

ENDÜSTRİYEL FIRINLARDA KÜTLE VE ENERJİ ANALİZİ

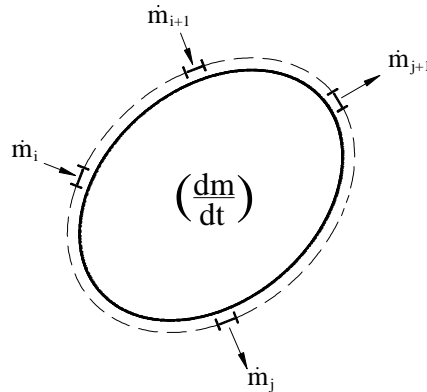
1. Endüstriyel Fırınlarda

Endüstriyel fırınlar ergitme, ısıl işlem, pişirme, kurutma, temperleme ve benzeri işlemleri gerçekleştirmek için sanayide yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Örneğin çimento fabrikalarında dönel fırın içerisinde yüksek sıcaklıkta çimento üretimi, seramik veya tuğla fabrikalarında pişirme ve kurutma fırınları, demir çelik endüstrisinde ergitme ve tavlama fırınları, cam üretiminde ergitme ve temperleme fırınları şeklinde bir dizi örnek verilebilir. Fırınlarda tasarlandıkları prosesi gerçekleştirebilmeleri için gerekli hammaddelerin beslenmesi ile birlikte gerekli enerjinin de beslenmesini gerektirir. Fırınlarda beslenen hammaddenin ürüne dönüşmesi sonucu açığa çıkan ürün dışı atıkları fırından uzaklaştıracak, gerekli enerji yakma sistemleri ve elektrik enerji besleme sistemleriyle donatılabilmektedir.

Fırınlardan üretilen ürünlerin kalitelerinin yanı sıra birim ürün başına harcadıkları enerjilerinde sorgulanması gereken önemli konu olduğu unutulmamalıdır. Fırında üretilen ürünün kalitesinden ve kapasitesinden ve çevresel etkilerden ödün vermeden birim üretim başına enerji tüketiminin azaltılması konusu detaylı işlenecektir.

2. Kütle korunumu ve Endüstriyel fırınlarda uygulanması

Bilindiği gibi çekirdek parçalanması sonucu (nükleer yakıtlarda olduğu gibi) kütle korunumu eşdeğeri bir enerji açığa çıkmaktadır. Bu durumda kütle korunumu ve enerjinin korunumu yasalarının birlikte uygulanması gerekir. Eğer çekirdek parçalanması yoksa bir sistem için kütle korunumu en genel halde aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 1. Kütle dengesi için genel şekil

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

Eğer sistemde kararlı rejim söz konusu ise sisteme giren ve çıkan kütlelerin zamanla değişmediği durum söz konusu olacaktır ve sistem içinde bir birikme olmayacağı için kütlelerin korunumu aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\sum_{i=1}^n m_i - \sum_{j=1}^m m_j = 0 \quad (2)$$

Eğer sistem içinde kimyasal reaksiyon gerçekleşiyorsa örneğin yanma prosesleri gibi bu durumda sistemden çıkan ürünlerin bileşenleri ve miktarlarının belirlenmesi gerekir. Bunun içinde ilgili bağıntıların kullanılması gerekir. Yanma durumu söz konusu ise denklemleri aşağıdaki gibi özetlenebilir. Yanmanın dışında kimyasal reaksiyon gerçekleşiyorsa onunda reaksiyon denklemleri açık bir şekilde yazılmalı ve bileşen hesaplamaları ona göre yapılmalı.

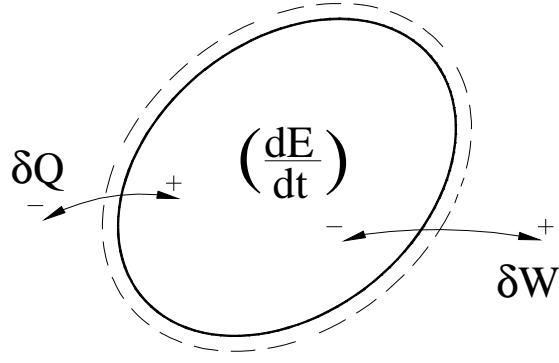
3. Termodinamiğin I. Yasası ve Endüstriyel fırınlarda uygulanması

Termodinamiğin birinci yasasına geçmeden önce kapalı ve açık sistemleri tanımlayalım. **Kapalı sistem**; çevresiyle kütle alış verişinin dışında her türlü enerji alış verişi yapan sistem olarak tanımlayabiliriz. **Açık sistem** ise enerji alış verişiyle birlikte kütle alış verişinin birlikte gerçekleştirildiği bir sistemdir.

Enerji iş yapabilme yeteneği olarak adlandırılabilir. Isı ve iş bir sistemden akış haline olan enerjilerdir. **Isı**, enerjinin bir sistemden diğer bir sisteme geçişi sadece sıcaklık farkından dolayı gerçekleşiyorsa geçiş halinde olan bu enerjiye ısı enerjisi adı verilir. Diğer taraftan bir sistemden dışarıya enerji sıcaklık farkının dışında iletiliyorsa bu geçiş halinde olan enerjiye **iş** adını veriyoruz.

Termodinamiğin birinci yasası bize enerjinin vardan yok yoktan var edilemeyeceğini ve korunduğunu ancak bir türden diğer bir türe dönüşebileceğini söylemektedir.

Şekil 2.2'de kapalı bir sistem görülmektedir. Bu kapalı sistem için termodinamiğin birinci kanunu uygulanırsa,

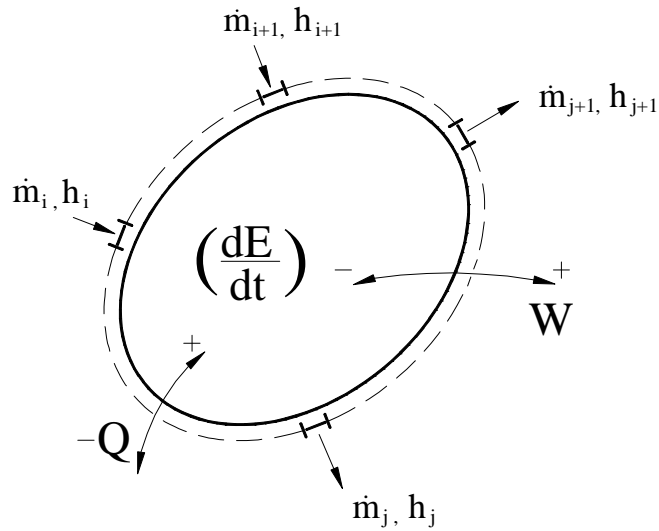


Şekil 2: Kapalı bir sistem örneği

$$\delta \dot{Q} - \delta \dot{W} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{\text{sistem}} \quad (3)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıda δQ , sisteme iletilen ısıyı, δW , sistemden üretilen işi, eşitliğin sağındaki terimde sistemin enerjisindeki değişmeyi ifade etmektedir.

Açık sistem içinde termodinamiğin birinci kanunu Şekil 2.3 esas alınarak, en genel durum için aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 3.2. Açık bir sistem örneği

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{sistem} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + Z\right)_i - \sum_{j=1}^p \dot{m}_j \left(h + \frac{V^2}{2} + Z\right)_j + \sum \dot{Q} - \sum \dot{W} \quad (4)$$

Bu bağıntıda m akışkanın kütesini, h entalpisini, P basıncını, V hızını ve Z referans düzlemine göre yüksekliğini ifade etmektedir.

Bazı durumlarda çözümlerin sürekli rejim şartlarında zamandan bağımsız olarak elde edilmesi gerekebilmektedir. Bu durumda ilgili denklemlerdeki zamanla ilgili terim devre dışı kalmaktadır. Sistemler ısı alış verişinde bulunmayabilir veya iş alışverişi yapmayabilir yada sisteme giren çıkan kütlelerin hızında olan enerjiler ihmal edilebilir ayrıca potansiyel enerji değişimi olmadığı varsayılabilir. Sisteme giriş çıkışlar tek hat üzerinden olabilir. Bu durumlarda denklem daha basit ifadelerle indirgenebilmektedir.

Ayrıca bazı basitleştirici yaklaşımlar yapılarak zaman bağılı problemlerde çözülebilir. Bu durumda sistemdeki değişim başlangıç ve son hal arasında yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + Z\right)_i - \sum_{j=1}^p \dot{m}_j \left(h + \frac{V^2}{2} + Z\right)_j + \sum \dot{Q} - \sum \dot{W} \\ = \left[m_2 \left(u_2 + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2\right) - m_1 \left(u_1 + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1\right) \right]_{\substack{\text{kontrol} \\ \text{hacmi}}} \end{aligned} \quad (5)$$

Kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği sistemlere enerji korunumu kanunu uygulanırken reaksiyonun gerçekleşmesi sonucu açığa çıkan veya sisteme ilave edilmesi gereken ısılarda (oluşum entalpideride) göz önünde bulundurularak denklemlere ilave edilmelidirler.

4. Termodinamiğin II. Yasası

Termodinamiğin birinci kanunu bize enerji dönüşümlerinin hangi sınırlar içinde gerçekleşeceğini açıklayamamaktadır. Termodinamiğin ikinci kanunu enerjilerin farklı kalitelerde olduklarını ve ısının tamamını işe dönüştürme imkanının bulunmadığını ve en fazla Carnot verimi ile ifade edilen kısmı kadarının işe dönüşebileceğini söylemektedir. Carnot verimli ifade aşağıda verilmiştir.

$$W = Q \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) \quad (6)$$

Dolayısıyla ısı kaynağının sıcaklığı ne kadar yüksekse o ısı kaynağının kullanılabilirliği o kadar yüksek olmaktadır. Sonuç olarak endüstriyel fırınlarda kullanılan ısı ve elektrik enerjisinin kaliteleri farklı olduğu için doğal olarak maliyetleri de farklı olacaktır ve kullanımlarında daha dikkatli davranılmalıdır ve tasarruf imkânları daha titiz analiz edilmelidir.

5. Yakıtların Alt ve Üst Isıl Değerleri ve Yanma havası miktarı hesabı

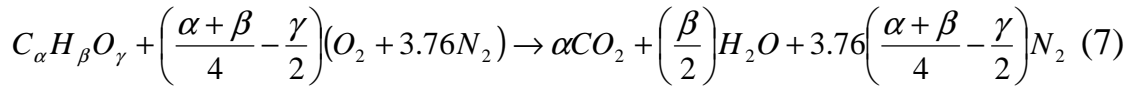
Bir yakıtın ısıl değeri: Başlangıçta (referans şartları örneğin) 25 °C de bulunan bir kg yakıtın oksijenle tamamen yanması sonucu, bu yakıttan elde edilen yanma sonu ürünlerinin sıcaklığının 25 °C ye kadar soğutulması durumunda elde edilen ısı miktarı olarak tanımlanabilir.

Isıl değer; üst ısıl değer ve alt ısıl değer olmak üzere iki şekilde tanımlanabilmektedir. **Üst ısıl değer (H_u)** yanma ürünleri içindeki su buharının yoğuşturulması sonucu çekilen ısıda göz önüne alınırsa yakıtın üst ısıl değeri elde edilir. Baca gazı içindeki su buharının yoğuşturulması söz konusu değilse, yakıttan elde edilen ısıl değer **alt ısıl değer (H_o)** olarak adlandırılmaktadır. Alt ısıl değer, üst ısıl değerden yanma ürünlerindeki suyun buharlaşması için gerekli ısının çıkartılması ile elde edilir.

$$H_o = H_u - \frac{m_{H_2O}}{m_y} h_{fg}$$

Bu denklemdeki h_{fg} : 25 °C'de suyun gizli buharlaşma entalpisini göstermekte olup (2440 kJ/kg su) değerindedir. Yakıttaki nemin buharlaşması ve hidrojenin oksijenle reaksiyona girmesi sonucu yanma ürünlerinde su buharı bulunur.

Stokiyometrik miktarda hava ile, karbon, hidrojen ve oksijen içeren bir yakıtın yanması sonucu, C, H, O ve N atomlarının atom dengesinden aşağıdaki genel ifade elde edilebilir.



Bu bağıntıdaki α , β ve γ yakıtın bir molekülündeki karbon, hidrojen ve oksijen atomlarının sayısını göstermektedir. Ayrıca α , β ve γ karbon, hidrojen ve oksijenin mol yüzdelerini de ifade etmektedir. Birim mol yakıt için stokiyometrik havanın mol miktarı,

$$\left(\frac{n_{hs}}{n_y} \right) = 4.76 \left(\frac{\alpha + \beta}{4} - \frac{\gamma}{2} \right) \quad (8)$$

Şeklinde elde edilir. Fazla hava yüzdesi veya hava fazlalık katsayısı,

$$\% \text{ Fazla Hava} = \frac{100.(m_h - m_{hs})}{m_{hs}} = \frac{100.(n_h - n_{hs})}{n_{hs}} = \frac{100.(n_{O_2} - n_{O_2(s)})}{n_{O_2(s)}} \quad (9)$$

Bağıntısı yardımı ile hesaplanır. Fazla hava miktarı yanma sonucu elde edilen ürünlerin kompozisyonları ölçülerek elde edilebilir. Ölçülen mol miktarlarından hareketle, yanmadan arta kalan miktarların fazla olacağı yaklaşımı ile

$$\% \text{ Fazla Hava} = 100. \left[\frac{(n_{O_2})_{bg}}{((n_{N_2})_{bg} / 3.76) - (n_{O_2})_{bg}} \right] \quad (10)$$

Şeklinde elde edilir.

6- Fırınlarda Enerji Analizinde Kullanılabilecek Diğer Bağıntılar

Enerji analizinde sistemdeki entalpilerin bir referans sıcaklığın temel alınarak hesaplanması oldukça önemlidir. Farklı kaynaklardan alınan entalpi değerleri farklı referans sıcaklıkları için hazırlanmış olabilir aynı referans sıcaklığındaki entalpi değerleri esas alınmazsa hesaplamalar hatalı olacaktır. Bu yüzden enerji analizlerine başlamadan önce bir (0 °C, 20 °C, 25 °C veya çevre sıcaklığı) referans sıcaklığı olarak seçilmeli ve tablolardan alınan değerler bu referans sıcaklığına dönüştürülmeli.

- Yakıtla sisteme beslenen enerji

$$\dot{Q}_{ya} = \dot{m}_y (H_o + C_{ya} (T_{ya} - T_r)) \quad (11)$$

Bu denklemde;

\dot{m}_{ya} : sisteme beslenen yakıt debisini (kJ/h)

H_o : Yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg)

C_{ya} : Yakıtın özgül ısısı c

T_{ya} : yakıtın sıcaklığı (°C)

Değişik yakıtlar için özgül ısıların sıcaklıkla değişmediği yaklaşımı ile aşağıdaki gibi kullanılabilir.

Sıvı yakıtlar için: 2.1 (kJ/kg K)

LPG için : 2.5 (kJ/kg K)

Kömür için : 1.3 (kJ/kg K)

Eğer baca gazında su buharının yoğuşması sonucu kullanılan ısı hesaba katılıyorsa sisteme yakıtla beslenen enerjide yakıtın üst ısıl değeri esas alınmalıdır.

- Havanın ve baca gazının entalpilerini hesabı

Hava ve baca gazları içeriğinde su buharı bulunduğu için entalpilerinin hesabında neminde hesaba katılması gerekir.

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g [C_g (T_g - T_r) + (w \cdot (C_{sb} (T_g - T_r) + 2501.6))] \quad (12)$$

\dot{m}_g : kuru baca gazı debisi (kg/h)

T_g : gaz sıcaklığı ($^{\circ}C$)

W : özgül nem miktarı (kgH₂O/ kg kuru gaz)

C_g : kuru gaz özgül ısısı (kJ/kg K)

Özgül ısının sıcaklıkla değişmediği yaklaşımı yapılırsa C_g değeri,

Hava için : 1 (kJ/kg K)

Baca gazı için: 1.1 (düşük hava fazlalık katsayısına sahip)

Alınabilir. Yine aynı yaklaşımla su buharının özgül ısısı (C_{sb})=1.9 (kJ/kg K) olarak kullanılabilir. Unutulmamalıdır ki sıcaklık aralığı büyük olan sistemlerde bu denklemlerde sıcaklığın fonksiyonu olan özgül ısı denklemleri kullanılmalıdır.

- Malzeme akışlarıyla ilgili enerjinin hesaplanması

Fırınlara beslenen malzemeler bir ön ısıtmadan geçirilerek fırına sevk edilebilir. Ayrıca fırında ısınmış malzemeler fırını terk ederken dış ortama enerji taşımaktadırlar. Bu enerjilerin miktarı aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_m = \dot{m}_m C_m (T_m - T_r) \quad (13)$$

Bu denklemde;

\dot{m}_m : malzeme debisi (kg/h)

T_m : malzemenin sıcaklığı ($^{\circ}C$)

C_m : malzemenin özgül ısısı (kJ/kg $^{\circ}C$)

Özgül ısının sıcaklıkla değişmediği yaklaşımı yapılırsa C_m değeri değişik malzemeler için aşağıdaki gibi kullanılabilir.

Su : 4.18 (kJ/kg $^{\circ}C$)

Çelik : 0.5 (kJ/kg $^{\circ}C$)

Cam : 0,8 (kJ/kg $^{\circ}C$) ($\rho=2300$ kg/m³ için)

Ateş tuğlası : 1.0 (kJ/kg $^{\circ}C$)

Eğer özgül ısı sıcaklığın fonksiyonu ise ilgili denklemde yerine yazılarak, ilgili sıcaklık sınırları arasında elde edilen bu integral çözümlidir.

- Sıcak Yüzeylerde Kaybolan ısı miktarı

Sıcak yüzeyler buldukları ortama ile ışıınım ve taşınım yoluyla ile ısı alışverişinde bulunur. Bu ısı alışverişini aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{kayna} = (u_{taş} + u_{ışınma}) A(T_y - T_o) \quad (14)$$

Bu bağıntıdaki semboller,

T_y : yüzey sıcaklığını ($^{\circ}C$)

T_o : çevre sıcaklığını ($^{\circ}C$)

A : Taşınım yüzey alanı (m^2)

$u_{taş}$: Isı taşınım katsayısı (kJ/m²h $^{\circ}C$)

$u_{ışınma}$: Işıınıma eşdeğer ısı taşınım katsayısı (kJ/m²h $^{\circ}C$)

Şeklinde tanımlanmışlardır. Fırınlardan yüzeyinden Isı taşınım katsayısı için aşağıdaki ifade kullanılabilir.

$$u_{tas} = B(T_y - T_o)^{0.25} \quad (15)$$

Bu denklemdeki B bir katsayı olup değişik durumlar için aşağıda verilmiştir.

Düşey yüzeyler ve geniş silindirler için $B=5.22$

Yatay yüzeyler yukarı bakan $B=6.12$

Yatay silindir için $B=4.32$

Fırınlardan yüzeyinden ışınlama ile ısı geçişini hesaplayabilmek için kullanılan ışınlama eşdeğer ısı taşınım katsayısı için aşağıdaki ifade kullanılabilir.

$$u_{ışınma} = \left(\frac{\epsilon \sigma}{\theta_y - \theta_o} \right) (\theta_y^4 - \theta_o^4) \quad (16)$$

Bu denklemdeki,

θ : Kelvin cinsinden sıcaklığı

σ : Stefan – Boltzman sabitini ($5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

ϵ : yüzey ışınlama yayma katsayısını

göstermektedir. Yüzey ışınlama yayma katsayısı için değişik malzemeler için aşağıdaki gibi seçilebilir.

Paslı çelik için $\epsilon=0.4-0.7$

Boyalı çelik $\epsilon=0.8-0.9$

Parlatılmış alüminyum $\epsilon=0.1$

Oksitlenmiş alüminyum $\epsilon=0.2-0.3$

Refraktör Malzeme $\epsilon=0.4-0.8$

- **Buhar kondensatı ile ilgili enerji miktarı**

Endüstriyel proseslerin çoğunda buharla taşınan ısı yoğuşturularak kullanılmaktadır. Proseslerde buharla kullanılan ısının hesaplanmasında da prosese beslenen buharın enerjisinden prosesi terk eden kondens olmuş veya kısmen kondens olmuş suyun veya ıslak buharın enerjisinden çıkarılması sonucu elde edilir. Sistemden çıkan kısmen kondens olmuş yada ıslak buharın enerjisi aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_x = \dot{m}_b (h_s + x(h_b - h_s))$$

Bu denklemdeki semboller aşağıdaki gibi tanımlıdır.

\dot{Q}_x : ıslak buharla enerji akışı (kJ/h)

\dot{m}_b : ıslak buhar debisi (kg/h)

h_b : doymuş buharın entalpisi (kJ/kg)

h_s : doymuş suyun entalpisi (kJ/kg)

x : kuruluk derecesi

7. Nem – Hava Karışımları ve Psikrometri

Psikrometri hava ve su buharı karışımının özelliklerini inceleyen bir bilim dalıdır. Atmosferik havanın tamamen kuru olmaması ve kurutma fırınlarında sıcaklığının yükseltilerek nem taşıma kapasitesini bulunmasından dolayı psikrometri önem kazanır. Psikrometri hava şartlandırma, kurutma, soğutma nem alma, ısıtma ve soğutma kulelerinin temelini oluşturmaktadır. Bu konu kapsamında bazı temel kavramları aşağıdaki gibi açıklayabiliriz.

Kuru termometre sıcaklığı: her hangi bir ortamdaki hava ve nem karışımının, nem oranına bağlı olmadan neme doymamış halindeki karışım sıcaklığı olarak ifade edilebilir.

Yaş termometre sıcaklığı: Havanın neme doymuş durumundaki sıcaklığı olarak tanımlanabilir.

Özgül nem: Bir kilogram kuru hava içerisindeki nem miktarı olarak tanımlanmaktadır ve aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir.

$$w = \frac{m_b}{m_h} \left(\frac{kg \text{ nem}}{kg \text{ kuru hava}} \right) \quad (7)$$

Bağlı nem: Sabit sıcaklıkta nemli hava içerisindeki nemin kısmi basıncının, doymuş durumdaki nemin kısmi basıncına oranı olarak tanımlanır.

$$\phi = \left(\frac{P_b}{P_d} \right)_{T=st} \quad (8)$$

Ayrıca havanın kısmi basıncı, nemin kısmi basıncı ve özgül nem arasında aşağıda verilen bağıntı mevcuttur.

$$w = 0.622 \frac{P_b}{P_h} \quad (9)$$

Bağlı nem ile özgül hacim arasında aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

$$w = 0.622 \frac{\phi P_d}{P_h} = 0.622 \frac{\phi P_d}{P_T - \phi P_d} \quad (10)$$

Tablo 1: Su buharı için değişik sıcaklıklardaki doyma basınçları

T(°C)	P(kPa)	T(°C)	P(kPa)	T(°C)	P(kPa)	T(°C)	P(kPa)
0	0.6108	36	5.940	72	33.96	108	133.90
2	0.7055	38	6.624	74	36.96	110	143.27
4	0.8129	40	7.375	76	40.19	112	153.16
6	0.9345	42	8.198	78	43.65	114	163.62
8	1.0720	44	9.100	80	47.36	116	174.65
10	1.2270	46	10.086	82	51.33	118	186.28
12	1.4014	48	11.162	84	55.57	120	198.54
14	1.5973	50	12.335	86	60.11	122	211.45
16	1.8168	52	13.613	88	64.95	124	225.04
18	2.0620	54	15.002	90	70.11	126	239.33
20	2.3370	56	16.511	92	75.61	128	254.35
22	2.6420	58	18.147	94	81.46	130	270.15
24	2.9820	60	19.920	96	87.69	132	286.70
26	3.3600	62	21.840	98	94.30	134	304.10
28	3.7780	64	23.910	100	101.33	136	322.30
30	4.2410	66	26.150	102	108.78	138	341.40
32	4.7530	68	28.560	104	116.68	140	361.40
34	5.3180	70	31.160	106	125.04	142	382.30

Nemli havanın yoğunluğu, aşağıdaki denklemler yardımıyla elde edilebilir.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_h + m_b}{V} \quad (11)$$

$$\rho = \frac{1}{\theta} \left[\frac{P_h}{R_h} + \frac{P_b}{R_b} \right] \quad (12)$$

Nemli havanın entalpisi: Nemli havanın entalpisi 0 (°C) referans sıcaklığı esas alınmak üzere kuru termometre sıcaklığının ve özgül nemin fonksiyonu olarak aşağıdaki bağıntı şeklinde yazılabilir. Bu denklemdeki entalpi bir kg kuru hava için nemli havanın entalpisini ifade etmektedir.

$$h = 1.0035.T + w(2501.6 + 1.8723T) \quad \left(\frac{kJ}{kg \text{ kuruhava}} \right) \quad (13)$$

Bu entalpi denkleminde havanın ve su buharının özgül ısılarının sıcaklıkla değişmediği yaklaşımı yapılmıştır.

Kurutma tekniğinde yukarıda bahsedilen önemli parametreler arasındaki ilişki en iyi olarak Psikrometri diyagramında açıklanabilir. Nemli havanın iki temel özelliği verildiğinde diyagram üzerinde diğer tüm özellikler rahatlıkla

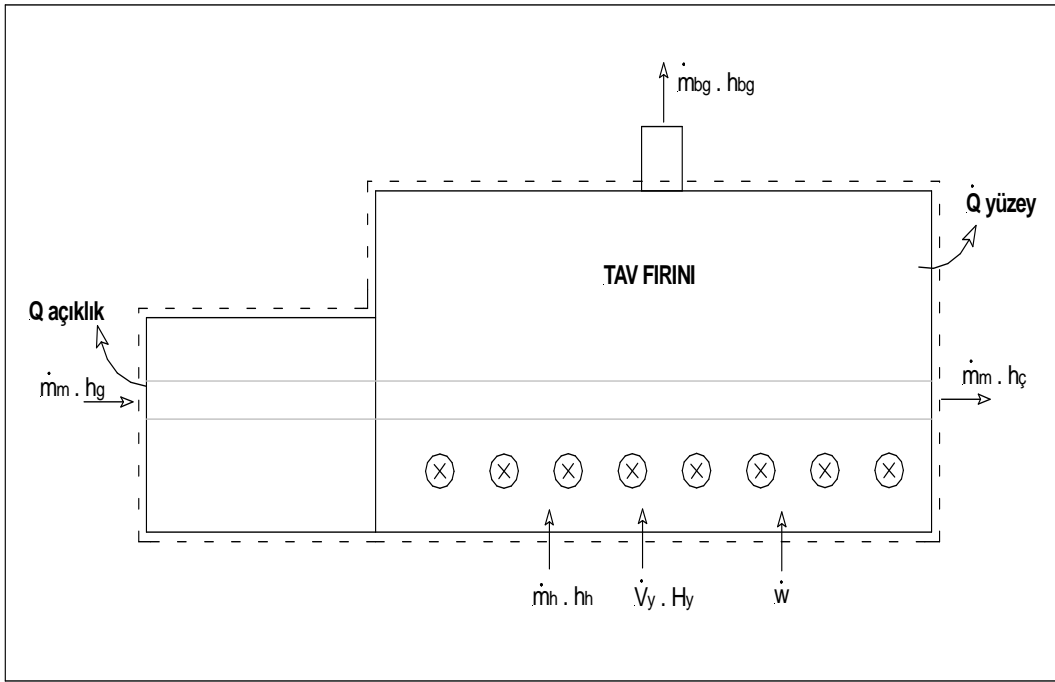
okunabilmektedir. Bununla beraber hava ile yapılan prosesler (nem alma, nem verme, soğutma, ısıtma, iki havanın karıştırılması) yine en iyi bu diyagram yardımıyla açıklanabilirler.

8. Örnek Fırınlr

a-Tavlama fırını

Tav fırınları metal ve diğer malzemeler için ısıl işlemlerin uygulandığı fırınlar olup değişik malzemeler için değişik şartlar ve sıcaklıklarda işletilmektedirler. Özellikle yüksek sıcaklıklarda çalıştırılan tavlama fırınları, endüstriyel işletmelerde gerek yakıt tüketimi açısından gerekse çevreye verdiği atık gazların oluşturduğu kirlilik açısından mümkün olduğunca verimli çalıştırılması gereken sistemlerdir. Bu örnekte (G. Ertem, B. Çelik ve S. Yeşilyurt'un) yaptıkları çalışma esas alınmıştır.

Tav fırınına ait basit şema Şekil 4'de verilmiştir. Bu örnek tav fırını çalışmasında ölçümlerin yapıldığı tav fırınında sistem sınırları girişindeki yükleme tablasının bitimi ve fırın bölümünden sonraki yavaş soğutma ünitesinin başlangıcı olarak belirlenmiştir.



Şekil:8.1 Tav fırınında kütle ve enerji akış durumu

Bu sisteme giren enerji olarak, yakıtle giren enerji (Q_y), brülör fanlarına iletilen mekanik enerji (W), çıkan enerjiler ise malzemeye aktarılan enerji ($m_m \cdot h_ç$), baca gazı ile dışarı atılan enerji ($m_{bg} \cdot h_{bg}$), yüzeyden kaybolan enerji ($Q_{yüzey}$) ve yükleme açıklığından kaybolan enerji ($Q_{açıklık}$) olarak ifade edilebilir.

Tav fırını ile ilgili yapılan ölçüm sonuçları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 8.1: Baca gazı sıcaklığı ve analizi ölçüm sonuçları

Baca gazı sıcaklığı (°C)	637
% O ₂	4.8
% CO ₂	8.9
% CO	0.9

Tablo 8.2: Diğer ölçüm sonuçları

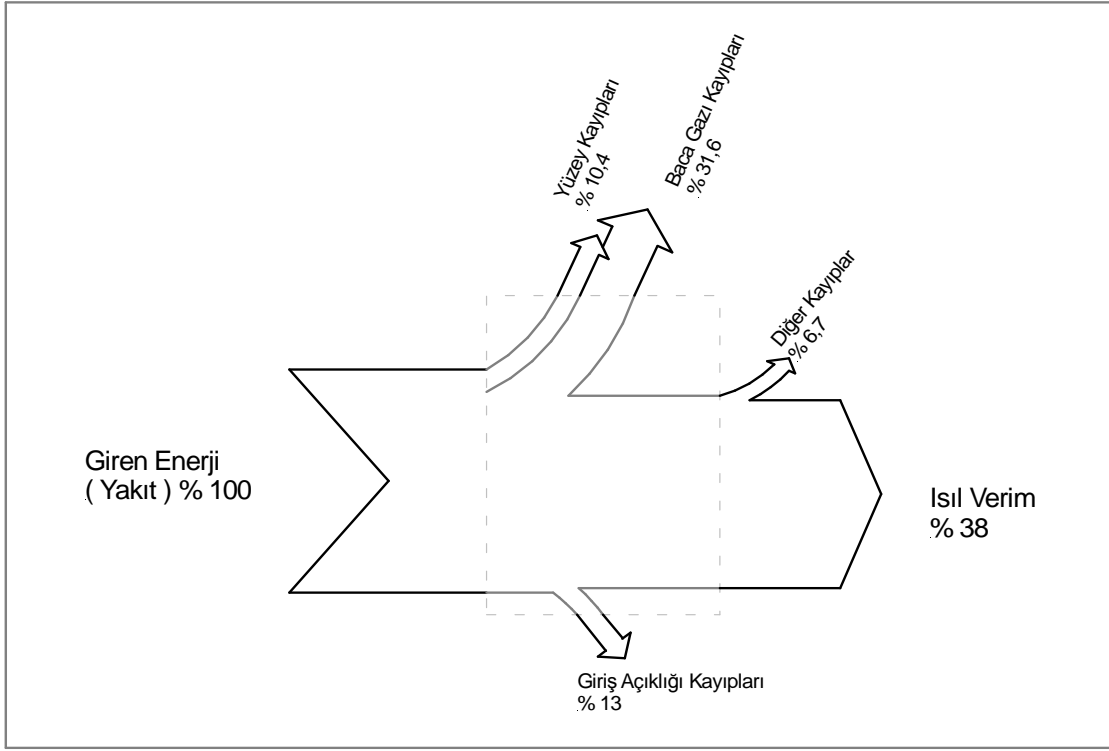
Ortam sıcaklığı (°C)	17.4
Bağıl nem (%)	37
Doğal gaz tüketimi (Nm ³ /h)	85
Tavlanan boru miktarı (kg/h)	2625
Ton başına yakıt tüketimi (Nm ³ /h Ton)	32.4
Ürün çıkış sıcaklığı (°C)	695

Tablo 8.3: Fırın yüzey alanları ve ortalama yüzey sıcaklıkları

Yüzey	Alan (m ²)	Ortalama yüzey sıcaklığı (°C)
Yan yüzey A	43.84	111.0
Yan Yüzey B	43.84	101.0
Üst yüzey	38.36	60.0
Ön cephe	1.97	68.8

Tablo 8.5: Tav fırınındaki enerji akışları

Tür	Miktar(kJ/h)
Yakıt enerjisi	1162136.6
Malzemeye aktarılan enerji	445704
Baca gazı kayıpları	367510.62
Yüzey kayıpları	120843.41
Giriş açıklığı kaybı	150630.48
Diğer kayıplar	77448



Şekil 8.2: Tav fırınının enerji akışınının Sankey diyagramında gösterilmesi

Tav fırınının verim hesaplaması aşağıdaki denklem yardımıyla yapılır.

$$\eta = (\text{Tav fırınında malzemeye aktarılan enerji} / \text{fırına beslenen enerji})$$

örnek aldığımız tav fırınının verimi Sankey diyagramından da görüleceği gibi,

$$\eta = \frac{1162136.6}{445704} = \% 38$$

Şeklinde elde edilir.

b-Temperleme fırını

Temperleme işlemi yatay hat üzerinde camın dış yüzeylerine basınç gerilimi, cam ortasına ise dolaylı bir çekme gerilimi kazandırmak için ısıtma ve soğutma aşamalarını içerir. Temperli cam işlemsiz cama göre yaklaşık 5 kat daha dayanıklı olup; kırıldığı zaman zar büyüklüğünde parçalara ayrılarak yaralanma riskini azalttığından güvenlik camı olarak kullanıma uygundur.

Temper işleminden sonra camlara herhangi bir kesim, delik delme, kenar ve yüzey işlemi yapılamaz (kumlama hariç).

Yalnızca bazı bakış açıları ve ışık koşullarında fark edilebilen "temperleme izleri" ile "kamburluk" ve "dönüklük" toleransları içinde kalmak kaydıyla ortaya çıkan distorsiyonlar ısıtma işleminin kaçınılmaz ve önlenemeyen sonucudur. Temperleme işlemi sırasındaki hassas bir ısı rejimi uygulaması ile minimuma indirilmiş izler başlı başına bir kusur olarak nitelendirilmemektedir.

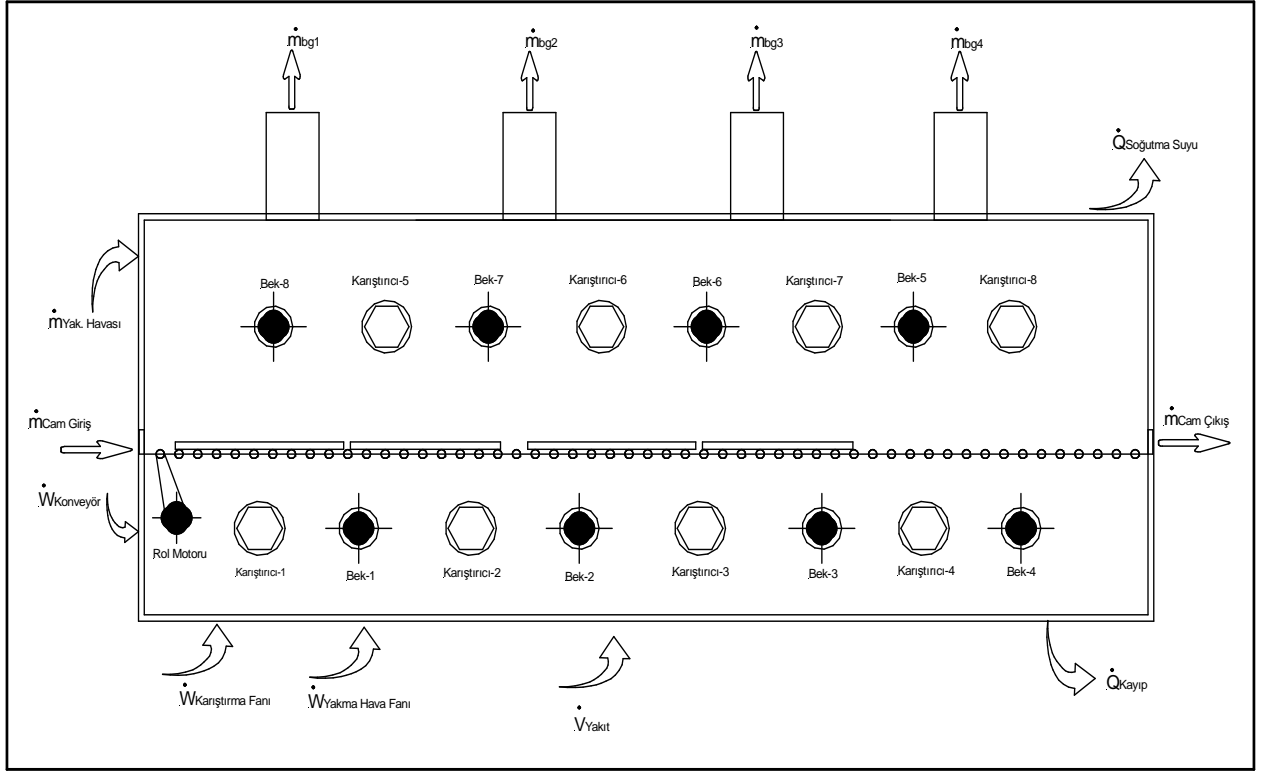
Temperleme işlemindeki temel problemlerden bir tanesi de temperleme maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Bununun nedeni ise temperlemede yakıt sarfiyatının yüksek olması ve fırının verimsiz çalışması gösterilebilir. Aşağıdaki şekilde bir temperleme fırınının genel bir resmi görülmektedir.



Şekil 8.3: Cam temperleme fırınının genel görünümü

Temperleme fırınının sistem olarak ele alındığı ve kütle ile enerji akışlarının ifade edildiği şema Şekil 8.4'de verilmiştir. Temperleme işlemi camların fırına yüklenmesini sağlayan fırın öncesi bir konveyör daha sonra fırın ve fırın

çıkışında da yüksek hızda ani soğutma işlemleri ile gerçekleşmektedir. Analizde sadece fırın kısmı analiz edilecektir.



Şekil 8.4: Cam temperleme fırını için kütle ve enerji akışları genel görünümü

Bu sisteme giren enerji olarak, yakıtla giren enerji (Q_y), brülör fanlarıyla iletilen mekanik enerji (W), fırının arkasına yerleştirilmiş fırın içi hava fanlarının tükettiği enerji sayılabilir. Çıkan enerjiler ise malzemeyle çıkan enerji (Q_m), baca gazı ile dışarı atılan enerji (Q_{bg}), arka fanları soğutmak için kullanılan soğutma suyu ile çekilen ısı ve yüzeyden kaybolan ısı ($Q_{yüzey}$) olarak ifade edilebilir.

Bu örnek için ilgili fabrikada cam temperleme biriminde gerekli ölçümler yapılarak ekteki tablo doldurulduktan sonra gerekli hesaplamalar yapılarak temperleme fırınının verimi çıkartılarak bu verimin yükseltilmesi için yapılması gerekenler tartışılacaktır.