

**ENDÜSTRİYEL TAV FIRINLARINDA KARIŞIK
YAKIT (KOK GAZI+YÜKSEK FIRIN GAZI)
KULLANIMI İLE DOĞALGAZ KULLANIMININ
ENERJİ VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ**

**2014
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Ergin GÜNEY

**ENDÜSTRİYEL TAV FIRINLARINDA KARIŞIK YAKIT (KOK
GAZI+YÜKSEK FIRIN GAZI) KULLANIMI İLE DOĞALGAZ
KULLANIMININ ENERJİ VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ**

Ergin GÜNEY

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2014**

Ergin GÜNEY tarafından hazırlanan “ENDÜSTRİYEL TAV FIRINLARINDA KARIŞIK YAKIT (KOK GAZI+YÜKSEK FIRIN GAZI) KULLANIMI İLE DOĞALGAZ KULLANIMININ ENERJİ VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 14/01/ 2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

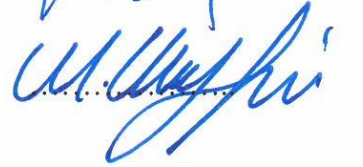
Başkan : Doç.Dr.Kurtuluş BORAN (GÜ)



Üye : Doç.Dr.Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)



Üye : Yrd.Doç.Dr.Muhammet KAYFECİ (KBÜ)



...../...../2014

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof.Dr. Mustafa BOZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ergin GÜNEY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ENDÜSTRİYEL TAV FIRINLARINDA KARIŞIK YAKIT (KOK GAZI+YÜKSEK FIRIN GAZI) KULLANIMI İLE DOĞALGAZ KULLANIMININ ENERJİ VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ

Ergin GÜNEY

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Ocak 2014, 46 Sayfa

Enerji kaynaklarının azalması, enerji ihtiyacının ve enerji maliyetlerinin artması, sanayideki rekabetçi koşullar ve çevresel duyarlılık enerji kaynaklarını verimli kullanmayı gerektirmektedir. Bu çalışmada sanayide enerjinin verimli kullanılması kapsamında iki farklı sanayi kuruluşunda bulunan biri doğalgaz yakıtlı diğeri ise karışık gaz yakıtlı haddehane tav fırınlarında enerji verimliliği çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmada hem karışık yakıt kullanan tav fırınında hem de doğalgaz kullanan tav fırınında ölçümler yapılmış, yapılan ölçüm sonuçları her bir tav fırını için ayrı değerlendirilmiş ve hesaplamalar yapılmıştır. Mevcut durumda, karışık yakıt kullanan haddehane tav fırını verimi %50,62, doğalgaz kullanan haddehane tav fırını verimi ise %60,52 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Sözcükler : Endüstriyel fırınlar, enerji analizi, enerji verimliliği, yanma, karışık gaz (kok gazı + yüksek fırın gazı), doğalgaz.

Bilim Kodu : 914.1.038

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EFFECTS OF BURNING NATURAL GAS AND MIXED GAS (COKE OVEN GAS + BLAST FURNACE GAS) ON ENERGY EFFICIENCY OF INDUSTRIAL REHEATING FURNACES

Ergin GÜNEY

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

January 2014, 46 Pages

Decrease in energy resources, increase in energy requirement and energy costs, competitive conditions in industry and environmental sensitivity have required energy resources to be used efficiently. In this study, within the scope of efficient use of energy in industry; a study on energy efficiency has been done in reheating furnaces with natural gas and mixed gas of rolling mills in two different industrial facilities. Within the study; measurements have been done in both reheating furnace with natural gas and reheating furnace with mixed gas, the measurements have been evaluated separately for each reheating furnaces, calculations have been done by using measurement results and companies' data. As a result of the study, efficiency of the reheating furnace with mixed gas has been calculated as 50,62% and efficiency of the reheating furnace with natural gas has been calculated as 60,52%.

Keywords : Reheating furnaces, energy analysis, energy efficiency, combustion, mixed gas (coke gas + blast furnace gas), natural gas.

Science Code : 914.1.038

TEŞEKKÜR

Tez alışmama verdikleri desteklerden dolayı danışmanım Do. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK' a, ölçümler esnasındaki yardımlarından dolayı Ray Profil Haddehanesi'ndeki alışma arkadaşlarıma, tezime verdikleri her türlü maddi ve manevi destekten dolayı başta Arř. Gör. Enes KILIN olmak üzere Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ndeki araştırma görevlilerine, tezime verdiği destekten dolayı Ünal ÖZTUYAK' a, ayrıca her zaman manevi desteklerini hissettiğim sevgili Eřim' e ve sevgili çocuklarım Enes ve Esat' a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	7
LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	7
BÖLÜM 3	10
3.1. FIRINLARIN SINIFLANDIRILMASI	10
3.1.1. Isı Kaynağına Göre Fırınlar	10
3.1.2. Şarj Şekline Göre Fırınlar	10
3.1.3. Yakıt Şekline Göre Fırınlar	11
3.1.4. Devridaim Şekline Göre Fırınlar	11
3.1.5. Doğrudan Ateşlemeli ve Dolaylı Ateşlemeli Fırınlar	12
3.1.6. Kullanım Şekline Göre Fırınlar	12
3.1.7. Isı Geri Kazanımına Göre Fırınlar	12
3.2. FIRINLARDA KULLANILAN YAKITLAR	13
3.2.1. Yakıtlar Hakkında Genel Bilgi	13
3.2.2. Yakıtlarda Aranılan Özellikler.....	14
3.2.3. Gaz Yakıtlar.....	15

	<u>Sayfa</u>
3.2.3.1. Kok Gazı	15
3.2.3.2. Yüksek Fırın Gazı	16
3.2.3.3. Doğalgaz	17
3.3. ENDÜSTRİYEL TAV FIRINLARINDA VERİMLİLİĞİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER	23
3.3.1. Eksik Yanma.....	23
3.3.2. Hava-Yakıt Oranı.....	24
3.3.3. Baca Gazı Sıcaklığı.....	24
3.3.4. Reküperatörler ve Yakma Havasının Ön Isıtılması	25
3.3.5. Duvar Kayıpları	26
3.3.6. Tufal Kayıpları.....	26
3.3.7. Soğutma Suyu Kayıpları.....	26
3.3.8. Açıklık Kayıpları	27
3.3.9. Yakıt Cinsi	27
3.3.10. Börnerler	27
3.3.11. Kütük Şarj Sıcaklığı.....	27
 BÖLÜM 4	 28
YÖNTEM, ÖLÇÜM VE HESAPLAMALAR	28
4.1. TEORİK TEMEL VE HESAPLAMA YÖNTEMİ.....	28
4.1.1. Yanma.....	28
4.1.3. Fırın Verimi	32
4.2. ÖLÇÜM YÖNTEMİ	32
4.3. KARIŞIK YAKIT KULLANILAN TAV FIRINI ÖLÇÜM SONUÇLARI VE HESAPLAMALAR	34
4.3.1. Karışık Yakıt Kullanılan Tav Fırını Ölçüm Sonuçları	34
4.3.2. Yarı Mamule Verilen Isı.....	35
4.3.3. Toplam Yakıt Isısı	35
4.3.4. Karışık Yakıt Kullanılan Tav Fırını Verimi	36
4.3.5. Karışık Yakıt Kullanılan Tav Fırını Bakım Maliyetleri	36
4.3.6. Karışık Yakıt Kullanılan Tav Fırını Duruşundaki Üretim Kayıpları.....	37
4.3.7. Karışık Yakıt Kullanılan Tav Fırını Tufal Kayıpları	37

	<u>Sayfa</u>
4.4. DOĞALGAZ KULLANILAN TAV FIRINI ÖLÇÜM SONUÇLARI VE HESAPLAMALAR	38
4.4.1. Doğalgaz Kullanılan Tav Fırını Ölçüm Sonuçları.....	38
4.4.2. Yarı Mamule Verilen Isı	38
4.4.3. Toplam Yakıt Isısı	38
4.4.4. Doğalgaz Kullanılan Tav Fırını Verimi.....	39
4.4.5. Doğalgaz Kullanılan Tav Fırını Tufal Kayıpları	39
4.4.6. Doğalgaza dönüşüm için gerekli yatırım maliyeti.....	39
BÖLÜM 5	41
SONUÇ VE ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Dünyada enerji üretimi (IEA, 2013).	1
Şekil 1.2. İnsan kaynaklı global sera gazı emisyonları	2
Şekil 1.3. Küresel enerji tüketimi ve sektörlere göre dağılımı.....	2
Şekil 1.4. Ülkelere göre 1971’den 2012’ ye kadar olan doğalgaz üretimi.....	4
Şekil 1.5. Dünyadaki yakıtların 1971’den 2012’ ye kadar olan tüketim miktarları.....	4
Şekil 1.6. Karışık yakıtlı endüstriyel bir tav fırını.	5
Şekil 1.7. Doğalgaz ile çalışan endüstriyel bir tav fırını.	5
Şekil 3.1. Kok gazı bileşenleri.	16
Şekil 3.2. Yüksek fırın gazı bileşenleri.	16
Şekil 3.3. Doğalgaz üretim ve tüketiminin değişimi.....	17
Şekil 3.4. Doğalgaz üretim ve tüketiminin değişimi.....	18
Şekil 3.5. Bölgelere göre dünya doğalgaz rezervleri.	18
Şekil 4.1. Tav fırını çalışma ve ölçüm sisteminin şematik gösterimi.	33

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Rusya'dan ithal edilen doğalgazda istenen özellikler ve gerçekleşen özellikler	19
Çizelge 3.2. Karışık yakıt ve doğalgazın karşılaştırılması	22
Çizelge 4.1. Karışık yakıt kullanılan tav fırınında kullanılan yakıt debileri	34
Çizelge 4.2. Kok gazı analiz değerleri	34
Çizelge 4.3. Yüksek fırın gazı analiz değerleri	35
Çizelge 4.4. Karışık yakıt kullanılan tav fırını verimi	36
Çizelge 4.5. Doğalgaz kullanılan tav fırını debisi	38
Çizelge 4.6. Doğalgaz kullanılan tav fırını verimi	39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

c_p : sabit basınçta özgül ısı

C_2H_2 : asetilen

C_2H_4 : etilen

C_2H_6 : etan

E : enerji

EJ : exajoule (10^{18} joule)

GJ : giga joule

Gt : giga ton

h : saat

H : alt ısı değer

HY : hava-yakıt oranı

H_2 : hidrojen

kcal : kilo kalori

kg : kilogram

kWh : kilo watt saat

m : kütle

\dot{m} : debi

M : mol kütlesi

MJ : mega joule

MTEP : milyon ton eşdeğer petrol

Mtoe : million ton oil equivalent

m^2	: metrekafe
N	: mol sayısı
Nm^3	: normal metre küp
\dot{Q}	: ısı miktarı
t	: ton
T	: sıcaklık
TEP	: ton eşdeğer petrol
ϕ	: eşdeğerlik oranı
η	: verim
$^{\circ}C$: derece santigrat
%FH	: fazla hava yüzdesi
ΔE	: enerji değişimi
bg	: baca gazı
\mathcal{C}	: çıkan
d	: diğer
g	: giren
s	: stokiyometrik
y	: yakıt
yh	: yakma havası
ym	: yarı mamul
kg	: kok gazı
yfg	: yüksek fırın gazı
dg	: doğalgaz

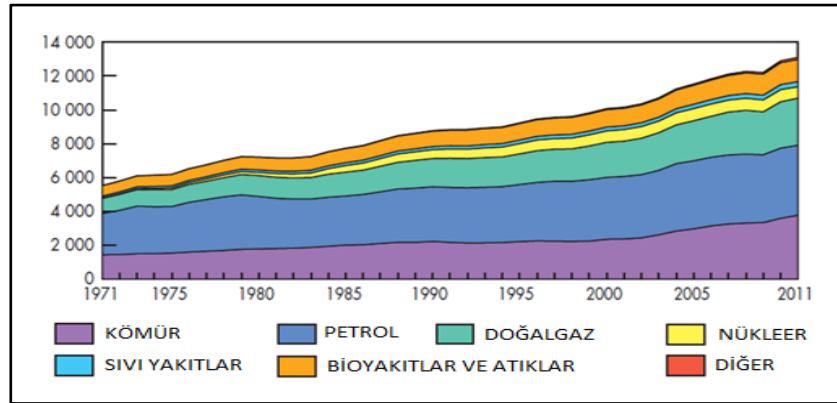
KISALTMALAR

AID	: Alt Isıl Değer
DRI	: Direct Reduced Iron
FD	: Forced Draft
ID	: Induced Draft
IEA	: International Energy Agency
IISI	: International Iron and Steel Institute
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
ob	: orijinal baz
PHAST	: Process Heating Assessment and Survey Tool
TL	: Türk Lirası
USD	: Amerikan Doları
ÜİD	: Üst Isıl Değer
YFG	: Yüksek Fırın Gazı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

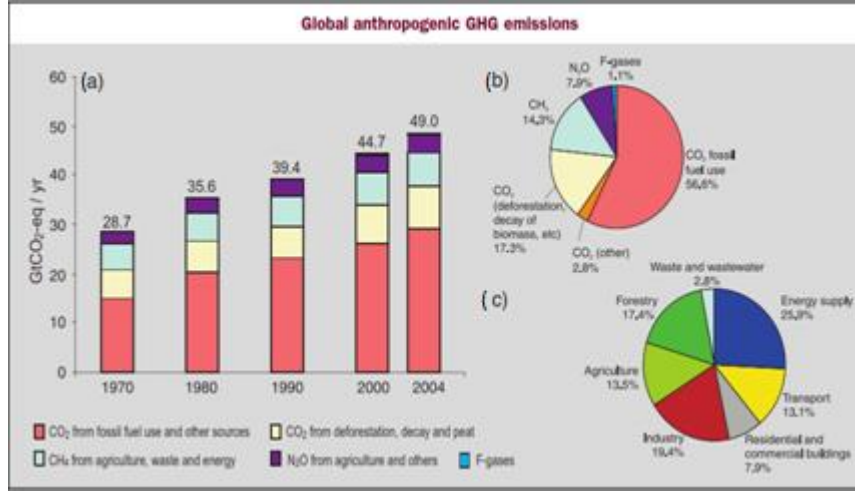
Enerji, insanoğlunun temel ihtiyaçlarının karşılanması ve hayat standartlarının yükseltilmesinde birincil derecede bir gereksinim olarak kabul edilmektedir. Bununla beraber dünyadaki nüfus artışıyla birlikte, sanayileşmenin artması ve teknolojinin gelişmesi her geçen gün enerjiye olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir. Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi dünya enerji üretiminin önemli bir kısmı fosil kökenli yakıtlardan karşılanmaktadır.



Şekil 1.1. Dünyada enerji üretimi (IEA, 2013).

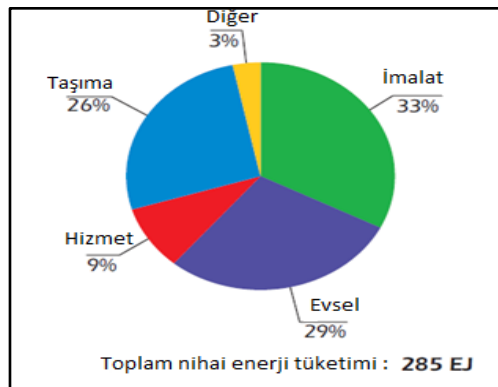
Günümüzde fosil kökenli enerji kaynakları hazır olarak tüketilmekte ve enerji kullanımında önemli bir artış görülmektedir. Enerjinin kullanımı ile enerji kaynakları arasındaki ilişki, enerji maliyetlerinde dramatik bir artışa neden olmasına rağmen kaynakların uygun miktarda kullanımını gerektirmektedir (Terzi and Baykal, 2011). Enerji tüketiminin hızla artması, fosil kökenli yakıtların daha çok kullanılmasına ve atmosfere salınan karbondioksit (CO₂) miktarının artmasına neden olmakta; bunun sonucu oluşan sera etkisi ile iklim değişiklikleri kaçınılmaz hale gelmektedir (Tütünoğlu vd., 2011). CO₂ en önemli insan kökenli sera gazıdır. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi CO₂, 2004 yılındaki toplam insan kaynaklı sera gazı salınımlarının

%77'sini oluşturmuş ve 1970 ile 2004 yılları arasında yıllık CO₂ salınımı %80 oranında 21 Gt'dan 38 Gt'a yükselmiştir. 1970 ile 2004 yılları arasında sera gazı salınımlarında en büyük artış enerji tedariki, taşımacılık ve sanayi sektörlerinden kaynaklanmıştır (IPCC, 2007).



Şekil 1.2. İnsan kaynaklı global sera gazı emisyonları, a) 1970'ten 2004'e yıllık emisyonlar, b) 2004 yılındaki farklı sera gazlarının paylaşımı, c) 2004 yılındaki farklı sektörlerin sera gazı salınımlarının paylaşımı.

1990 ve 2005 yılları arasında küresel boyutta toplam enerji tüketimi %23 oranında artmıştır. Şekil 1.3'te küresel enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı gösterilmiştir. 2005 yılında imalat sanayii %33'lük pay ile enerjiyi küresel olarak en çok tüketen sektör olmuştur (IEA, 2008).



Şekil 1.3. Küresel enerji tüketimi ve sektörlere göre dağılımı.

Tüm dünyada küresel ısınmadan kaynaklanan iklim değişikliği, enerji ve çevre güvenliği, bunun yanında enerjinin verimli ve yararlı kullanımı başlıkları önemli rol oynamaktadır. Yaşam kalitesinden ve üretimden ödün verilmeden enerji verimliliği ile enerji tasarrufu yapılabilmektedir. Jollands ve arkadaşları (2009), tasarruf edilen enerjiyi dönüştürülebilen, ucuz, yerli ve temiz bir enerji kaynağı olarak tanımlamışlardır (Terzi and Baykal, 2011).

Ülkemizde, sanayide %15, yerleşim yerlerinde %35 ve taşımacılık maliyetlerinde %15 enerji tasarruf potansiyeli mevcuttur. Bu potansiyeller; yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edebilecek enerjiden daha yüksektir. Eğer enerji verimliliğine doğru kararlı ve başarılı adımlar atılabilirse ülkemizdeki enerji talebi 2020 yılında %20 oranında (45 MTEP) azalacaktır (Terzi and Baykal, 2011).

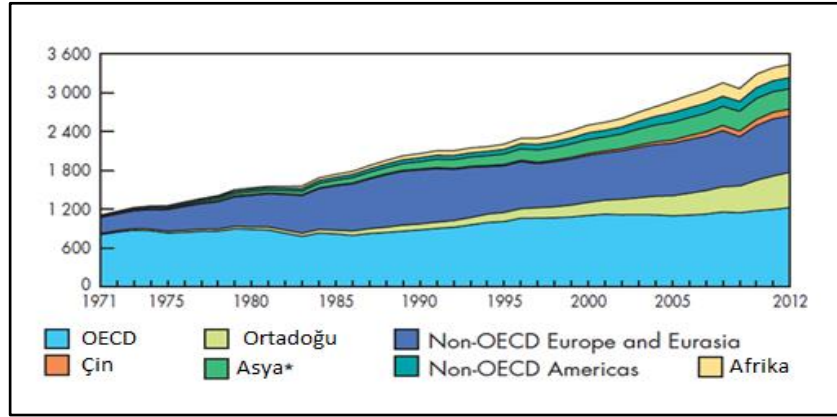
Demir-çelik sektörü yıllık yaklaşık 24 EJ ($\times 10^{18}$) enerji tüketimi ile en çok enerji tüketen sektörlerden birisidir ve dünyanın toplam enerji tüketiminin %5'ine karşılık gelmektedir (Xu and Cang, 2010).

Demir-çelik sektörü kömürü birincil indirgeyici madde olarak kullanmaktadır. Kömürün en büyük bileşeni olan karbon (C), süreç sonucunda çevreye CO₂ olarak bırakılır. Bu yüzden bu sektördeki enerji tüketimi CO₂ salınımına eşittir ve enerji verimliliğini artırmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır (Nogami vd., 2006).

Demir-çelik sektöründe enerji verimliliğinin artırılması sera gazı salınımlarının azaltılmasında etkili ve kısa vadeli bir yaklaşımdır. Brüksel'de bulunan International Iron and Steel Institute (IISI) Kyoto süreci sonrasında iklim değişikliğine yeni ve küresel bir yaklaşım geliştirmek için devletleri demir-çelik sektörü ile çalışmaya davet etmiştir (Xu and Cang, 2010).

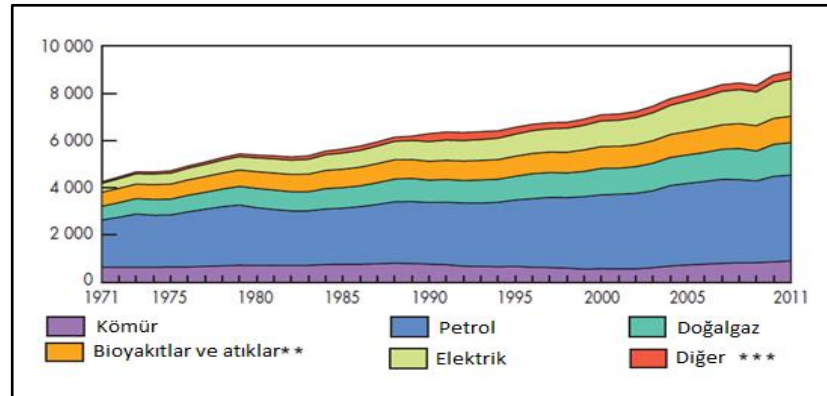
Endüstriyel işletmeler açısından bakıldığında, verimliliği artırıcı çalışmalar yakıttan tasarruf sağlamakla birlikte kaynakların verimli kullanımına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunurlar. Enerji verimliliğinin artırılması, ısı kayıplarının meydana geldiği bölgelerin ve miktarlarının belirlenmesi ile mümkün olmaktadır (Tütünoğlu vd., 2011).

Doğalgaz yakın zamanda keşfedilmiş bir olgu olmayıp, binlerce yıl öncesinden beridir yer altında var olan, ancak elde edilme ve kullanılma teknikleri son yüzyıllarda geliştirilebilen bir kaynaktır. Tarihindeki gelişimi yavaş olsa da 1950' li yıllardan itibaren üretiminde ve tüketiminde büyük ivmelenmeler yaşamıştır. Ülkelere göre 1971-2012 yılları arasındaki doğalgaz üretimi (milyar m³) Şekil 1.4' de verilmiştir (IEA 2013).



Şekil 1.4. Ülkelere göre 1971'den 2012' ye kadar olan Doğalgaz üretimi.

Dünyadaki yakıtların 1971-2011 yılları arasındaki tüketim değerleri Şekil 1.5' te gösterilmiştir (IEA 2013).



Şekil 1.5. Dünyadaki yakıtların 1971'den 2012' ye kadar olan tüketim miktarları.

İçerisine yerleştirilen ya da sürekli olarak şarj edilen malzemeleri ekonomik bir şekilde ısıtmak suretiyle işlem sıcaklığına yükselten ve gerektiğinde bu sıcaklıkta gerekli süre kadar tutan teknik ünitelere ocak ya da fırın adı verilmektedir. Tav

fırınları; çeliklerin haddelenmesinde, hadde bandı üzerine yerleştirilen ve çeliklerin 1050-1300°C sıcaklık aralığında ısıtılmasında kullanılan ve sürekli çalışan fırınlardır (Topbaş, 1991). Sanayide kullanılan karışık gaz yakıtlı endüstriyel bir tav fırını Şekil 1.6' da, doğalgaz yakıtlı endüstriyel bir tav fırını Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Karışık yakıtlı endüstriyel bir tav fırını.



Şekil 1.7. Doğalgaz ile çalışan endüstriyel bir tav fırını.

Endüstriyel tesislerde enerjiyi en yoğun kullanan ünitelerin başında fırınlar gelmektedir. Endüstriyel fırınlar ergitme, ısıl işlem, pişirme, kurutma, temperleme, vb. süreçleri gerçekleştirmektedir. Fırınlara, tasarlandıkları süreçlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli hammadde ve enerjinin beslenmesi gerekir (Tütünoğlu vd., 2011).

Fırınlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan tavlama fırınları, endüstriyel işletmelerde gerek yakıt tüketimi açısından gerekse çevreye verdiği atık gazların oluşturduğu kirlilik açısından mümkün olduğunca verimli çalıştırılması gereken sistemlerdir (Ertem vd., 2008).

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Ertem vd. (2010) yaptıkları çalışmada Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları'nın 3 nolu yassı kütük fırınında kullanılan özgül enerjinin iyileştirilmesi potansiyelini incelemiştir. Prosesteki kayıp enerjinin hesaplanması için bir enerji giriş ve çıkış modeli oluşturmuşlar ve yassı kütük fırınının enerji verimliliğini %64,26 olarak hesaplamışlardır. Yapılan çalışmada enerji tasarrufu için iki seçenek belirlenmiştir. Bunlardan birincisi fırına şarj edilen kütüklerin sıcak şarj edilmesi, ikincisi ise reküperatörden sonra atılan baca gazı ısısının geri kazanılmasıdır. Baca gazının enerji potansiyelini 81.590 kcal/TEP olarak hesaplamışlardır.

Ertem vd. (2008) yaptıkları çalışmada endüstriyel tav fırınlarında enerji kaybının görüldüğü başlıca kısımları incelemiş, enerji verimlilik analizi yapmış, ısı verimi bulmuş ve kayıpları tespit etmişlerdir. Tavlanan malzemeye aktarılan enerji bulunmuş, birim zamanda tüketilen yakıt ve tavlanan ürün miktarı belirlenerek buradan toplam yakıt tüketimi giren enerji olarak elde edilmiştir. Giren enerji ile ürüne aktarılan enerji arasındaki farkın hangi tür kayıplar olduğu ve miktarları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda ısı verim %38,3 olarak bulunmuştur. Kayıplar ise %31,6 ile baca gazı kayıpları, %10,4 ile yüzey kayıpları, %13 ile açıklık kayıpları ve %6,7 ile diğer kayıplar olarak belirlenmiştir.

Si vd. (2011) yaptıkları çalışmada Kanada, Manitoba'da bulunan bir çelik fabrikasının enerji verimliliğini değerlendirmiş ve atık ısı geri kazanımının olabirliğini analiz etmişlerdir. Proses ısıtma değerlendirmesi ve gözden geçirme aracı (PHAST) ile yapılan çalışmada tav fırını verimi %60 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada baca gazı kayıpları toplam enerji kayıplarının %29,5'i ile tav fırınındaki en büyük enerji kaybını oluşturmuştur. Çalışma sonucunda enerji verimliliğinin artırılması için kütüklerin 315°C'ye ön ısıtılması gerektiği belirtilmiştir.

Chen vd. (2005) yaptıkları çalışmada bir sıcak haddehanenin tav fırınlarının performansını ve enerji tüketimini hem sayısal tahminler hem de pratik ölçümler ile analiz etmişlerdir. Sayısal tahminlerde fırınların artan üretim hızının yakıtı daha verimli olarak kullandığını göstermiştir. Pratik çalışma ise fırın içerisindeki ısının %80'inin yakıtın yanması, %15,7'sinin ise sıcak baca gazı ile sağlandığını göstermiştir. Ayrıca pratik ölçümler ısı geri kazanımı bölgesindeki ısı değişimi ve ısı geri kazanımı verimlerinin sırasıyla %86,66 ve %47,76 olduğunu göstermiştir.

Manatura and Tangtrakul (2010) yaptıkları çalışmada reküperatör ile birleştirilmiş rejeneratif bönerlerin kullanıldığı bir tav fırınında enerji kullanımını incelemiştir. Yapılan çalışmada tav fırınının özgül enerji tüketimi 1.042 MJ/t olarak bulunmuş ve fırın verimi %80,1 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada enerji tasarruf oranı sadece reküperatör kullanılan tav fırınları ile karşılaştırıldığında %43,4 olarak bulunmuş ve rejeneratif böner ile önemli bir verim değeri elde edilmiştir.

Kirschen vd. (2009) yaptıkları çalışmada birçok elektrik ark fırınının 70 adet enerji balansı ve enerji verimlilikleri, saha ölçümlerinden hesaplanan ve literatürden alınan veriler ile birlikte sunulmuştur. Elektrik ark fırınlarının enerji gereksinimleri 510 ile 880 kWh/t aralığında, enerji verimliliği değerleri ise %40 ile %75 arasında hesaplanmıştır.

Lee and Jou (2011) yaptıkları çalışmada fazla hava oranının ve hava ön ısıtma sıcaklığının fırın verimi üzerine etkilerini incelemiştir. Çalışmada egzoz gazındaki oksijen konsantrasyonunun %4'ten %3'e azaltılması ile fırın veriminin %0,6 artacağını bildirmişlerdir. Ayrıca havanın ön ısıtma sıcaklığının 200 °C'den 240 °C'ye çıkarılması ile yıllık yaklaşık $2,3 \times 10^6$ m³ doğalgaz tasarrufu yapılabileceğini ve CO₂ emisyonunda $3,1 \times 10^3$ ton, azot oksit emisyonunda ise %14,3 azalma sağlanacağını söylemişlerdir.

Galletti vd. (2013) yaptıkları çalışmada 3 MW kapasiteli yarı endüstriyel bir fırında oksijenli doğalgazın yanma şartlarını hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile modellemiştir. Yaptıkları modelde kimyasal yaklaşımların sıcaklık alanını tahmin edemediğini belirlemiştir. Ayrıca spektral metodun doğru bir analiz için önemli

bir rol oynadığını tespit etmişlerdir. Deneysel sonuçlar ve model sonuçlarındaki belirsizlikler karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada ise iki farklı sanayi kuruluşunda bulunan biri doğalgaz yakıtlı diğeri ise karışık gaz yakıtlı haddehane tav fırınlarında enerji verimliliği çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmada hem karışık yakıt kullanan tav fırınında hem de doğalgaz kullanan tav fırınında enerji verimliliğine yönelik ölçümler yapılmış, yapılan ölçüm sonuçları her bir tav fırını için ayrı değerlendirilmiş ve hesaplamalar yapılmıştır.

BÖLÜM 3

ENDÜSTRİYEL FIRINLAR VE ENDÜSTRİYEL TAV FIRINLARINDA VERİMLİLİĞİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Endüstriyel fırınlar, ısının fırına farklı işlemlere tabi tutulmak üzere şarj edilen yüklere aktarıldığı izole edilmiş kapalı alanlardır. İçerisindeki sıcaklığın 650 °C'nin altında olan fırınlara *ocak* adı verilmekte olup ancak fırın ile ocak arasında kesin bir çizgi yoktur. Örneğin kok fırınlarındaki sıcaklık 1478 °C'nin üzerindedir (Trinks vd., 2004).

3.1. FIRINLARIN SINIFLANDIRILMASI

3.1.1. Isı Kaynağına Göre Fırınlar

Fırın içerisindeki sıcaklığı işlem sıcaklığının üzerine çıkarmak için ya yakıt yakılarak ya da elektrik enerjisi ısıya dönüştürülerek ısı elde edilir. Yakıt kullanılan fırınlar daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ancak elektriksiz olarak ısıtılan fırınlar yakıt maliyeti açısından avantaj sağladıkları yerlerde kullanılırlar (Trinks vd., 2004).

3.1.2. Şarj Şekline Göre Fırınlar

Yığın fırınları, çevrimsel fırın veya doldur-boşalt fırını olarak da bilinirler ve fırın içerisinde bir tek sıcaklık ayarı vardır. Manuel olarak yüklenirler. Yığın fırınlarında muhafaza, oluk, hazne, gidiş-geliş, çan, asansör ve banyo bölümleri bulunur. Çan ve asansör fırınları genelde silindiriktir (Trinks vd., 2004).

Arabalı tip fırınlar raylar üzerinde çelik tekerlekleri olan hareketli bir hazneye sahip fırınlardır. Yük, hazneye yerleştirilir ve fırın içerisine hazne üzerinde alınır, hazne

üzerinde ısıtılır ve hazne üzerinde fırından çıkarılır. Bu tür fırınlar ağır veya büyük yüklerin ısıtılmasında kullanılırlar (Trinks vd., 2004).

Sürekli fırınlar yükü fırın içerisinde ilerletirken aynı zamanda ısıtırlar. Malzeme hareketsiz bir haznenin üzerinden geçer veya haznenin kendisi hareket eder. Yatay düz hat fırınlar döner hazneli fırınlardan daha yaygındır (Trinks vd., 2004).

Döner hazneli veya döner tablalı fırınlar birçok amaç için kullanışlıdır. Yükler atılırken şeklindeki hazneye yerleştirilir ve tam bir tur döndüğünde fırından çıkarılır. Bu tür fırınlar özellikle silindirik yükler için uygundur (Trinks vd., 2004).

Akışkan yataklı fırınlar yoğun gaz taşınım ısı transferini ve katı ısı alıcı yüzeylerin milyonlarca hızlıca titreşen sıcak katı partiküller ile fiziksel bombardımana uğramasını kullanırlar (Trinks vd., 2004).

3.1.3. Yakıt Şekline Göre Fırınlar

Endüstriyel ısıtma için olan elektrik fırınları dirençle ısıtma veya indüksiyonla ısıtmayı kullanırlar. Teorik olarak eğer herhangi bir gaz veya hava çıkışı yoksa elektrikli ısıtmada baca gazı kaybı yoktur, ancak elektriğin yakıt olarak maliyeti yüksektir. Dirençle ısıtmanın elektrik maliyeti yüksektir ve sıcaklık homojenliğinin sağlanabilmesi için dolaşım fanları gerekir (Trinks vd., 2004).

İndüksiyonla ısıtmada ısıtılacak parçayı saran bir bobinden bir akım geçer. Kullanılan elektrik akımı frekansı ısıtılacak parçanın kütlesine bağlıdır. İndüksiyon bobini aşırı ısınmadan korunabilmeleri için su soğutmalıdır (Trinks vd., 2004).

3.1.4. Devridaim Şekline Göre Fırınlar

760°C'nin altındaki orta ve düşük sıcaklık fırınları için zorlanmış bir devridaim fırını daha iyi sıcaklık homojenliği ve yakıt ekonomisi sağlar. Devridaim, bir fan ve baca düzenlemesi veya börnerlerin püskürtme momenti ile yapılabilir (Trinks vd., 2004).

3.1.5. Doğrudan Ateşlemeli ve Dolaylı Ateşlemeli Fırımlar

Eğer yanma ısıtma odasında gerçekleşiyor veya yanma ürünleri ısıtılan parçanın yüzeyinde dolaştırılıyorsa bu tip fırımlara doğrudan ateşlemeli fırımlar denir. Bu tip fırımların birçoğunda ısıtılan parça yanma ürünlerinin teması ile zarar görmez (Trinks vd., 2004).

Dolaylı ateşlemeli fırımlar, yanma ürünleri veya alevle temastan dolayı ikinci kaliteye düşen ürünler için kullanılırlar. Bu durumda malzeme ya bürnerlerin yanma ürünleri ile dışarıdan ısıtılan bir alev gömleği içerisinde ya da alevi ve yanma ürünlerini çevreleyen ışıyan borular ile ısıtılmalıdır (Trinks vd., 2004).

3.1.6. Kullanım Şekline Göre Fırımlar

Kütük, blum veya yassı kütüklerin genelde dik bir pozisyonda ısıtılması için tav çukuru fırımları veya kütük ısıtma fırımları mevcuttur. Dövme veya kaynak yapma işlemleri için tüm parçayı veya parçanın uç kısımlarını ısıtmada dövme fırımları bulunur (Trinks vd., 2004).

3.1.7. Isı Geri Kazanımına Göre Fırımlar

Yakma havasının ısıtılması reküperatör veya rejeneratör ile sağlanmaktadır. Reküperatörler ısıyı sıcak baca gazlarından soğuk yakma havasına aktaran kararlı hal ısı değıştiricilerdir. Rejeneratörler baca gazındaki ısıyı küçük refrakterler veya metaller içinde depolayan kararsız hal ekipmanlarıdır. Isının depolandığı bu kütleler ısılarını yakma havasına aktarmaları için yakma havası akımına doğru hareket ettirilirlir. Bu ekipmanlarla donatılan fırımlar reküperatör veya rejeneratör fırımları olarak adlandırılırlar (Trinks vd., 2004).

3.2. FIRINLARDA KULLANILAN YAKITLAR

3.2.1. Yakıtlar Hakkında Genel Bilgi

Günümüzde, küreselleşen dünyada enerji kaynaklarının kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Özellikle Türkiye gibi hızla gelişmekte olan ülkelerde enerji ihtiyacı da giderek artmaktadır. Eskiden beri kullanılan geleneksel yakıtlar; kömür, sıvı yakıtlar (fuel oil, benzin, gaz yağı v.b.), gaz yakıtlar (lpg, doğalgaz, hava gazı, su gazı) dır. Bu yakıtların kullanım şekilleri kendi içlerinde farklılıklar gösterdiği gibi gerek çevreye olan olumsuz etkileri gerekse rezervlerinin giderek azalmasından dolayı alternatif enerji kaynaklarına yönelmek zorunda kalınmıştır.

Yakıtların bu kadar önemli oluşu en verimli şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Yakıtların tarihçesine baktığımızda ilk bulunan yakıt yüzey katmanlarının en üst tabakasında bulunan kömür gibi katı yakıtlardır. Gün geçtikçe ilerleyen teknoloji ve buna bağlı olarak ortaya çıkan daha fazla enerji ihtiyacı, yakıtlarda da daha verimli, başka bir deyişle daha fazla enerji girdisi sağlayan çeşitlere olan eğilimi arttırmıştır. Bu yüzden temin edilimi, taşıma, depolama ve yakama kolaylığı daha iyi olan yakıtlara yönelim artmıştır. Bunlardan en önemlisi kimyasal formülü CH₄ (Metan) olan ve doğalgaz adıyla bilinen fosil yakıttır. Doğalgazın diğer yakıtlar yerine tercih edilmesinin ana nedenlerinden birkaçı şu şekildedir;

- Yanması tam ve temizdir. Hava fazlalık katsayısı uygun tutulursa CO oluşmaz, yanmanın kontrolü gaz yakıt olduğundan daha kolaydır.
- Yakma için ön hazırlama ve depolama gerektirmez.
- Yatırım ve işletme maliyetleri düşüktür çünkü doğal gazın depolanma olmaksızın kullanılabilir ve ayrıca otomatik kontrol kolaylığı nedeniyle daha az personele ihtiyaç olmasıdır.
- Doğalgazın ısı değeri yüksektir, kazan dönüşümleri sırasında kazan kapasite artırımını gerektirmez.
- Kuru bir gazdır, içerisinde H₂O bulunmaz.
- Yakıtın yanması sonucu uçucu kül ve partikül oluşmaz. Doğal gaz temiz bir yakıt olduğu için içerisinde toz ve partikül ihtiva etmez.

Oksijenle hızlı bir şekilde oksitlenerek, çevresine yüksek enerji veren (ekzotermik reaksiyon gerçekleştiren) maddelere yakıt, meydana gelen reaksiyonlara ise yanma adı verilmektedir. En çok kullanılan yakıtlar karbon ve hidrojenden oluşurlar, bunlara hidrokarbon yakıtlar denir ve genellikle C_nH_m kapalı formülü ile gösterilirler. Hidrokarbon yakıtlar, gaz (doğalgaz, LPG vs.), sıvı (benzin, fuel-oil vb.) ve katı (Kömür) halde bulunabilirler.

3.2.2. Yakıtlarda Aranılan Özellikler

- Fiyatı ucuz olmalı, bol bulunmalı,
- Tutuşma sıcaklığı düşük olmalı; bir defa tutuşturulan yakıt yanmasını devam ettirebilmelidir. Katı yakıtların tutuşma sıcaklığı, gaz ve sıvı yakıtların tutuşma sıcaklığından daha düşüktür. Bunun nedeninin, bu tip yakıtların yapısında hidrojen, oksijen ve metal tuzlarının bir arada bulunmasının olduğu, kabul edilir. Hızlı yanma kısmen oksitlenmiş moleküllerde daha fazladır. Özellikle katalizör görevi yapan tuzların varlığı yanma hızının artmasına neden olur. Örneğin linyitler, odun, düşük sıcaklıkta elde edilen katranlar (damıtma ürünlerini kısmen oksitlenmiş gazlar oluşturur) 300 °C civarında tutuştukları halde, hidrojen 600 °C, karbon 800 °C de tutuşur (Yüksel, 2004)
- Yanabilme kabiliyeti olmalı; bir kez tutuşan yakıtın yanmasını sürdürmesi gerekir. Bunun için yakacağın tutuşma sıcaklığının düşük, yanma ısısının yüksek, ısıl iletkenliğinin yüksek olması gerekir. Ayrıca yakacağın hava ile temasının sürekli sağlanması gerekir. Yakacak üzerinde biriken külün yakıt ile hava arasındaki teması kesmemesi gerekir.
- Isıl kabiliyeti iyi olmalı; yakacağın yanma sırasında verdiği ısı ortamı istenilen sıcaklığa çıkabilmelidir. Örneğin buhar üretiminde kullanılan yakacağın verdiği ısı, buharın sıcaklığının 500 °C geçebilmelidir. Bunun için,
 - Yakıt içerisinde ki nem ve kül miktarı az olmalıdır.
 - Hava fazlalık katsayısının gereğinden fazla olmaması gerekir, oda sıcaklığındaki hava içerisindeki azot ve nem baca gazı sıcaklığında atmosfere atıldığından enerjinin bir kısmını duyulan enerji olarak beraberinde götürür.

- Yanma havası baca gazı ile ısıtılmalıdır; yanma odası sıcaklığını yükseltmek için yanma havası ve yakıt ısıtılabilir. Yakıtların ısıtılması bozulmaya uğradıklarından dolayı uygun değildir. Bu nedenle sadece yanma havası ısıtılır.
- Isıtma kabiliyeti olmalı; alev hızı yüksek olmalı. Yakacağın ısıtılan yüzeye temas halinde olması istenir.
- Yakma sırasında otomatik kontrolü kolay olmalıdır.
- Zararsız olmalı; yanmadan sonraki atıkların insan sağlığına, çevreye, yakma sistemlerine zarar vermemesi gerekir.
- Yakıtların alımı dış ülkelerden bağımsız olmalı,
- Yangın ve patlama açısından emniyetli olmalı,
- Taşınma ve depolama kolaylığı olmalı, depolama sırasında ufalanmamalı, çevre şartlarından etkilenmemelidir.

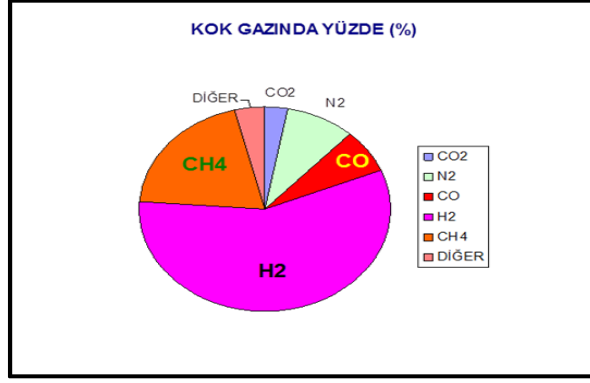
3.2.3. Gaz Yakıtlar

Gaz yakıtlar genellikle temiz olmaları ve temiz yanmaları açısından, sıvı yakıtlar kadar kolay ve ucuz olmasa da depolanma, taşınma ve kullanımlarının yaygınlıkları açısından önemli yakıtlardandırlar. Yanmalarının kontrolünün kolaylığı yine bu yakıtların avantajıdır.

3.2.3.1. Kok Gazı

Kok gazının başlıca özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Renksiz, kokulu (Kendine has keskin naftalin kokusu)
- Havadan hafif bir gazdır. (0,44 Kg/m³)
- Patlama aralığı %4,3-%32 arasındadır.
- Yanma sıcaklığı 640 °C dir.

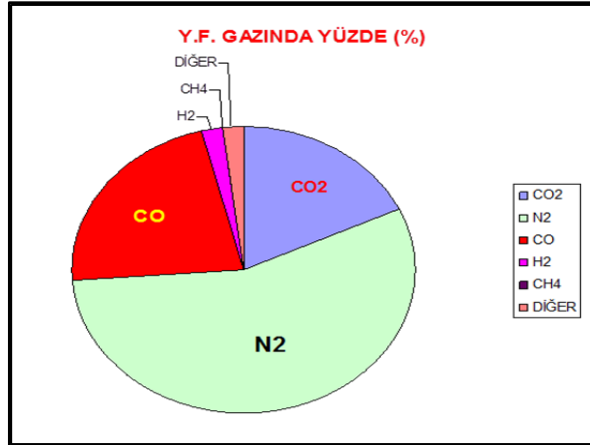


Şekil 3.1. Kok gazı bileşenleri.

3.2.3.2. Yüksek Fırın Gazı

Yüksek fırın gazının başlıca özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Renksiz, kokusuz, tatsız
- Havadan ağır
- Sinsi ve zehirleyici kolay fark edilemeyen bir gazdır.
- Yanma sıcaklığı 680 °C dir.
- Hava ile belli oranlarda karışması halinde patlar.
- Patlama aralığı %30-%70 arasındadır.

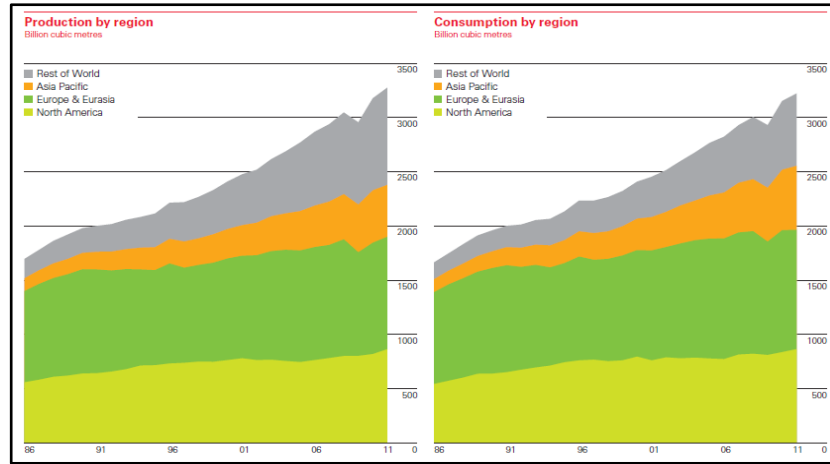


Şekil 3.2. Yüksek fırın gazı bileşenleri.

3.2.3.3. Doğalgaz

Doğalgaz yakın zamanda keşfedilmiş bir olgu olmayıp, binlerce yıl öncesinden beridir yer altında var olan, ancak elde edilme ve kullanılma teknikleri son yüzyıllarda geliştirilebilen bir kaynaktır. Tarihindeki gelişimi yavaş olsa da 1950' li yıllardan itibaren üretiminde ve tüketiminde büyük ivmelenmeler yaşamıştır.

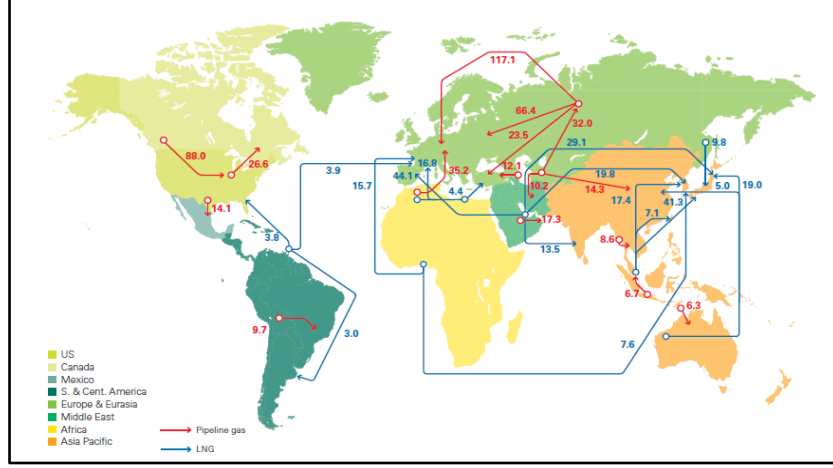
Dünya' da doğalgaz tüketimi 2011 yılında %2,2 artış göstermiştir. Ancak ekonomik kriz, yüksek fiyat ve yenilenebilir kaynaklara yönelim nedeniyle, doğalgaz tüketimi Avrupa Birliği' nde %9,9 oranında azalmıştır. LNG halinde gaz ticareti %10,1 artış göstermiştir. Buna rağmen boru hatları ile ticarete de artış gözlenmektedir (%1,3). Doğalgaz üretimi yıllık bazda %3,1 artmıştır. Dünya doğalgaz üretim / tüketiminin son yıllardaki seyri aşağıdaki şekilden görülebilir:



Şekil 3.3. Doğalgaz üretim ve tüketiminin değişimi.

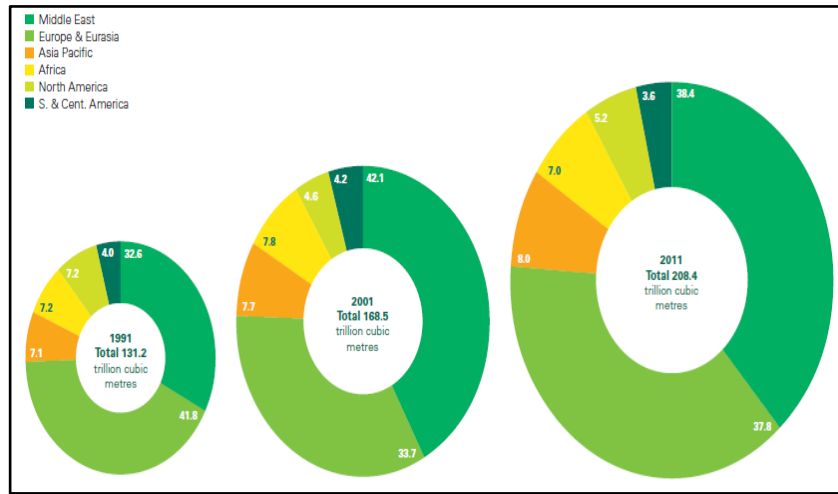
Doğalgaz, CO2 salınımı ile ilgili fazla yaptırımı olmayan enerji kaynağı olduğundan, 2035 projeksiyonuna göre payı artan tek fosil türevli yakıt olacaktır. Fakat bölgelere göre farklı gelişimler gösterecektir. Çin, Hindistan ve Orta Doğu' da kuvvetli bir talep artışı olacaktır. Mesela; Çin' in 2011 yılındaki tüketimi 130 bcm iken, 2035' te 545 bcm olması beklenmektedir.

Özellikle LNG sektörünün gelişimi hesaba katılınca, dünyada doğalgaz ticareti son yıllarda çeşitlilik kazanmıştır. Şekil 3.4’ te Dünya doğalgaz ticareti ile ilgili harita görülebilir:



Şekil 3.4. Doğalgaz üretim ve tüketiminin değişimi.

2001 yılında 168,5 trilyon m³ olan dünya doğalgaz rezerv miktarı, 2011 yılında bir miktar artarak 208,4 trilyon m³ olarak gerçekleşmiştir. Dünya doğalgaz rezervinin mevcut üretim düzeyi ile 70 yılın üzerinde ömrü bulunmaktadır. Dünya doğalgaz rezerv kaynakları yoğun olarak Orta Doğu’da, Avrupa ve Avrasya ülkelerinde bulunmaktadır.



Şekil 3.5. Bölgelere göre dünya doğalgaz rezervleri.

2011 yılında 44,6 trilyon m³ 'lük ispatlanmış rezerv miktarı ile ilk sırada yer alan Rusya Federasyonu'nu 33,1 trilyon m³ ile İran, 25 trilyon m³ ile Katar izlemektedir. Doğal gaz esas olarak metan (CH₄) ve daha az oranda bütan (C₄H₁₀) ve propan (C₃H₈) gibi hidrokarbonlardan meydana gelir. Ayrıca bileşiminde azot (N₂), karbondioksit (CO₂), hidrojen sülfür (H₂S) ile helyum (He) gazları da bulunabilir. Ancak H₂S zararlı bir bileşen olduğundan, doğal gaz üretim noktasında bu bileşenden temizlenerek boru hatuna pompalanır. Dünya üzerindeki rezervlerinin % 40'nın petrol yataklarının üst kısımlarından, % 60'nın ise petrolün olmadığı bölgelerden çıkarıldığı belirtilmektedir. Çıkarılan gazın içerisinde kükürtlü bileşikler bulunuyorsa kuyu çıkışında giderildikten sonra boru hatlarıyla uzak mesafelere pompalanırlar. Uzak mesafeli taşımada ara pompalama istasyonları kullanılmaktadır.

Doğalgazın bileşiminde ağırlıklı olarak metan (%55 ile 98) (CH₄) bulunmaktadır. Etan, propan, bütan, hidrojen, azot, hidrojen sülfür, karbondioksit gibi birçok gazlarda bulunmaktadır. Çizelge 3.1' de ülkemizin Rusya'dan ithal ettiği gazda aradığı özellikler ve fiili duruma ait bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.1. Rusya'dan ithal edilen doğalgazda istenen özellikler ve gerçekleşen özellikler.

	İstenen	Gerçekleşen
Metan (CH ₄)	min. %85	%98.68
Etan (C ₂ H ₆)	max. %7	%0.211
Propan (C ₃ H ₈)	max. %3	%0.043
Bütan (C ₄ H ₁₀)	max. %2	%0.017
Diğer hidrokarbonlar (C _m H _n)	max. %1	%0.033
Karbondioksit (CO ₂)	max. %3	%0.035
Oksijen (O ₂)	max. %0.02	-
Azot (N ₂)	max. %5	%0.829
Hidrojen sülfür (H ₂ S)		max. 5.1 mg/m ³
Toplam kükürt (S)		max. 102 mg/m ³
Üst Isıl Değer	Max. MJ/m ³ (15 0C, 0,1MPa)	39.02
Ortalama MJ/m ³	37.62	37.41
Min. MJ/m ³	36.57 (8750)	

Doğal gaz zehirsizdir: Doğal gazın en önemli Özelliklerinden birisi zehirsiz olmasıdır. Doğal gazın solunması halinde zehirleyici ve öldürücü etkisi yoktur. Ancak ortamda çok fazla birikmişse teneffüs edilecek oksijen azaldığından dolayı boğulma tehlikesi vardır. Bu yüzden şehre dağıtmadan önce gaza İGDAŞ tarafından koku verilmektedir. Böylece ortamda gazın varlığını hissetmek mümkün olmaktadır.

- Doğal gaz çevreyi kirletmeyen yakıttır: Çevreyi kirleten ana faktör doğal gaz dumanı içerisinde bulunmamaktadır. Bunlardan birincisi kükürt oksitlerdir. Bu madde duman gazındaki ve havadaki nemle, sülfürik aside dönüşür.
- Doğal gaz havadan hafiftir: Doğal gazın diğer önemli bir özelliği havadan hafif olmasıdır. Dolayısı ile hava içinde yükselme eğilimindedir. Gaz kaçakları hava ile karışmadan öne yükseklerde toplanır. Bu yüzden havalandırma bacalarında kolaylıkla dışarı atılabilirler.
- Havaya % 5 ile % 15 arasındaki oranlarda karışırsa patlayıcıdır (Yüksel, 2004)
- Havadan hafiftir. Kapalı ortamlarda üst kısımlarda toplanır, havalandırma bacaları tavana yakın veya tavanlardan yapılır.
- Kuru bir gazdır, içerisinde H₂O bulunmaz.
- İçerisinde kükürtlü bileşikler bulunmadığından temiz bir gazdır. Kükürtlü bileşikler çıkışta boru hatlarına verilmeden Önce doğalgazdan ayrılır. Bu nedenle kazan borularının ömrü uzar.
- Yakıtın yanması sonucu uçucu kül ve partikül oluşturmaz. Kazan borularında kurum birikmediğinden ısı transferi mükemmeldir, borular daha uzun ömürlüdür.
- Yanması tam ve temizdir. Hava fazlalık katsayısı uygun tutulursa CO oluşmaz, yanmanın kontrolü gaz yakıt olduğundan daha kolaydır. Ancak doğalgaz kazanlarında ocak sıcaklığı yüksek olduğundan NO_x oluşabilir. Bu nedenle alev sıcaklığını düşürmek için ocak içerisine alev soğutucu çubuklar yerleştirilir (Yüksel, 2004)
- Yakma için ön hazırlama ve depolama gerekmez.
- Yakmada gaz yakıt olduğundan otomatik kontrolü kolaydır.
- Yatırım ve işletme maliyetleri düşüktür (depolama gereksiz, otomatik kontrol kolaylığı nedeniyle daha az personele İhtiyaç olması nedeniyle).

- Doğalgazın ısı değeri yüksektir, kazan dönüşümleri sırasında kazan kapasite artırımını gerekmez.
- Ocak yükü fazla, ocak hacmi küçüktür. Alev boyu fuel oil'e göre kısadır. Yanmayı tamamlamak için 8,4–9,6 saniye yeterlidir. Bu nedenle doğalgaz kazanlarının ocak hacmi küçüktür.
- Ocak sıcaklığı 1500 °C 'ye kadar çıkabilir. Kazan konstrüksiyonunda özel önlemler almak gerekir. Bu nedenle yukarıda da belirtildiği gibi doğalgaz kazanlarında soğutma çubukları kullanılır.
- Doğalgaz yakan sistemlerde baca gazları içerisindeki su buharı miktarı oldukça fazladır. Bacalarda yoğunlaşma olayına karşı önlemler alınmalıdır.
- Yanma olayında gerekli hava miktarı diğer yakıtlara göre oldukça azdır.

Çizelge 3.2' de Karışık yakıt (Kok gazı + Yüksek fırın gazı) ve doğalgazın yakıt özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Karışık yakıt ve doğalgazın karşılaştırılması.

Yakıt Özellikleri	Kok Gazı	Yüksek Fırın Gazı	Doğal gaz
Karbon (%)	CO: 6,09 CO ₂ :1,56 CH ₄ :21,08 Olefinler: 2,25	CO: 24,66 CO ₂ :17,12	73,98
Hidrojen (%)	61,50	1,90	24,57
Kükürt (%)	H ₂ S :0,19		-
Kül (%)			-
Nem (%)			-
Isıl değeri MJ/kg	Üst Isıl Değer: 4552 kcal/Nm ³ Alt Isıl Değer: 4026 kcal/Nm ³	Üst Isıl Değer: 802 kcal/Nm ³ Alt Isıl Değer: 794 kcal/Nm ³	49,095
Baca gazı çiğ. Sıcaklığı °C			56
Ocak yükü TJ/m ³ h			1.6-4
Ocak sıcaklığı yaklaşık (°C)			1 500
Birim kütle veya hacim için gerekli teorik hava miktarı			9,3 Nm ³ /m ³
Birim kütle veya hacim için gerekli gerçek hava miktarı			10,3Nm ³ /m ³
Birim kütle veya hacim için Üretilen teorik duman miktarı			10,7Nm ³ /m ³
Alev ışınım katsayısı			0,3 – 0,5

3.3. ENDÜSTRİYEL TAV FIRINLARINDA VERİMLİLİĞİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Birçok endüstriyel ısıtma işlemlerinde yakıt, üretim maliyetinin büyük bir kısmını kapsar. Yakıt ve elektrik enerjisi maliyetleri sürekli artmaktadır, bu yüzden ısı tasarrufu bir zorunluluk haline gelmiştir. Yakıt tasarrufu aynı zamanda daha iyi ürün kalitesi, artırılmış güvenlik, yüksek verimlilik, düşük kirlenme, daha iyi personel ve halkla ilişkiler ve yakıt tedarikinin uzaması manalarına gelmektedir (Trinks vd., 2004).

Sürekli fırınlar, yığın fırınlarına göre yakıt açısından daha verimlidirler. Çünkü her yükleme yapıldığında soğuyup tekrar ısıtılmazlar (Trinks vd., 2004). Endüstriyel tav fırınlarında verimliliği etkileyen başlıca faktörler şunlardır:

- Eksik yanma,
- Hava yakıt oranı,
- Baca gazı sıcaklığı,
- Reküperatörler ve yakma havasının ön ısıtılması,
- Duvar kayıpları,
- Tufal kayıpları,
- Soğutma suyu kayıpları,
- Açıklık kaybı,
- Yakıt cinsi,
- Börnerler,
- Kütük şarj sıcaklığı.

3.3.1. Eksik Yanma

Eksik yanma, gaz yakıt içerisinde bulunan yanabilir maddelerin yanmayarak baca gazında yanmamış hidrokarbon ve karbon monoksit (CO) olarak atılması durumunda meydana gelmektedir. Eksik yanma yakıt kaybına neden olduğu için, tam yanmayı sağlamak amacıyla hava-yakıt oranının tam yanmayı sağlayacak şekilde ayarlanması

gerekmektedir. Bu nedenle baca gazındaki oksijen (O_2) miktarı uygun seviyede tutulmalıdır.

3.3.2. Hava-Yakıt Oranı

Fırınlarda yanma sistemi, yanma problemlerine neden olmayacak minimum hava-yakıt oranı ayarlanarak en uygun hale getirilmelidir. Fazla hava miktarı, gerektiğinden fazla olursa baca gazı miktarı artar. Artış miktarı kadar hava, baca gazı sıcaklığına kadar ısınıp enerji alacağından bu enerjinin bacadan atılmasına neden olur. Ayrıca baca gazı miktarının artması gaz debisinin, dolayısıyla hızının artmasına ve ısı transfer oranının düşmesine neden olmaktadır. Fazla hava (dolayısıyla O_2) aynı zamanda fırında tufal kaybı artışına da neden olmaktadır. Bundan dolayı fazla hava miktarı mümkün olan en düşük seviyede tutulmalıdır. Bunun sağlanması için baca gazındaki O_2 seviyesi kontrol edilmeli, hava ayarı yapılarak oksijen miktarı mümkün olan en düşük seviyeye getirilmelidir (Kaya and Eyidoğın, 2010).

İyi hava-yakıt oranı kontrolünün faydaları şunlardır (Trinks vd., 2004):

- Alev ve patlamalara karşı güvenlik sağlar.
- Yakıt tüketimini azaltır.
- Ürün kalitesini artırır. Çünkü hava-yakıt oranı düşük olduğunda malzemenin yüzeyi oksitlenir, yüksek olduğunda ise karbürize olur veya hidrojen emilimi yapar.
- Tufal oluşumunu azaltır.
- Hurda kayıplarını azaltır.

3.3.3. Baca Gazı Sıcaklığı

Fırın verimini etkileyen önemli faktörlerden birisi de baca gazı sıcaklığıdır. Baca gazı sıcaklığının kabul edilen değerlerin üzerinde olması halinde bacadan atmosfere fazla enerji atılmış olacaktır. Bu da fırın veriminin düşmesine neden olmaktadır.

Baca gazı sıcaklığına etki eden faktörler şunlardır (Trinks vd., 2004):

- Reküperatördeki ısı transfer oranının yetersiz olması baca gazı sıcaklığını artırır.
- Yakma havasının istenen değerden çok olması baca gazı debisini artırır ve fazla hava ile birlikte ısının atılmasına yol açar.
- Fırın içerisinde alev boyunun çok yüksek olması baca gazı sıcaklığını artırır.

Bu tür olumsuzlukların önlenmesi için yeterli hava ile tam yanma gerçekleştirilmeli ve gaz geçiş yolları ile reküperatörler belirli dönemlerde temizlenmelidir.

Baca gazı sıcaklığının “asit yoğuşma sıcaklığı” olarak belirlenen sınırın altına düşmesi durumunda ise bacada korozyon sorunları ile karşılaşmaktadır. Ayrıca, baca gazı sıcaklığının aşırı azaltılması sonucu baca çekişinde de önemli düşüşler meydana gelebilir. Baca gazı sıcaklığı düşürülürken bu durumların göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

3.3.4. Reküperatörler ve Yakma Havasının Ön Isıtılması

Reküperatörler, baca gazındaki atık ısının yakma havasına aktarıldığı ısı değiştiricilerdir. Reküperatörlerde yakma havası borular içinden geçerken, baca gazı bu borular arasından geçerler. Reküperatörler ters akışlı, paralel akışlı ve/veya çapraz akışlı olabilirler. Yaygın reküperatör tipleri iç içe borulu, huzme borulu ve plakalı reküperatörlerdir (Trinks vd., 2004).

Reküperatördeki borular ısıya dayanıklı çelik malzemedan imal edilmektedirler. Ancak zamanla baca gazının aşındırıcı etkisinden dolayı bu borular korozyona uğramakta ve yüksek basınçlı ortamdan düşük basınçlı ortama doğru sızıntı miktarları artmaktadır. Taze hava hattında basma fanı (pozitif basınç) ve baca gazı hattında cebri çekme olduğu için sızıntı yönü yüksek basınçlı taze hava hattından düşük basınçlı baca gazı hattına doğru olmaktadır. Reküperatörlerde bulunan muhtemel hava kaçak miktarlarının bulunması için reküperatör öncesinde ve sonrasında gaz kompozisyonu analizinin yapılması gerekmektedir.

3.3.5. Duvar Kayıpları

Duvar kayıpları; ısının fırın duvarları, tavanı ve tabanından önce iletim, daha sonra ise taşınım ve radyasyon ile kaybedilmesi sonucu meydana gelmektedir. Isı, fırının dış yüzeyine ulaştığında çevreye yayılır veya hava akımları yoluyla kaybedilir.

Modern fırınlar çok iyi yalıtılmış olmasına rağmen konveksiyon ve radyasyon yoluyla ısı kayıpları fırın verimliliği üzerinde önemli derecede etkili olmaktadır. Fırın yüzey sıcaklığını ortam sıcaklığının yaklaşık 30°C üstündeki bir değere düşürecek şekilde yapılmış bir yalıtım, bu tür kayıpları en aza indirmek açısından yeterli ve uygun olarak görülmektedir.

3.3.6. Tufal Kayıpları

Çelik, haddeleme sıcaklığına kadar ısıtıldığında oksijenin metal yüzeyi ile reaksiyona girmesi sonucu tufal meydana geldiği bilinmektedir. Tufal metal yüzeylerdeki oksitlerdir. Oluşan tufal miktarı ısınma süresine, ısıtılan çeliğin kalitesine, fırın atmosferine, ısıtma ekipmanlarının tip ve kullanılma şekillerine bağlıdır. Genel tavlama pratiğinde yanmış gazların oksidasyon özelliği daima oldukça yüksektir. Çeliğin yüzey sıcaklığı arttıkça meydana gelen tufal miktarı da artar ve artış tavlama süresince artan O₂, CO₂ ve su buharı yüzdelerine bağlıdır. Kütüğün oksitlenmesi hava-yakıt oranının kontrolü ile minimum seviyeye indirilerek tufal kaybı azaltılabilir.

3.3.7. Soğutma Suyu Kayıpları

Kızak borularının, konveyör rulolarının, kapı çerçevelerinin aşırı ısıdan korunması için gerekli olan sulu soğutma sistemleri ısı alarak ısı verimi düşürürler (Trinks vd., 2004).

3.3.8. Açıklık Kayıpları

Fırınlarda gözlem deliklerinden, açık kalan kapı aralıklarından, ateşleme deliklerinden ve benzer aralıklardan radyasyonla ısı kaybı olur. Ayrıca şarj vedeşarj kapaklarının açılıp kapanması sırasında da önemli ölçüde ısı kaybedilir. Bu durumda sıcak gazlar dışarı çıkarken soğuk hava fırın içerisine girer. Soğuk havanın içeri girmesinden kaynaklanan ısı kaybı sıcak gazinkinden daha fazladır (Trinks vd., 2004).

3.3.9. Yakıt Cinsi

Farklı yakıtlar, farklı oranlarda karbon ve hidrojen ihtiva ettikleri için ısıl değerleri ile yanma sonucu baca gazındaki nem miktarları da değişmektedir.

3.3.10. Börnerler

Börnerlerde yakıt basıncının ve sıcaklığının istenen değerde olmaması, yakıtın yeterince atomize olmamasına ve dolayısı ile eksik yanmaya neden olmaktadır. Bu durum verimi azaltacak yönde etki etmektedir.

3.3.11. Kütük Şarj Sıcaklığı

Kütükler fırına 500°C sıcaklığa kadar şarj sıcaklığında verilebilir. Bu durumda kütüğün tavllanması için verilmesi gereken ısı azalacağından ısıl verim artar.

BÖLÜM 4

YÖNTEM, ÖLÇÜM VE HESAPLAMALAR

4.1. TEORİK TEMEL VE HESAPLAMA YÖNTEMİ

4.1.1. Yanma

Bir yanma işleminde, yanmanın tam olduğunu kabul ederek yapılan çözümlemenin sağladığı bazı bilgiler vardır. Yanma işlemi sırasında eğer yakıt içindeki karbonun tümü CO₂'ye, hidrojenin tümü H₂O'ya ve varsa kükürdün tümü SO₂'ye dönüşüyorsa yanma tamdır. Başka bir deyişle yakıt içinde bulunan yanabilecek tüm bileşenler tam olarak yanarlar. Yanma sonu ürünleri arasında yanmamış yakıt veya C, H₂, CO, OH gibi bileşenler varsa yanma işlemi tam değildir.

Yanma için yeterli oksijenin bulunmaması, yanmanın tam olmamasının açık nedenlerinden biridir, fakat tek nedeni değildir. Hatta yanma odasında tam yanma için gerekli oksijenden daha çoğunun bulunduğu durumlarda bile, yanma tam olmayabilir. Bunun nedenlerinden biri, yakıtın ve oksijenin bir arada olduğu süre içinde yeterince karışmamasıdır. Yanmanın tam olmamasının bir başka nedeni de yüksek sıcaklıklarda önem kazanan ayrışmadır.

Hidrojen atomlarının oksijen atomlarını çekim kuvveti, karbon atomlarına oranla daha büyüktür. Bu nedenle yakıt içindeki hidrojen, ortamda tam yanma için gerekli oksijenden daha az oksijen bulursa bile, tümüyle H₂O'ya dönüşür. Buna karşılık karbonun bir bölümü yanma sonu ürünleri arasında CO veya C parçacıkları olarak görülür.

Bir yakıtın tam olarak yanması için gerekli en az hava miktarına stokiyometrik veya teorik hava adı verilir. Böylece bir yakıt teorik havayla tam olarak yandığı zaman

yanma sonu ürünleri arasında serbest oksijen bulunmaz. Teorik hava aynı zamanda kimyasal olarak gerekli hava miktarı veya yüzde 100 teorik hava diye de adlandırılır. Teorik havadan daha az havayla gerçekleşen bir yanma işleminin tam olması mümkün değildir. Yakıtın teorik havayla tam olarak yandığı ideal bir yanma işlemi, yakıtın stokiyometrik veya teorik yanması diye bilinir.

Gerçek yanma işlemlerinde yanmanın tama yakın olmasını sağlamak veya çıkış sıcaklığını belirli bir düzeyde tutabilmek için, genellikle stokiyometrik miktardan daha fazla hava kullanılır. Stokiyometrik miktarın üzerinde olan hava miktarına fazla hava adı verilir. Fazla hava genellikle, stokiyometrik hava esas alınarak, fazla hava yüzdesi veya teorik hava yüzdesi olarak ifade edilir. Örneğin %50 fazla hava, %150 teorik hava ve %200 fazla hava, %300 teorik hava anlamına gelir. Doğal olarak stokiyometrik miktarda hava, %0 fazla hava veya %100 teorik hava demektir. Stokiyometrik miktardan daha az hava, eksik hava diye nitelenir ve eksik hava yüzdesi olarak ifade edilir. Örneğin %90 teorik hava ve %10 eksik hava aynı miktarı belirtir. Yanma işleminde kullanılan hava miktarı, hava fazlalık katsayısı ile de gösterilebilir. Hava fazlalık katsayısı, gerçek hava yakıt oranını stokiyometrik hava yakıt oranına bölerek bulunur.

Yanma sırasında azot inert gaz olarak davranır ve çok az miktarda azot oksit oluşturmasının dışında diğer elementler ile tepkimeye girmez. Bununla beraber azotun varlığı bile yanma sonucunu önemli ölçüde etkiler. Çünkü genellikle azot yanma odasına düşük sıcaklıklarda girer ve yanma sırasında ortaya çıkan kimyasal enerjinin büyük bir kısmını alarak yüksek sıcaklıkta çıkar. Yanma işlemlerinin çoğunda nem ve yanma sırasında oluşan H_2O da azot gibi inert gaz olarak varsayılabilir. Yanma gazları su buharının çiy noktasının altına soğuduğunda bir miktar nem yoğunlaşır. Su damlaları yanma gazları içinde bulunan kükürt dioksit ile birleşerek korozyona neden olan sülfürik asit oluşturduğu için çiy noktasının önceden bilinmesi çok önemlidir (Çengel ve Boles, 2011).

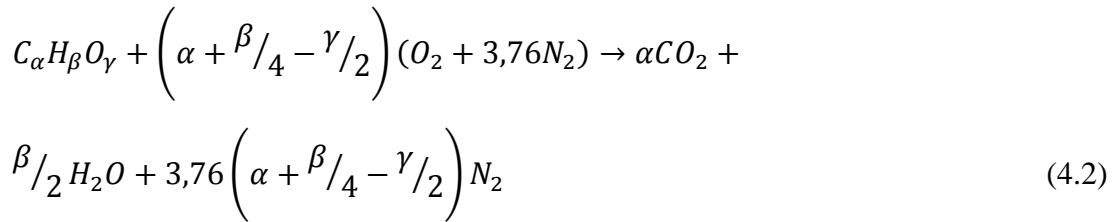
Yanma işlemi sırasında tepkimedan önce bulunan bileşenlere *girdiler* ve tepkimedan sonra bulunan bileşenlere *ürünler* denir. Örneğin 1 kmol karbonun 1 kmol saf oksijen ile karbon dioksit oluşturarak yanmasında



C ve O₂ yanmadan önce var olduğu için girdilerdir ve CO₂ yanmadan sonra ortamda olduğu için üründür. Eğer karbon saf oksijen yerine hava ile yanarsa yanma eşitliğinin her iki tarafında da N₂ olacaktır (Çengel ve Boles, 2011).

Kimyasal tepkimeler kütle korunumu ilkesine dayanarak denkleştirilmektedir. Kütle korunumu ilkesi *kimyasal tepkime sırasında her bir elementin toplam kütlesi sabit kalır* şeklinde ifade edilebilir. Bununla beraber girdilerin toplam mol sayısı ürünlerin toplam mol sayısına eşit olmayabilir. Yani bir kimyasal tepkimede toplam mol sayısı sabit kalmayabilir (Çengel ve Boles, 2011).

Genel hidrokarbon yakıtlar C_αH_βO_γ için hava ile yanma stokiyometresi şu şekilde ifade edilebilir (McAllister vd., 2011):



Burada α, β ve γ sırasıyla C, H ve O elementlerinin atom sayılarıdır. Gerçek yanma işlemlerinde tam yanmayı sağlamak ve yanma odasının sıcaklığını kontrol etmek için stokiyometrik miktardan daha fazla hava kullanmak genel bir uygulamadır.(Çengel ve Boles, 2011; McAllister vd., 2011):

$$\%FH = 100x \frac{m_h - m_{hs}}{m_{hs}} \quad (4.3)$$

Yanma işlemlerinin analizinde yakıt ve hava miktarlarını sayısal olarak ifade etmek için kullanılan büyüklük *hava-yakıt oranı (HY)*'dir. Yanma işlemlerinde *havanın kütlesinin yakıtın kütlesine oranı* olarak tanımlanır.

$$HY = m_h/m_y \quad (4.4)$$

Burada m maddenin kütlesi $m=NM$ bağıntısı ile verilir ve N mol sayısına bağlıdır, M mol kütesidir (Çengel ve Boles, 2011).

Gerçek hava-yakıt oranının stokiyometrik hava-yakıt oranına bölünmesi ϕ eşdeğerlik oranını verir:

$$\phi = HY / HY_s \quad (4.5)$$

Burada $\phi < 1$ olursa eksik yanma, $\phi = 1$ olursa stokiyometrik yanma, $\phi > 1$ olursa zengin yanma olur (McAllister vd., 2011).

Yakıtların yanması ile bağlantılı olarak kullanılan diğer bir terim yakıtın ısı değeridir ve bir yakıtın tamamen yandığında ve girdiler ürünler haline döndüğünde ortaya çıkan ısı miktarı olarak tanımlanır. Isı değeri ürünlerde bulunan suyun fazına bağlıdır. Ürünlerdeki su sıvı halde olduğunda ısı değerine üst ısı değer (ÜİD), ürünlerdeki su buhar fazında ise alt ısı değer (AİD) denir (Çengel ve Boles, 2011).

Yakıtların yanması ile sisteme giren enerji şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{Q}_y = \dot{m}_y H \quad (4.6)$$

Burada \dot{m}_y yakıtın debisi ve H yakıtın alt ısı değeridir.

Fırında yarı mamule aktarılan enerji ise şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{Q}_{ym} = \dot{Q}_{ym,\zeta} - \dot{Q}_{ym,g} = \dot{m}_{ym,\zeta} c_{pym,\zeta} T_{ym,\zeta} - \dot{m}_{ym,g} c_{pym,g} T_{ym,g} \quad (4.7)$$

Burada $\dot{m}_{ym,\zeta}$ fırın çıkışı yarı mamul miktarı, $\dot{m}_{ym,g}$ fırın girişi yarı mamul miktarı, $c_{pym,\zeta}$ yarı mamulün fırın çıkış sıcaklığındaki özgül ısısı, $c_{pym,g}$ yarı mamulün fırın giriş sıcaklığındaki özgül ısısı, $T_{ym,\zeta}$ yarı mamulün fırın çıkış sıcaklığı ve $T_{ym,g}$ yarı mamulün fırın giriş sıcaklığıdır.

4.1.3. Fırın Verimi

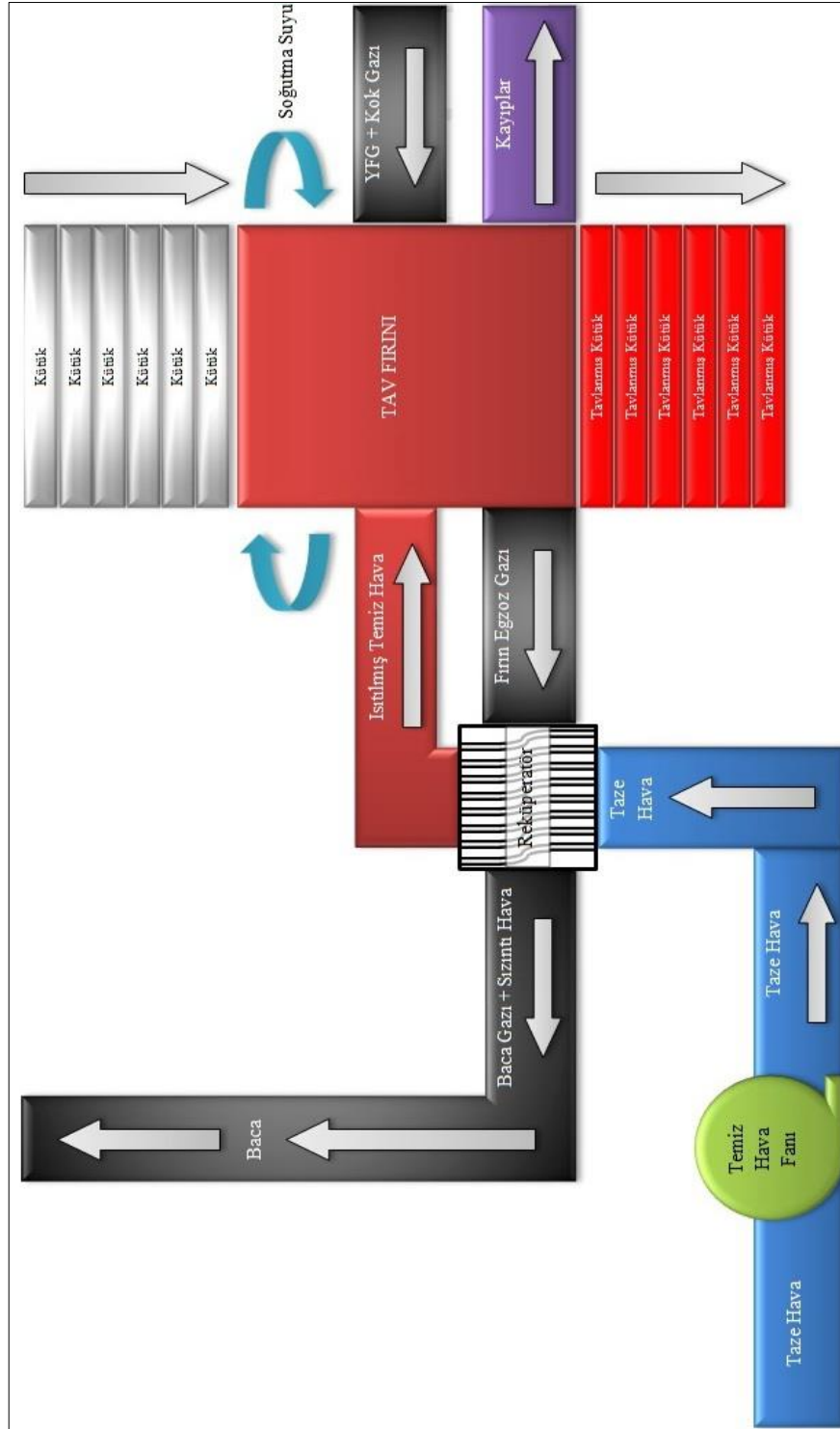
Haddehane tav fırınlarında verim şu şekilde hesaplanır:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{ym}}{\dot{Q}_y} \times 100 \quad (4.8)$$

Burada \dot{Q}_{ym} yarı mamule aktarılan enerji, \dot{Q}_y ise toplam yakıt enerjisidir.

4.2. ÖLÇÜM YÖNTEMİ

İki farklı sanayi kuruluşunun haddehane tav fırınlarında karışık yakıt ve doğalgaz kullanımına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada iki farklı sanayi kuruluşundaki yarı mamul üretim miktarları, tufal kayıpları alınmış ve sıcaklık değerleri sistem üzerindeki mevcut sayaçlardan okunmuştur. Fırınlarda yakıt olarak kullanılan karışık gaz (kok gazı + yüksek fırın gazı) ve doğalgaz debileri mevcut sayaçlardan okunmuştur. Ölçülen değerler ile mevcut sayaçlardan alınan değerler kullanılarak her bir fırında verimler hesaplanmıştır. Tav fırınlarının çalışma sistemi Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Tav fırını çalışma ve ölçüm sisteminin şematik gösterimi.

4.3. KARIŞIK YAKIT KULLANILAN TAV FIRINI ÖLÇÜM SONUÇLARI VE HESAPLAMALAR

4.3.1. Karışık Yakıt Kullanılan Tav Fırını Ölçüm Sonuçları

Karışık yakıt kullanan tav fırınında yakıt olarak kok gazı ve yüksek fırın gazı (YFG) kullanılmaktadır. Kullanılan yakıt debileri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Karışık yakıt kullanılan tav fırınında kullanılan yakıt debileri.

Kok Gazı (Nm ³ /h)	5.712
Yüksek Fırın Gazı (Nm ³ /h)	714

Karışık yakıt kullanılan tav fırınına beslenen kok gazı ve yüksek fırın gazı analiz değerleri sırasıyla Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kok gazı analiz değerleri.

Kok Gazı Analiz Değerleri (kütlece %, orijinal temel)	
Karbondiyoksit	1,02
Hidrojen Sülfür	0,15
Oksijen	0,98
Karbonmonoksit	5,82
Hidrojen	60,87
Metan	21,50
Olefinler	2,29
Diğer	0,99
Azot	6,38
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	4190
Üst Isıl Değer (kcal/kg)	4738

Çizelge 4.3. Yüksek fırın gazı analiz değerleri.

Yüksek Fırın Gazı Analiz Değerleri (kütlece %, orijinal temel)	
CO ₂	13,59
CO	23,76
H ₂	2,23
N ₂	60,42
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	775
Üst Isıl Değer (kcal/kg)	786

4.3.2. Yarı Mamule Verilen Isı

Karışık yakıtlı tav fırınında yarı mamule verilen ısı; saatlik yarı mamul üretimi, yarı mamulün ortalama özgül ısısı ve sıcaklık farkı alınarak şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\dot{Q}_{ym,g} = 63\ 000\ \text{kg/h} \times 0,105\ \text{kcal/kg}^\circ\text{C} \times 20\ ^\circ\text{C} = 132\ 300\ \text{kcal/h}$$

$$\dot{Q}_{ym,\text{ç}} = 63\ 000\ \text{kg/h} \times 0,163\ \text{kcal/kg}^\circ\text{C} \times 1.220\ ^\circ\text{C} = 12\ 528\ 180\ \text{kcal/h}$$

$$\dot{Q}_{ym} = \dot{Q}_{ym,\text{ç}} - \dot{Q}_{ym,g} = 12\ 528\ 180 - 132\ 300 = 12\ 395\ 880\ \text{kcal/h}$$

4.3.3. Toplam Yakıt Isısı

Karışık yakıt kullanılan tav fırınında toplam yakıt ısısı; saatlik debileri ve alt ısı değerleri alınarak şu şekilde hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{y,kg} = 5\ 712\ \text{Nm}^3/\text{h} \times 4\ 190\ \text{kcal/Nm}^3 = 23\ 933\ 280\ \text{kcal/h}$$

$$\dot{Q}_{y,yfg} = 714\ \text{Nm}^3/\text{h} \times 775\ \text{kcal/Nm}^3 = 553\ 350\ \text{kcal/h}$$

$$\dot{Q}_y = \dot{Q}_{y,kg} + \dot{Q}_{y,yfg} = 23\ 933\ 280 + 553\ 350 = 24\ 486\ 630\ \text{kcal/h}$$

4.3.4. Karışık Yakıt Kullanılan Tav Fırını Isıl Verimi

Karışık yakıt kullanılan tav fırını ısı verimi; yarı mamule verilen ısı miktarı ve toplam yakıt ısısı kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Karışık yakıt kullanılan tav fırını ısı verimi.

Yarı mamule verilen ısı \dot{Q}_{ym} (kcal/h)	12 395 880
Toplam yakıt ısısı \dot{Q}_y (kcal/h)	24 486 630
Verim ($\%, \dot{Q}_{ym}/\dot{Q}_y$)	50,62

Özgül yakıt tüketimi: 96 Nm³/h kok gazı ve 12 Nm³ yüksek fırın gazı

1Nm³ kok gazı maliyeti: 0,17 TL

1Nm³ yüksek fırın gazı maliyeti: 0,035 TL

1ton yarı mamulün karışık gaz ile tavlama maliyeti: 16,74 TL

4.3.5. Karışık Yakıt Kullanılan Tav Fırını Bakım Maliyetleri

Karışık yakıt kullanılan tav fırınında en az üç yılda bir bakım için fırının durması gerekmektedir. Bu duruş en az beş gün sürmektedir. Fırının durdurulup soğutulması, bakım yapılması ve yeniden ısıtılması sürecini kapsamaktadır. Karışık yakıtın transfer edildiği borular, hat üzerindeki daraltıcılar, dirsekler, kontrol ekipmanları, vanalar ve brülör gibi ekipmanların ya temizliği ya da yedekleri ile değişimi yapılmaktadır. Bu işlerin maliyetleri aşağıda ifade edilmiştir.

Brülör değişimi: 45 100 TL

Vana değişimi: 5 000 TL

Boru temizliği: 7 500 TL

Fan değişimi ve yerinde balansı: 3 800 TL

TOPLAM: 61 400 TL

Bu işlemler üç yılda bir yapıldığına göre yıllık bakım maliyeti: 20 467 TL/yıl

4.3.6. Karışık Yakıt Kullanılan Tav Fırını Duruşundaki Üretim Kayıpları

Bu duruşta yıllık üretim kayıpları yıl bazındaki üretim değerlerine göre üç gün ray üretimi ve iki gün de profil üretimi yapıldığı göz önüne alınarak üretim kayıp hesabı yapılmıştır.

Yıllık üretim kaybı ray üretimi için: $63 \text{ t/h} \times 3 \text{ g} \times 24 \text{ h} \times 748 \text{ TL/t} = 3\,392\,928 \text{ TL}$

Yıllık üretim kaybı profil üretimi için: $63 \text{ t/h} \times 2 \text{ g} \times 24 \text{ h} \times 108 \text{ TL/t} = 326\,592 \text{ TL}$

Toplam üretim kaybı: $3\,719\,520 \text{ TL}$

Bu işlem üç yılda bir yapıldığına göre yıllık üretimden gelen kayıp: $1\,239\,840 \text{ TL}$

4.3.7. Karışık Yakıt Kullanılan Tav Fırını Tufal Kayıpları

Karışık yakıt kullanılan tav fırınında yarı mamulün tavlanması sırasında yarı mamulün yüzeyinde oksijen ile meydana gelen tepkime sonucu tufal oluşmaktadır.

Karışık yakıt kullanılan tav fırınında ölçülen bu tufallar %1,8 civarındadır.

Yıllık net üretim $325\,000 \text{ t} \times 0,018 = 6\,120 \text{ t}$ tufal kaybı olmaktadır.

$6\,120 \text{ t} \times 491,4 \text{ TL} - 6\,120 \text{ t} \times 65 \text{ TL} = 3\,007\,368 - 397\,800$

Yıllık tufaldan olan kayıp: $2\,609\,568 \text{ TL}$

Toplam kayıp = Bakım giderleri + yıllık üretim kaybı + tufal kaybı

= $20\,467 \text{ TL} + 1\,239\,840 \text{ TL} + 2\,609\,568 \text{ TL}$

= $3\,869\,875 \text{ TL}$

CO₂ salınım miktarı: 1 Nm^3 karışık gazın yanması sonucu;

Kok gazı için $0,63 \text{ kg CO}_2$ açığa çıkmaktadır. 5712 Nm^3 kok gazı yanması sonucu 3599 kg/h CO_2 açığa çıkmaktadır.

Yüksek fırın gazı için $0,45 \text{ kg CO}_2$ açığa çıkmaktadır. 714 Nm^3 yüksek fırın gazı yanması sonucu 321 kg/h CO_2 açığa çıkmaktadır.

Karışık yakıt olarak 3920 kg/h CO_2 açığa çıkmaktadır.

4.4. DOĞALGAZ KULLANILAN TAV FIRINI ÖLÇÜM SONUÇLARI VE HESAPLAMALAR

4.4.1. Doğalgaz Kullanılan Tav Fırını Ölçüm Sonuçları

Doğalgaz kullanılan diğer sanayi kuruluşundaki yakıt debisi Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Doğalgaz kullanılan tav fırını debisi.

Doğalgaz (Nm ³ /h)	1082
-------------------------------	------

4.4.2. Yarı Mamule Verilen Isı

Doğalgaz kullanılan tav fırınında yarı mamule verilen ısı; saatlik yarı mamul üretimi, yarı mamulün ortalama özgül ısısı ve sıcaklık farkı alınarak şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\dot{Q}_{ym,g} = 27\ 460\ \text{kg/h} \times 0,105\ \text{kcal/kg}^{\circ}\text{C} \times 20\ ^{\circ}\text{C} = 57\ 666\ \text{kcal/h}$$

$$\dot{Q}_{ym,\phi} = 27\ 460\ \text{kg/h} \times 0,163\ \text{kcal/kg}^{\circ}\text{C} \times 1\ 220\ ^{\circ}\text{C} = 5\ 460\ 696\ \text{kcal/h}$$

$$\dot{Q}_{ym} = \dot{Q}_{ym,\phi} - \dot{Q}_{ym,g} = 5\ 460\ 696 - 57\ 666 = 5\ 403\ 030\ \text{kcal/h}$$

4.4.3. Toplam Yakıt Isısı

Doğalgaz kullanılan tav fırınında toplam yakıt ısısı; saatlik kullanılan gaz debisi ve alt ısıl değerleri alınarak şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\dot{Q}_{y,dg} = 1\ 082\ \text{Nm}^3/\text{h} \times 8\ 250\ \text{kcal/Nm}^3 = 8\ 926\ 500\ \text{kcal/h}$$

4.4.4. Doğalgaz Kullanılan Tav Fırını Isıl Verimi

Doğalgaz kullanılan tav fırını ısı verimi; yarı mamule verilen ısı miktarı ve toplam yakıt ısı kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Doğalgaz kullanılan tav fırını ısı verimi.

Yarı mamule verilen ısı \dot{Q}_{ym} (kcal/h)	5 403 030
Toplam yakıt ısı \dot{Q}_y (kcal/h)	8 926 500
Verim (%), \dot{Q}_{ym}/\dot{Q}_y	60,52

Özgül yakıt tüketimi: 39,4 Nm³/h doğalgaz

1Nm³ doğalgazın maliyeti: 0,81 TL

1ton yarı mamulün doğalgaz ile tavlama maliyeti: 31,91 TL

4.4.5. Doğalgaz Kullanılan Tav Fırını Tufal Kayıpları

Doğalgaz kullanılan tav fırınında yarı mamulün tavlama sırasında yarı mamulün yüzeyinde oksijen ile meydana gelen tepkime sonucu tufal oluşmaktadır.

Doğalgaz kullanılan tav fırınında ölçülen bu tufallar %1,5 civarındadır.

Yıllık net üretim 180 000 t x 0,015 = 2 700 t tufal kaybı olmaktadır.

$$2\,700\text{ t} \times 90\text{ TL} - 2\,700\text{ t} \times 65\text{ TL} = 243\,000 - 175\,500$$

Yıllık tufaldan olan kayıp: 67 500 TL

4.4.6. Doğalgaza dönüşüm için gerekli yatırım maliyeti

Karışık yakıt kullanılan tav fırınının doğalgaza dönüşümü için iki ayrı çalışma yapılması gerekmektedir. Bunlardan birincisi ana doğalgaz hattından tav fırınına kadar olan boru hattı ve ekipmanlarıdır. Diğer bir hatta tav fırını boru hattı ve ekipmanlarıdır.

Ana hattan fırına kadar olan hat için : yaklaşık 142 000 € + KDV

Tav fırını boru hattı ve ekipmanları için : yaklaşık 80 000 € + KDV

Toplam dönüşüm maliyeti: 222 000 € + KDV' lik bir yatırım gerekmektedir.

CO₂ salınım miktarı: 1Nm³ doğalgazın yanması sonucu 2,1 kg CO₂ açığa çıkmaktadır.

1082 Nm³ /h doğalgazın yanması sonucu 2 272 kg/h CO₂ salınımı olmaktadır.

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER

İki sanayi kuruluşunun karışık yakıtlı haddehane tav fırını ve doğalgazlı haddehane tav fırınlarında enerji verimliliği çalışması yapılmıştır. Ölçüm ve kuruluş verileri kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda karışık yakıt kullanılan tav fırınında; tav fırını ısı verimi, yarı mamule verilen ısı, toplam yakıt ısı, tav fırını duruşundaki üretim kayıplarının maddi değeri, tav fırını tufal kayıpları maddi değeri ve toplam maddi kayıp miktarları belirlenmiştir. Aynı şekilde doğalgaz kullanılan tav fırınında da; tav fırını ısı verimi, yarı mamule verilen ısı, toplam yakıt ısı, tav fırını tufal kayıpları maddi değeri, doğalgaza dönüşüm için gerekli yatırım maliyeti belirlenmiştir.

Buna göre Karışık yakıt kullanılan tav fırını sonuçları şunlardır:

- Yarı mamule verilen ısı 12 395 880 kcal/h
- Toplam yakıt ısı 24 486 630 kcal/h
- Tav fırını ısı verimi %50,62 olarak hesaplanmıştır.
- Tav fırını yıllık bakım maliyeti de 20 467 TL/yıl olarak hesaplanmıştır.
- Tav fırını duruşundaki üretim kayıplarının parasal değeri 1 239 840 TL/yıl olarak hesaplanmıştır.
- Tav fırını tufal kayıplarının parasal değeri de 3 869 875 TL olarak hesaplanmıştır.
- CO₂ salınım miktarı 3 920 kg/h' tir.

Doğalgaz kullanılan tav fırını sonuçları ise şunlardır:

- Yarı mamule verilen ısı 5 403 030 kcal/h
- Toplam yakıt ısı 8 926 500 kcal/h
- Tav fırını ısı verimi %60,52 olarak hesaplanmıştır.
- Tav fırını tufal kayıplarının parasal değeri 67 500 TL olarak hesaplanmıştır.

- CO₂ salınım miktarı 2 272 kg/h' tir.

Karışık yakıt kullanılan tav fırınının Doğalgaza dönüşümü için toplam 222 000 € + KDV' lik bir yatırım gerekmektedir.

Farklı yakıt kullanılan her iki tav fırını için avantaj ve dezavantajlı durumları aşağıda belirtilmiştir:

- Karışık yakıtın proses gereği açığa çıkan bir gaz olması nedeni ile doğalgazdan daha ucuz olması karışık yakıtı avantajlı hale getirmektedir.
- Tufal kaybı ve dolayısıyla üretim kaybı açısından bakıldığında doğalgaz daha avantajlıdır.
- Karışık yakıtın içerdiği maddeler nedeniyle gaz hatlarında tıkanmalar meydana gelmekte ekstra bakım maliyeti ve üretim kayıpları olmaktadır. Bu bakımdan doğalgaz daha avantajlıdır.
- Tav fırını verimi açısından doğalgazlı fırın daha verimli çalışmaktadır.
- Doğalgaza dönüşüm için yüksek yatırım maliyetleri gerekmektedir.
- CO₂ salınımı açısından doğalgaz daha avantajlıdır.

Doğalgaz kullanılan tav fırınının; daha verimli çalışması, tufal kayıp miktarlarının düşük olması, CO₂ salınımlarının düşük olması, bakım maliyetlerinin yok denecek kadar az olması açısından karışık yakıt kullanılan tav fırınında doğalgaza dönüşüm yapılabilir. Mevcut karışık yakıtta yeni yapılan enerji santralinde yakıt olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Chen, W. H., Chung, Y. C. and Liu, J. L., “Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32: 695-706 (2005).

Çengel, Y. A. ve Boles, M. A., “Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla, 5. Baskı”, Pınarbaşı, A., *Güven Bilimsel*, İzmir, 753-757, 764 (2011).

Ertem, G., Çelik, B. ve Yeşilyurt, S., “Endüstriyel tav Fırınlarında ısı dengliği hesaplamaları ve enerji verimliliğinin belirlenmesi”, *IV. Ege Enerji Sempozyumu*, İzmir, 1-8 (2008).

Ertem, M. E., Şen, S., Akar, G., Pamukçu, C. and Gürgen, S., “Energy balance analysis and energy saving opportunities for Erdemir slab furnace #3”, *Energy Sources, Part A*, 32: 979-994 (2010).

Galletti, C., Coraggio, G. and Tognotti, L., “Numerical investigation of oxy-natural-gas combustion in a semi-industrial furnace: Validation of CFD sub-models”, *Fuel*, 109: 445-460 (2013).

Intergovernmental Panel on Climate Change, “Fourth assessment report, climate change 2007: Synthesis Report”, *IPCC AR4*, Switzerland, 36 (2007).

International Energy Agency, “Worldwide trends in energy use and efficiency”, *Energy Indicators*, France, 16, 17 (2008).

Karimi, H. J. and Saidi M. H., “Heat transfer and energy analysis of a pusher type reheating furnace using oxygen enhanced air for combustion”, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 17 (4): 12-17 (2010).

Kaya, D. and Eyidogan, M., “Energy conservation opportunities in an industrial boiler system”, *Journal of Energy Engineering*, 136 (1): 18-25 (2010).

Kirschen, M., Badr, K. and Pfeifer, H., “Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry”, *Energy*, 36: 6146-6155 (2011).

Kirschen, M., Risonarta, V. and Pfeifer, H., “Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry”, *Energy*, 34: 1065-1072 (2009).

Lee, C.L. and Jou, C.J., “Saving fuel consumption and reducing pollution emissions for industrial furnace”, *Fuel Processing Technology*, 92: 2335-2340 (2011).

Manatura K. and Tangtrakul M., “A study of specific energy consumption in reheating furnace using regenerative burners combined with recuperator”, *Silpakorn U Science & Tech J.*, 4 (2): 7-13 (2010).

McAllister, S., Chen, J. and Fernandez-Pello, A. C., “Fundamentals of Combustion Processes, 1st edition”, *Springer*, USA, 18-20 (2011).

Mullinger, P. and Jenkins, B., “Industrial and Process Furnaces, 1st edition”, *Butterworth-Heinemann*, Hungary, 304 (2008).

Nogami, H., Yagi, J., Kitamura, S. and Austin, P. R., “Analysis on material and energy balances of ironmaking systems on blast furnace operations with metallic charging, top gas recycling and natural gas injection”, *ISIJ International*, 46 (12): 1759-1766 (2006).

Si, M., Thompson, S. and Calder, K., “Energy efficiency assessment by process heating assessment and survey tool (PHAST) and feasibility analysis of waste heat recovery in the reheat furnace at a steel company”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 2904-2908 (2011).

Siitonen, S., Tuomaala, M. and Ahtila, P., “Variables affecting energy efficiency and CO₂ emissions in the steel industry”, *Energy Policy*, 38: 2477–2485 (2010).

Terzi, Ü. K. and Baykal, R., “Efficient and effective use of energy: a case study of TOFAS”, *Environmental Research, Engineering and Management*, 1 (55): 29-33 (2011).

Topbaş, M. A., “Endüstri Fırınları, Cilt 1”, *Yıldız*, İstanbul, 1, 16 (1991).

Trejo, E., Martell, F., Micheloud, O., Teng, L., Llamas, A. and Montesinos-Castellanos, A., “A novel estimation of electrical and cooling losses in electric arc furnaces”, *Energy*, 20: 1-11 (2012).

Trinks, W., Mawhinney, M. H., Shannon, R. A., Reed, R. J. and Garvey, J. R., “Industrial Furnaces, 6th Edition”, *John Wiley and Sons*, USA, 1 (2004).

Tütünoğlu, Y., Güven, A., Öztürk, İ. T., “Cam temperleme fırınında enerji analizi”, *III. Enerji Verimliliği Kongresi*, Kocaeli, 153-166 (2011).

Worrell, E., Martin, N. and Price, L., “Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the U.S. iron and steel sector”, ***LBNL-41724***, California, (199a).

Worrell, E., Martin, N. and Price, L., “Energy efficiency opportunities in electric arc steelmaking”, ***LBNL-42775***, California, (1999b).

Xu, C. and Cang, D., “A brief overview of low CO₂ emission technologies for iron and steel making”, ***Journal of Iron and Steel Research, International***, 17 (3): 1-7 (2010).

Yüksel, B., “Enerji santraller”, Ders Notları, ***Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü***, Erzurum (2004).

ÖZGEÇMİŞ

Ergin GÜNEY, 1974 yılında Karabük'te doğdu. İlk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladıktan sonra 1993 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. Lisans eğitimini 1998 yılında tamamladıktan sonra 1998-2000 yılları arasında askerlik görevini Asteğmen olarak yaptı. 2000-2009 yılları arasında Kardemir A.Ş. Çelikhane Müdürlüğü bünyesinde Mekanik Bakım Mühendisi olarak çalıştı. 2010 yılında Kardemir A.Ş. Ray Profil Haddehanesi'nde Mekanik Bakım Mühendisi olarak görev aldı ve halen devam etmektedir. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Ergin GÜNEY, evli ve iki çocuk babasıdır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Şirinevler Mah. Bestekar Sok. Akkaya Apt. No: 7 / 7 KARABÜK
Tel : 0 505 502 35 63
E-posta : ergin_guney@hotmail.com