarak dışarı çıkar. Bu durum, şekil 5.3'de, baca gazlarının, baca kanalının dışında, ayrıca tavanda bulunan iki delikten dışarı çıkışı şeklinde gösterilmiştir. Bu gazlar, tavandan geçerken kısmen yada tamamen soğur ve bu esnada tavanı ısıtarak, Q_d duvar kaybı ve Q_1 ısınma kaybını azaltıcı etki yaparlar. Bu durumda bacadan Q_b baca kaybı yerine Q_b' gibi daha az kayıp olacak, ancak iç reküperatörden kaçan ısı da Q_b'' olacaktır. Bu durmad ısı bilançosu:

$$Q_v = Q_0 + Q_a + Q_1 + Q_d + Q_r + Q_b' + Q_b'' \quad (5.3)$$

Duman gazlarının gaz geçiren duvarlardan dışarı geçebilmesi için, bir basınç fazlalığı gerekeceğinden, fırın içerisindeki basınç daha yüksektir. Bu durumda, fırın kapakları çok iyi kapatılmalı ve arzu edilmeyen ilave deliklerden sızma önlenmelidir. Tam sızdırmazlık sağlanırsa, $Q_0 = 0$ ve $Q_a = 0$ olur. Tüm duman gazları, duman geçiren duvarlardan dışarıya atılırsa, $Q_b' = 0$ olacaktır.



Şekil 5.3. İç reküperatörlü fırında ısı akışı

5.2.2. Verim

Termodinamiğin ikinci temel kanunu, ısıl verim ve fırın verimi ile ilgili temel esasları vermektedir. Buna göre, yüksek sıcaklıktaki bir cismin ısısı, yalnızca düşük sıcaklıktaki bir cisme geçebilir ve yüksek sıcaklıktaki ısı, düşük sıcaklıktakinden daha değerlidir.

Fırına herhangi bir yolla verilen ısının bir kısmı, baca ve aralıklardan çıkan gazlarla dışarı atılır. Bir kısmı ise, fırın içerisinde duvarlardan kaybolur, duvarların ısınmasına harcanır yada kapak açma-kapamada kaybolur. Verilen ısının geriye kalan pek az bir kısmı ise, ısıtılacak maddenin ısınmasını sağlar. Bu durumlara göre, fırında ısıl verim, fırının kalite derecesi ve fırın verimi değerleri hesaplanabilir.

5.2.2.1. Isıl verim

Fırına verilen ısının bir kısmı, baca kanalıyla yada aralıklardan dışarı atılmaktadır. Fırına verilen ısı ile, baca ve aralıklardan dışarı atılan ısı miktarları toplamalarının farkının, verilen ısıya oranı **ısıl verim** η_1 verir. Çok iyi sızdırmazlık sağlandığında, aralık kaybı Q_0 sıfır olabilir. Fırın kimyasal enerji ile ısıtılırsa, ısının bir kısmının, baca gazları ile dışarı atılması zorunludur. Elektrikle ısıtma yapıldığında, baca kaybı yoktur. Yukarıda yapılan tarife göre, ısıl verim η_1 , fırına verilen Q_v ısının, ne kadar kısmının fırında kullanıldığını belirtmektedir. Fırında zorunlu olarak kullanılan ısı, $Q_a + Q_d + Q_f + Q_1$ değerindedir. Fırın dışına atılan ısı ise, $Q_0 + Q_b'$ dir.

Buna göre ısı verim:

$$\text{Rekuperatörsüz fırında: } \eta_1 = (Q_v - Q_o - Q_b) / Q_v \quad (5.4)$$

$$\text{Rekuperatörlü fırında: } \eta_1 = (Q_v + Q_r - Q_o - Q_b) / Q_v \quad (5.5)$$

$$\text{İç rekuperatörlü fırında: } \eta_1 = (Q_v - Q_o - Q_b - Q_b) / Q_v \quad (5.6)$$

Isıl verim daha basit olarak hesaplanmak istenirse, yukarıdaki formüllerde ısı miktarları 1 Nm^3 gaz için hesaplanabilir. Bu durumda, verilen ısı Q_v yerine, 1 Nm^3 gaz için 1 , alınabilir. Buna göre yakıtın yanmasıyla 1 Nm^3 gazdaki ısı değeri $1_1 = H_a / v_r$ olur. Ayrıca rekuperatör kullanıldığında, rekuperatörden elde edilen ısı Q_r yerine de, 1 Nm^3 gaz için 1_r değeri alınabilir.

Diğer taraftan, fırında kullanılmaksızın dışarı giden toplam gaz miktarının x kadar bir kısmının, kapı aralığı, ateşleme ve gözlem deliklerinden kaçtığı kabul edilirse, Q_0 değeri yerine 1 Nm^3 gaz için 1_0 alınabilir. Aralıktan kaçan gaz oranı x olduğuna göre, bacaya atılan gaz oranı ise $(1-x)$ olacaktır. Bacaya atılan 1 Nm^3 gazdaki ısı miktarı da, $(1-x)_2$ olur.

Duman gazları fırını gaz geçiren duvarlardan da terk ederse ve bu gazların miktarı, tüm çıkan gazları y miktarı kadarsa, Q_0 yerine $(1-x-y)_2$ alınabilir. Burada 1_2 , baca kanalından çıkan bu sıcaklıktaki 1 Nm^3 gazdaki ısı miktarıdır. Bu durumda Q_b için $y \cdot 1_2$ yazılır ve 1_2 , fırın duvarlarındaki kapılar kanallardan geçen 1 Nm^3 gazın, bu sıcaklıktaki ısı miktarıdır.

Şekil 5.4 ve 5.5 ile tablo 6.6, en basit durum için (5.4) formülüne göre ve $Q_0 = 0$ olduğunda, ısı verim η_1 vermektedir.

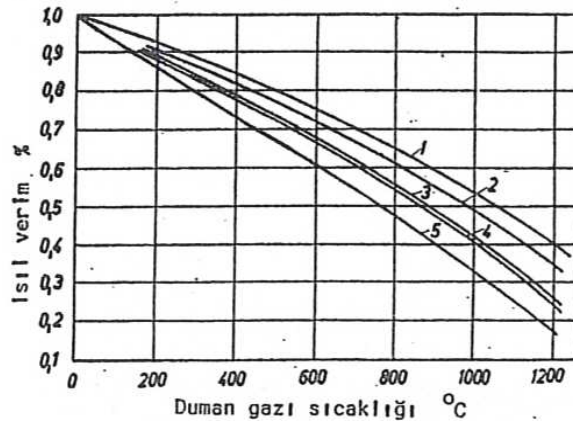
1 = Havagazı, sıcak jeneratör gazı $n=1,1$

2 = Akaryakıt $n=1,4$

3=Soğuk jeneratör gazı $n=1,2$

4=Taş kömürü $n=1,6$

5=Linyit briketi



Şekil 5.4. (5.4) formülüne göre ve $Q_0 = 0$ olduğunda ısı verim

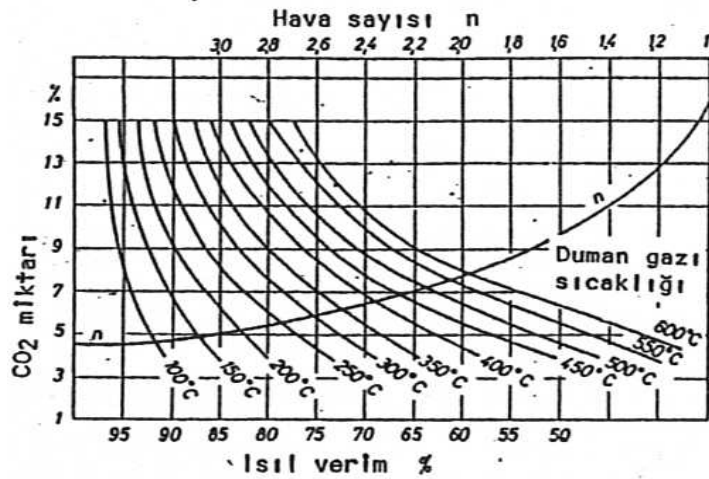
Bu bilgilere göre ısı verim:

Duman gazlarının bacadan ve kapı açıklığından çıktığı normal fırında:

$$\eta_1 = 1 - \frac{(1-x)i_2}{i_1} - \frac{xi_0}{i_1} \quad (5.7)$$

Tam sızdırmazlık sağlanır ve tüm gazlar bacadan çıkarsa:

$$\eta_1 = 1 - \frac{i_2}{i_1} \quad (5.8)$$



Şekil 5.5. (5.4) formülüne göre ve $Q_0 = 0$ olduğunda ısı verim

Rekuperatörlü fırında:

$$\eta_1 = 1 + \frac{i_r}{i_1} - \frac{(1-x)i_2}{i_1} - \frac{xi_0}{i_1} \quad (5.9)$$

Açıklıklar tam kapatılır ve tüm duman gazları bacadan çıkarsa:

$$\eta_1 = 1 + \frac{i_r}{i_1} - \frac{xi_2}{i_1} \quad (5.10)$$

İç rekuperatörlü fırında:

$$\eta_1 = 1 - \frac{(1-x-y)i_2}{i_1} - \frac{yi_2}{i_1} - \frac{xi_0}{i_1} \quad (5.11)$$

Açıklıklar tam kapatılır ve tüm duman gazları baca kanalından ve duvar kapılar kanallarından dışarı çıkarsa:

$$\eta_1 = 1 - \frac{(1-y)i_2}{i_1} - \frac{yi_2}{i_1} \quad (5.12)$$

Açıklıklar yok edilmeksizin baca kanalı kapatılır ve tüm gazlar, açıklıklardan ve duvar kapılar kanallarından geçerse:

$$\eta_1 = 1 - \frac{(1-x)i_2}{i_1} - \frac{xi_0}{i_1} \quad (5.13)$$

Tüm açıklıklar ve baca kapatılır, tüm gazlar duvar kapılar kanallarından geçerse:

$$\eta_1 = 1 - \frac{i_2}{i_1} \quad (5.14)$$

Baca gazı sıcaklığı t C	Hava sayısı n=						
	1,00	1,05	1,10	1,15	1,2	1,25	1,3
100	95,9	95,8	95,6	95,4	95,2	95,1	94,9
200	91,8	91,4	91,1	90,7	90,4	90,0	89,7
300	87,6	87,0	86,5	86,0	85,4	84,9	84,4
400	83,2	82,5	81,8	81,1	80,4	79,7	78,9
500	78,7	77,8	6,9	76,0	75,2	74,3	73,3
600	74,2	73,1	72,0	70,9	69,8	68,8	67,6
700	69,4	68,1	66,9	65,7	64,3	63,0	61,8
800	64,7	63,2	61,7	60,2	58,7	57,3	55,8
900	59,8	58,1	56,4	54,7	53,1	51,4	49,7
1000	54,8	52,9	51,0	49,1	47,3	45,4	43,5
1100	49,8	47,7	45,5	43,4	41,3	39,3	37,2
1200	44,6	42,3	39,9	37,8	35,5	33,2	30,9
1300	39,5	37,0	34,4	32,1	29,5	27,0	24,5
1400	34,2	31,4	28,8	24,0	23,3	20,6	17,9
1500	28,9	25,9	23,1	20,1	17,2	14,2	11,3

Tablo 5.6. % olarak Metan için ısı verim η_1 değerleri *)

Değerler, (5.4) formülüne göre ve $Q_0 = 0$ olduğuna göredir.

Hesaplamlarda çoğu zaman, tüm duman gazlarının baca kanalından ve eşit sıcaklıkta çıktığı kabul edilerek **baca kaybı** hesaplanır. Ancak, yukarıda da görüldüğü gibi, gazlar fırını değişik yerlerden ve değişik sıcaklıklarda terk edebilmektedir. Isıl verimin iyileştirilmesi düşünüldüğünde, tüm olasılıklarının göz önünde tutulması, değişik koşulların sonucu önemli miktarda etkilenmesinden dolayı çok önemlidir.

Eşit hava sayılarındaki yanma sıcaklıkları, değişik yakıtlar için büyük farklar göstermektedir. Bunun sonucunda, yanmada diğer koşullar aynı kaldığında da, ısı verim farklı olabilmektedir. Bu durum, belirli amaç için ve belirli fırın tipleri için, değişik yakıtların kullanılmasında, yakıt maliyetlerinin karşılaştırılması açısından önemlidir. Çoğu zaman, alt ısı değeri ve kalori fiatı esas alınarak, diğer koşullar hesaba katılmaksızın, hatalar yapılır. Müteakip örnekte açıklandığı gibi, ekonomiklik daha iyi değerlendirilmelidir.

Pratikte çoğu zaman, ısı verim η_1 'nın hesaplanmasında, **hatalı hava**'nın fırın hacmine girişi yanlış olarak değerlendirilir. Hatalı hava olarak tanımlanan bu soğuk hava, çevreye nazaran daha düşük basınçta olan fırın hacmine girer, duman gazlarını inceltir ve sıcaklığını düşürür. Bu durumda, fırını terk eden baca gazı miktarı, yanma

hesaplarında bulunan değerden daha büyük olacaktır. Fırın işletilmesinde, hatalı havanın fırına girmesiyle, ısıl verimin daha yüksek hesaplandığı ve ısı ihtiyacının daha iyi görüldüğü, genellikle yanlıtır. Baca kanalından yalnızca, yanma sonucu teşekkül etmiş duman gazları değil, hatalı havanın girmesiyle daha fazla miktarda baca gazı çıkar. Hatalı hava, duman gazları tarafından ısıtılarak bacadan çıktığından, çok büyük miktarda ısı kaybı olur. Isıl verimin kontrolünde, baca gazlarının içindeki CO₂ miktarı ölçülür. Hatalı hava girdiğinden CO₂ miktarı, baca gazlarının incelenmesi nedeniyle daha düşük çıkar. Yanmanın en düşük hava sayısı ile yapılması ve hatalı havanın girmesinin engellenmesiyle, daha iyi ısıl verim değerlerine ulaşılabilir. Bunun için, çok iyi ölçme ve ayarlama sistemleri kullanılması yararlı olur. Hatalı havanın, ısıl verimi ne ölçüde etkilediği, şu örnekle açıklanabilir. Isıl verim; genel durum olarak duman gazlarının fırına girişi ve terk edişi ile ilgilidir. Bu değer, duman gazlarının sıcaklığı fırına girişte yüksek, çıkışında düşük olduğundan, yüksek olur. Endüstri fırınında da en yüksek sıcaklığı kullanmak, daha yararlıdır. Bunun için yanma olayı, teorik hava miktarıyla ya da mümkün olan en düşük hava sayısı ile gerçekleştirilmelidir. Eğer fırının tesis masrafı müsaade ederse, yanma havasının reküperatör ya da rejenaratörde ısıtılması ve ayrıca, yakıt tarzi imkan veriyorsa, yakıtın ön ısıtılması, büyük yarar sağlar.

Bir fırın prosesinde en düşük sıcaklık olarak, çevre sıcaklığı düşünülür. Fakat, ısıtılan parçaların sıcaklığı çevre sıcaklığından daha yüksek olması gerekli olduğundan, baca gazlarının sıcaklığı, fırın içerisinde çevre sıcaklığına kadar düşürülemez. Sıvı banyolarında ve kazanlarda özel durum olarak, baca gazları sıvıya sevk edilerek, baca gazları sıvı sıcaklığına kadar soğutulabilir. Sıvıyla soğutma meydana gelirken, yanmadaki su buharı çığ noktası altına da düşülebilir ve böylece, yakıtın alt ısıl değerine göre beklenilenden daha yüksek ısı elde edilebilir. Fakat endüstri fırınlarında, duman gazlarının tesis içerisindeki soğuk parçalara temas ederek, yoğunlaşma yapmamasına ve bunun sonucu korozif etki meydana gelmemesine özellikle dikkat edilir.

5.2.2.2. Fırın kalite derecesi

Fırında malzemenin ısıtılmasında kullanılan faydalı ısının, fırın içerisinde harcanan diğer ısıların toplanma oranı, **fırın kalite derecesi** η_0 'ı verir. Fırın içerisinde

harcanan ısı, fırına verilen toplam ısıdan, baca gazlarıyla dışarı atılan ve aralıklardan dışarı sızan ısıların çıkarılmasıyla, geriye kalan ısıdır. Bu ısının bir kısmı malzemenin ısınması için harcanırken, bir kısmı da duvar kaybı, kapak açma-kapama ve fırın yapı malzemelerinin ısınmasında harcanır.

Faydalı ısı değeri Q_r . G ağırlığındaki malzemenin, işlem sıcaklığında ulaştığı ısıdır. Malzemenin 1 kg'ının aldığı ısı q değeri, kJ/kg olarak, en basit şekilde yükseltilecek sıcaklık miktarı ile ısıtılan malzemenin ortalama özgül ısılarının çarpımlarıyla bulunabilir. Bunun için, fırında uygulanan prosesin türüne göre (ergitme, redüksiyon, buharlaştırma, aşırı ısıtma ve ısıtma) belirlenir. Ancak, oksidasyon yada diğer ısı veren reaksiyonlar olduğunda, bu tarzda elde edilen ısı da gerektiğinde göz önünde tutulmalıdır.

Fırında harcanan toplam ısı ise, yakıttan sağlanan ısıdan, baca ve aralıklardan fırın dışına atılan ısının çıkarılmasıyla bulunacağına göre, değeri basit fırında birim yakıt miktarı için $v_r (f_1 - i_2)$ (kJ/kg yakıt veya kJ/Nm³ yakıt) olarak hesaplanabilir. B (kg veya Nm³) miktar yakıt kullanıldığında, fırında harcanan toplam ısı miktarı $B \cdot v_r (i_1 - i_2)$ (kJ) olacaktır.

Bu duruma göre, fırın kalite derecesi :

$$\eta_0 = \frac{G \cdot q}{B \cdot v_r \cdot (i_1 - i_2)} \quad (5.15)$$

Buradaki i_1 , yanmanın hemen ardından 1 Nm³ duman gazlarının ısı miktarı ve i_2 , fırın hacmini terk eden baca gazlarının 1 Nm³'ünün ihtiva ettiği ısı miktarıdır. (5.15) formülü, reküperatörü olmayan ve tüm baca gazlarının fırını terk ettiği, basit tip fırınlar içindir. Diğer alternatiflere göre de, ısı verim hesaplanabilir:

Tüm baca gazlarının fırını eşit sıcaklıkta terk ettiği reküperatörlü fırında, fırın hacminde kullanılan ısı miktarı $B \cdot v_r (i_r + i_r - i_2)$ 'dir. Buna göre, fırın kalite derecesi:

$$\eta_0 = \frac{G \cdot q}{B \cdot v_r \cdot (i_r + i_r - i_2)} \quad (5.16)$$

Fırında, tüm gazların fırını eşit sıcaklıkta terk ettiği iç reküperatör varsa, fırının gaz geçiren duvarlarından geçen i_2 ısı miktarı hesaplanır. Bu durumda, fırın kalite derecesi:

$$\eta_0 = \frac{G \cdot q}{B \cdot v_r \cdot (i_1 - i_2)} \quad (5.17)$$

Malzeme		C özgül ısı kJ/(kg.K) t O°C'ye göre ihtiva ettikleri ısı miktarı kJ/kg				Ergiyik		Ergiyik halde özgül ısı kJ/(kg-K)
		0°C	400°C	800°C	1200°C	Sıc °C	Isı kJ	
Arı demir	C	0,439	0,523	0,657	0,67	1536	281	0,795
	F	0	208,5	526,7	819,4			
Çelik 0.1C	F	0	211,9	569,4	854,1	1485	1340	
	F	0	0,98	577,8	862,4			
1.0C	F	0	0,98	577,8	862,4	1455	1340	
	F	0	0,98	577,8	862,4			
Alüminyum	C	0,867	392,7			659	398	1,088
	F	0	0,406					
Bakır	C	0,368	161,6	0,423		1083	205	0,494
	F	0	158,7	338,7				
Pirinç	F	0	0,519	363,0		650	168	0,376
Nikel	C	0,435	206,8	0,527	0,548	1453	302	0,657
	F	0	1,088	422,9	657,3			
Mağnezyum	C	0,134	435,4			650	377	
	F	0						
Kurşun	C	0,125				328	23	0,138
	F	0	0,419					
Çinko	C	0,394	167,4			419	113	0,482
	F	0						
Kalay	C	0,222				232	61	0,26
	F	0						

Tablo 5.7. Metal ve alaşımların özgül ısı ve ihtiva ettikleri ısı miktarları

Tuz Cinsi		c özgül ısı kJ/(kg.K) f 0°C'ye göre ihtiva ettikleri ısı miktarı			Ergiyik		Ergiyik halde özgül ısı kJ/(kg-K)
		0°C	400°C	800°C	Sıcaklık °C	Isı kJ	
NaCl	c	0,833	0,916	0,971	800	490	1,151
	f	0	366,3	778,7		1269	
kCl	c	0,682	0,716		770	343	0,9
	i	0	286,4			930	
KNO	c	0,963			306	116	1,223
	f	0				528	
NaNO	c	1,017			306	172	1,821
	f	0				653	
BaCl	c	0,368	0,385	0,401	960	109	
	f	0	155	322,4		494	

Tablo 5.8. Tuz banyolarında kullanılan tuzların özgül ısı ve ihtiva ettikleri ısı miktarları

q değerlerinin hesaplanmasında, yapılan işlemin çalışma prosesine uygun olarak, malzemenin özgül ağırlığı, değişik sıcaklıklarda ortalama özgül ısısı, ergime sıcaklığı ve ergime ısısı gibi karakteristik değerlerden yararlanılır. Tablo 5.7 metal malzemelerde ve tablo 5.8, tuz banyolarında, c özgül ısılarını ve buldukları sıcaklıklarda f ihtiva ettikleri ısıları vermektedir.

Eğer fırındaki şarj miktarı, yani birim zamanda fırına yüklenen ısıtılan madde miktarı az olursa, fırın kalite derecesi η_0 'de düşük çıkar. Bundan dolayı, fırının düşük şarj miktarlarıyla çalıştırılmaması gerekir. Ancak, ısıtılacak malzemelerin boyunun çok uzun olması nedeniyle fırının büyük seçilmesi zorunluluğu ve ayrıca sıcaklık dengelemesi için beklemlerin uzun olması hallerinde zorunlu olarak fırın kalite derecesi düşer.

Fırın kalite derecesi, büyük ölçüde ısı kayıplarına da bağlıdır. Konstrüktöre bağlı olan, duvar kayıpları, ısınma ısısı ve fırında uygulanan işleme bağlı olan hızlı yükleme, çabuk boşaltma, kapı ve aralıkların çok iyi kapatılması, fırın kalite derecesine etki eder.

Ayrıca, yanma seyirinin hızı da fırın kalite derecesini etkiler. Yanma hızının büyüklüğü, alev sıcaklığı ve malzemelerin fırın içerisindeki ısı transferiyle birlikte değerlendirilmesi gerekir.

5.2.2.3. Toplam verim

Fırındaki toplam verim η_t , ısı verim ve fırın kalite derecelerinin çarpımına eşittir. Buna göre:

$$\eta_t = \eta_1 \cdot \eta_0 \text{ yada;} \quad (5.18)$$

$$\eta_t = \frac{G \cdot q}{B \cdot v_r \cdot i_1} = \frac{G \cdot q}{B \cdot H_a} \quad (5.19)$$

Fırında toplam verim, diğer verimlere nazaran daha önemli karakteristiktir. Fırının geliştirilmesi ve gücünün artırılmasında, özellikle göz önünde tutulması gerekir. Yukarıdaki bağıntı, özellikle kimyasal enerji ile ısıtılan fırınlarda geçerlidir. Elektrik direnç ısıtmalı fırınlarda ise baca kaybı yoktur. Aralık kaybı da, tam sızdırmazlık sağlanırsa sıfır olur. Bu durumda, ısı verim 1 olacaktır ve fırın kalite derecesi de, toplam verime eşit olur.

Daima aynı işlem prosesini yapan, örneğin ergitme fırını, dövme fırını, hücre fırın, sertleştirme fırını gibi fırınlarda, q değeri bilinir ve işletme sürekli olarak denetlenir. Isıtılan madde miktarı, günlük ve haftalık olarak saptanarak, kullanılan yakıt miktarı göz önünde tutulur ve toplam verimin takibi yapılır. Bu arada, kullanılan yakıtın da alt ısı değeri H_a , laboratuarda sürekli olarak numuneler üzerinde saptanmalıdır. Bu tespitlerde, toplam verimde düşme görülmüşse, düşme sebebinin, şarj miktarlarından mı, yakıttan mı, yoksa fırının işletilmesindeki kapağın uzun süre açık kalması yada fırında aralıkların doğmasından mı, yada reküperatörün kirlenmesinde mi, olduğu araştırılır. Kontrol kabaca bakarak göz kontrolü olarak öncelikle yapılır, ancak kesin sonuca hassas ölçme cihazlarıyla ulaşılabilir.

5.2.2.4. Yakıt sarfiyatı

Fırının çalışma şartlarına bağlı olarak, fırına verilmesi gereken ısı miktarı hesaplanır. Toplam verimin de göz önünde tutulduğu bu hesaplamada, tüm kayıplar ve faydalı ısı, 1 saat için göz önünde tutulur. Yanmanın tam olduğu ve yakıcının sürekli faaliyette olması halinde, sarf edilecek yakıt miktarı, değişik çalışma koşullarına göre hesaplanabilir. Yanma için gerekli olan havanın eksik verilmesi, yada gerekli

olandan fazla (hatalı hava) verilmesi, formüllerde saptanan yakıt miktarından fazlasını kullanmayı gerektirir.

Fırın işlem sıcaklığına ulaştığında, bu sıcaklıkta uzun süre bekleme gerekirse, yakıcı kesintili çalıştırılabilir. Bu durumda, hesaplanan yakıt miktarı değişmez, yaklaşık olarak aynı kalır, ancak ayrıca, sıcaklık kontrol ve yakıt ayar ünitesine gerek vardır. Değişik çalışma koşullarına göre, gerekli yakıt miktarı şöyle hesaplanabilir:

1. Eğer fırında ısıtılacak parça yoksa ve fırın soğuk halden işlem sıcaklığına kadar ısıtılmak isteniyorsa, bu çalışma tarzına **boş çalışma** denir. Boş çalışmada $G = 0$ olacağından, gerek fırın kalitesi derecesi η_0 , gerekse toplam verim η_t sıfır olur. Verilen ısının bir kısmı baca ve aralıklardan çıkarken, bir kısmı da duvarların ısınmasında ısınma ısı olarak harcanır. Bu arada bir kısım ısı da, duvar kaybı olarak dışarı çıkar. Bu durumda, yakıtın alt ısı değeri H_a (kJ/kg veya kJ/Nm³) olduğuna göre, yakıt miktarı:

$$B = (Q_v/H_a) = (Q_o + Q_b + Q_d + Q_1)/H_a \text{ (kg/h) (Nm}^3\text{/h)} \quad (5.20)$$

2. Eğer fırın ısıtılacak parça doldurulduktan sonra, soğuk halden işlem sıcaklığına kadar ısıtılırsa, yakıt miktarı:

$$B = (Q_v/H_a) = (Q_o + Q_b + Q_d + Q_1 + Q_f)/H_a \text{ (kg/h) (Nm}^3\text{/h)} \quad (5.21)$$

Fırının ilk çalıştırılmasında, soğuk halden işlem sıcaklığına çıkılması genellikle, birkaç saat içerisinde gerçekleşir. Bu durumda, her bir saatte duvar kaybı ve ısınma ısı, duvar sıcaklığına bağlı olarak farklı olur. Bu nedenle, kesintili çalışma için duvar ve ısınma kayıpları, her bir saat için ayrı hesaplanır. Aynı durum, faydalı ısı için de geçerlidir. Ancak, uygulamalarda, yakıcıdan belirli miktar yakıt, sürekli olarak verilerek, fırının ısınma süresi buna bağlı olur.

3. İşlem sıcaklığına ulaşmış fırın içerisinde, işlem sıcaklığında bekleme söz konusu olduğunda, ısınma ısı sıfırdır ve duvar kaybı en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durumda yakıt miktarı:

$$B = (Q_v/H_a) = (Q_o + Q_b + Q_d + Q_f)/H_a \text{ (kg/h) (Nm}^3\text{/h)} \quad (5.22)$$

4. İtme ocaklarda olduğu gibi, sürekli ısıtma yapılıyorsa, yani soğuk parçalar fırının bir tarafından girip, diğer tarafından işlem sıcaklığında çıkıyorsa, yakıt miktarı:

$$B = (Q_v/H_a) = (Q_o + Q_b + Q_d + Q_a + Q_f)/H_a \text{ (kg/h) (Nm}^3\text{/h)} \quad (5.23)$$

İlk üç çalışma tarzında, yani fırının işlem sıcaklığına ısınması ve işlem sıcaklığında bekleme durumlarında, genellikle kapak kapalı tutulur. Dolayısıyla kapak açma-kapama kaybı Q_a burada düşünülmemiştir. Fırının belirli aralıklarla yüklenmesi yada boşaltılmasında ise bu kayıp oldukça önemli etki yapacağından, göz önünde tutulmalıdır. Diğer taraftan, yukarıdaki yakıt miktarı hesapları reküperatörsüz fırın için geçerlidir. Reküperatör bulunduğu her 4 halde de reküperatörden elde edilen Q_r ısı, yukarıda formüllerde, pay bölümünde negatif işaretli olarak alınmalıdır. İç reküperatör bulunması halinde de, baca kaybı ve iç reküperatör ısı birlikte değerlendirilmeli, kazanç ve kayıp tam olarak hesaba alınmalıdır.

5.2.2.5. Fırında gaz konsantrasyonu ve verim

Birçok ısıl proste, belirli bir fırın atmosferi arzu edilir. Örneğin, demir ve çeliğin dövme sıcaklığına ısıtılmasında, duman gazlarının mümkün olduğunca hiç serbest oksijen içermemesi yada pek az karbon monoksitli olması istenir. Buna karşılık, seramik endüstrisinde kurşun ihtiva eden sırn pişirilmesinde, renk veren kurşunoksidin redüklenmemesi için, duman gazlarının biraz oksidleyici olması gerekir. Pirinç malzemelerde, çekme işlemleri arasında yapılan rekristalizasyon tavlamasında, çinkonun buharlaşmasını engelleyecek oksid filmi temini için, hafif oksidleyici atmosfer tercih edilir.

Fırın prosesinde belirli bir fırın atmosferi zorunlu değilse, yanmanın havaya doymuş olarak yapılması gerekir. Çünkü, bu durumda ısı verim en yüksek değerdedir.

Hem, duman gazları içerisinde yanabilir maddelerin (genellikle redükleyici atmosfer olarak tanımlanır) ve hem de duman gazlarında hava fazlası olması (oksidleyici atmosfer olarak da tanımlanır) ısı verimi düşürürler. Bunun için, hava ve yakıt miktarları, sürekli olarak ölçülmeli ve ayarlanmalıdır.

Yakıt	Hava fazlalık sayısı n=						
	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	2.00
Taş kömürü H _a = 29300 kJ/kg	0.452	0.562	0.669	0.642	0.61	0.583	0.38
Jeneratör gazı H _a = 5650 kJ/Nm	0.404	0.48	0.569	0.544	0.52	0.498	0.34
Kok fırın gazı H _a = 16750 kJ/Nm	0.47	0.552	0.657	0.63	0.60	0.576	0.39

Tablo 5.9. Hava sayısı ve yakıta bağlı olarak ısı verim değerleri

Baca gazları sıcaklığı 800°C

Duman gazlarının fırını 800°C'de terk ettiği, fırınlarda değişik hava sayıları ve değişik yakıtlar için, ısı verim değerleri, tablo 5.9'da verilmiştir.

Yanma havası bir defada yada iki kademede verilebilir. Gaz ve akaryakıt yakıcılarında çok sık rastlanılan kademeli hava uygulamasında, ilk verilen havaya **birinci hava** ve daha sonra verilen havaya **ikinci hava** denmektedir. Birinci hava ile yanma başlatılır, duman gazları ısıtılan parçalara temas ederek ısıtır ve daha sonra ikinci hava verilebilir. Hatta, gerekli hava miktarı, parsiyel olarak fırının belirli yerlerinde verilebilir. Eksik hava ile başlayan yanma, duman gazları fırın içerisinde hareket ederken yeniden verilen havalarla devam ettirilir. Bu şekilde, özellikle boyu uzun olan fırınlarda homojen sıcaklık dağılımı daha kolay sağlanabilir. Ancak, böyle bir yakma sisteminde, fırında çok iyi kontrol ve ayar düzeninin bulunması zorunludur. Hatalı bir ayarlama yada yanmada kesinti olması halinde, fırın içerisinde birikim yapan yanabilir gazlar, tekrar taze hava verilmesiyle, sıcaklığın da yüksek olması sonucu patlama yapabilir. Havada ön ısıtma yapılması, bu tehlikeyi kısmen azaltır.

Yanma olayı tamamen sona erdikten sonra, eğer fırına hatalı hava girmiyorsa, duman gazlarının konsantrasyonu değişmeden kalır. Konsantrasyon, ancak yeni yakıt, yeni hava yada yeni karışımlar verilmek suretiyle değiştirilebilir.

5.3. Fırın İçerisinde Isı Transferi

5.3.1. Teorik esaslar

5.3.1.1. Konveksiyonla ısı transferi

Konveksiyonla ısı transferinde, sıvı yada gazlarının molekülleri yüzeye temas eder ve böylece ısı alışverişi meydana gelir. Bu durumda, daima yeni moleküller, yüzeye temas edecektir. Sıvı yada gazların hareketi ne kadar yüksekse, konveksiyonla ısı transferi o kadar fazla olur. Konveksiyonla ısı transferi, birimsiz sayılara bağlı olarak belirtilir.

$$\text{Nusselt sayısı} : \text{Nu} = \alpha \cdot d / \lambda$$

$$\text{Prandtl sayısı} : \text{Pr} = 3600 \gamma / \alpha = 3600 \eta \cdot c / \lambda$$

$$\text{Reynold sayısı: } \text{Re} = w \cdot d / \gamma = w \cdot d \cdot \rho / \eta$$

$$\text{Grashof sayısı: } \text{Gr} = d^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta t / \gamma^2$$

Burada:

$$\alpha = \text{Isı geçiş katsayısı (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$d = \text{Karakteristik boyut (m)}$$

$$a = \text{Sıcaklık iletme katsayısı (m}^2/\text{s)}$$

$$c = \text{Özgül ısı (kJ/kg} \cdot \text{K)}$$

$$\lambda = \text{Isı iletme katsayısı (W/m} \cdot \text{K)}$$

$$\gamma = \text{Özgül kütle (yoğunluk) (kg/m}^3\text{)}$$

$$w = \text{Hız (m/s)}$$

$$\gamma = \text{Kinematik vizkozite (m}^2/\text{s)}$$

$$\eta = \text{Dinamik vizkozite (N} \cdot \text{s/m}^2\text{)}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\beta = \text{Isıl genleşme katsayısı} = 1/T \text{ gazlar için (1/K)}$$

$$t = \text{Gaz-cidar sıcaklık farkı (}^{\circ}\text{C)}$$

Gr. gaz akımı içindeki sıcaklık farkları sonucu meydana gelen akımla ilgilidir.

Re sayısının büyüklüğüne göre, cebri akımla, **laminar ve türbülanslı** olarak ayrılırlar. Borulardaki akışta, her ikisi arasındaki sınır $Re = 2320$ 'dir. Borulardaki akış, bu sınırın altında laminardır. Cebri akımın hızı yeterli büyüklükte olduğunda, tahrik ihmal edilebilir.

Akım tarzı, **cebri ve serbest akım** olarak, ayrılabilir. Cebri akımda Re, serbest akım da Gr sayıları, ölçü olarak rol oynar.

Gazlarda Pr sayısı eşit olduğunda, yalnızca Re ve Gr sayıları da benzerlik olduğunda, Nu ölçü olarak alınır.

Fırın yapımında söz konusu olan gazlar ve hava için, düşük ve yüksek sıcaklıklarda Pr sayısı yaklaşık 0.70 kadardır. Yalnızca su buharı için, 0°C 'de $Pr=0.95$ ve 1200°C 'da $Pr =0.89$ alınır.

t_g ($^{\circ}\text{C}$) sıcaklığındaki gazlardan, t ($^{\circ}\text{C}$) sıcaklığındaki F (m^2) yüzeyine konveksiyonla geçen ısı miktarı:

$$Q_k = F \cdot \alpha \cdot (t_g - t) \quad (\text{kJ/h}) \quad (5.24)$$

Formüldeki, α ısı geçiş katsayısı ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), gaz ve 1 m^2 duvar yüzeyi arasında, her $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkı için, saatte geçen ısı miktarını belirtir.

Her akımda, sıvı yada gaz parçacıkları ile cidar arasında, bir sınır tabakası kalır. Laminar akımda akışkanlar, bu tabaka boyunca kayarlar. Hiçbir parçacık, cidara dik doğrultuda hareket etmez. Böylece, tam laminar akımda ısı geçişi, yalnızca sıvı yada gaz tabakalarında ısı iletimiyle olur. Bu bakış açısı altında, borulardaki laminar akımda, ısı geçiş katsayısının formülü, nüsselt'e göre yazılabilir.

$$\alpha = 5,15 \lambda/d \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (5.25)$$

Burada, $\lambda =$ Gazların ısı iletme katsayısı (W/m . K)

D = Boru çapı (m)

Tablo 5.10, laminar akımda, küçük boru çaplı kanallar için α değerlerini vermektedir.

Sıcaklık °C	Kapilar kanalın çapı (mm)			
	1	1.5	2	3
500	238	158	119	79
750	286	190	142	95
900	309	205	155	102
1000	321	213	160	106
1200	351	233	178	116

Tablo 5.10. Hava duman gazlarının laminar akımından değerleri (W/m² . K)

Fakat, bu formülün kullanılmasında, iki noktaya dikkat edilmesi gerekir:

1. Gazların boruya girişinde, başlangıçta (5.25) formülündeki değere göre, α değeri çok büyüktür ve başlangıç mesafesi L sahası içerisinde, (5.25)'de verilen değere düşene kadar azalır ve daha sonra sabit kalır.

Bu başlangıç mesafesi, şöyle hesaplanabilir:

$$L = C_{po} \cdot W_o \cdot d^2 / \lambda \quad (\text{m})$$

Burada: $C_{po} =$ Hava ve yaklaşık olarak da duman gazlarında, 0°C'de ve sabit basınçta, gazların özgül ısısı = 1.299 kJ/Nm³ . K

$W_o =$ 0°C sıcaklığa indirgenmiş akışkan hızı m/s

$\lambda =$ Gazların ısı iletme katsayısı W/m . K

X/dRe	Nu	X/dRe	Nu	X/dRe	Nu
$0.0375 \cdot 10^3$	59.5	0.00312	14.1	0.020	7.9
$0.078 \cdot 10^3$	47.7	0.00375	13.3	0.0225	7.7
$0.118 \cdot 10^3$	41.9	0.0044	12.6	0.025	7.5
$0.157 \cdot 10^3$	37	0.005	12.0	0.0275	7.35
$0.310 \cdot 10^3$	30.1	0.0075	10.5	0.03	7.2
$0.48 \cdot 10^3$	26.2	0.01	9.6	0.0325	7.1
$0.625 \cdot 10^3$	23.4	0.0125	9.0	0.035	7.0
$1.25 \cdot 10^3$	18.6	0.015	8.5	0.0375	6.9
$1.90 \cdot 10^3$	16.1	0.0175	8.2	0.05	6.6
$2.50 \cdot 10^3$	14.5			0.075	6.25
				0.10	6.1
				10.00	5.15

Tablo 5.11. Laminar akımda, boru girişinde hesaplanmış, x boru boyu için ortalama Nusselt sayıları

Nusselt sayısı değerleri, gazların ortalama sıcaklığı için geçerlidir, gazların karışım sıcaklığı için geçerli değildir.

Kısa borularda ve kapilar kanallarda, başlangıç mesafesinin ihmal edilmemesi gerekir. Ayrıca, kapilar açıklığına gazların girişinde, sınır tabaka bozulur ve böylece, ısı transferi de yükselir. Çıkışta da, tersi durum olur.

2. (5.25) formülü, yalnızca akım bir tahrik yoksa kullanılabilir. O halde yalnızca cebri akımlı dar boru (kapilar) yada kanallar için geçerlidir. Aksi takdirde, çevre ile sıcaklık farkında, daima etkilenme meydana gelir ve ısı geçiş katsayısı (5.25)'da hesaplanmadan yüksek çıkar.

Türbülanslı akımda, keza şimdiye kadar belirtildiği gibi, cidarla hareketsiz bir sınır tabakası teşekkül eder, fakat türbülansın şiddetine bağımlı olarak çok veya az şekilde, akım doğrultusuna dik olarak parçacıkların hareketi de söz konusudur. Bu parçacıklar ısıyı direkt olarak sınır tabakasına veya yolları üzerindeki maddeler verirler. Çok ince tabakalarda cidara iletimle ısı geçer. Akımın, türbülans yada laminar olacağı Reynold sayısına bağlıdır.

Fırınlarda, rejenaratörlerde ve reküperatörlerde, akım genellikle cebridir. Çünkü gazlar (gaz, duman gazı, hava) tahrik edilirler ve böylece cebri akım doğar. Bu akımda ani yön değiştirmeler, türbülans akımı doğurur ve konveksiyonla ısı transferi de büyür. Buna karşılık, dışından ısıtılan, kutu ve hücrelerde, bir vantilatör kullanılmadığında, akım serbest tarzdadır.

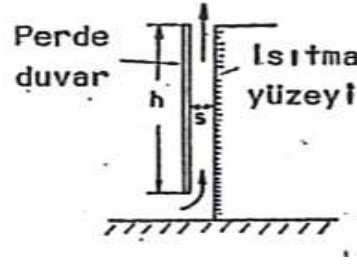
Konveksiyonla ısı transferinde, tam değerlendirme için, α_k önemlidir.

Düşey ve yatay duvarlar için ve serbest akımda konveksiyonda, Nusselt'e göre:

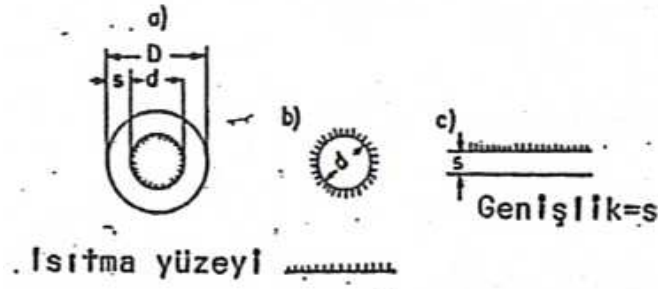
$$\alpha_k = 2,56 \sqrt[4]{t_d - t_g} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)} \quad (5.26)$$

Burada, t_d °C duvar sıcaklığı t_g °C olarak gaz sıcaklığıdır.

Isıtılmış hava yada gazların baca etkisi yaparak, sıcak duvarlardan yüksek hızda geçtiği, **konveksiyon kolonu** teşekkül eden, düşey sıcak duvarlarda ısı transferi oldukça yüksektir. Bu duruma, sıcak duvar önüne bir perde duvar (şekil 5.6) yapıldığında, veya içinden ısıtılan borunun dışında bir dış boru (şekil 5.7) konveksiyon kolonu teşekkül ettirilebilir.



Şekil 5.6. Bir sıcak duvarda konveksiyon kolonu teşekkülü



Şekil 5.7. Konveksiyon kolonları kesitleri, a ve b- boru c- kanal

Konveksiyon kolonları, h kolonunun yüksekliğini ve d_a eküvelan çapını gösterdiğine göre, d_a/h oranıyla karakterize edilirler. d_a/h oranının belirli değerinde, ısı transferi en yüksek değere ulaşır. Konveksiyon kolonları, hava ısıtıcılarda ve düşük sıcaklıklı fırınlarda (ayrıca elektrikli fırınlarda) çok sık uygulanır.

Duvar yada plaka boyunca cebri akımlarda, α_k değeri akım hızı w (m/s)'ye bağlıdır.

Hız w , m/s'den küçük olduğunda:

$$\alpha_k = 5.58 + 5.95 w \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K) Parlak yüzeyler için} \quad (5.27)$$

$$\alpha_k = 6.16 + 4.19 w \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K) Pürüzlü yüzeyler için} \quad (5.28)$$

Hız w , 5 m/s'den büyük olduğunda:

$$\alpha_k = 7.12 w^{0.78} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K) Parlak yüzeyler için} \quad (5.28)$$

$$\alpha_k = 7.52 w^{0.78} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K) Pürüzlü yüzeyler için} \quad (5.29)$$

Hız değeri w olarak, şu değerler alınmalıdır.

$$w = w_t \cdot 293 / T_g \text{ (m/s)}$$

$$w_t = T_g \text{ (K) gaz sıcaklığında m/s olarak gazların hızı}$$

Bu formül, nispeten düşük sıcaklıktaki fırınlar için (kurutma fırını, pişirme fırını, boya, plastik ve demir olmayan metallerin ısıl işlemi için fırınlar v.b.) duman gazı, sıcak hava yada her ikisinin karışımının, bir vantilatör yardımıyla fırında dolaşım yaptırıldığında kullanılabilir.

Endüstri fırınlarında, fırın hacminde ve ısıtılan parçaların çevresinde, gaz hızı genellikle çok yüksek değildir ve fırın hacmindeki kesit değişiklikleri ile akım yönünün değişmesi de sonucu etkiler. Yüksek fırın sıcaklıklarında, cebri akımın yanında serbest akım da meydana gelebilir. Bunların sonucu, duman gazlarından fırın duvarlarına ve duman gazlarından ısıtılan parçaya, konveksiyonla ısı transferi için ısı geçiş katsayısı α_k , çoğu zaman tam olarak verilemez. Genellikle, $\alpha_k = 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ kabul edilebilir, fakat gaz hızının yükselmesiyle, bu değer artar.

Boru ve kanallarda (radyasyon boruları ve reküperatör boruları) türbülanslı akımda, gazların konveksiyonla ısı transferi oldukça önemlidir. t_g ($^{\circ}\text{C}$) gaz sıcaklığı, w_0 (m/s) gaz hızı ve d (m) boru çapı olduğuna göre, hava ve duman gazları için α_k değeri :

$$\alpha_k = 1,163 \left[3,55 + 0,2 \frac{t_g}{100} - 0,0066 \left(\frac{t_g}{100} \right)^2 \right] \frac{w_0^{0,75}}{d^{0,25}} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (5.30)$$

Isı transferi, gaz hızının artmasıyla ve boru çapının azalmasıyla yükselir.

Tablo 5.12’de, teknik pürüzlülükte ve 0°C sıcaklıkta metalik borular için α_{k0} değerleri verilmiştir. t°C sıcaklığında α_k değerlerini bulmak için, α_{k0} değeri, tablo 5.13’de verilen faktör sayı ile çarpılmalıdır.

0°C ve 760 mm Hg koşullarında hız W_0 (m/s)	Boru çapı (mm)					
	25	50	75	100	150	200
0.4	8.4	7.9	7.4	7.2	7.1	7.0
0.8	10.7	9.8	9.3	8.9	8.4	8.0
1.0	12.0	10.9	10.1	9.7	9.0	8.4
1.5	15.1	13.3	12.0	11.4	10.4	9.5
2.0	18.4	15.6	14.1	13.3	11.9	10.9
2.5	22.0	18.4	16.5	15.4	14.0	12.8
5.0	36.5	30.7	27.8	25.8	23.3	21.4
8.0	52.1	43.7	39.5	36.6	33.1	30.6
10.0	61.6	51.8	46.6	43.6	39.4	36.1
20.0	102.0	87.0	78.0	73.0	66.0	60.0
30.0	140.0	118.0	106.0	99.0	90.0	82.0

Tablo 5.12. 0°C sıcaklıkta borular için α_k değerleri

	Sıcaklık °C						
	0	200	400	600	800	1000	1200
Hava.....	1.00	1.09	1.19	1.29	1.38	1.47	1.57
Duman gazı	1.00	1.13	1.25	1.37	1.49	1.61	1.72

Tablo 5.13. α_k değerini bulmak için α_k sayılarının çarpılacağı faktörler

Boru yerine örülmüş kanallar söz konusu olduğunda (örneğin baca kanalı), gaz hızı w_0 2 m/s’den büyük olduğunda ve parlak yüzeyli kanal duvarlarında tablo 5.12 ve 5.13’de bulunan α_k değeri, tablo 5.14’de verilen katsayı ile çarpılır. Kanal duvarları pürüzlü olduğunda, ayrıca %25 kadar ilave edilir.

Kanal genişliği mm	25	50	75	100	150	200
Faktör sayı.....	1.22	1.14	1.1	1.07	1.05	1.04

Tablo 5.14. Örülmüş parlak yüzeyli kanallar için, α_k değerleriyle çarpılacak faktör sayılar

C_m ve C , şekil 5.8.'de verilen değişik durumlar için, tablo 5.15'den alınabilir. Ancak boru boyu veya 1 aralığı için, şekil 5.8.'de 0 ile belirtilen noktaların esas alındığına dikkat edilmelidir.

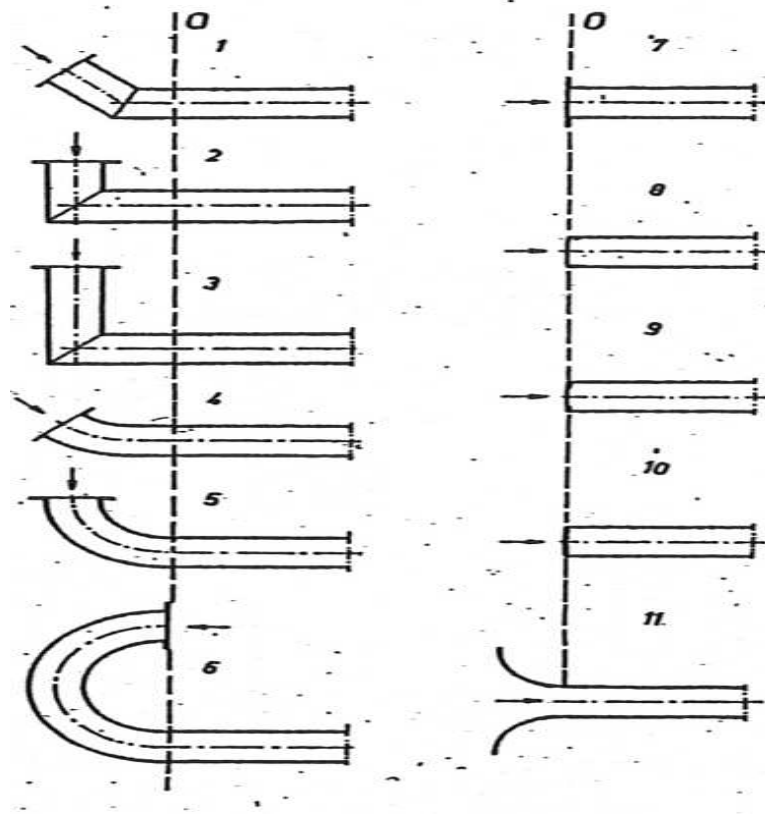
Giriş formu		Belirtme tarzı	C_m	C
Nr	Grup			
			$\frac{1}{d} \geq 5$ için	
1	A	Açı 45°	5.0	1.8
2	A	Açı 90°	7.0	2.0
3	A	Açı 90° uzun	3.2	1.3
4	A	Dirsek 45°	4.2	1.7
5	A	Dirsek 90°	3.2	1.3
6	A	Dirsek 180°	5.3	2.1
7	B	Duvardan giriş	2.3	0.9
8	B	Serbest giriş	3.0	1.2
9	B	Büyük aralık	7.0	2.8
10	B	Küçük aralık	16.0	5.8
11	C	Yönlendirici ile giriş	0.7	0.4

Tablo 5.15. Şekil 5.8.'de verilen değişik giriş formlarında C_m ve C değerleri

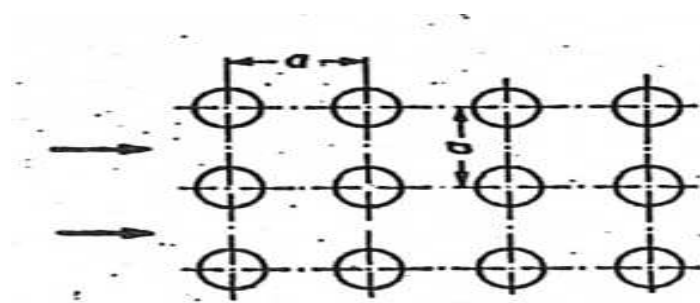
Rekuperatörlerde ve sıcak havalı fırınlarda ısı transferi, çoğu zaman duman gazları yada havanın boru demeti eksenine dik doğrultuda hareket ettiği boru demezlerindeki konveksiyonla gerçekleşir. Bunun için de, belirli katsayılar alınır. Tablo 5.16'den alınan α_{ko} değeri, tablo 5.17 ve 5.18'da verilenlerle çarpıldığında, şekil 5.9'de verilen boru demeti için, ısı geçiş katsayısı bulunur. Şekil 5.10 için ise $(a-2d)$, ayrıca %5 ilave edilmelidir.

Tablo 5.13 ve tablo 5.16'den görüleceği gibi, eşit hızlarda konveksiyonla ısı geçiş katsayısı, boru çapının büyümesiyle düşer. Aynı durum, serbest akım ve küre formunda parçalar için de geçerlidir. Çap büyüdüğünde, α_k 'nın değeri, düz duvar değerine giderek yaklaşır. Buna karşılık, çok küçük çaplarda, α_k değeri, normal

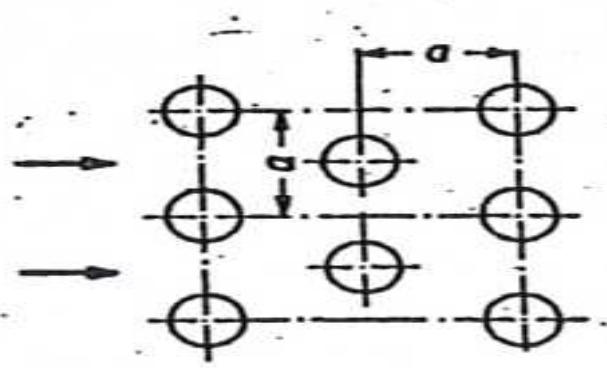
değerlerinin 50 katına kadar yükselir. Bu durum, sıcaklık ölçmelerinde ve infraruj ısıtmada göz önünde tutulmalıdır.



Şekil 5.8. Değişik boru başlangıç formları



Şekil 5.9. Boru demetinde boru düzenlemesi (Tablo 5.16)



Şekil 5.10. Boru demetinde boru düzenlemesi (Tablo 5.16)

Tablo 5.16. 0°C'deki boru demetleri için α_{ko} değerleri

0°C'de ve 760 mmHg koşullarında hız w_0 (m/s)	Boru dış çapı (mm)				
	25	50	75	100	150
0,4	15,7	12	10,2	9,2	7,8
0,6	20,2	15,5	13,1	11,7	10
0,8	24	18,4	15,6	14	12
1	27,6	21,1	17,9	16	13,7
1,5	35,2	27	22,9	20,5	17,4
3	54	41,3	35,1	31,4	26,7
4	64	49	41,9	37,3	31,9
5	73	56	48	42,8	36,5
7,5	92	72	61	55	46,6
10	113	86	73	65	56

Tablo 5.17. α_{ko} değerlerini bulmak için, α_{ko} değerleri ile çarpılacak sıcaklığa bağımlı faktör sayılar

	Sıcaklık C						
	0	200	400	600	800	1000	1200
Hava	1	1,15	1,25	1,33	1,41	1,47	1,52
Duman gazı	1	1,17	1,31	1,43	1,54	1,63	1,72

Tablo 5.18. Akım doğrultusundaki boru sayısına göre çarpım faktörü

Boru sayısı	1	2	3	4	6	10
Çarpım faktörü	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1

5.3.1.2. Radyasyonla ısı transferi

Isı radyasyonu olarak, bir cisimden gönderilen elektromanyetik enerjinin bir kısmı anlaşılır. Dalga enerjisi, görülebilir ve ultraviyole olarak da her durumda

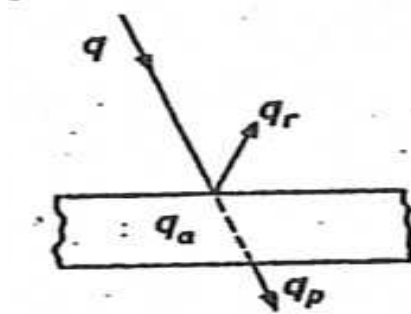
dönüştürüleceğinden, bu tanım yeterince açıklık getirmez. Elektromanyetik dalgalardan oluşan ışıkların tamamı radyasyon yapar, fakat ısı etkisi olmayabilir. Katı cisimlerde, yalnızca dalga boyu 0,75 ve 400 μ ($1\mu = 1/1000$ mm) arasında olan enfraruj dalgalarda, ısı etkisi oldukça büyüktür. 40 μ 'nun üzerindeki ısı radyasyonu, teknik için anlam ifade etmez. Görülebilir ışık, psikolojik algılamaya bağlı olarak, 0,8 μ kadar dalga boyludur. 0,75 ve 0,8 μ arasında, ışık ve ısı radyasyonu aynı anda gerçekleşir.

Radyasyon doğrusal olarak yayılır ve fırında gölgede kalan bölgeler, radyasyonda etkilenmez. Radyasyon cisme geldiğinde, radyasyonun bir kısmı, cisim tarafından emilir ve genellikle ısı enerjisine dönüşerek, cismin sıcaklığını yükseltir. Emilen radyasyon A_λ 'nın, toplam radyasyon enerjisi A_{λ_s} 'ye oranı, absorpsiyon oranı olarak adlandırılır ve ε ile belirtilir.

$$A_\lambda/A_{\lambda_s} = \varepsilon$$

Yüksek sıcaklıktaki bir cisim, düşük sıcaklıktaki bir cismin karşısında durursa, her ikisi de ısı radyasyonu yayarlar. Yalnız, soğuk olanın sıcak üzerine radyasyonu, ısı miktarı olarak daha az olduğundan, karşı doğrultuda radyasyon meydana gelir.

Bir cismin üzerine gelen radyasyon enerjisinin tamamı, genellikle bu cisim tarafından emilmez, aksine kısmen yansır. Ayrıca, cisme gelen radyasyonun bir kısmı da cismin arka tarafına geçebilir. Bu durum için, cismin radyasyon geçirme olanağına sahip olması gerekir. Absorpsiyon (emme), refleksiyon yansıma ve geçirgenlik olasılıkları toplamı, daima 1'dir.



Şekil 5.11. Cisme gelen radyasyon enerjisinin dağılımı

Şekil 5.11 $q = q_r + q_a + q_p$ olduğunu göstermektedir.

Teorik olarak düşünölen, absorbsiyon olanağı = 1 olan, yeni geri yansıtma ve geçirme yapmadan tüm gelen radyasyonu yutan cisimlere, **mutlak siyah cisim** adı verilir. Cisim, yalnızca radyasyonu almaz, aynı zamanda onu ısıya dönüştürür. Isı miktarı, radyasyonunun sıcaklığına da bağımlı olduğundan dolayı **emisyon olanağı** olarak tanımlanır. Kirşof kanununda, bir cismin belirli bir dalga boyunda emisyon olanağı, bir cismin absorbsiyon olanağına eşit olacağından, mutlak siyah cisimler yalnızca mümkün en büyük absorbsiyon oranına (=1) sahip değil, aynı zamanda mümkün en büyük emisyon oranına (=1) sahip olarak da tanınırlar.

Katı Cisimlerin Radyasyonu

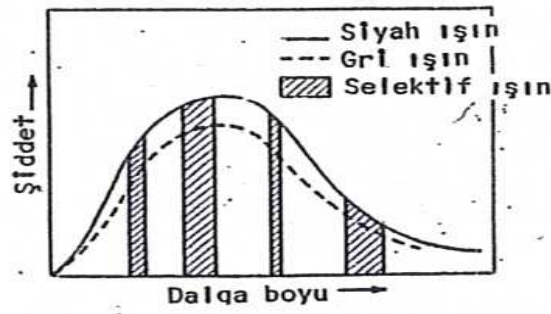
Mutlak siyah cisim için, Stefan-Boltzmanh kanunu geçerlidir:

$$Q = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad \text{kJ/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$C = \text{Mutlak siyah cismin radyasyon sayısı} = 5.77 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Genellikle fırın yapımında kullanılan yapı malzemeleri ve diğer maddeler (Parlak metal yüzeyleri, dalga boyuna bağlı olarak değişik absorbsiyon olanağını verdiğinden, bir istisna teşkil eder), gri radyasyon verici olarak tanımlanırlar. Mutlak siyah cismin absorbsiyon olanağı, emisyon olanağına ($\epsilon=1$) eşit iken, gri radyasyon vermede, daha az emisyon olanağı ($\epsilon < 1$) doğar ve her dalga boyunda, bu durum olur. Bunun sonucu, gri radyasyon için de C yerine $\epsilon \cdot C$ alınmak suretiyle uygulanabilir. ϵ ve $\epsilon \cdot C$ değerleri, tablodan alınabilir.

Şekil 5.12, siyah radyasyon, gri radyasyon ve selektif radyasyon arasındaki farkı göstermektedir. Burada, belirli bir sıcaklık için radyasyonun şiddeti, değişik dalga boyları için verilmiştir. Radyasyonun şiddeti, yükselen sıcaklıkla, daha kısa dalga boylarına kayarak, cisim fırın hacmine konduğunda önce görölebilir ışık yaymaz iken, artan sıcaklıkla birlikte kırmızı, sonra sarı ve sonunda beyaz ışık yayar. Selektif radyasyonda, ϵ dalga boyu ile değişir. Karbondioksit ve su buharında, **emisyon bandı** (aynı şekilde **absorbsiyon bandı da**) genişliği, sıcaklığa bağımlıdır.



Şekil 5.12. Radyasyonun değişik çeşitleri

İki cisim karşılıklı durduğunda, ortaya çıkan radyasyon sayısı, yalnızca iki cisim radyasyon sayılarına değil, ayrıca birbirlerine göre pozisyonlarına ve yüzey alanlarına bağlı olarak değişir. Basit, fakat çok sık rastlanılan birkaç örnek aşağıda verilmiştir.

Eğer bir doğrultuyla yüzeye gelen radyasyon, radyasyon doğrultusu ile yüzeye dik doğrultu arasındaki açının cosinüsü kadar etkili olur. Bu durum, Lambert radyasyon kanunu olarak bilinir ve teknik hesaplarda kullanılır.

Çok büyük iki paralel yüzey, aynı F yüzey alanına ve C_1 ve C_2 radyasyon katsayılarına sahip olarak karşılıklı durduğunda, toplam radyasyon sayısı:

$$C_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{5,77}} \quad (5.31)$$

Malzeme	Sıcaklık °C	ϵ	$\epsilon \cdot C$ W/m ² · K ⁴
Şamot ve silika tuğla, yeni	600-1000	0.75-0.80	4.3-4.6
Şamot ve silika tuğla, kullanılmış	600-1000	0.82-0.87	4.7-5.0
Aynalaşmış cüruf tabakalı, şamot ve silika tuğla	600-1000	0.70-0.75	4.1-4.3
Yumuşak demir, parlak ve temiz	25-250	0.04-0.07	0.2-0.4
Yumuşak demir, siyah ve katı oksidli	25-1100	0.78-0.9	4.5-5.0
Dökme demir, ergiyik	1300-1400	0.3-0.45	1.7-2.6
Dökülmüş halde dökme demir	25	0.8	4.6
İşlenmiş dökme demir	900	0.65	3.2
Bakır, ergiyik	1200	0.14	0.8
Bakır, parlak ve temiz	25	0.03	0.17
Bakır, parlak, biraz tavllanmış	25	0.04	0.23
Bakır, siyah okside olmuş	25	0.78	4.5
Pirinç, parlak	25-350	0.3-0.035	0.17-0.20
Pirinç, haddelenmiş	25	0.06	0.35
Alüminyum, haddelenmiş	100-500	0.06-0.09	0.35-0.52
Alüminyum, kum döküm	100-500	0.3	1.75

Alüminyum, kokil döküm	100-500	0.2	1.16
Alüminyum, sac, pürüzlü	26	0.07	0.4
Alüminyum sac, parlak	26	0.053	0.3
Alüminyum sac, parlak	230	0.039	0.22
Porselen, Quarz camı, kiremit, cam	25	0.92-0.94	5.3-5.5
Alüminyum boya		0.4	2.3
Boya, siyah-beyaz, parlak		0.9	5.2
Ergitme emaye, beyaz		0.9	5.2
Kömür	0-700	0.8	4.6
Nikel, parlatılmış	18-30	0.06	0.35
Çinko		0.26	1.5

Tablo 5.19. Malzemelerde sıcaklığa bağlı ϵ ve $\epsilon \cdot C$ sayıları

Eğer, F_1 yüzey alanında radyasyon katsayısı C_1 ve F_2 yüzey alanında radyasyon katsayısı C_2 ise:

$$C_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{5,77} \right)} \quad (5.32)$$

Eğer soğuk cismin yüzey alanı F_2 sıcak cismin yüzey alanı F_1 'e göre çok fazla büyükse, F_1 / F_2 oranı yaklaşık sıfır kabul edilebilir. Bu durumda:

$C_{1,2} = C_1$ olur.

Radyasyonla ısı transferi, F_1 yüzeyinin mutlak sıcaklığı $T_1 = t_1 + 273$ ve F_2 yüzeyinin mutlak sıcaklığı $T_2 = t_2 + 273$ olduğuna göre hesaplanabilir:

$$Q = F \cdot C_{1,2} \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\} \text{ (kJ/h)} \quad (5.33)$$

Bu formülün kullanılmasında, tablo 5.20'den de yararlanılabilir.

Fırın tabanında duran parça üzerine, fırın tavanından gelen radyasyonla ısı miktarı, tavan ve ısıtılacak parça üst yüzeyi paralel yüzeyler teşkil edeceğinden, aralarındaki mesafe h olduğuna göre:

$$q = k \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot C \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\} \text{ (kJ/m}^2 \cdot \text{h)} \quad (5.34)$$

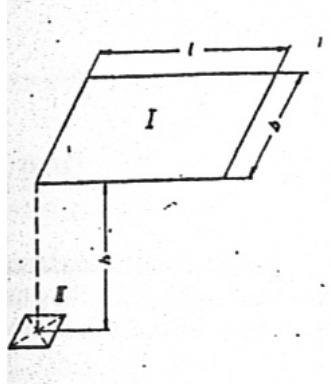
Sıcaklık t°C	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	Sıcaklık t°C	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$	Sıcaklık t°C	$\left(\frac{T}{100}\right)^4$
0	55	360	1610	840	15350
10	64	280	1820	860	16480
20	74	400	2055	880	17670
30	85	420	2300	900	18930
40	96	440	2588	920	20260
50	109	460	2890	940	21650
60	123	480	3215	960	23110
70	139	500	3570	980	24650
80	156	520	3960	1000	26260
90	174	540	4370	1050	30640
100	194	560	4810	1100	35540
110	215	580	5290	1150	41000
120	239	600	5810	1200	47080
140	292	620	6360	1250	53800
160	352	640	6950	1300	61220
180	422	660	7580	1350	69390
200	502	680	8250	1400	78340
220	592	700	8960	1450	88140
240	695	720	9720	1500	98820
260	809	740	10530	1550	110450
280	936	760	11390	1600	123070
300	1078	780	12290	1650	139610
320	1235	800	13260	1700	151540
340	1415	820	14280	1750	167500
				1800	184670

Tablo 5.20. Sıcaklık t'ye göre hesaplanmış, $(T/100)^4$ değerleri

Buradaki k değeri, $L = 1/h$ ve $B = b/h$ değerleri, şekil 5.13'e göre hesaplandıktan sonra, tablo 5.21'den alınabilir. Burada, fırın tavanının dikdörtgenlere bölündüğüne ve dikdörtgen herhangi bir köşesinin izdüşümünün, parça yüzeyi merkezine geldiğine, dikkat edilmelidir. Bu durum, müteakip örnekle daha iyi anlaşılabilir.

Tablo 5.21. Paralel yüzeyler için k değerleri

B = b/h	L = 1/h					
	0,5	1,0	1,5	2,0	4,0	10,0
0,5	0,061	0,091	0,104	0,108	0,113	0,115
1,0	0,091	0,139	0,159	0,167	0,174	0,175
1,5	0,104	0,159	0,184	0,195	0,205	0,208
2,0	0,108	0,167	0,195	0,208	0,22	0,223
4,0	0,113	0,174	0,206	0,22	0,238	0,243
10,0	0,115	0,175	0,208	0,223	0,243	0,248



Şekil 5.13. Fırın tavanı ve ısıtılan parça arasında radyasyon

Gazların radyasyonu

Gazların radyasyonu, 1000°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda konveksiyonla ısı transferinin toplam ısı transferindeki payı, radyasyonla ısı transferine nazaran çok az olduğundan, oldukça önemlidir.

Alevlerin radyasyonu, **görülebilir radyasyon** (ışık veren alevler) ve **görülmeyen radyasyon** olarak ortaya çıkar. Karbondioksit ve su buharı, endüstri fırınlarında söz konusu olan sıcaklıklarda ışık vermediklerinden, görülemeyen infraruj radyasyonu yayarlar. Bu gazların ısı radyasyonu, **selektif**'tir. Bunlar, belirli sıcaklıklarda ve yalnızca belirli dalga boylarında radyasyon verirler.

Karbondioksit için, s (m) tabaka kalınlığında, T_g (K) sıcaklığında ve p_1 kısmi basıncında gazların, T_d (K) sıcaklığındaki bir gri yüzeye ε emisyon katsayısıyla radyasyonla verdikleri ısı miktarı:

$$q_{\text{CO}_2} = \varepsilon \cdot 10,35 (p_1 b s)^{0,4} \cdot [(T_g/100)^{3,2} - (T_d/100)^{3,2}] \cdot (T_g/100)^{0,65} \text{ W/m}^2 \quad (5.35)$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = \varepsilon \cdot 46,5 (1 -$$

$$1,825 p_2 \cdot s) (p_2 \cdot s) (p_2 \cdot s)^{0,6} \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^{2,32 + 1,37 \sqrt[3]{p_2 \cdot s}} - \left(\frac{T_d}{100} \right)^{2,32 + 1,37 \sqrt[3]{p_2 \cdot s}} \right] \text{ W/m}^2 \quad (5.36)$$

Su buharı ve karbondioksit karışımları için $q_{\text{H}_2\text{O}}$ ve q_{CO_2} değerlerinin toplamı alınarak, hesaplama yapıldığında büyük bir hata yapılmaz. Ancak, her iki gaz miktarının p_1 ve p_2 gaz basınçları toplamı, 1 atü duman gazı basıncına

indirgenmelidir. Ayrıca, aşağıdaki formüle göre, yaklaşık hesaplanması da mümkündür.

$$s = 0,9 a. 4V/F \text{ (m)} \quad (5.37)$$

Burada : $V = \text{Fırın hacmi (m}^3\text{)}$

$$F = \text{Kesit (m}^2\text{)}$$

Form	Ölçü Alınan D Boyutu	Ortalama tabaka kalınlığı, a değerini bulmak için, D değeri ile çarpılacak faktör
Küre	Çap	0,6
Sonsuz uzunlukta silindir	Çap	0,9
Silindir D=Yükseklik. Toplam yüzey radyasyonu	Çap	0,6
Silindir D=Yükseklik. Esas yüzeyin orta noktasındaki radyasyon	Çap	0,77
İki sonsuz paralel düzlem arasındaki toplam	Aralık	1,8
Küb, toplam yüzey	Kenar	1,6
Eşkenar üçgen üzerinde boru eksenli sonsuz boru demeti	Açık aralık (açık aralık, dıştan boru çapıdır)	2,8
Benzer boru demeti	Açık aralık (boru çapı, yarım açık aralıktır)	3,8
Dikdörtgen üzerinde boru eksenli, Sonsuz boru demeti	Açık aralık (Boru çapı, açık aralıktır)	3,5

Tablo 5.22. Değişik gaz kütlelerinin ortalama tabaka kalınlığı

Duman gazı türü	Sıcaklık °C	Tabaka kalınlığı s(m)	Isı radyasyonu (kJ/m ² 9.h)		
			CO ₂ miktarı	H ₂ O miktarı	Toplam
Baca gazı.....	900	0,05	19260	1170	20430
Kok fırın gazı....	900	0,05	10680	7955	18635
Baca gazı.....	900	0,5	43125	11725	54850
Kok fırın gazı....	900	0,5	30145	53175	83320
Baca gazı.....	1400	0,05	51920	3225	55145
Kok fırın gazı....	1400	0,05	27635	20935	48570
Baca gazı.....	1400	0,5	131885	30980	162865
Kok fırın gazı....	1400	0,5	85410	154910	240320

Tablo 5.23. Baca gazı ve kok fırın gazı duman gazlarının havaya doymuş yanmada radyasyonu

Düşük tabaka kalınlıklarında karbondioksitin radyasyonu, büyük tabaka kalınlıklarında ise su buharının radyasyonu daha etkilidir. Bu durum, tablo 5.23'de

verilen, baca gazının havaya doymuş yanmadaki duman gazlarında (%23.3 CO₂ ve %3.5 H₂O) ve kok fırın gazı duman gazlarında (%7.3 CO₂ ve %23.5 H₂O) açık olarak görülür.

Işık veren alevlerin radyasyonunda, duman gazları çok ince dağılmış halde is parçacıkları ihtiva eder. Bu parçacıklar, özel bir tarzda yanarlar ve konvektif ısı transferiyle alev gazlarını ısıtırlar ve radyasyon yaparlar. İis parçacıklarının bulunmasıyla, gazların ısı radyasyonu genellikle yükselir. Ancak, yakıt hava karışımının çok iyi olmadığı durumlarda, yanmada sıcaklık düşer ve bunun sonucu radyasyon da azalır.

5.3.1.3. İletimle ısı transferi

İki durumda olabilir:

1. Cismin her bir noktasının sıcaklığı, ısı geçmesi esnasında, zamanla sabit kalır. Burada düzenli (stasyoner) ısı akışı mevcuttur ve bu duruma, rejim hali denir.
2. Her bir noktanın sıcaklığı zamanla değişir, rejim hali yoktur ve ısı akışı zamana bağlı olarak değişerek, düzensiz (stasyoner olmayan) durum doğar. (Fırının ısıtılması ve soğutulması, ısıtılacak parçalarda ısıtma olayı Σ fırında taşıma araçları)

Düzenli Isı Akışı: Belirli bir malzemeden yapılmış s(m) kalınlığındaki, her iki yüzey alanı F (m²) olan duvarda, düzenli ısı akışı olduğunda, yüzey sıcaklıkları t₁ ve t₂ (°C) olur ve duvardan geçen ısı miktarı

$$Q = F \cdot (\lambda/s) (t_1 - t_2)(W) \text{ veya } (kJ/h) \quad (5.38)$$

λ değeri, **ısı iletme katsayısı**'dır (W/m.K) ve her malzemede değişik değerdedir. Ayrıca, sıcaklığa bağımlı olarak da değişme gösterir. Gazlar kötü iletkenler ve ısı tutucu tarzında izolasyon malzemesi olarak kullanılabilirler.

5.3.2. Fırın içerisinde ısı transferi

Isı transferi, serbest yada cebri akımda konveksiyonla, gazlardan ve yüzeylerden ısı radyasyonu ile, ısı iletimiyle ve bunların çok değişik tarz etkimesiyle gerçekleşir.

Ayrıca, ısının malzemenin kendisinde üretildiği indüktif ve dielektriksel ısıtma da, malzemenin ısıtılmasında kullanılabilir.

İletim ile ısı transferi, ısıtılacak parçaların bir taban üzerine konmasında ve ayrıca pota içerisinde ergitme yapıldığında daha etkilidir.

Konveksiyon ile ısı transferi, her fırında görülür. Çünkü, fırın içerisindeki ısıtılan parça, daima hava, duman gazı, koruyucu gaz, reaksiyon gazı gibi bir gaz ortamla çevrilidir. Yalnızca vakum fırınları, özel bir durum olarak istisna teşkil eder.

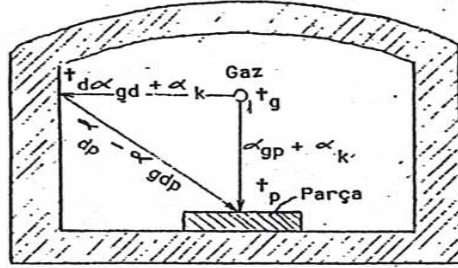
Fırın içerisindeki gazlar, örneğin hücre içerisinde, infraruj fırınlarında, birçok elektro fırında ve radyasyon borulu fırında (vantilatörsüz) olduğu gibi, çok yada az stasyoner (sakin) ise, ısı transferi serbest akımda konveksiyonla hesaplanır. Bu ısı transferi, çoğu zaman radyasyonla ısı transferine nazaran daha değerlidir, fakat genellikle büyük değildir.

Fırın hacminde, ısıtılan parçaların yanında duman gazları bulunan yakıtla ısıtılan fırınlarda, gaz akımı cebridir. Bu durumda gaz hızı, genellikle çok yüksek olmaz ve bundan dolayı da ısı transfer sayısı da oldukça düşük kalır. Diğer taraftan, duman gazları bir vantilatör yada impuls yakıcı yardımıyla hareketlendirilirse, gaz hızı çok yükselir ve konveksiyonla ısı geçişi de artar. Aynı durum, elektro fırınlarda da sıcak hava yada koruyucu gaz için geçerlidir. Eğer alev direkt olarak ısıtılacak parçaya çarparsa, özellikle gazın tam yanmadığı durumlarda, konveksiyonla ısı transferi çok artar. Büyük yüzeylerde homojen ısıtmaya, genellikle gaz radyasyonu ile ulaşamaz. Ancak, istisnai bir durum olarak, gaz akımı yüzey radyasyonuna dönüştürülebildiği için, iç reküperatörlü fırınlarda çok iyi sonuç alınır. Elektrik direnç ısıtmalı ve yakıt ısıtmalı radyasyon borulu veya hücre tipi fırınlarda, yüzey radyasyonu ile ısıtılan parçaya ısı transferi oldukça önemlidir.

Ark fırınlarında ısı transferi, yalnızca ergitilen maddenin radyasyonu ile değil, aynı zamanda fırın duvarlarından da olur.

Bu esnada, bölgesel farklılıklar, büyük aşınmalara sebep olur. Bu durumu iyileştirmek için, küçük elektrod çaplarında daha yüksek akım şiddetiyle çalışılır, ancak bu durumda da güç faktörü düşer.

Yakıtla ısıtılan fırın hacmi içerisinde, parçalar direkt olarak duman gazlarıyla ısıtıldığında, ısı transferi, fırın tabanından iletimle, duman gazları akımından konveksiyonla, fırın duvarlarının ve gazın radyasyonuyla gerçekleşir. Bunlar arasında, gaz radyasyonuyla ısı transferi, normal fırınlarda en yüksek değerdedir.



Şekil 5.14. Direkt ısıtmalı fırında ısı transferi

Duman gazlarıyla direkt ısıtılan, fakat çalışma sıcaklığı oldukça düşük olan (800° 'nin altında) fırınlarda, gaz radyasyonuyla ısı transferi oldukça azdır. Isıtılan parçalara radyasyonla ısı veren fırın duvarları, indirekt ısıtma yüzeyleri olarak tanımlanır. Radyasyonla ısı tutan ve bu ısıyı konveksiyonla ön ısıtılan havaya veren reküperatörlerin çevre duvarları, yardımcı ısıtıcı duvarlar olarak adlandırılır. Isıtma esnasında duman gazları, ısıtılan parçalara temas etmiyorsa, bu tür ısıtmaya indirekt ısıtma adı verilir.

5.3.2.1. Direkt ısıtma ısı transferi

Şekil 6.14, fırın hacmi içerisindeki ısı transferini genel olarak göstermektedir. Burada t_g duman gazları sıcaklığını, t_p ısıtılan parçanın sıcaklığını ve t_d duvarın iç yüzeyinin sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$) olarak göstermektedir. Duman gazları, konveksiyon ve radyasyonla, ısıtılan parçaya Q_{gp} ısı miktarı verir. Fakat bu esnada, duman gazlarındaki ısının Q_{gp} miktarı da, konveksiyon ve radyasyonla, fırın iç duvarlarına geçer. Ancak, bu bir kayıp olarak görülmez, çünkü, genellikle “fırın sıcaklığı” olarak adlandırılan fırın iç duvar sıcaklığı t_d , ısıtılan parça sıcaklığı t_p 'den daha yüksektir. Ayrıca, Q_{dg} ısı, gazlar tarafından absorbe edilir ve Q_{gp} ısı radyasyonla iç duvarlardan ısıtılan parçaya geçer. Bu durumda, duvarlar “indirekt ısıtma yüzeyleri” olarak görev yapmaktadır. Fakat, $Q_a + Q_o$ ısı, sürekli olarak fırının duvarlarından kaybolur.

O halde, birim zamanda ısıtılan parçaya verilen ısı miktarı:

$$Q_f = Q_{gp} + Q_{dp} \text{ olur.}$$

Fırında ısıtılacak olan maddelerin ağırlığını, özgül ağırlığıdır, hangi sıcaklığa ısıtılacağını ve ısıtma hızı ile ilgili bilgileri, fırını sipariş eden başlangıçta belirtmelidir. Verilen bu temel karakteristiklere göre, gerekli hesaplama yapılır.

Parçaların ısıtılmasında, ısı parçanın dış yüzeyinden verilerek, iç kısmında ısınması sağlandığından, Q_f ısıısının başlangıçta bilinmesi gerekir.

Parçaların ısınmasında, dış ve iç kısım arasında büyük sıcaklık farkı doğuracak şekilde, dış yüzeyde aşırı ısınmaya izin verilmez. Dış kısım istenilen sıcaklığa ulaştığında, iç kısım henüz soğuksa, dövme gibi birçok işlem yapılamaz ve büyük ısıl gerilmeler meydana gelir.

Q_f faydalı ısı değerinin hesaplanmasında, şekil 5.14'de verilen aşağıdaki karakteristiklerden yararlanılır.

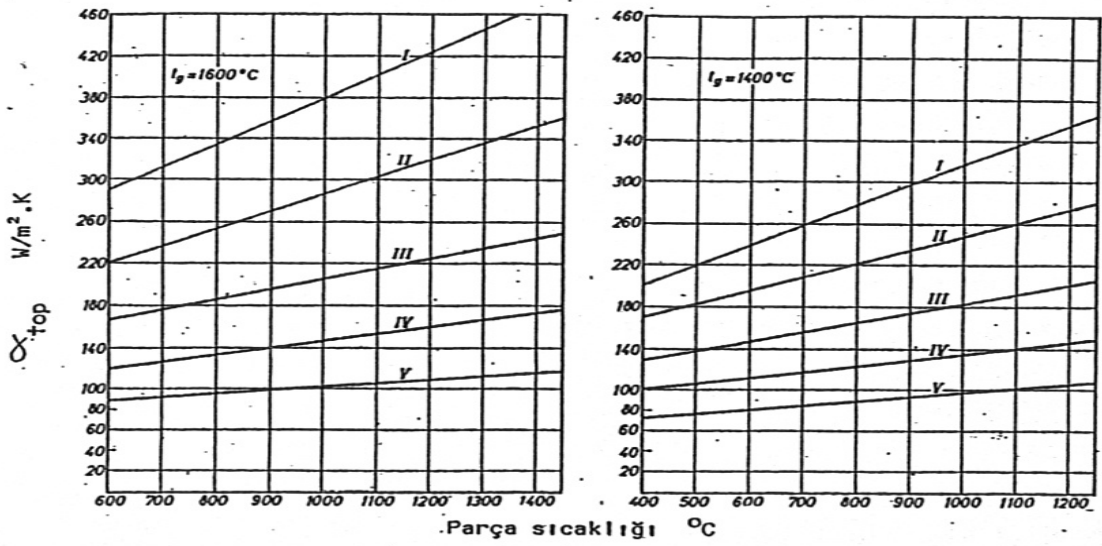
$$F_d = \text{Duvar yüzeyi } m^2$$

$$F_p = \text{Isıtılan parçanın serbest dış yüzeyi } m^2$$

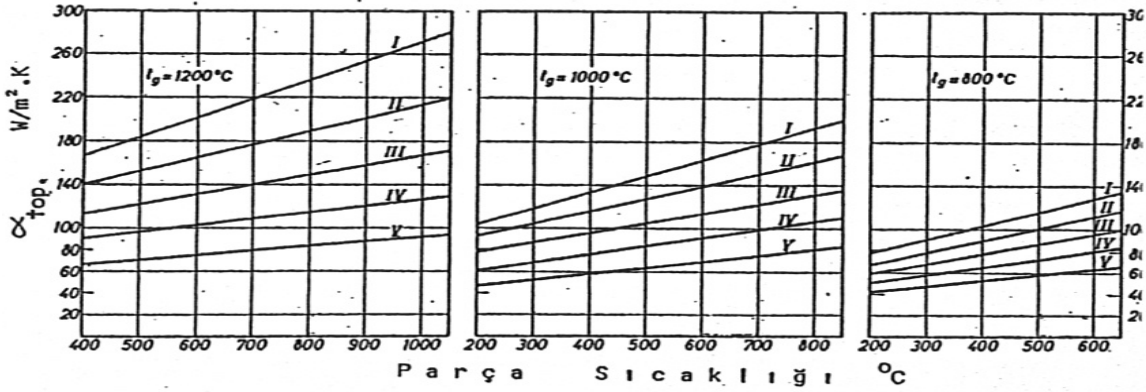
$$\alpha_d = \text{Duvarda konveksiyonla ısı geçiş katsayısı } W/m^2K$$

$$\alpha_p = \text{Isıtılan parçada konveksiyonla ısı geçiş katsayısı } W/m^2K$$

$$\alpha_{gd} = \text{Duvarda, duvar gazlarının radyasyonu ile ısı geçiş katsayısı } W/m^2K$$



Eküvelan gaz tabaka kalınlığı $S = 0,45 \sqrt[3]{h \cdot b \cdot l}$. (m) h, b ve l fırın boyutları (m)



I	S = 150 cm K = 0,3	III	S = 40 cm K = 0,3
II	S = 150 cm K = 0,7 yada	IV	S = 40 cm K = 0,7 yada
II	S = 80 cm K = 0,3	IV	S = 20 cm K = 0,3
III	S = 80 cm K = 0,7 yada	V	S = 20 cm K = 0,7

Şekil 5.15. Kok fırın gazı ile ısıtılan fırınlarda toplam ısı geçiş katsayısı

Bu durumda, ısıtılan parçaya geçen toplam ısı miktarı:

$$Q_f = Q_{dp} + Q_{gp} = F_p (\epsilon_{dp} \alpha_{dp} - \epsilon_d \alpha_{gdp}) (t_d - t_p) + F_d (\alpha_{gp} \epsilon_p) (t_g - t_p) \quad (5.39)$$

F_p ve F_d kolaylıkla hesaplanabilir, $\alpha_p = \alpha_d$ yaklaşık olarak 15 ilâ 25 W/m^2K (tam değer hesaplanması zordur) ve ϵ_d , yaklaşık 0,85 alınabilir, ϵ_p değeri de, malzeme cinsi ve sıcaklığa bağlı olarak alınabilir. Bu tabloda ayrıca, C = mutlak siyah cismin radyasyon katsayısı = 5,77 W/m^2K olduğuna göre, $g.C$ değerleri de verilmiştir. α_{gtp} ve α_{gp} , gaz radyasyonunu belirttiğinden, tabaka kalınlığı S ve gazların PCO_2 ile PH_{20} kısmi basınçlarına bağlıdır. Tablo 5.22 ve 5.23, tabaka kalınlığı S değeri ile ilgili

bilgileri vermektedir. Isıtılan parçanın sıcaklığı t_p işlem türüne bağlı olarak bellidir. Duman gazları sıcaklığı t_g , çoğu zaman, işlem sıcaklığından 100 ilâ 300°C daha yüksek olarak tahmin edilir.

Çelik endüstrisinde çok sık kullanılan itme fırınlarda, duman gazları fırının boyu doğrultusunda hareket ederken, çelik kütükleri fırının rayları üzerinde ters yönde hareket eder.

Duman gazları, kütükler ve duvarda (ve tavan) sıcaklık seyri görülmektedir. Fırının sonunda, duman gazlarının sıcaklığı 800°C'nin altına düşer ve duvar sıcaklığı, fırının son üçte birinde keza 800°C'nin altındadır. Fırının büyük bir kısmında, sıcaklık o kadar düşer ki, parça üzerinde toplam ısı transferinde konveksiyonun payı, çok önem kazanır. Fakat, fırının ilk kısımlarında sıcaklık oldukça yüksektir. O halde, fırın ilk kısımlarında kuvvetli duman gazı radyasyonu söz konusudur.

K değeri büyük olan fırında, büyük ısı kapasiteli parçalar fırın hacmine konduğu anda, fırın duvarlarında kuvvetli soğuma olur. Özellikle, kütük formunda büyük parçalarda, bu durum görülebilir. Fırın duvarları sıcaklığı, tekrar normal değere yükselene kadar, bu duvarlardan radyasyonla ısı transferi büyük ölçüde etkilenir. Bundan dolayı, bu tür fırınlarda K değerinin mümkün olduğu kadar küçük seçilmesine çalışılır. Bu durumda çok artacak olan, ısınma ve duvar kayıplarını azaltmak için, hafif tuğla kullanılması tavsiye edilebilir. Ancak, nisbeten yüksek sıcaklıklarda, fırın iç yüzeyinin normal şamot tuğla ve dışa doğru hafif şamot tuğladan yapılması, yeni ısıtılacak madde yüklendiğinde düşen duvar sıcaklığının, normal tuğladaki ısınma ısı etkisiyle, kısa zamanda eski değerine gelmesi kolaylaşır.

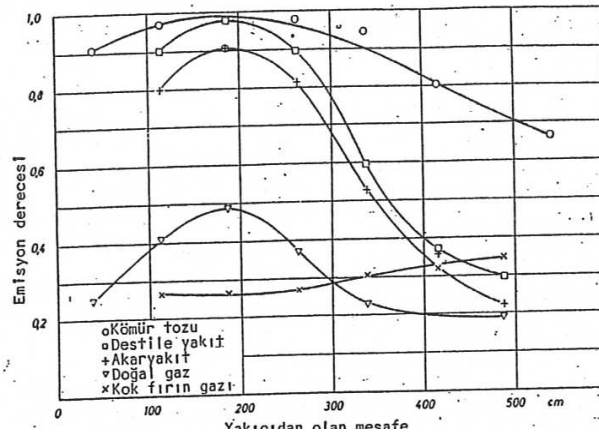
Bu tür büyük fırınlarda, üç tabakalı duvar da uygulanabilir. Bu durumda, duvarın en iç kısmı normal şamot tuğla, orta kısım hafif tuğla ve dış kısım izolasyon malzemesinden yapılır. Sorunun bir diğer çözümü de, fırında iç reküperasyon uygulamasıdır.

Duman gazlarının radyasyonunda, CO₂ ve H₂O miktarları önemli olduğundan, fırındaki CO₂ miktarı, ayrıca dıştan CO₂ ilave edilerek arttırılabilir. Bu yöntem, şimdiye kadar, pek uygulama alanı bulmamıştır.

Hidrokarbon ihtiva eden gazların ışık veren alevleri, çoğu zaman ısı transferinin yükselmesine yardımcı olur. Bu durum oldukça önemlidir. Fakat, is parçalarının büyüklüğü, duman gazlarının birim hacimdeki is miktarının bilinemeyeceği ve alev kalınlığında rol oynamalarından dolayı, alev radyasyonunu bu tarzının hesaplanmasında, esas olarak genellikle hata yapılır. Bundan başka, alevin son kısmında is parçacıklarının yanması gerektiğinden, kararına bölgesel olarak farklıdır ve is parçacıklarının yanması sonucu, ışık veren radyasyon da sona erer. Alevin boyunu uzatabilmek için, alevin kademeli olarak hava sevk edilmesi de mümkündür. Işık vermeyen alevler, hidrokarbonu zengin yakıt ilavesiyle, ışık verir hale getirilebilirler.

Düşük sıcaklıklarda siyah radyasyonunu mevcut olmasıyla, ısı transferinde iyileşme beklenmez. Fakat yüksek sıcaklıklarda da, görülebilir ışık göndermeyen duman gazlarının, emisyon sayısı yüksektir (Örneğin, duman gazı tabaka kalınlığı S büyük olduğunda, $\epsilon = 0.5$). Bu durumda, siyah radyasyonun iyileşmesine karşılık, parçalar üzerine ısı transferinde büyük bir iyileşme görülmez. Fırın işletmesinin ışık vermeyen gazlarla çalıştırıldığı, $\epsilon = 0.5$ ilâ 0.20 sayılarında da, yüksek sıcaklıklarda toplam ısı transferi oldukça yüksektir. Yüksek sıcaklıklara havanın ön ısıtılmasıyla kolaylıkla ulaşılabilir ve çoğu zaman siyah radyasyon yerine, bu yöntem kullanılır.

Gaz tabakasının siyah radyasyonunun çok fazla artmasıyla, indirekt ısıtma yüzeylerinin (duvar radyasyonu) etkinliğinin çok azaldığına dikkat edilmelidir. Gazın siyah cisim olarak radyasyon yaptığı $\epsilon = 1$ değerinde, duvar radyasyonu sıfıra düşmektedir. Haddelme tesislerinde kullanılan fırınlarda olduğu gibi, duvar radyasyonunun önemli olduğu fırınlarda, kesintili siyah radyasyon temini (Örneğin 5 dakika siyah radyasyon, 5 dakika ara) yararlı olabilmektedir. Siyah radyasyon sağlanması esnasında, fırın duvarlarında birikmiş ısı, ara verildiğinde ısıtılan parçalara geçer.



Şekil 5.16. Değişik yakıtlarda emisyon sayıları

Buna karşılık, Siemens-martin fırınlarından, kesintili siyah radyasyon karşı etik gösterir ve bundan dolayı, burada duvar radyasyonu geri planda düşünülür. Çünkü ergiyiğin yüzey sıcaklığı çok yüksektir ve daha fazla yüksek sıcaklıkta olduğunda fırın tavanı kısa zamanda tahrip olacağından, fırın tavanının eriyiğe göre pek az yüksek sıcaklıkta olması arzu edilir. Pek az sıcaklık farkı olan bu yüzey arasında, kalın bir duman gazı tabakası (yaklaşık 2 m) ile ayrılma olduğunda, radyasyon çok azalır.

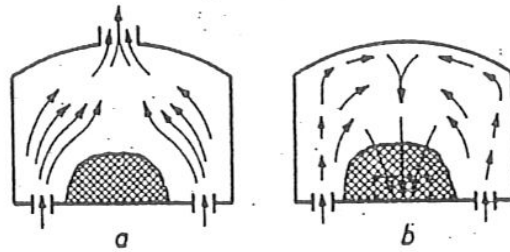
Yakıt çeşitlerine bağlı olarak, siyah radyasyon da farklı olur. Şekil 5.16 ϵ değerlerini, değişik yakıtlar için, yakıcıdan olan mesafeye bağımlı olarak vermektedir. ϵ değerleri, özel bir durum olarak, kok fırın gazında ışık veremeyen alev için yaklaşık sabittir ve yaklaşık 0.3 değerinde kalmaktadır. Doğal gaz, önceleri artmakta, yakıcıya yaklaşık 2 m mesafede en yüksek değere ulaşmakta ve yakıcıdan daha fazla uzaklaştığında düşmektedir. Akaryakıt, kömür destilasyonu ile elde edilen yakıt ve kömür tozu alevlerinde, siyah radyasyonla çok yüksek emisyon sayılarına (0.8 ilâ 1) ulaşılır. Şekilden de görüleceği gibi ve değeri, yanmanın sona ermesiyle hemen düşmekte, yani bu değer alevin formu, alevin seyri ve yanmasıyla ilgili olaylarla bağlı kalmaktadır. Birkaç yakıtta, gaz radyasyonunda % olarak siyah radyasyon payı, tablo 5.24'de verilmiştir.

Fırınlarda baca çıkış kanallarının, tabana yakın olarak yapılması da, parçaya ısı transferinin artmasına yardımcı olur. Şekil 5.28'de, baca çıkışının üstte ve altta olmasında, gaz hareketleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Baca çıkışı üstte olduğunda, sıcak gazlar, taşıdıkları ısının da etkisiyle, yukarıya doğru hareket ederler

ve bu esnada, parçaya temasları az olur. Buna karşılık baca çıkışı alta yerleştirilirse, bir taraftan sıcak gazlar yukarıya doğru hareket ederken, diğer taraftan bacadan dışarı çıkmak için, aşağıya doğru da gaz akımı olur. Fırın içerisinde gaz hareketi artacağından, baca çıkışının altta olması, daha yüksek ısı geçişi sağlayacaktır.

Yakıt	% olarak, gaz radyasyonunda siyah radyasyonun payı
Akaryakıt	35
Likid petrol gazı	25
Doğal gaz	10
Kok fırın gazı	0
Baca gazı	0

Tablo 5.24. Işık veren alevlerle gaz radyasyonunun artışı



Şekil 5.17. Baca çıkışının üstte (a) yada altta (b) olmasında, ısıtılan parça etrafındaki ve fırında gaz hareketi

Fırın içerisinde ısı hareketlerini belirlemek için, **ısı akışı ölçerler** geliştirilmiştir. Su kalorimetresi olarak da tanımlanan, ısı akışı ölçerde, U formunda bükülmüş borudan su geçirilir. Suyun, büküme girişi ve çıkış sıcaklıkları, hassas sıcaklık ölçerlerle saptanarak, fırın içerisinde nokta, nokta ısı geçme karakteristiği çıkarılabilir. Ayrıca, kondüktif yada termoelektriksel yöntemle çalışan, ısı akışı ölçerler de mevcuttur.

5.3.2.2. İndirekt ısıtmada ısı transferi

Metal ve seramik endüstrisinde, ısıtılan parçaların duman gazlarıyla, özellikle katı yakıtların yanmasıyla elde edilen duman gazlarıyla temas etmesine müsaade edilmediğinden, indirekt ısıtma tarzı uygulanır.

İndirekt ısıtmada, ısıtılacak parçaların içerisine konduğu ve sıcak duman gazlarıyla yada direnç elemanlarla dışından ısıtılan **hücre (muffel)** fırınlarla, içerisinden sıcak gaz geçen ve fırın hacmi içerisine döşenmiş olan, **radyasyon boruları** ile ısıtma arasında, sistem olarak fark vardır. Radyasyon boruları ile ısıtmada, bu borulardan radyasyon ısısı alınarak, parçalar ısıtılır. Hücre sisteminde ise, ısıtılacak parçalar,

sepet, kutu, pota yada hücre içerisinde bulunur. Duman gazları, bunların çevresinde dolaşır ve cidarları ile radyasyon alışverişi olur. Isıtılacak parça ile arada bir bölmenin olması, ısı transferini zorlaştıracığından, bu durum ısıtma tekniği açısından verimi azaltır. Durum, çok basitleştirilmiş olarak, şöyle açıklanabilir:

T_1 sıcaklığındaki bir yüzey ile T_2 sıcaklığındaki diğer bir yüzey arasında radyasyon alışverişi olur ve saatte geçen ısı miktarı, F yüzey alanı ve $C_{1,2}$ radyasyon katsayısı olduğuna göre:

$$Q = F \cdot C_{1,2} \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4$$

İki yüzey arasına, çok ince bir ara duvar (hücre duvarı) konursa, bunun sıcaklığı çok kısa bir zaman sonra T_m olur. Dış duvardan ara duvara radyasyonla geçen ısı miktarı, ara duvardan ısıtılacak parçaya radyasyonla geçen ısı miktarına eşit olur.

$$\frac{Q^l}{F \cdot C_{1,2}} = \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4$$

$$\frac{Q^l}{F \cdot C_{1,2}} = \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4$$

Her iki eşitlik toplanırsa:

$$Q^l = 0,5Q$$

Hücre içerisinde ilave olarak, konveksiyonla da ısı transferi olur ve böylece ısıtılan parçaya daha fazla ısı verilir.

Bu basit karşılaştırma da göstermektedir ki, ısıtılan parçaya radyasyonla ısı geçişi, ince bir hücre duvarından dolayı azalmaktadır. Hücre yada kap cidarları sonsuz incelikte olmayacağı, aksine belirli bir kalınlıkta olması zorunlu olduğundan, bu cidarların iç kısmı sıcaklığı, dış kısmına nazaran daha düşük olur ve ısı transferi de daha da azalır. Bu sıcaklık düşüşü, yalnızca cidar kalınlığına bağlı değil, ayrıca cidarın ısı iletme kabiliyetine de bağımlı olduğundan, çoğu zaman düşük ısı iletme

kabiliyetli şamot malzeme yerine, daha yüksek ısı iletme kabiliyetli silisyumkarbür yada metal gibi malzemeler kullanılır.

Bundan başka, hücre, pota, kutu ve sepetlerin ısıtılması için de, bir ısınma ısı verilmelidir ve yapılan işin tarzına göre, parçalarda ısıtma tamamlandığında fırından bu hücrelerle birlikte alınır, bu ısı tamamen yada kısmen kaybolur. Ayrıca, hücre inşası fırının dış boyutlarını büyüteceğinden; fırın için daha fazla yapı malzemesine ihtiyaç doğar. Hücre fırınlarının dış yüzeyleri, direkt ısıtılmalı fırınlara nazaran çok büyüyeceğinden, duvar kaybı da daha büyük olur. Diğer taraftan, düşük sıcaklıklarda, parça üzerine ısı transferinin radyasyon payı çok düşüktür. Eğer fırın atmosferi de hareketsiz olursa, konveksiyonla ısı geçişi de azalacağından, ısı transferi çok düşük olur. Bundan dolayı, hücre içindeki gazlara (örneğin koruyucu gaz) hareket kazandırılarak, konveksiyonla ısı transferi arttırılmaktadır. Bunun için, hücre içerisinde radyal yada aksiyal vantilatör gereklidir. Çelik sac hücreli fırınlarda (pişirme ve kurutma fırınları), gerekli dolaşım sağlanarak, her iki cidar yüzeyinin sıcaklığı, yanma gazları sıcaklığından büyük sapma yapmayacak duruma getirilir. Bu amaçla, bir vantilatör yardımıyla, duman gazı geri dolaşımı da uygulanabilir.

Çoğu zaman, temizlenmiş gaz formundaki yakıtların (kok fırın gazı, havagazı) kullanılmasıyla, çelik ve seramik endüstrisinde de, hücre olmaksızın çalışılması ve böylece yakıt tasarrufu olanaklıdır. Kaliteli seramik endüstrisinde, duman gazları, üretimi etkiler. Sır içerisinde yada üretilen maddelerde demiroksit mevcut ise, renk vermeyen demiroksidi redüklemek için, eksik hava ile çalışılır. Buna karşılık, kurşun ihtiva eden sır kullanılırsa, kurşun oksidin redüklenmemesi için, hafif oksidleyici atmosfer gereklidir. Duman gazları yüksek oranda kükürt bağlantıları ihtiva ettiğinde, sır üzerine çok zararlı etkileri vardır. Oksidleyici yada redükleyici atmosferin ayarlanmasında aşırı masraflardan kaçınmak gerektiğinden, gaz formundaki yakıtların kullanılması ve hava miktarının tam ayarlanması yapılarak, yakıtı fiatı düşürülebilir. Ayrıca, kükürt bağlantıları da (daha çok kok fırın gazında ve havagazında bulunabilir) eser (çok az) miktarda bulunduğu, büyük yarar sağlar. Fakat, temizlenmiş gaz formunda yakıtlar da kullanılsa bile, duman gazlarını ihtiva ettiği su buharı ve karbondioksitin parçalanmasıyla teşekkül eden oksijen, duman gazlarının parçaya temasında oksidasyon yapabilir. Bundan dolayı, çeliklerin ısı işlemlerinde, indirekt ısıtma ile koruyucu gaz kullanılması gereklidir.

Fırın hacminin indirekt ısıtılması, elektrik direnç elemanları ile, buhar boruları ile (hatta Ferkins boruları), yağ borusu radyasyonu ile, infraruj elemanlar ile ve radyasyon boruları ile yapılabilir.

5.3.3. Parçanın ısınma süresi

Fırın hacmi içerisinde, parçanın dış yüzeyinden ısı verildiğinde, parçanın sıcaklığı belirli bir değere ulaşır. Parça çekirdeğinde arzu edilen sıcaklığa, hangi zaman sonunda ulaşabildiği bilinmek istenir.

Eğer parça, dıştan verilen ısının içeriye kolaylıkla nüfuz edebildiği ve cidar ile çekirdek arasında sıcaklık farkının fazla olmadığı, metal plaka yada ince cidarlı parça ise, ısınma süresinin saptanması oldukça kolaydır. Bu durumda, G (kg) ağırlığındaki parçanın, fırın içerisinde t_1 ($^{\circ}\text{C}$) başlangıç sıcaklığından, arzu edilen t_2 ($^{\circ}\text{C}$) sıcaklığına ulaşması için gerekli olan süre Z(h):

$$Z = \frac{G \cdot c}{F \cdot \alpha_{top}} \cdot \ln \frac{t_f - t_1}{t_f - t_2} \quad (\text{h}) \quad (5.40)$$

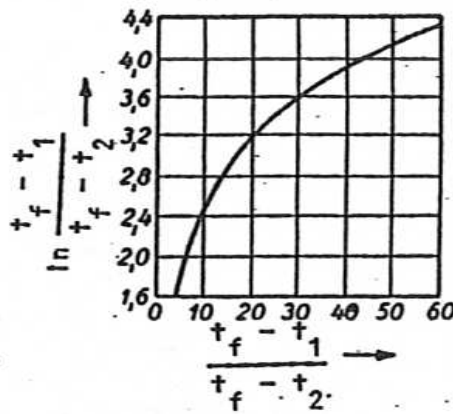
Burada c (kJ/kg . K) ısınan parçanın özgül ısısını, F(m²) parçanın ısı alan yüzeyinin alanını belirtir. t_f ($^{\circ}\text{C}$) fırın sıcaklığı ve α_{top} fırından parçaya geçen ısı için, toplam ısı geçme katsayısıdır. Isı geçiş katsayısının SI birim sisteminde birimi W/m² . K'dır, ancak özgül ısı kJ/kg . K olarak alındığından, ısı geçiş katsayısı da kJ/m² . h . K birimine dönüştürülmelidir. Bu değer, parçanın sıcaklığına bağlıdır ve ısınma süresinde de sürekli olarak artar. Bundan dolayı, ortalama sıcaklık t_m ($^{\circ}\text{C}$) hesaplanır.

$$t_m = t_f - \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{t_f - t_1}{t_f - t_2}} \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (5.41)$$

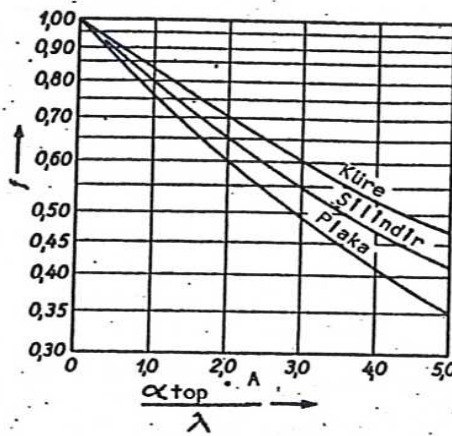
Şekil 5.17'den, yukarıdaki eşitlikte bulunan

$$\frac{t_f - t_1}{t_f - t_2}$$

değerinin tabii logaritması okunabilir.



Şekil 5.18. Isıtma süresinin hesaplanmasında yararlanılan diyagram



Şekil 5.19. Çeşitli formda parçaların ısınma sürelerinin hesaplanmasında yararlanılan diyagram

Önce şekil 5.18'den, logaritmik değer alınır ve (5.41) eşitliğinden t_m hesaplanarak, buna göre α_{top} belirlenir. Bu değerlerden yararlanılarak da (5.40) eşitliğinden, ısınma süresi hesaplanır.

Genellikle, t_f sıcaklığındaki fırına, t_1 sıcaklığında konulan parçanın çekirdeğinin, belirli bir Z süresi sonunda, hangi sıcaklığa ulaştığı da aranır. Küçük zaman aralığı dZ süresinde, dQ kadar ısı verildiğinde, parçanın sıcaklığı da dt kadar yükselir. Buna göre:

$$dQ = \alpha_{top} \cdot F \cdot (t_f - t) dZ$$

Parçanın ağırlığı G ve özgül ısısı c olduğuna göre:

$$dQ = G \cdot c \cdot dt$$

Bu iki bağıntıdan yararlanılarak:

$$\frac{dt}{t_f - t} = \frac{\alpha_{top} \cdot F}{G \cdot c} dZ \text{ bulunur.}$$

$t = t_1$. t_2 ve $dZ = 0$, $dZ = Z$ aralığında integrasyonla

$$\frac{t_2 - t_1}{t_f - t_1} = 1 - e^{-\frac{\alpha_{top} \cdot F}{G \cdot c} Z}$$

$e = 2.718$ tabii logaritma tabanıdır .

5.4. Isı Kayıpları

Fırın içerisinde bulunan ısı, fırın duvarının iç yüzeyinden duvara geçerek, kısmen duvarların ısınmasıyla, kısmen de dış duvara geçerek dış duvardan çevreye yayılarak kaybolur. Çevreye yayılan ısı, **duvar kaybı** ve duvarların ısınmasında kullanılan ısı **ısınma kaybı** olarak adlandırılır. Ayrıca, fırında bulunması gerekli, gözlem deliği ve benzeri aralıklardan da radyasyonla ısı kaybı şeklinde, **aralık kaybı** meydana gelir. Bundan başka, fırına ısıtılacak malzemelerin doldurulup boşaltılması esnasında açılıp kapatılan fırın kapaklarından da **kapak açma kapama kaybı** doğar. Bu son kayıpta da, ısı radyasyonla kaybolduğu için, hesaplama aralık kaybına benzer şekilde yapılır. Ancak, aralıklardan, fırının çalışması esnasında sürekli ısı kaybı olurken, kapaklardan yalnızca açma-kapama süresi içerisinde ısı kaybedildiğine dikkat edilmelidir. Yakıtların yakılmasıyla elde edilen ısıda, duman gazlarının fırın dışına atılmasında, bacadan atılan ısı olarak **baca kaybı** meydana gelir.

Kayıpların hesaplanmasında, kayıpları meydana getiren durumlar göz önünde tutularak hesaplama yapılır. Örneğin, fırın soğuk halden ısıtılmaya başlandığında, duvarlara verilen ısının bir kısmı duvarları ısıtırken, bir kısmı dışarıya giderek artar. Duvarlar tam ısındığında, ısınma kaybı sıfır olur, fakat duvarlardan dışarıya iletilen ısı miktarı, fırın rejim halinde çalışmaya devam ettiğinde, sürekli olarak kaybolur. Dolayısıyla, hesaplamanın fırının ısıtılması ve rejim hali için, ayrı ayrı yapılması zorunludur.

5.4.1. Duvar kayıpları

Fırın duvarlarının dış yüzeyleri, ortam sıcaklığından daha yüksek sıcaklıktadır. Ortam havası, tabii konveksiyonla bu yüzeylerden ısınır ve bu ısı miktarı:

$$Q = F \cdot \alpha_{dd} (t_{dd} - t_o) \text{ J/h}$$

Burada: F = Fırın dış yüzey alanı, m^2

α_{dd} = Isı geçiş katsayısı, $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$

t_{dd} = Dış duvar sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

t_o = Ortam sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

Fakat, radyasyonla da ısı kaybı olacağı için, gerçekte kaybolan ısı, yukarıda belirtilen konveksiyonla ısı kaybından daha yüksek değerdedir. Ancak, dış duvar sıcaklığı, genellikle düşük olacağından, hesaplamanın yalnızca konveksiyonla ısı kaybı olarak yapılması, büyük bir hata doğurmaz. Birim yüzeyden kaybolan toplam ısı, şu şekilde hesaplanabilir:

$$Q_{dd} = \alpha_{dd} (t_{dd} - t_o) \text{ J/m}^2 \cdot \text{h} \quad (5.42)$$

Burada, Q_{dd} dış duvar ısı geçiş katsayısıdır ve şöyle hesaplanabilir:

Düşey duvarlar için:

Tuğla ve çelik saç kaplı duvarlarda ($\varepsilon = 0,8$)

$$\alpha_{dd} = 7.0 + 0.057 t_{dd} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (5.43)$$

Alüminyum boya ile boyanmış duvarlarda ($\varepsilon = 0,5$)

$$\alpha_{dd} = 6.30 + 0.040 t_{dd} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (5.44)$$

Yatay duvarlar için:

Tuğla ve çelik saç kaplı duvarlarda ($\varepsilon = 0.8$)

$$\alpha_{dd} = 9.4 + 0.057 t_{dd} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (5.45)$$

Alüminyum boya ile boyanmış duvarlarda ($\epsilon = 0.5$)

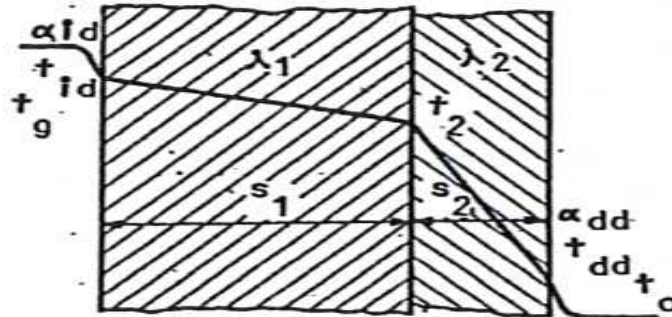
$$\alpha_{dd} = 8.6 + 0.040 t_{dd} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (5.46)$$

5.4.1.1. Sürekli çalışan fırınlarda ısı iletimi

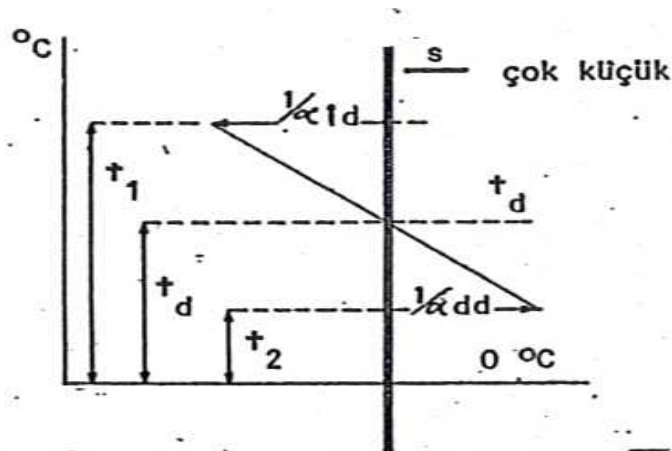
Duvarda ısı transferi, duvarın iç ve dış yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkına ($t_{id} - t_{dd}$), duvar kalınlığına (s) ve ısı iletme katsayısına (λ) bağlıdır. Duvar yüzey alanı (F) olduğuna göre, sürekli çalışmada duvardan geçen ısı miktarı:

$$Q = F \cdot \alpha_{dd} \cdot (t_{id} - t_{dd}) \quad (5.47)$$

Refrakter malzemeler ve bazı metaller için, sıcaklığa bağımlı olarak, ısı iletme katsayıları tablolarda verilmiştir. Hesaplama, sıcaklığa bağlı olarak, ortalama değerlerin alınması yeterlidir. Tam değer hesaplaması ancak grafik yöntemle yapılabilir.



Şekil 5.20. İki tabakalı fırın duvarı



Şekil 5.21. İnce duvarda, duvar sıcaklığının, çizimle bulunması

Şekil 5.20'de, s_1 kalınlığında refrakter malzeme ve s_2 kalınlığında izolasyon malzemesinden oluşan, bir duvar görülmektedir. Duvar kaybı olan Q ısı miktarı, duvar iç yüzeyinde radyasyon ve konveksiyon ile alınır, düzenli bir akımla duvarın dış yüzeyine geçer. Burada:

$$Q = F \cdot k \cdot (t_g - t_o) \text{ J/h} \quad (5.48)$$

$t_g =$ Fırın içerisinde gazların sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

$k =$ Isı geçiş katsayısıdır ve değeri :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_{id}} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{1}{a_{dd}}} \quad (5.49)$$

Isı iletme katsayısı (λ)'nın, çok büyük olduğu, ince duvarlarda ise:

$$k = \frac{a_{id} \cdot a_{dd}}{a_{id} + a_{dd}} = \text{W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (5.50)$$

Eğer metal duvarlarda olduğu gibi s/λ çok küçük ise, dış duvar sıcaklığı t_{dd} şekil 5.21'de görüldüğü gibi, çizimle bulunabilir.

Şekil 5.20'de, s_1, s_2, \dots duvardaki değişik tabakaların kalınlıklarını, $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ değişik tabakalarda ısı iletme katsayılarını ve α_{td}, α_{dd} ısı geçiş katsayılarını verdiği göre:

$$Q = F \cdot \alpha_{td} (t_g - t_{td})$$

$$Q = F \cdot \frac{\lambda_1}{s_1} (t_{td} - t_2)$$

$$Q = F \cdot \frac{\lambda_2}{s_2} (t_2 - t_{dd})$$

$$Q = F \cdot \alpha_{dd} (t_{dd} - t_o) \quad (5.51)$$

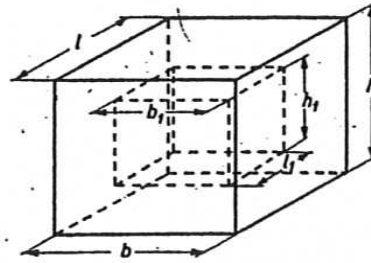
Bu bağıntılardan yararlanmak suretiyle, Q ısı miktarı (duvar kaybı) birçok yolla belirlenebilmektedir. Gaz sıcaklığı t_g 'ye bağlı olarak, α_{td} biliniyorsa, yada

hesaplanabilirse, dış duvar sıcaklığı t_{dd} ve buna uygun ısı geçiş katsayısı α_{dd} kabul edilir. (5.49) formülünden k ve (5.48) formülünden Q değeri hesaplanır. Bulunan Q değeri, (5.51) formüllerinden ikincisinde yerine konarak, t_{td} hesaplanır. Üçüncü formülden t_2 ve son formülden de t_{dd} bulunabilir. Bulunan t_{dd} sıcaklığı, daha önce kabul edilenle uyuşuyorsa, hesaplama iyidir. Uyuşmama halinde, yeni bir kabul ile hesaplama yenilenir. Uyuşma sağlanana kadar, yeni kabuller yapılır.

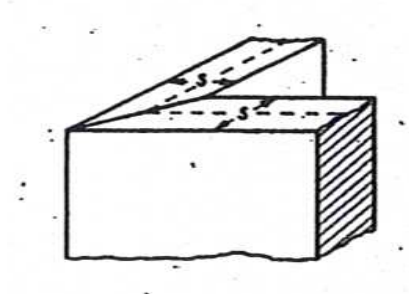
5.4.1.2. Kenar ve köşelerde duvar kaybı

Fırın duvarları sonsuz uzun boyda, yada karşılıklı sonsuz paralel olamayacağından, duvar köşeleri duvar kaybı üzerine önemli etki yapar. Fırınlar kutu formunda (Şekil 5.22) yada silindirik fırında yapılırlar. Şekil 5.23'de, iki duvarın birleşmesini ve kenar oluşmasını göstermektedir. Isının kaybolduğu yada geçtiği mesafe kenarlarda artacak ve yol boyu s/V olacaktır. Yol boyunun artması, ısı geçmesi için olan direnci arttırır, dolayısıyla duvar kayıpları daha azdır. Üç duvarın birleştiği köşelerde yol daha da uzundur. Normal yöntemle hesaplanan her m^2 için duvar kaybıyla, fırın toplam dış yüzeyin çarpılması ile bulunan kayıp, gerçeğe nazaran oldukça yüksektir. Fırın ne kadar küçükse, gerçek kayıplara göre olan fark değeri o kadar fazladır. Bu nedenle yüzey hesaplanmasında, fırın dış boyutları $h \cdot b$ ve l (Şekil 5.22) ve iç boyutları $h_1 \cdot b_1$ ve l_1 olduğunda, ortalama boyutlara,

$$\frac{h + h_1}{2} \cdot \frac{b + b_1}{2} \text{ ve } \frac{l + l_1}{2}$$



Şekil 5.22. Kenar ve köşelerin duvar kaybına etkisi



Şekil 5.23. Kenarların duvar kaybına etkisi

5.4.2. Isınma ısısı ve kesintili çalışmada duvar ısı kayıpları

Fırınlarda kesintili çalıştırılmasında, tamamen soğumuş fırının yeniden rejime alınması esnasında, gerek duvardan kaçan ısı miktarının, gerekse duvar malzemesinin ısınması için sarf edilen ısınma ısısının birim zaman için hesaplanması oldukça zordur. Bu nedenle, pratikte daha çok yaklaşık hesapla sonuca ulaşılmaya çalışılır.

Fırının ilk ısınmasında duvardan kaçan ısı miktarının yaklaşık hesaplanması için, önce sürekli çalışmada duvardan saatte kaçan ısı miktarı bulunur. Duvarların ısınma süresi tahmin edilerek yada ölçülerek, ısınma süreci içerisinde her bir saat için kaçan ısı miktarı, sürekli çalışmadaki değerin yüzdesi olarak belirlenmeye çalışılır. Endüstri fırınlarında çok kullanılan şamot duvarlar için, izolasyonsuz ve izolasyon yapılmış halde, ısınma süresine bağlı olarak, her bir zaman dilimindeki ısı kaybı değerleri değişik duvar kalınlıkları için şekil 5.24’de verilmiştir.

Fırının ilk ısınmasında, duvarların ısınma ısısının hesaplanması da, duvardan kaçan ısı miktarına benzer yapılır. Fırın tam ısındığında duvarların ısıtılması için gereken toplam ısı hesaplanır ve her bir zaman dilimi için, ısınmada yüzde değerler tespit edilmeye çalışılır.

Duvar kalınlığı s (m), duvar malzemesinin özgül ısısı c (kJ/kg.K) ve özgül ağırlığı γ (kg/m³) olan bir duvarda, ısıtmaya başlandığı sıcaklık t_0 olduğuna göre, tam ısınmış durumda ısınma kaybı:

$$q_1 = s \cdot \gamma \cdot c \left(\frac{t_{id} + t_{dd}}{2} - t_o \right) \text{kJ/m}^2 \quad (5.52)$$

Eğer duvar, özgül ısıları c_1 ve c_2 , özgül ağırlıkları γ_1 ve γ_2 kalınlıkları s_1 ve s_2 ve iki tabaka arası sıcaklığı t_1 olan iki tabakadan meydana geliyorsa, tam ısınmada ısınma ısısı

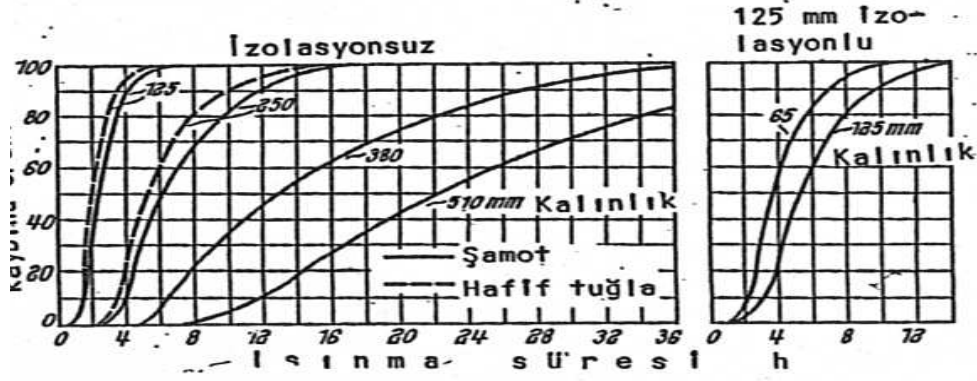
$$q_1 = s_1 \cdot \gamma_1 \cdot c_1 \left(\frac{t_{id} + t_1}{2} - t_o \right) + s_2 \cdot \gamma_2 \cdot c_2 \left(\frac{t_{id} + t_1}{2} - t_o \right) \text{ kJ/m}^2 \quad (5.53)$$

olarak hesaplanır. (5.52) ve (5.53) formüllerindeki c özgül ısı değerleri, malzemelerin ortalama sıcaklığına göre tablo 5.25'den alınır.

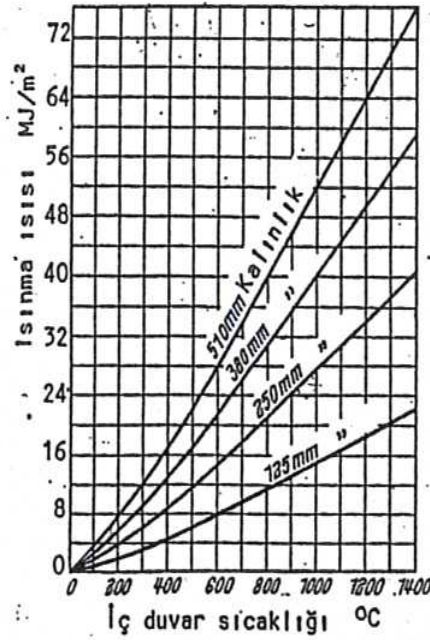
Malzeme	c özgül ısı kJ/kg.K					
	0°C	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
Şamot tuğla	0,775	0,854	0,929	0,996	1,055	1,096
Silika tuğla	0,779	0,852	1,000	1,034	1,067	1,096
Magnezit tuğla	0,867	0,942	1,063	1,114	1,109	1,096
Silisyumkarbür	0,712	0,808	0,908	0,983	1,034	1,08
Grafit	0,712	0,929	1,143	1,298	1,407	1,503
Çelik	0,439	0,477	0,523	0,569	0,657	0,670 x)
Bakır	0,368	0,389	0,406	0,414	0,423	0,431
Alüminyum	0,867	0,929	0,98	1,034		
Kleselgur	0,81	0,837	0,864	0,891	Demir 911°C'de modifitazlor meydana getirir. Dönüşüm ısısı 15,9 kJ/kg	
Diğer izole mad.	0,888	0,908	0,938	0,97		

Tablo 5.25. Fırınlarda yapı malzemesi olarak kullanılan malzemelerin özgül ısı değerleri

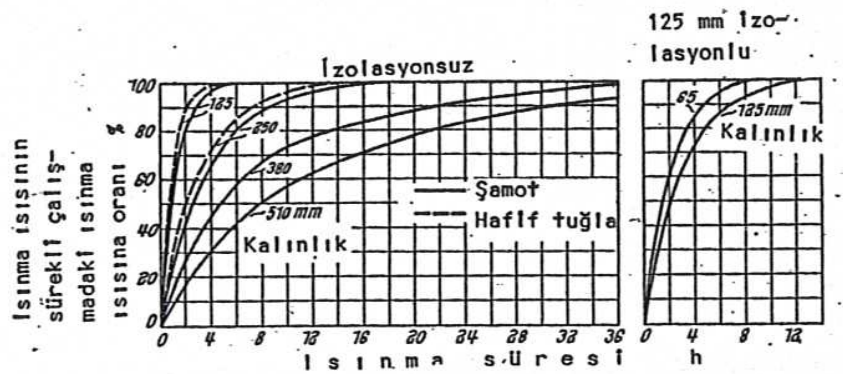
Şamot duvarlar için, duvar kalınlığı ve iç duvar sıcaklığına bağlı olarak, ısınma kaybı değerleri şekil 5.25'de verilmiştir. Yaklaşık hesaplamada, şamot duvarlar için duvarın izolasyon durumu ve kalınlığına göre ısınma süresine bağlı olarak hangi zaman diliminde ısınma kaybının ne oranda olacağı da şekil 5.24'de görülmektedir. Şekil 5.24, 5.25 ve 5.26 fırının ilk ısınmasında ısı kayıpları ve fırına birim zamanda verilmesi gereken enerji miktarının saptanmasında kullanılır



Şekil 5.24. Şamot ve hafif tuğlalarda fırının ilk ısınmasında zamana bağlı duvar kayıplarının, sürekli duvar kaybına oranı

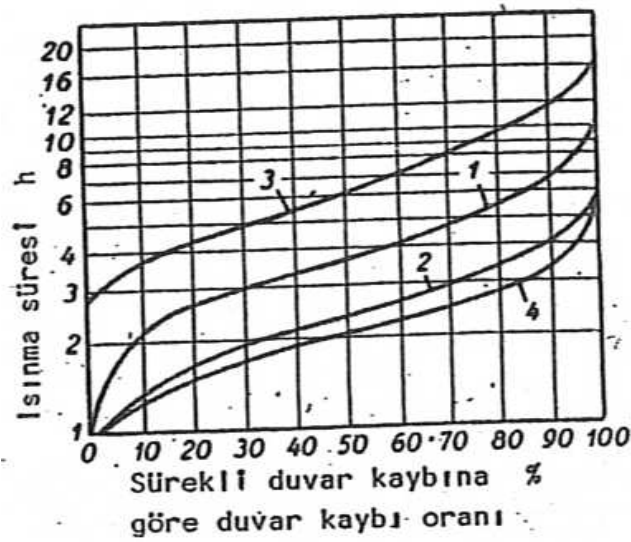


Şekil 5.25. İzolasyonsuz şamot duvarlarda tam ısınmış halde, duvarın ihtiva ettiği ısınma ısısı

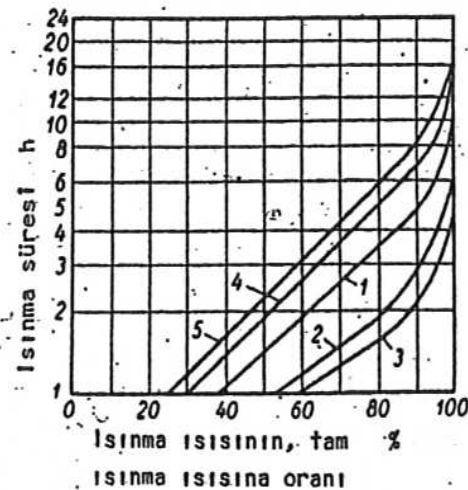


Şekil 5.26. Şamot ve hafif tuğlalarda, fırının ilk ısınmasında zamana bağlı ısınma ısısının, tam ısınmış haldeki ısınma ısısına oranı

Hafif tuğlanın kullanılmasında, toplam ısı kaybı normal izolasyonsuz şamota nazaran ısı kaybının %40 değerine düşmektedir. Hafif şamot bu sıcaklıklarda kullanıldığında ömrü oldukça uzundur ve normal şamota nazaran daha ucuzdur. Normal şamot izolasyonlu kullanıldığında, kesintili çalışmada kayıp hafif tuğlaya nazaran daha büyük olmaktadır. Ancak sürekli çalışmada, ilk ısınmadaki ısınma kaybının etkisi çok azalacağı, hatta çok uzun süreler için ihmal edileceği için, izolasyon yapılması yararlıdır.

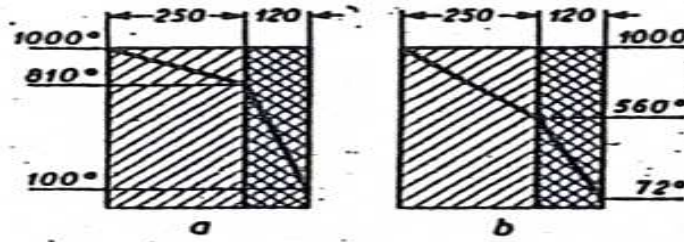


Şekil 5.27. Helligenstaedt'e göre ısıtma başlangıcından itibaren duvar kaybının, sürekli duvar kaybına oranı



Şekil 5.28. Helligenstaedt'e göre ısıtma başlangıcından itibaren ısıtma ısıısının, tüm ısınmış duvardaki ısı miktarına oranı

Şekil 5.27 ve 5.28’de, daha önce şekil 5.24 ve 5.26’da verilen ısı oranları Helligenstaedt’e göre tekrar verilmiştir. Özellikle ısıtmanın ilk saatlerindeki yüzde ısı oranlarının bu diyagramlardan alınması, daha sağlıklı hesaplama yapılmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.29. Şamot ve hafif şamotları yapılan iki izolasyonlu duvarda duvar sıcaklıkları

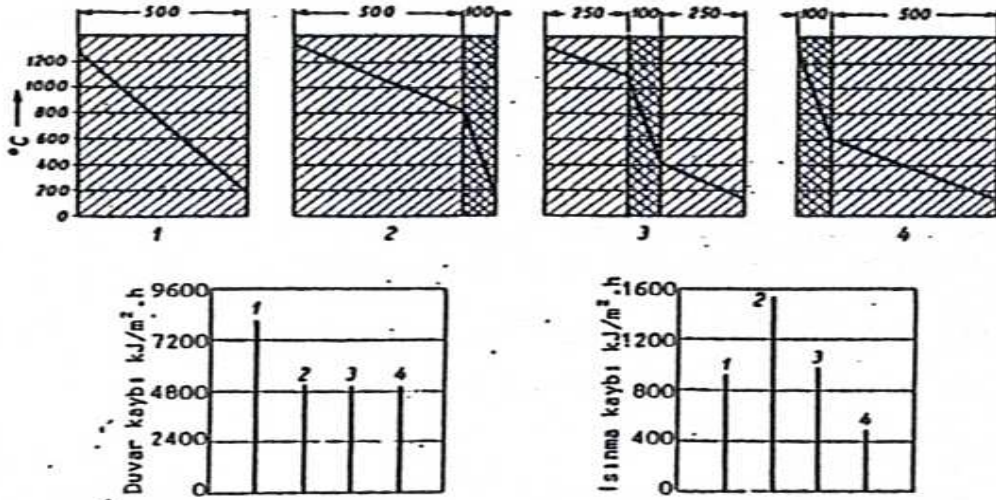
Fırın duvarlarında, normal şamot yerine, hafif şamot kullanılması birçok yarar sağlamaktadır. Hafif şamot tuğlalarda sürekli duvar kaybı ve ısınma ısısı daha düşüktür. İki duvar tarzının karşılaştırılması için şekil 5.27’de bir örnek verilmiştir. a duvarı normal şamot (özgül ağırlığı 850 kg/m^3), b duvarı ise hafif şamot tuğla (özgül ağırlığı 750 kg/m^3) ve aynı izolasyon tuğlasından yapılmıştır.

Bu iki duvar tarzında, ısı kayıpları hesaplanırsa;

	250 mm şamot ve 120 mm izolasyon	250 mm hafif şamot 120 mm izolasyon
Sürekli çalışmada duvar kaybı $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{h}$	2275	1630
Tam ısınmada ısınma kaybı kJ/m^2	462000	165000
Isınma süresi.....h	31	23
Dış duvar sıcaklığı $^{\circ}\text{C}$	100	72

Hafif şamot tuğla kullanılması, duvar kaybını ve ısınma kaybını azaltmakta, ayrıca dış duvar sıcaklığını da düşürmektedir. Ancak, hafif şamot, normal şamot gibi çok yüksek sıcaklıklarda kullanılamaz. Ayrıca fırının çabuk soğuması isteniyorsa, normal şamot tercih edilmelidir. Duvarlarda izolasyon yapılması duvar kayıplarını önemli ölçüde azaltır. İzolasyon tabakasının iç duvara, duvar ortasına yada alışıldığı gibi dış duvara yerleştirilmesi, duvar kayıplarını etkilemez. Ancak, ısınma ısısı uygulamaya

göre değişir ve en büyük değer dış duvara yerleştirildiğinde olur. Şekil 5.30'da, bu duruma örnek verilmiştir.



Şekil 5.30. İzolasyonun duvar kaybı ve ısınma kaybına etkisi

5.4.3. Aralık ve kapak açma-kapama kaybı

Endüstri fırınlarında gözlem deliklerinden, açık kalan kapı aralıklarından, ateşleme deliklerinden ve benzer sıcaklıklardan radyasyonda ısı kaybı olur. Ayrıca, kapak açma kapama arasında geçen kısa sürede de önemli ölçüde ısı kaybedilir.

Radyasyonla kaçan ısı, mutlak siyalı cismin radyasyon katsayısı C ile saptanabilir. Hatta açıklık çok büyük olduğunda, radyasyon sayısının büyük hata yapılmaksızın tam belirlenmesi de mümkündür. Örnek olarak açık duran kapakta $c = 18,8 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$ alınabilir. Bir sıcak fırın hacminin, ısıtılmamış tabanla yada diğer cisimlerle radyasyonunda $C = 16 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$ alınabilir.

Radyasyonla kaçan ısı miktarı:

$$Q = F \cdot C \cdot \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\} \text{ kJ/h} \quad (5.54)$$

Q – Saatte aralıklardan yada kapak açma-kapamadan kaçan ısı miktarı kJ/h

F – Açık yüzey alanı m^2

T_1 - Fırın hacmi sıcaklığı K

T_2 – Ortam sıcaklığı K

5.4.4. Baca kaybı

Elektrikle ısıtılan fırınlarda baca kaybı yoktur, buna karşılık kömür, akaryakıt yada gazın yakılması ile ısıtılan fırınlarda, üretilen ısının büyük bir kısmı baca gazları ile dışarı atılır. Baca gazlarının ihtiva ettiği ısı, fırını terk ettiği sıcaklığa ve gaz analizine bağlıdır. Gaz sıcaklığı, genellikle fırın sıcaklığının üzerinde yada en az fırın sıcaklığındadır. Baca gazlarının analizi ise yakıt cinsine, yanma için kullanılan havanın sıcaklığına ve miktarına bağlıdır. İstenirse, gazı meydana getiren karışımların ısı değerleri ve karışım oranından giderek, baca gazının ihtiva ettiği ısı miktarı hassas olarak hesaplanabilir. Fırında kullanılan yakıt miktarı, baca kaybı ile birlikte diğer ısı kayıplarının ve faydalı ısı toplamının, yakıtın ısı değerine bölünmesi ile bulunur. Kullanılan yakıt miktarı önceden bilinmediğinden, baca kaybının da tam belirlenmesi olanaksızdır. Diğer taraftan, baca gazlarının ihtiva ettiği ısı miktarı fırına verilmesi gereken enerji için gereklidir.

5.5. Faydalı Isının Hesaplanması

Fırın içerisinde ısıtılan parçaların, fırına konuldukları sıcaklık $t_1(^{\circ}\text{C})$, bir saat ısındıktan sonra ulaştığı sıcaklık $t_2(^{\circ}\text{C})$, t_1 sıcaklığında özgül ısı c_1 (kJ/kg . K) ve t_2 sıcaklığında özgül ısı c_2 (kJ/kg.K), ağırlığı G (kg) ise, bir saatte verilen ısı miktarı:

$$Q_r = G (t_2 \cdot c_2 - t_1 \cdot c_1) \quad (\text{kJ/h}) \text{ olur.} \quad (5.55)$$

Refrakter ve birkaç metal malzeme için, özgül ısı c değerleri, tablo 5.28'de verilmiştir. Tablo 5.29'da, endüstride kullanılan önemli metal ve alaşımlarının, tuz banyolarında kullanılan tuz çeşitlerinin özgül ısı c değerleri ve belirli sıcaklıklarda ihtiva ettikleri ısı miktarı verilmiştir. Faydalı ısının hesaplanmasında, istenirse özgül ısı ve sıcaklık değeri çarpımları yerine, ihtiva ettikleri ısı değere f (kJ/kg) kullanılarak, hesaplama basitleştirilebilir. Tablo 5.26 ve 5.27'da ayrıca, ergitme ısıları, ergime sıcaklıkları ve ergiyik halde özgül ısı değerleri de verilmiştir. İhtiva ettikleri ısı miktarı f değeri, tablolarda 0°C sıcaklığına göre hesaplanarak verilmiştir. Ayrıca, tablo 5.26 ve 5.27'da önemli malzemelerin ısıtılmasında ısı değerleri ve ihtiva ettikleri ısı miktarları, sıcaklığa bağımlı olarak verilmiştir.

Malzeme Çeşidi	Özgül ağırlık kg/1	Ergime noktası °C	Ergime ısısı kJ/kg	Ortalama özgül ısı kJ/kg.K		
				20°C	100°C	800°C
Alüminyum	2,7	628	355,9	0,888	0,908	0,988
Kurşun	11,4	328	23,9	0,126	0,130	-
Cam	3,0	1200	-	0,712	0,754	0,963
Tahta	2,3	-	-	-	2,721	-
Bakır	8,9	1083	209,3	0,381	0,385	0,410
Pirinç	8,5	900	180,0	0,377	0,381	0,415
Porselen	2,3	1550	-	0,795	0,879	1,088
Çelik (Yumuşak)	7,86	1530	2272,1	0,461	0,465	0,553
Çelik (%% 1,2 C)	7,85	1500	251,2	0,473	0,494	0,586
Dökme Demir	7,6	1200	-	0,502	0,544	0,586
Kalay	7,28	232	58,6	0,226	0,230	-
Çinko	7,13	420	112,2	0,381	0,389	0,419

Tablo 5.26. Önemli malzemelerin ısıtılmasında ısıl değerler

Sıcaklık C	İhtiva ettikleri ısı miktarı kJ/kg				
	Çelik	Alüminyum	Pirinç	Kalay	Çinko
0	0	0	0	48,57	0
100	47,73	90,02	36,84	23,45	39,36
300	151,56	285,12	115,97		123,09
500	271,30	502,42	203,49		324,06
800	571,50	1222,5	392,99		
1000	712,59		621,74		
1200	856,62				

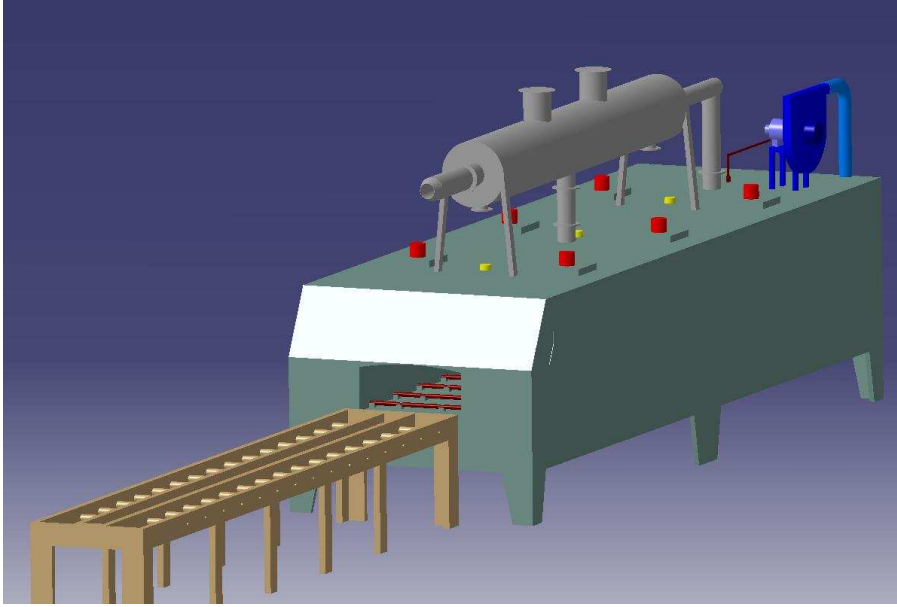
Tablo 5.27. Önemli malzemelerde sıcaklığa bağımlı olarak ihtiva ettikleri ısı miktarları

Açıklama: Çizgilerin altındaki değerler ergiyik hal içindir.

BÖLÜM 6. TEORİK MODEL, FIRININ BOYUTLANDIRILMASI VE TERMAL ANALİZ

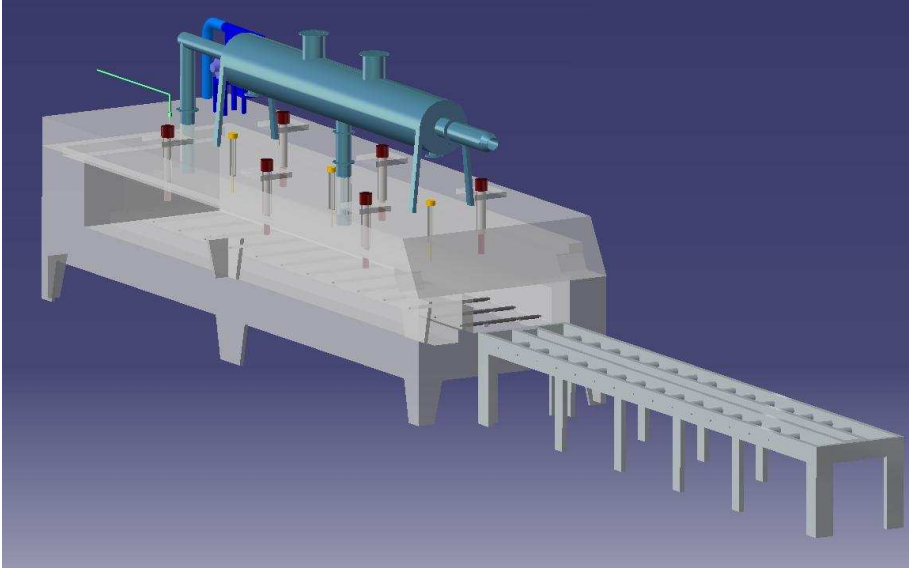
6.1. Isıl İşlem Fırını Katı Modellenmesi

Bu ısıl işlem fırınının katı modellenmesi birebir ölçülerinde CATIA programında çizilerek oluşturulmuştur. Ayrıca teknik resimi , montajı , demontajı kolaylıkla görülebilmektedir.



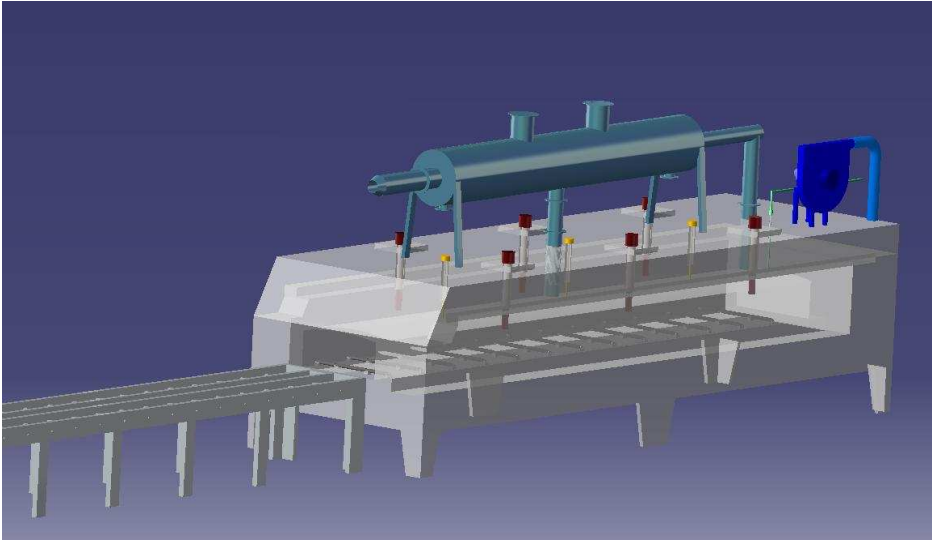
Şekil 6.1 Isıl işlem fırını katı modeli

Catia programında Sketch ve Product menüleri kullanılarak üstteki model çıkartılmıştır.

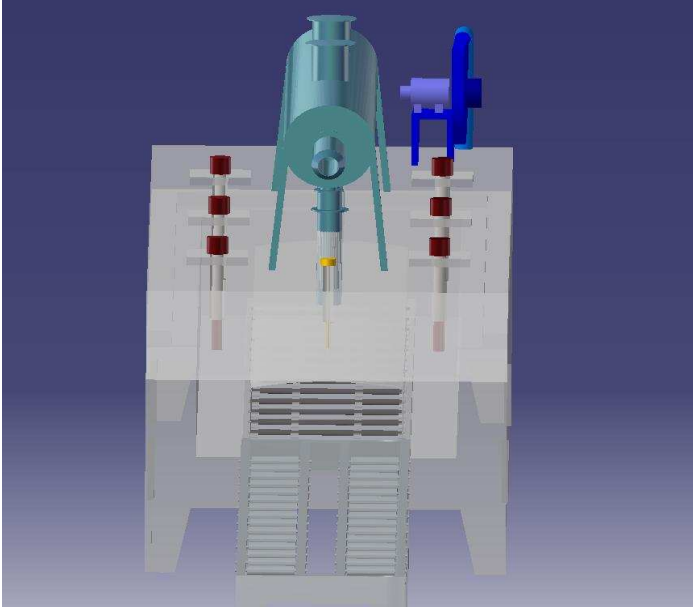


Şekil 6.2. Isıl işlem fırını katı modeli

Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de fırının iç kısmında şeffaf olarak gözükmektedir.

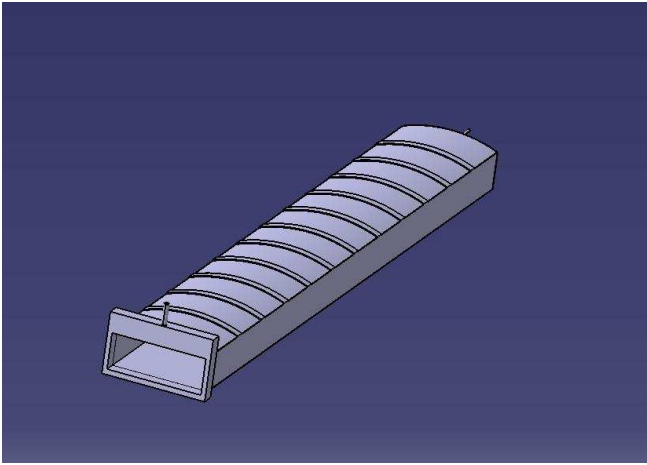


Şekil 6.3. Isıl işlem fırını katı modeli

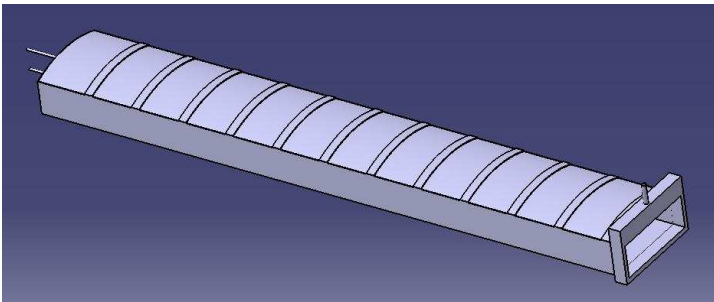


Şekil 6.4. Isıl işlem fırını katı modeli

Yukarıdaki şekilde kırmızı renkli 6 adet brülör; sarı renkli 3 adet termokupul, yeşil renkli fırın bacası ve mavi renkli fan belirtilmiştir.

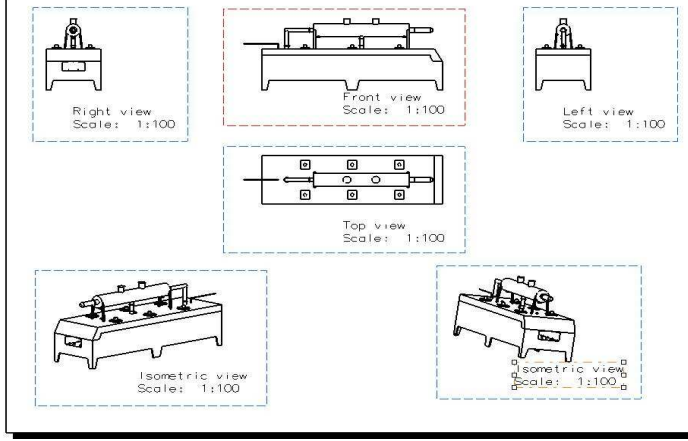


Şekil 6.5. Isıl işlem fırını muffle



Şekil 6.6. Isıl işlem fırını muffle

Boruların içerisinde tutulduğu Muffle denilen sepetin 3boyutlu şekli yukarıdaki gibidir.



Şekil 6.7. Isıl işlem fırını teknik resim

Fırının ön-üst-sağ-sol görünüşleri ve 3 boyutlu şekli yukarıdaki gibidir.

6.2. Tünel Tipi Boru Gerilme Giderme Fırını Teknik özellikleri

1.Kapasite 2 ton(Bu kapasite dış çap 16mm-iç çap 12mm olan referans malzeme içindir. Daha büyük ve daha küçük borularda bu kapasite büyür veya küçülür.)

2.Ölçüler

Fırın toplam uzunluğu: 7500mm

Fırın toplam genişliği: 2360mm

Tesis uzunluğu: 15000mm

Tesis bölümleri:

—Yükleme: Döner rulolu

—Fırın: Muffle içi döner makaralı sistem

Yükleme genişliği: 900mm

Muffle genişliği: 1050mm

3.İsıtma (doğalgaz) Homojen ısıtma için fırın 3 bölgeye ayrılmıştır. Her bölgede 2adet ve toplamda 6adet yakıcı fırın tavanına monte edilmiştir. Yakıcılar otomatik ateşlemeli, oransal kontrollü ve alev emniyetlidir. Yakma sisteminde gaz emniyet, kontrol ve kumanda cihazları kullanılmaktadır.

Muffle içi sıcaklığı 850°C-880°C olacaktır.

Yakma sistemi kurulu gücü=6Yakıcı x 125000kcal/h=750000kcal/h brüt dür.

4.Otomatik sıcaklık kontrolü Üç bölgeli fırının, her bölgesinin sıcaklığı istenilen değere ayarlanabilir ve ayarlanan değerlerde otomatik tutulur. Ayrıca her bölgenin sıcaklığı devamlı izlenebilmektedir. Sıcaklık hassasiyeti $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 'dir.

Bir adet komple Elektrik-Kontrol-Kumanda Panosu fırının yanına monte edilmiştir.

5.İzolasyon (Toplam 330mm) Fırın tabanı ve duvarları 1250°C-1450°C dayanımlı beyaz tuğla ile örülmüştür. Arkada izole tuğla(d:0,7) ve plaka izolasyonu vardır. Üst kapak ise Seramik Fiber(1230°C dayanımlı-d=128kg/m³) malzemeden imal edilmiştir. Fırın içersinde sıcaklık 850°C iken fırın dışında sac kaplamada sıcaklık 40°C olmaktadır.

6.Muffle 6 mm kalınlığında 1100°C'ye kadar kullanılabilen sacdan imal edilmiştir. Kaynaklar Argon kaynağıdır.

Muffle'ın iç tabanında aynı kalite malzemeden özel döner rulolar vardır. Yükleme aparatı bu rulolar üzerinde içeri girer ve çıkar.

7.Yükleme Aparatı Sıcağa dayanıklı malzemeden üretilmiş olup boyları takriben 6,70metre olan boruları içinde barındırabilmektedir.

8.Malzemenin Yüklemesi Ve Boşaltılması Yükleme Aparatı düğme kumandalı olarak Muffle içine itilir. İşlem sonunda ise geri çekilerek dışarı alınır.

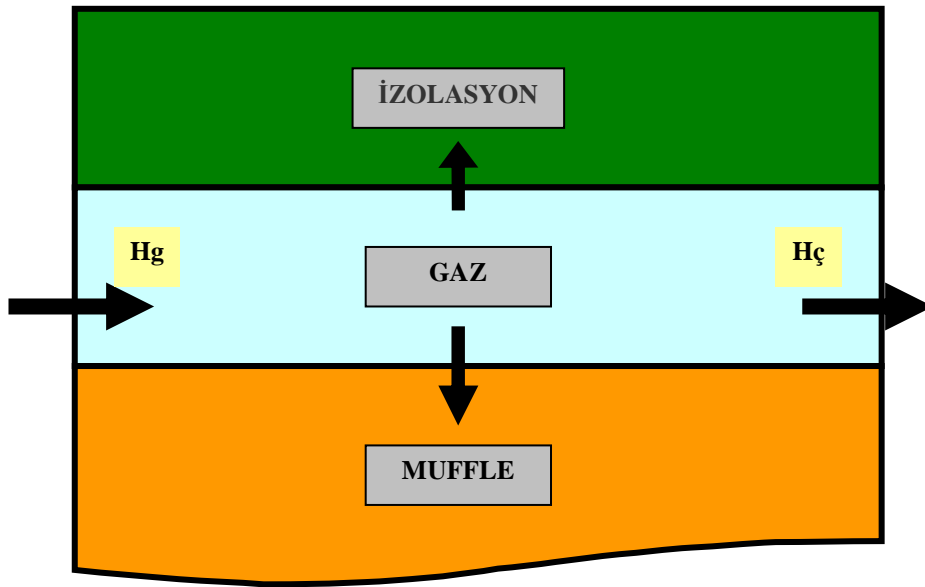
9.Kapı ve Alev Perdesi Bir adet sızdırmaz kapı mekanik hareketli olarak aşağı yukarı hareket eder. Mal içeriye gireceği veya dışarı çıkarılacağı zaman açılır. Alev perdesi yükselir ve hava girişini engeller. Kapı tam kapandığı zaman kısılır. Kapının alt bölümü sac kaplıdır.

10.Çelik Konstrüksiyon Dış çelik konstrüksiyon 4-5mm St37 sacdan ve takviye profillerden meydana gelmiştir. Fırının üst kapağı kolayca demonte edilebilir özellikte ve sızdırmaz olarak imal edilmiştir

Fırının bir kez çalışması süresince yaklaşık 75lt Argon ve 1028,57lt CH₄(metan gazı) tüketilir.

6.3. Termal Sistemler Analizi

Fırın içerisindeki katmanlara kontrol hacimleri belirlenerek, bu kontrol hacimleri arasındaki ısı alışverişleri ve sıcaklık değişimleri üzerinde durulmuştur.

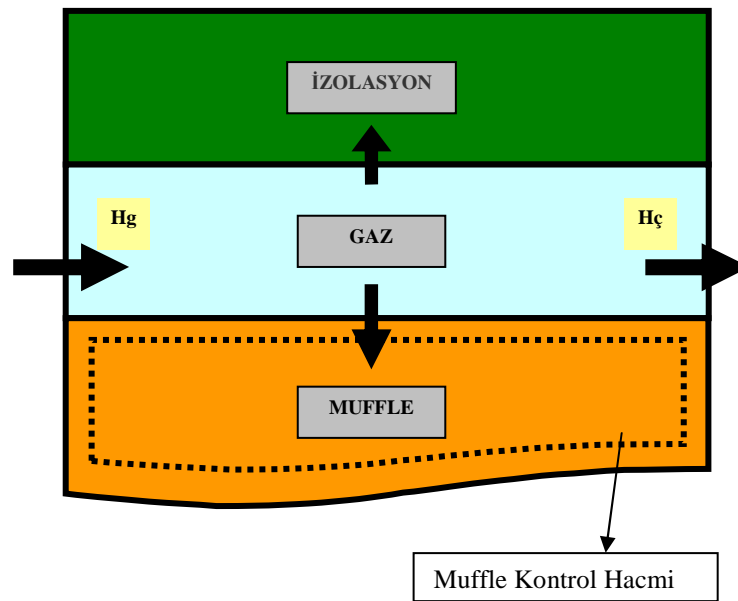


Şekil 6.8. Termal sistem gösterimi

6.3.1. Muffle kontrol hacmi

Termodinamiğin I. Yasasına göre

Muffle Kontrol Hacmi İçin Enerji Denklemi



Şekil 6.9 Muffle kontrol hacmi

$$\frac{dE_{kh,m}}{dt} = \dot{Q}_M = K \times A \times (T_g - T_m)$$

$$m_m \times C_p \times \frac{dT_m}{dt} = \dot{Q}_m = K \times A \times (T_g - T_m)$$

$$\frac{dT_m}{T_g - T_m} = \left(\frac{K \times A}{m_m \times C_p} \right) dt \quad \int \frac{dT_m}{T_g - T_m} = \int \left(\frac{K \times A}{m_m \times C_p} \right) dt$$

$$\ln(T_g - T_m) = \left(\frac{K \times A}{m_m \times C_p} \right) \times t + \ln c$$

$t=c$, $T_m=T_{m0}$, $T_g=T_g$ başlangıç sınır şartı

$$\ln c = \ln(T_g - T_{m0})$$

$$\ln \frac{T_g - T_m(t)}{T_g - T_{m0}} = \left(\frac{K \times A}{m_m \times C_p} \right) t \quad T_g - T_m(t) = (T_g - T_{m0}) \cdot e^{\left(\frac{K \times A}{m_m \times C_p} \right) t}$$

$$K \Rightarrow \frac{1}{K} = \frac{1}{h_1} + \frac{l}{k} + \frac{1}{h_2}$$

Değerler:

$$T_g = 1000^\circ\text{C} = 1273\text{K}$$

$$T_{m_0} = 20^\circ\text{C} = 293\text{K}$$

$$C_p = 0,5\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K} = 500\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$$

$$A = 25,5\text{m}^2$$

$$m_m = 11702\text{kg}$$

$$h_1 = 143\text{W} / \text{m}^2\text{K}$$

$$h_2 = 92\text{W} / \text{m}^2\text{K}$$

$$k = 18\text{W} / \text{mK}$$

$$l = 0,006\text{m}$$

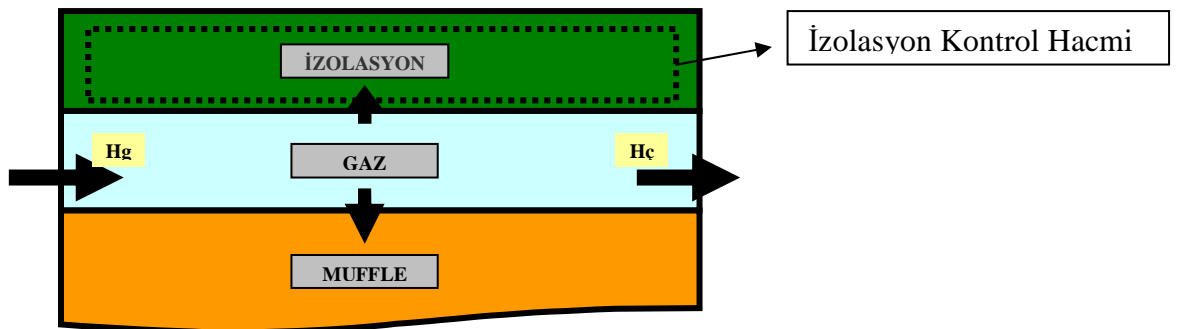
denklemdedeğerleri yerine koyarak “K” değerini buluruz.

$$K \Rightarrow \frac{1}{K} = \frac{1}{143} + \frac{0,06}{18} + \frac{1}{92} \quad K = 48\text{W} / \text{m}^2\text{K}$$

Zaman (dakika)	Muffle sıcaklığı (°C)
5	79
20	238
70	594
130	809
250	958
370	990
490	997
510	998

Tablo 6.1. Muffle kontrol hacminde zamanla sıcaklık değişimi

6.3.2. İzolasyon kontrol hacmi



Şekil 6.10. İzolasyon kontrol hacmi

Termodinamiğin I. Yasasına göre

İzolasyon Kontrol Hacmi İçin Enerji Denklemi

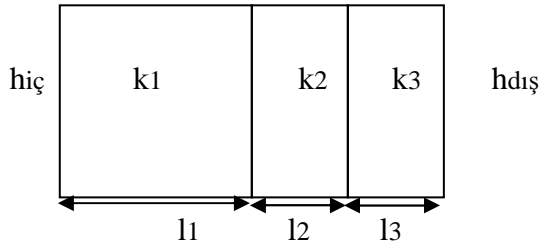
$$\frac{dE_{kh,i}}{dt} = \dot{Q}_i = K \times A \times (T_g - T_i)$$

$$m_i \times C_p \times \frac{dT_i}{dt} = \dot{Q}_i = K \times A \times (T_g - T_i)$$

$$\frac{dT_i}{T_g - T_i} = \left(\frac{K \times A}{m_i \times C_p} \right) dt$$

$$\ln \left(\frac{T_g - T_{i0}}{T_g - T_i} \right) = \left(\frac{K \times A}{m_i \times C_p} \right) \times t$$

$$K \Rightarrow \frac{1}{K} = \frac{1}{h_{iç}} + \frac{l}{k_1} + \frac{l}{k_2} + \frac{l}{k_3} + \frac{1}{h_2}$$



Değerler

$$T_g = 1000^\circ C = 1273K$$

$$T_{i0} = 20^\circ C = 293K$$

$$C_p = 624J / kg.K$$

$$A = 37,5m^2$$

$$m_i = 16564kg$$

$$h_{i\check{c}} = 92W / m^2 K$$

$$k_1 = 1.4W / mK$$

$$k_2 = 0,034W / mK$$

$$k_3 = 12W / mK$$

$$h_{du} = 20W / m^2 K$$

$$l_1 = 0,2m$$

$$l_2 = 0,05m$$

$$l_3 = 0,05m$$

$$K \Rightarrow \frac{1}{K} = \frac{1}{92} + \frac{0,2}{1,4} + \frac{0,05}{0,034} + \frac{0,05}{12} + \frac{1}{20}$$

$$K = 0.6W / m^2 .K$$

Zaman (dakika)	İzolasyon sıcaklığı (°C)
5	20.63
20	22.54
70	28.74
130	36.38
250	51.3
370	65.77
490	80.67
510	82

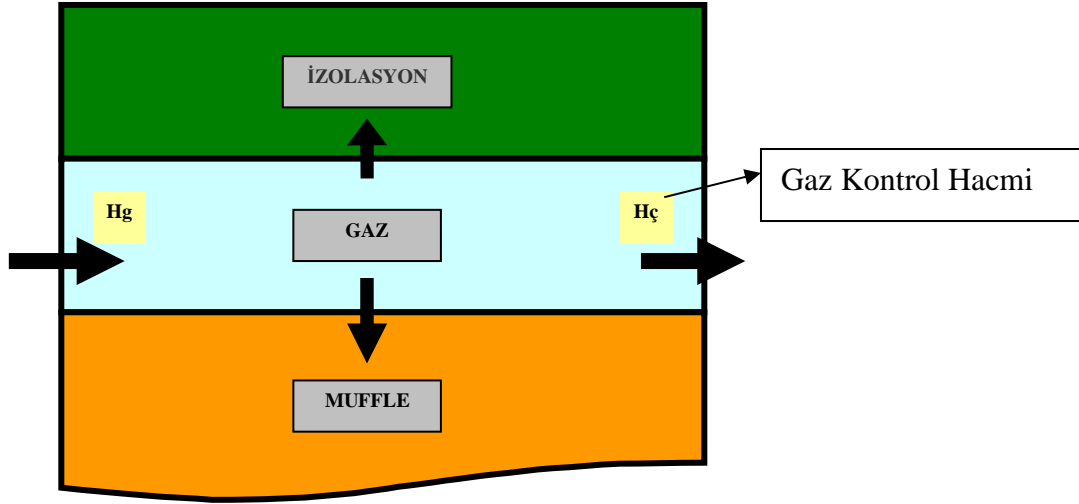
Tablo 6.2. İzolasyon kontrol hacminde zamanla sıcaklık değişimi

Denklemden verileri yerine koyarak Q_i ve Q_m değerlerini buluruz.

Zaman (dakika)	Q_m (W)	Q_i (W)
5	1127304	22035
20	932688	21992
70	496944	21853
130	233784	21681
250	51408	21345
370	12240	21020
490	3672	20685
510	2448	20655

Tablo 6.3. İzolasyon kontrol hacminde zamanla ısı değişimi

6.3.3. Gaz kontrol hacmi



Şekil 6.11 Gaz kontrol hacmi

Termodinamiğin I. Yasasına göre

Gaz Kontrol Hacmi İçin Enerji

$$\frac{dE_{kh,G}}{dt} = -\dot{Q}_M - \dot{Q}_I + \dot{H}_g - \dot{H}_ç$$

$$mG \times C_p \times \frac{dT_G}{dt} = -Q_m - Q_i + H_g - H_ç$$

(Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal ediliyor.)

$$dE_{kh,G} = du = C_p dT$$

$$\frac{dE_{kh,G}}{dt} = \frac{dU_{kh,G}}{dt}$$

$$H_{giren} = H_{yakıt} + H_{hava}$$

$$H_g = m_y (C_{py} + dT_y + h_{ay}) + m_h C_{ph} dT_h$$

Değerler:

$$C_{py} = 1,980 \text{ KJ/KgK} = 1980 \text{ J/KgK}$$

$$T_y = 1273 \text{ K}$$

$$h_{ay}=9,77 \text{ KWh/m}^3=9,77*10^3*3600 \text{ J/m}^3$$

$$m_h=1,1 \text{ my}$$

$$C_{ph}=1,004 \text{ KJ/KgK}=1004 \text{ J/KgK}$$

$$T_h=293 \text{ K}$$

$$\lambda = \frac{m_h}{m_y} \quad , \quad m_h = \lambda m_y$$

$$\text{dogalgazın hava fazlalık katsayısı}(\lambda) = 1.05 / 1.10$$

$$(\lambda) = 1.10 \text{ (kabul edilir)}$$

$$m_h = 1,10 \text{ my}$$

$$H_{çıkan} = m_{\text{bacagazı}} C_{p \text{ bacagazı}} dT_{\text{bacagazı}}$$

$$m_{\text{bacagazı}} = m_h + m_y$$

$$C_{p \text{ bacagazı}} = 1,004 \text{ KJ/KgK} = 1004 \text{ J/KgK}$$

$$T_{\text{bacagazı}} = 1273 \text{ K}$$

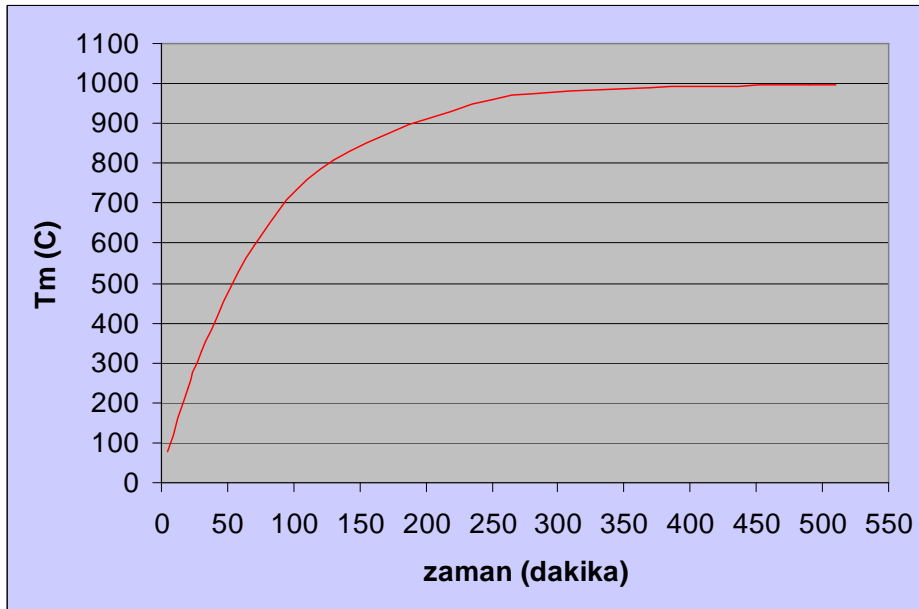
Zamana göre m_y değerleri

Zaman (dakika)	m_y (kg)
5	0,028
20	0,023
30	0,020
70	0,012
130	0,006
250	0,0017
370	0,0008
490	0,0006
510	0,00056

Tablo 6.4. Gaz kontrol hacminde zamanla yakıt miktarı değişimi

Zaman (dakika)	Muffle sıcaklığı (°C)
5	79
20	238
30	328
70	594
130	809
250	958
370	990
490	997
510	998

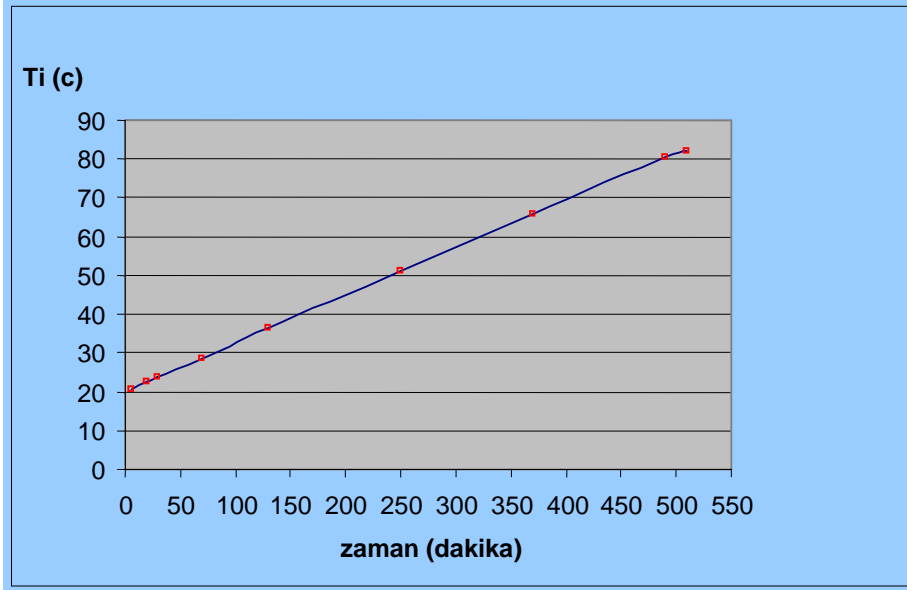
Tablo 6.5. Gaz kontrol hacminde zamanla sıcaklık değişimi



Şekil 6.12. Muffle sıcaklığının zamanla değişimi

Zaman (dakika)	İzolasyon sıcaklığı (°C)
5	20.63
30	23.9
70	28.74
130	36.38
250	51.3
370	65.77
510	82

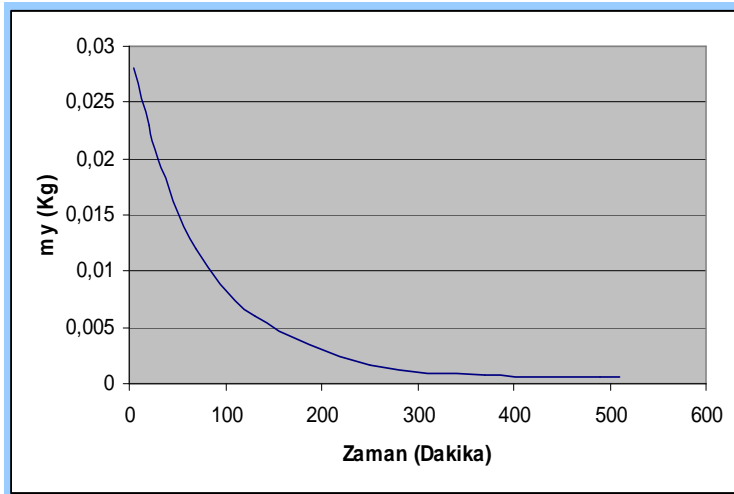
Tablo 6.6. Zamana göre izolasyon sıcaklığı



Şekil 6.13. Zamana göre izolasyon sıcaklığı değişimi

Zaman (dakika)	m_y (kg)
5	0,028
20	0,023
30	0,020
70	0,012
130	0,006
250	0,0017
370	0,0008
490	0,0006
510	0,00056

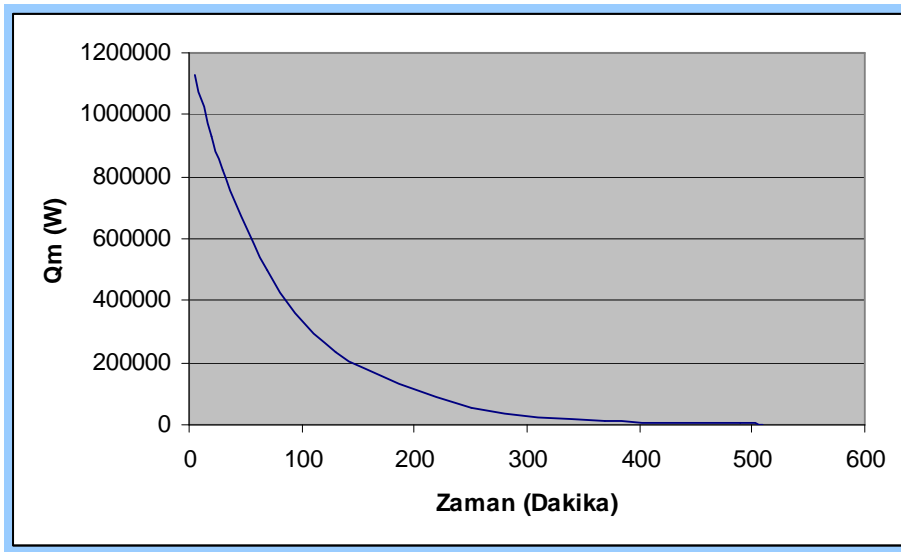
Tablo 6.7. Zamana göre m_y değerleri



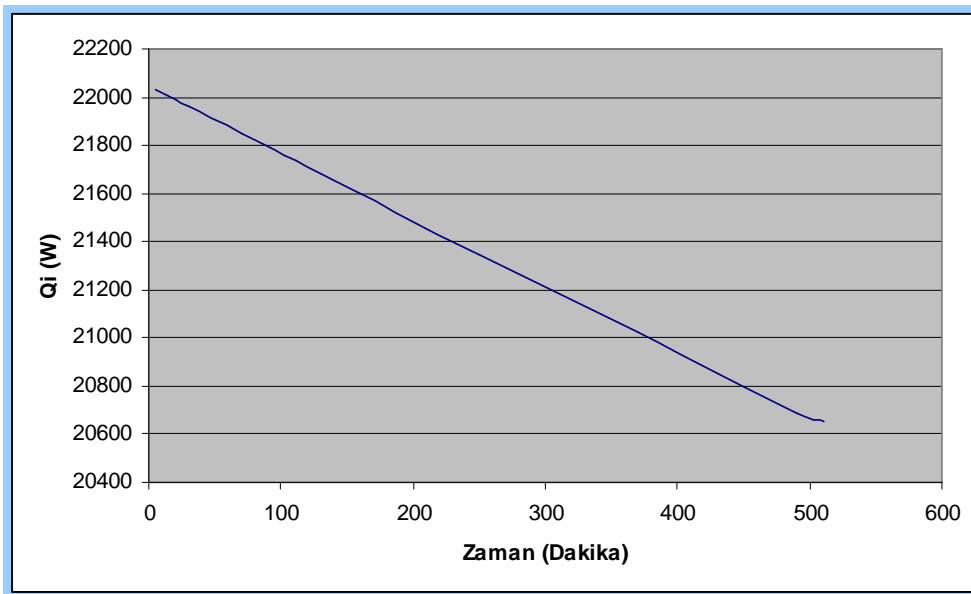
Şekil 6.14. Zamana göre m_y değerleri değişimi

Zaman (dakika)	Qm (W)	Qi (W)
5	1127304	22035
20	932688	21992
30	822528	21962
70	496944	21853
130	233784	21681
250	51408	21345
370	12240	21020
490	3672	20685
510	2448	20655

Tablo 6.8. Zamana göre Qm ve Qi değerleri



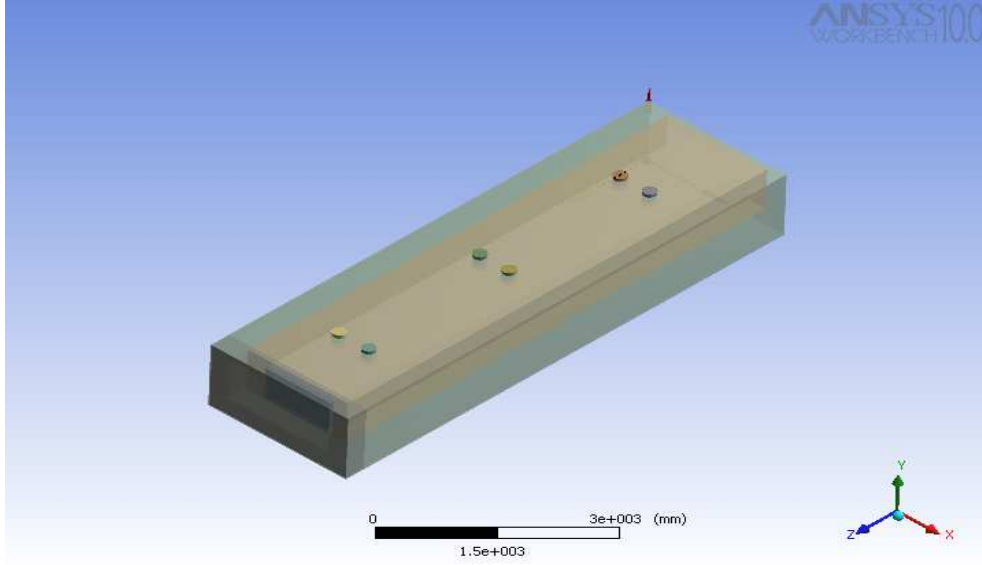
Şekil 6.15. Zamana göre Qm değerleri değişimi



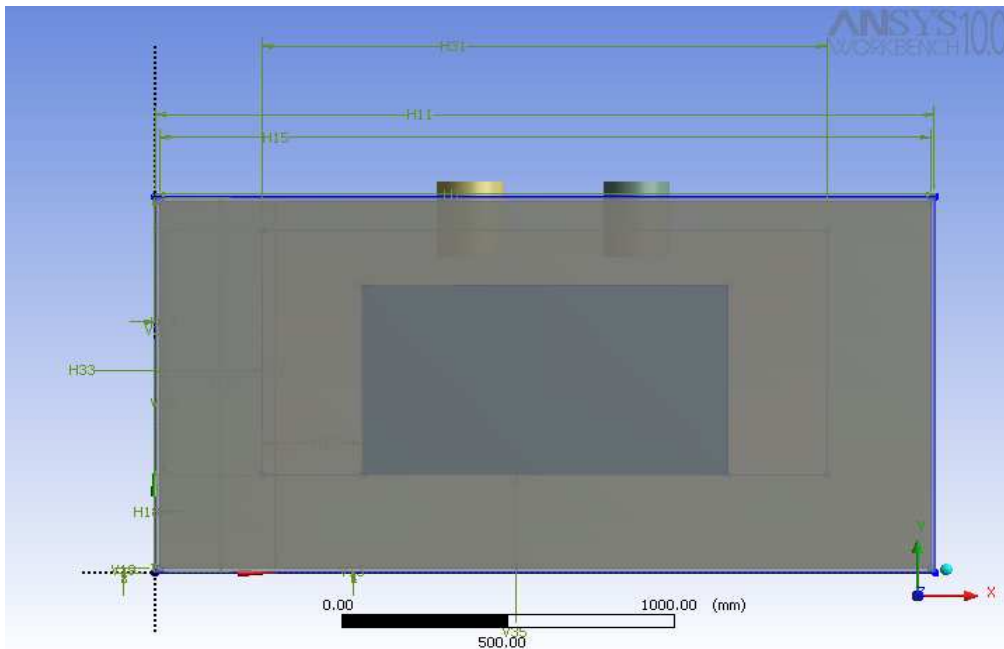
Şekil 6.16. Zamana göre Qi değerleri değişimi

6.4. Isıl İşlem Fırının Elektronik Ortamda Termal Sistem Analizi

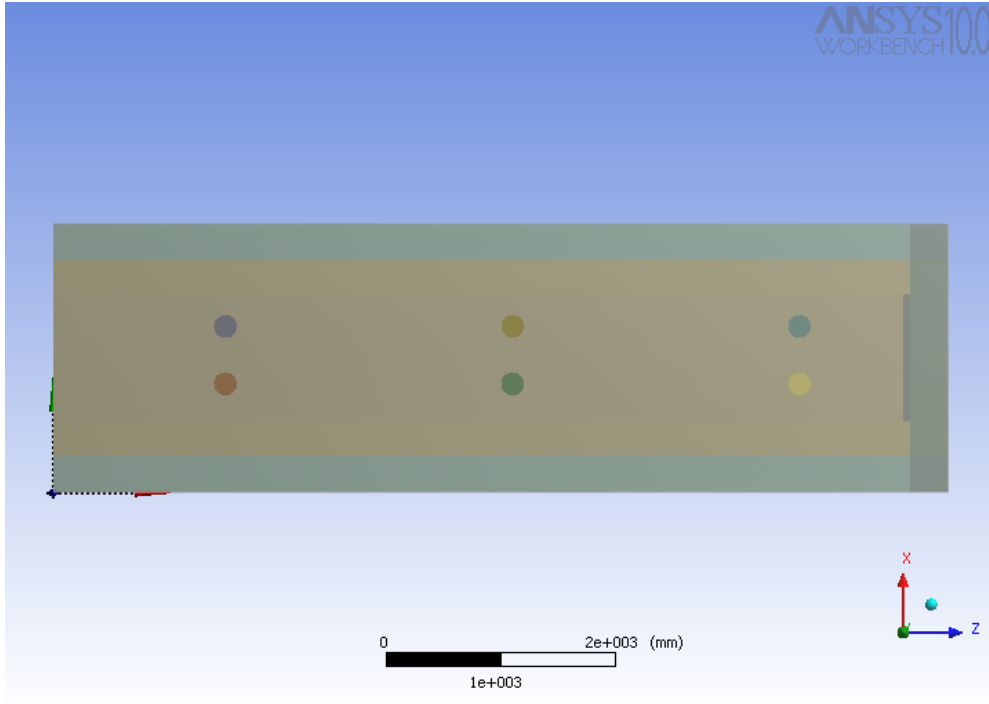
Termal analiz ANSYS Workbench aracılığıyla yapılmıştır.Öncelikle Ansys programı içerisinde fırının basit katı modellemesi yapılmıştır.



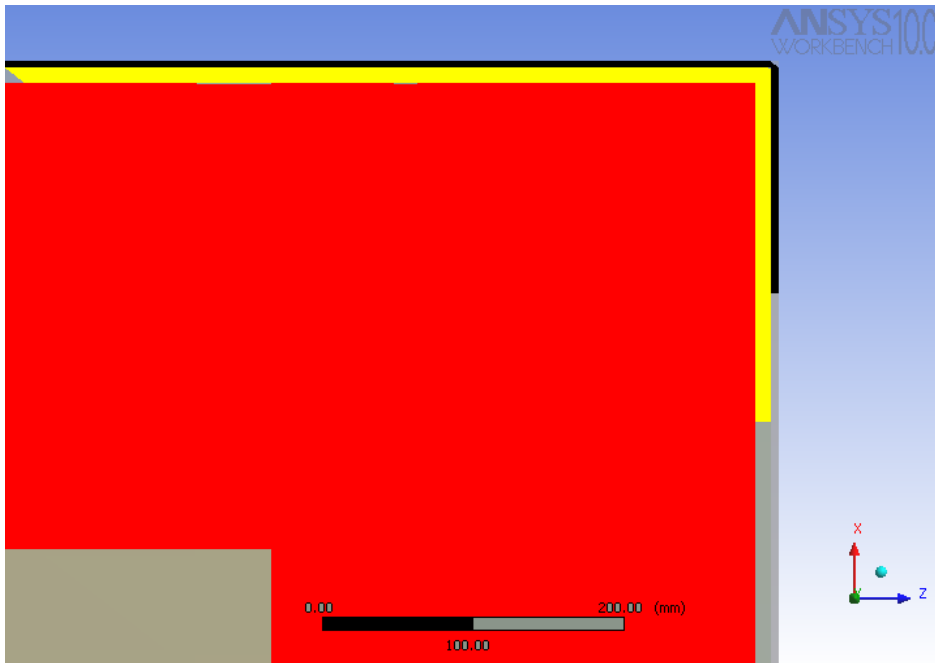
Şekil 6.17 Ansys'de fırının katı modeli



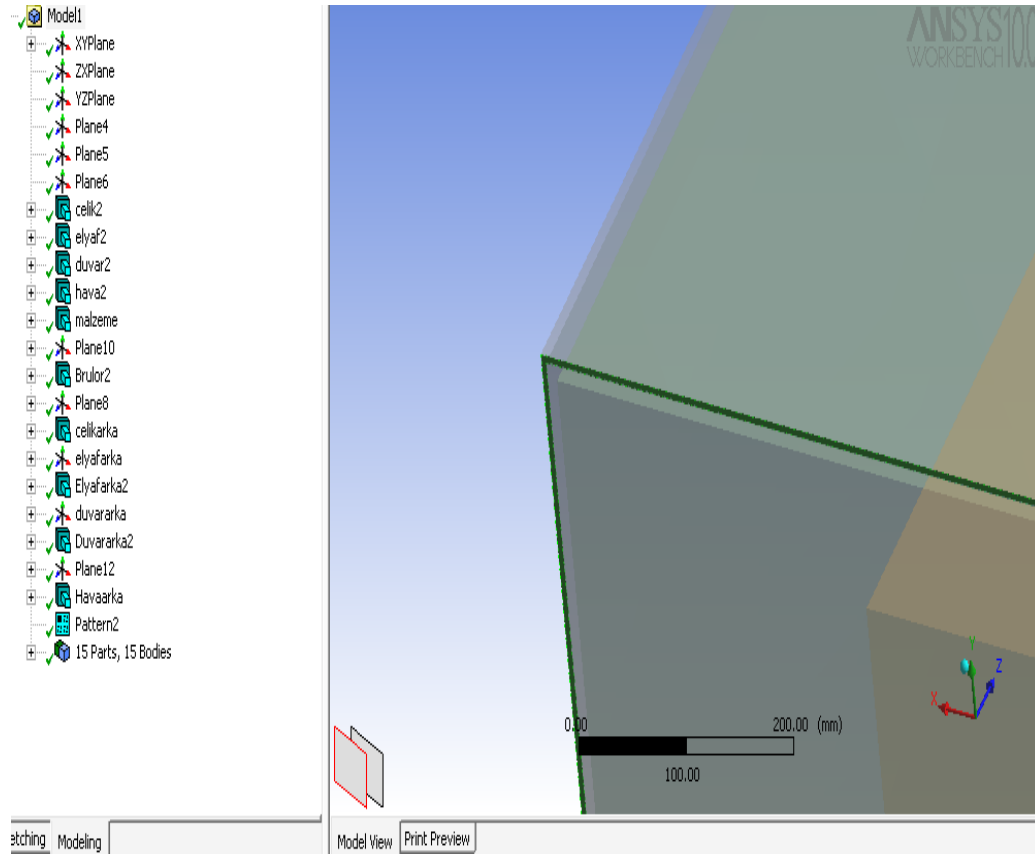
Şekil 6.18 Ansys'de fırının katı modeli ön görünüş



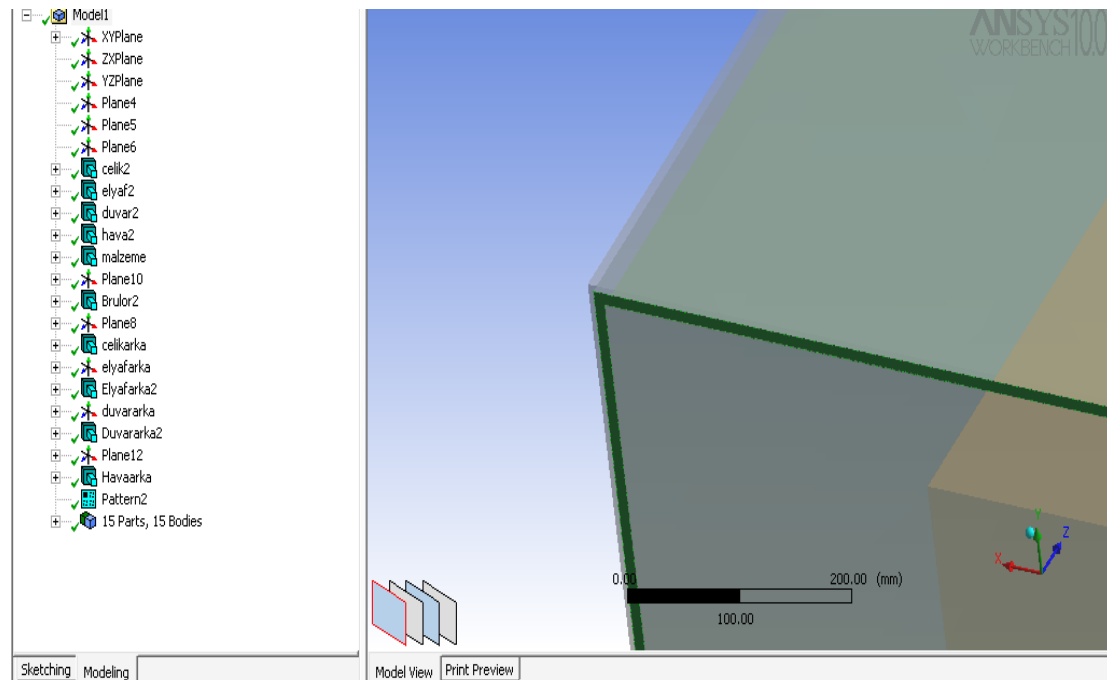
Şekil 6.19 Ansys'de fırının katı modeli üst görünüş



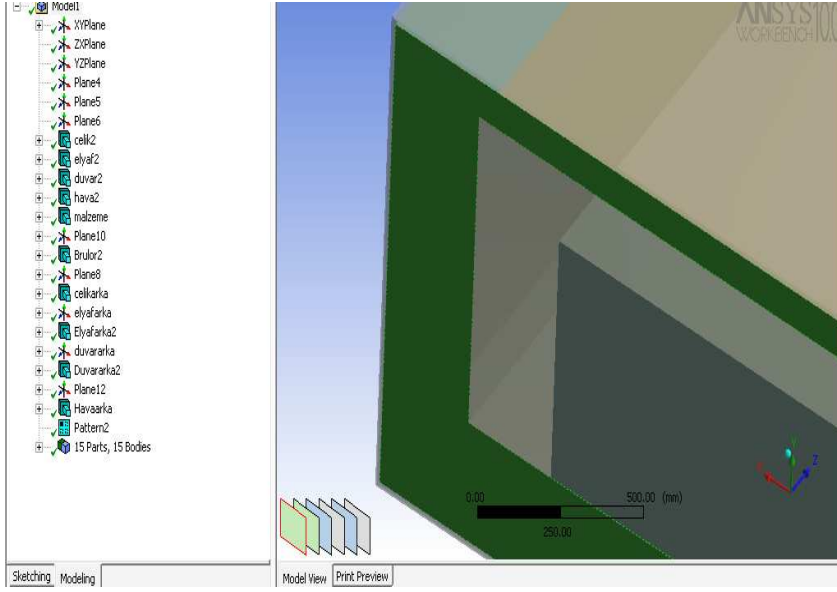
Şekil 6.20 Fırın önden kesitinden katmanlar



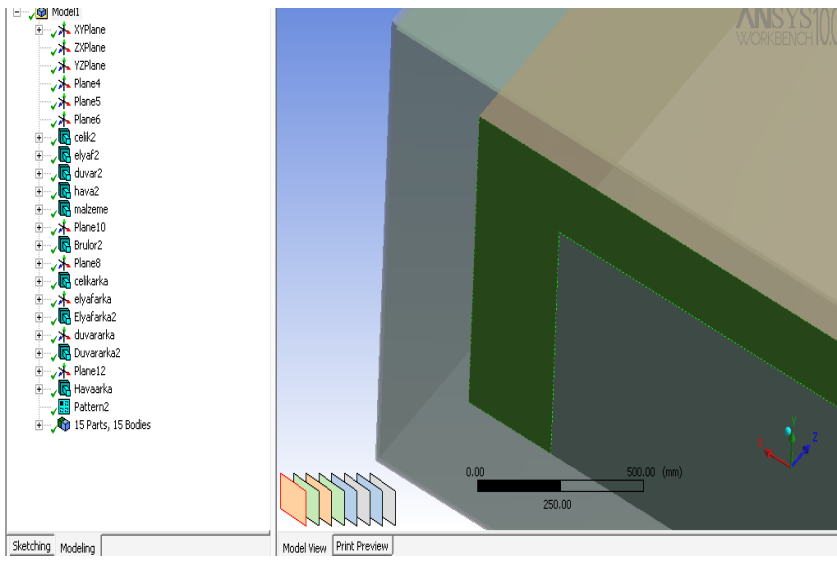
Şekil 6.21 Sac katman



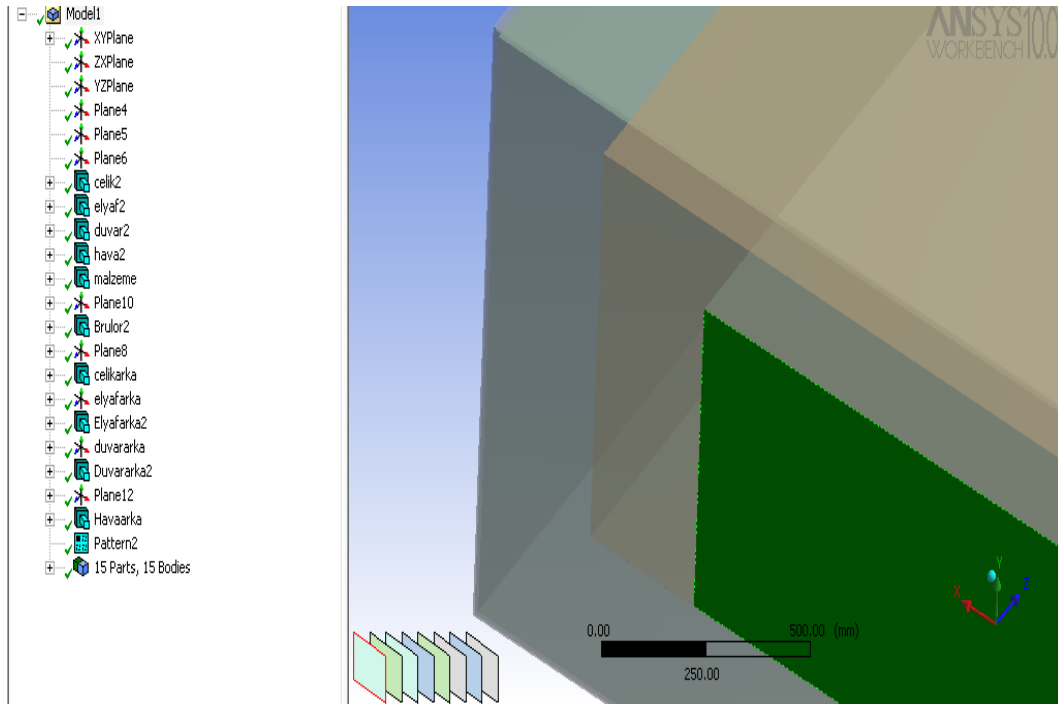
Şekil 6.22. Cam elyaf battaniye



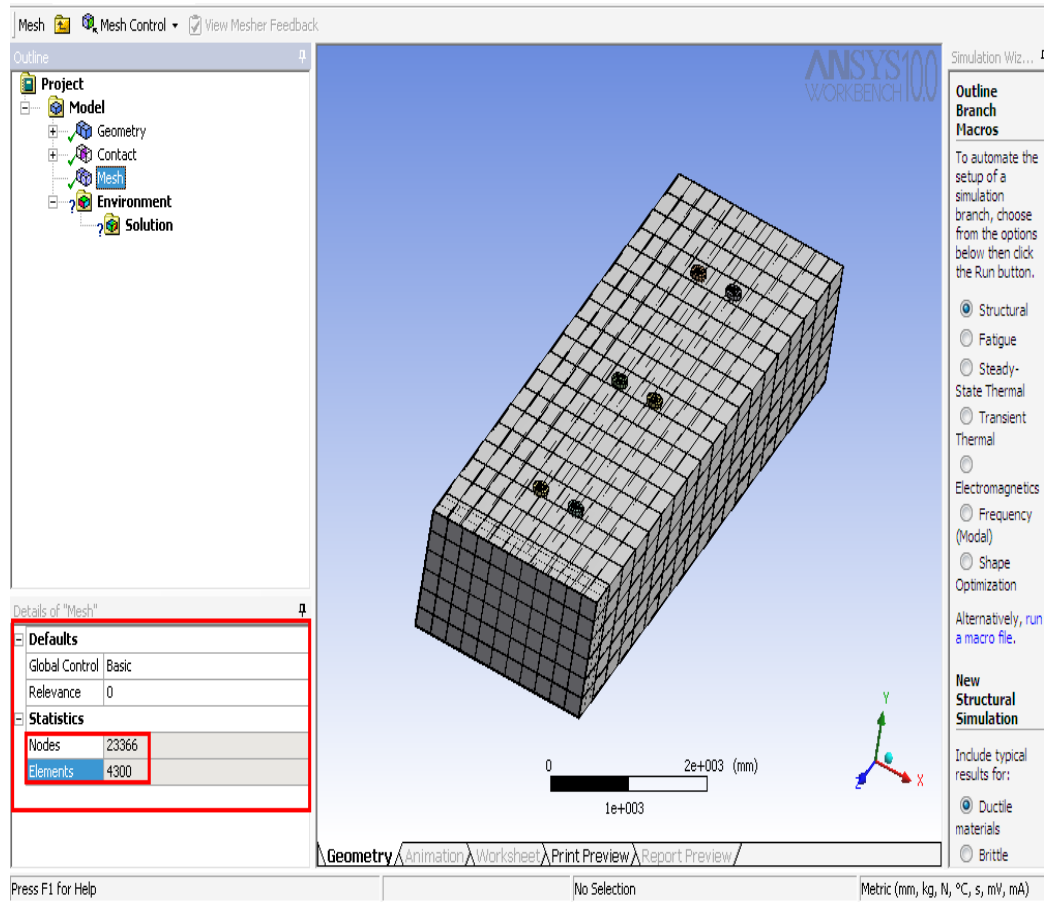
Şekil 6.23. İzolasyon tuğla katmanı



Şekil 6.24 Hava katmanı

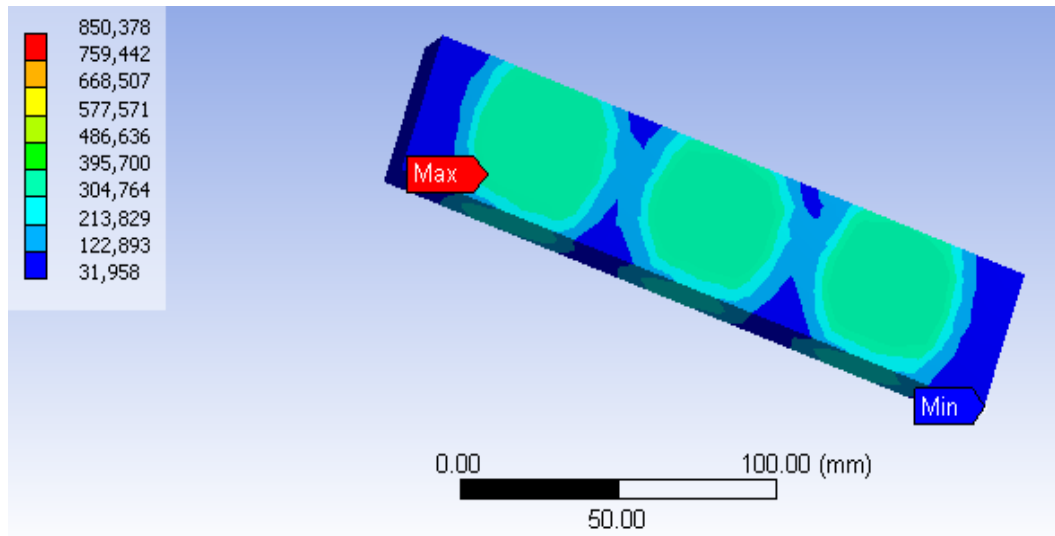


Şekil 6.25 Muffle katmanı

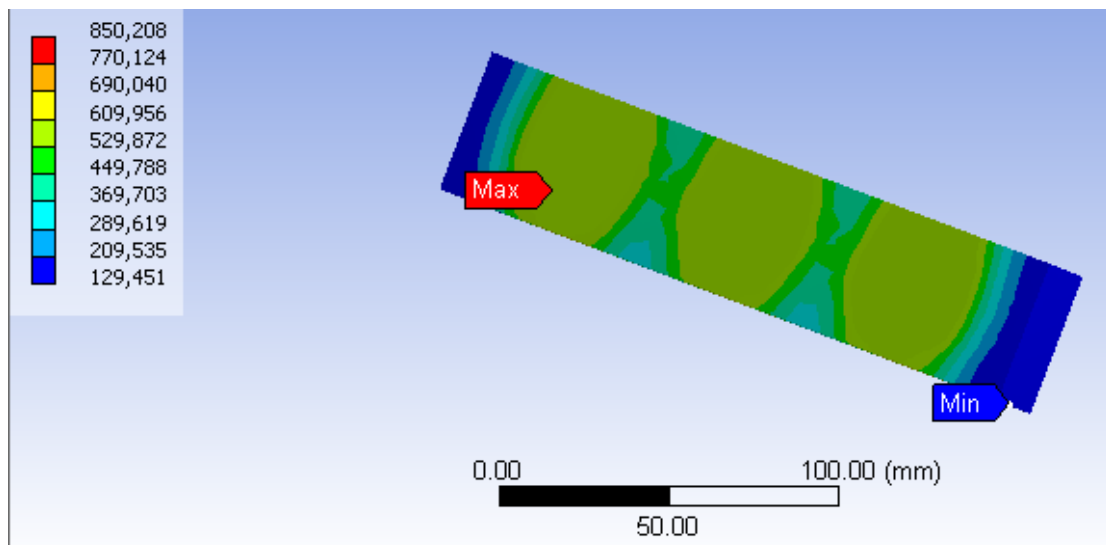


Şekil 6.26. Fırının Mesh'lenmesi

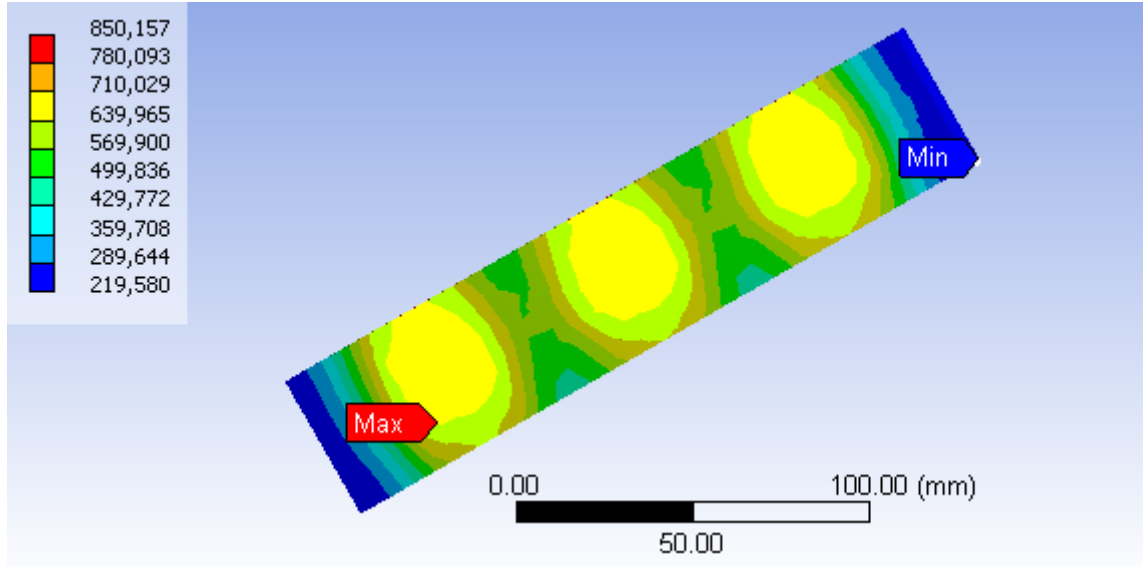
Mesh düzeninde 4300 eleman, 23366 bağlantı noktası (nodes) vardır. Model üzerindeki meshteki eleman sayısının fazla olması, modelin analiz için doğruluğunu göstermeyebilir. Model üzerinde oluşturulan mesh yapısındaki eleman sayısının az olması ise sonuçtaki doğruluğun belirsiz tolerans değerleri arasında olmasına neden olacağından istenmeyen bir oluşumdur. Meshin optimum olması ise mesh refinement ile dar bölgelerde sık ağ yapısı oluşturularak veya model üzerinde farklı eleman (piramit, kübik, vb..) tipleri kullanılarak sağlanabilir. Bu çalışmada Ansys Workbench 10'un otomatik olarak atadığı ağ yapısı kullanılmış, ağ yapısı üzerinde herhangi bir iyileştirme yapılmamıştır. Solve işlemi yapıldıktan sonra da aşağıdaki sıcaklık dağılımı sonuçlarına ulaşılmıştır.



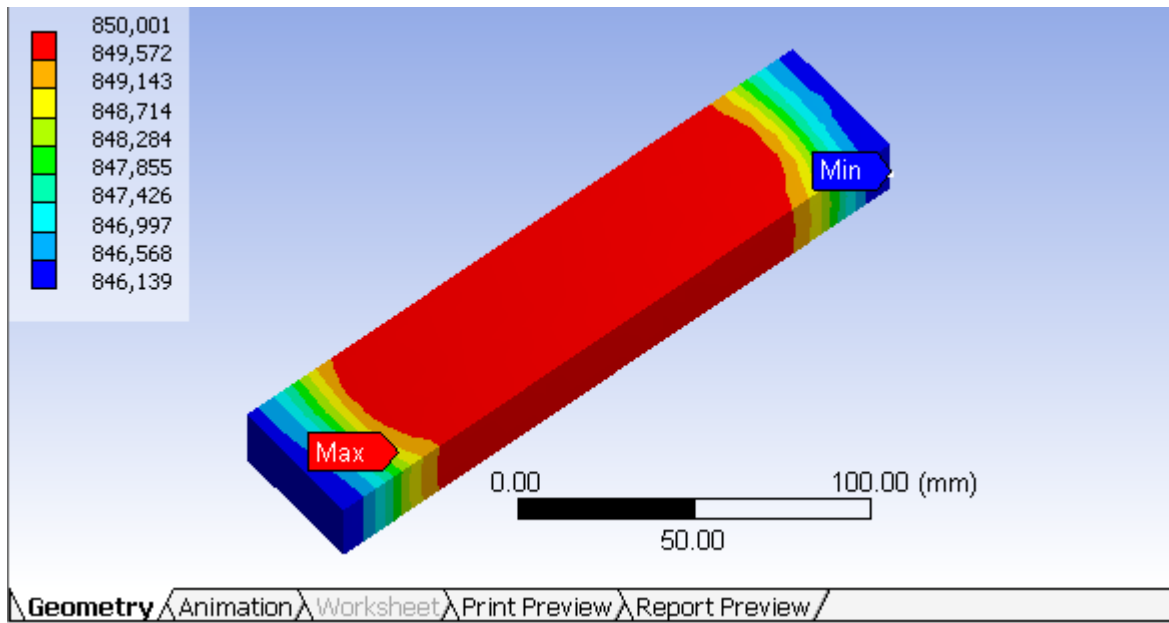
Şekil 6.27. 300°C' de sıcaklık dağılımı



Şekil 6.28 500°C' de sıcaklık dağılımı



Şekil 6.29. 600⁰C' de sıcaklık dağılımı



Şekil 6.30. 850⁰C' de sıcaklık dağılımı

SONUÇLAR

Bu çalışmanın amacı bir metal ısıl işlem (gerilim giderme) fırınının boyutlandırılması, ısı transferlerinin hesaplanması ve termal analizlerinin yapılmasıdır.

Fırınlar ısıl işlem için hayati önem taşır. Isıl işlemler şu nedenlerden dolayı uygulanır;

- 1) Sıcak ve soğuk biçimlendirme gerginliklerini gidermek.
- 2) Talaş çıkaran işçilikleri kolaylaştırmak.
- 3) Serlik ve dayanım kazandırmak.
- 4) Darbelere direnç'i yükseltmek.
- 5) Elektrik ve magnetit özellikleri yükseltmek.
- 6) Kristal yapısını değiştirmek.
- 7) Isı ve korozyon direncini yükseltmek.
- 8) Kimyasal bileşimi değiştirerek özellik kazandırmak.
- 9) Zamanla sertleşmeyi sağlamak.
- 10) Metal ve alaşımların gazlarını uzaklaştırmak.

Fırının boyutlandırılması yapılmıştır.

1.Kapasite 2 ton(Bu kapasite dış çap 16mm-iç çap 12mm olan referans malzeme içindir. Daha büyük ve daha küçük borularda bu kapasite büyür veya küçülür.)

2.Ölçüler

Fırın toplam uzunluğu: 7500mm

Fırın toplam genişliği: 2360mm

Tesis uzunluğu: 15000mm

Tesis bölümleri:

—Yükleme: Döner rulolu

—Fırın: Muffle içi döner makaralı sistem

Yükleme genişliği: 900mm

Muffle genişliği: 1050mm

3.İsıtma (doğalgaz) Homojen ısıtma için fırın 3 bölgeye ayrılmıştır. Her bölgede 2adet ve toplamda 6adet yakıcı fırın tavanına monte edilmiştir. Yakıcılar otomatik ateşlemeli, oransal kontrollü ve alev emniyetlidir. Yakma sisteminde gaz emniyet, kontrol ve kumanda cihazları kullanılmaktadır.

Muffle içi sıcaklığı 850°C-880°C olacaktır.

Yakma sistemi kurulu gücü=6Yakıcı x 125000kcal/h=750000kcal/h brüt dür.

4.Otomatik sıcaklık kontrolü Üç bölgeli fırının, her bölgesinin sıcaklığı istenilen değere ayarlanabilir ve ayarlanan değerlerde otomatik tutulur. Ayrıca her bölgenin sıcaklığı devamlı izlenebilmektedir. Sıcaklık hassasiyeti $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 'dir.

Bir adet komple Elektrik-Kontrol-Kumanda Panosu fırının yanına monte edilmiştir.

5.İzolasyon (Toplam 330mm) Fırın tabanı ve duvarları 1250°C-1450°C dayanımlı beyaz tuğla ile örülmüştür. Arkada izole tuğla(d:0,7) ve plaka izolasyonu vardır. Üst kapak ise Seramik Fiber(1230°C dayanımlı-d=128kg/m³) malzemedan imal edilmiştir. Fırın içersinde sıcaklık 850°C iken fırın dışında sac kaplamada sıcaklık 40°C olmaktadır.

6.Muffle 6 mm kalınlığında 1100°C'ye kadar kullanılabilen sacdan imal edilmiştir. Kaynaklar Argon kaynağıdır.

Muffle'ın iç tabanında aynı kalite malzemedan özel döner rulolar vardır. Yüklem aparatı bu rulolar üzerinde içeri girer ve çıkar.

7.Yükleme Aparatı Sıcağa dayanıklı malzemeden üretilmiş olup boyları takriben 6,70metre olan boruları içinde barındırabilmektedir.

8.Malzemenin Yüklemesi Ve Boşaltılması Yükleme Aparatı düğme kumandalı olarak Muffle içine itilir. İşlem sonunda ise geri çekilerek dışarı alınır.

9.Kapı ve Alev Perdesi Bir adet sızdırmaz kapı mekanik hareketli olarak aşağı yukarı hareket eder. Mal içeriye gireceği veya dışarı çıkarılacağı zaman açılır. Alev perdesi yükselir ve hava girişini engeller. Kapı tam kapandığı zaman kısılır. Kapının alt bölümü sac kaplıdır.

10.Çelik Konstrüksiyon Dış çelik konstrüksiyon 4-5mm St37 sacdan ve takviye profillerden meydana gelmiştir. Fırının üst kapağı kolayca demonte edilebilir özellikte ve sızdırmaz olarak imal edilmiştir

Fırının bir kez çalışması süresince yaklaşık 75lt Argon ve 1028,57lt CH₄(metan gazı) tüketilir.

Endüstri fırınlarında enerji gereksinmesi, ya katı, sıvı veya gaz yakıtların yakılması suretiyle kimyasal enerji olarak yada elektrikten direnç, ark veya indüksiyonla ısıtma tarzında fiziksel enerji olarak karşılanır. Son zamanlarda, diğer enerji kaynaklarının da fırınlarda kullanılması, her geçen gün artmaktadır.

Isıtılacak parçalar yada fırın yapı malzemeleri ile, alev ve baca gazlarından oluşan fırın atmosferi arasında, genellikle istenmeyen birçok kimyasal olay meydana gelir. Sıcaklığa da bağımlı olan bu olayların, fırın tipinin seç iminde ve konstrüksiyonunda göz önünde tutulması gerekir.

Fırınlarda, sıcaklık ve atmosfer kontrolü, büyük önem taşır. Modern işletmelerde ölçme ve kontrol, hassas ve otomatik olarak yapılmaktadır. Yakıt olarak gaz yada akaryakıt kullanılmasında, fırın işletiminde şu üstünlükler sağlanır:

- Basınç altında, boru ile kolay taşıma;
- Yakıt ve hava çok iyi karıştırılabildiği için, daha düşük hava sayısı (n)

- Isı teminini, daha çok sayıda yakıcı kullanarak sağlama;
- Fırın özelliklerine bağlı olarak daha uygun alev formu sağlayabilme;
- Yanmanın ve yakıt sevkini daha iyi ayar edilebilmesi;
- Gaz halindeki yakıtların tamamen, akaryakıtın ise külsüz olmaları.

Bu çalışmada ki fırında kullanılacak en ideal yakıtın NPG olduğu hesaplamalar sonucunda ortaya çıkmıştır.

Fırın içersinde ısı transferinin homojen şekilde yapılması için “muffle” kullanılmalıdır.

Endüstri fırınlarında yapı malzemesi olarak, refrakter malzemeler ve sıcağa dayanıklı metal alaşımları kullanılır. Refrakter malzemelerin yapısı, SiO_2 , Al_2O_3 ve MgO gibi oksit mineraller yada karbür, borür ve nitrür gibi bağlantılardan meydana gelir. Oldukça yüksek sıcaklığa, sıcaklık değişimlerine, fırın atmosferi ve ergiyik tahribine karşı dayanıklıdırlar.

Metal malzeme olarak ise, sıcağa dayanıklı çelik, dökme demir, bakır ve alaşımları ve direnç malzemeler kullanılır. Bakır ve alaşımları, sıcağa dayanıklı olmadığından, kullanma esnasında mutlaka soğutulmalıdır. Sıcaklığın fazla yüksek olmadığı, fırının dış kısımlarında ise, alaşımsız çelikler de konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılır.

Fırında oksitlenmenin giderilmesi için “Argon” gazı kullanılmıştır. Argon gazı sayesinde metal malzemelerin hava ve nem ile etkileşimi kesilmektedir.

Fırın içinde ısı transferi, serbest yada cebri akımda konveksiyonla, gazlardan ve yüzeylerden ısı radyasyonu, ısı iletimiyle ve bunların çok değişik tarz etkimesiyle gerçekleşir. Ayrıca, ısının malzemenin kendisinde üretildiği indüktif ve dielektriksel ısıtma da, malzemenin ısıtılmasında kullanılabilir.

Teorik hesaplar yapıldığında metal sıcaklığı tespit edildi ve gaz sıcaklığı değişimleri çıkarıldı.

Fırın içinde ısının yeniden geri kazanılmasında, esas olarak üç ana kaynak vardır.

1. Isıl prosesin uygulanmasını takiben, ısıtılan parçaların ihtiva ettikleri ısıdan yararlanma,
2. Fırını terk eden duman gazlarının, ihtiva ettikleri ısıdan yararlanma,
3. Rayların soğutulması gibi, soğutma sıvılarının ihtiva ettiği ısıdan yararlanma. Bu kaynak, yalnızca zorunlu hallerde tercih edilir ve genellikle kullanılmaz.

Rekuperatör yada rejeneratör kullanılmasıyla, fırın hacminde yüksek sıcaklık olan endüstri fırınlarında, yakıt tasarrufu en büyüktür.

Bu çalışmada ki fırına rekuperatör eklenmesiyle daha verimli bir fırın elde edileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] ÇİĞDEMOĞLU, M; “Fırın Atmosferleri ve Karbon Kontrolü” Makine Mühendisleri Odası Yayını No:52 1970
- [2] DAĞSÖZ,A.K. “Isı izolasyonu” 1976 İTÜ
- [3] GÜVENTÜRK, F. “Çelik El Kitabı” 2003-İZMİR
- [4] GÜNER,B. “İndüksiyon ergitme fırınlarının Türkiye’de yapılabilirliğinin etüdü” Yıldız Üniversitesi Metalurji Müh. Bölümü. Lisansüstü Bitirme Tezi 1997
- [5] ÖNDER,D ; “sanayi Fırınlarında Doğalgaz Kullanımı Ve Bilgisayarlı Kumanda Sistemi” TMMOB Mak. Müh. Odası. İst. Şubesi 1991
- [6] SIEMENS Firma Yayınları
- [7] SİSTEM MAKİNA Yayınları
- [8] SÜMERBANK-Filyos Refrakter Firma Yayını
- [9] TEKNİM Firma Yayınları
- [10] TERMO Firma Yayınları
- [11] TOPBAŞ, M.ALİ. “Endüstri Fırınları” 2.CİLT Yıldız Teknik Üniversitesi 1991
- [12] TOPBAŞ, M.ALİ. “Endüstri Fırınları” 1.CİLT Yıldız Teknik Üniversitesi 1991
- [13] TUNABOYLU , A. “Elektrik ark ocaklarında çelik üretiminde maliyetleri düşürme olanakları ve kısıtlar” ASİLÇELİK YAYINI 10-1989
- [14] TUNALI, Ö. “Türkiye’de elektrik ark fırınlarının yapılabilirliğinin etüdü.” Yıldız Üniversitesi Metalurji Müh. Bölümü Lisans Bitirme Tezi 1991

ÖZGEÇMİŞ

Sertan Genç, 05.12.1983 de İstanbul'da doğdu. İlk ve orta okulu Maltepe'de tamamladı.1999 yılında Kadir Has Anadolu Lisesi'den mezun oldu. 2003 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümüne girdi ve 2007 yılında mezun oldu.2007 yılından bu yana Telatar Metal Sanayi ve Tic. Ltd. Şti.'nde mühendis olarak çalışmakta.Bu süre içerisinde Tübitak bağlantılı bir projeyi tamamladı, şirketin Ar-Ge,Kalite Yönetim ve İmalat bölümlerinde görev yaptı.