



**T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**SANAYİ FIRINLARINDA ENERJİ VE EKSERJİ
VERİMLİLİĞİ; ÖRNEK ÇALIŞMA EMAYE PİŞİRME
FIRINI VERİMLİLİK PROJESİ ENERJİ VE EKSERJİ
ANALİZLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Sedat VATANDAŞ

Yüksek Lisans Tezi



**SANAYİ FIRINLARINDA ENERJİ VE EKSERJİ
VERİMLİLİĞİ; ÖRNEK ÇALIŞMA EMAYE PİŞİRME
FIRINI VERİMLİLİK PROJESİ ENERJİ VE EKSERJİ
ANALİZLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Sedat VATANDAŞ



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SANAYİ FIRINLARINDA ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLİLİĞİ; ÖRNEK
ÇALIŞMA EMAYE PİŞİRME FIRINI VERİMLİLİK PROJESİ ENERJİ VE
EKSERJİ ANALİZLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Sedat VATANDAŞ

Prof. Dr. Atakan AVCI

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2016

TEZ ONAYI

Sedat VATANDAŞ tarafından hazırlanan “Sanayi Fırınlarında Enerji Ve Ekserji Verimliliği; Örnek Çalışma Emaye Pişirme Fırını Verimlilik Projesi Enerji Ve Ekserji Analizlerinin Gerçekleştirilmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Atakan AVCI

Başkan : Prof. Dr. Atakan AVCI
Fakültesi,Anabilim Dalı


İmza

Üye : Prof. Dr. Recep YAMANKARADENİZ
Fakültesi,Anabilim Dalı


İmza

Üye : Prof. Dr. Ali SÜRMEK
Fakültesi,Anabilim Dalı


İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali Osman DEMİR

Enstitü Müdürü

18/11/2016

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

04/10/2016

Sedat VATANDAŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SANAYİ FIRINLARINDA ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLİLİĞİ; ÖRNEK ÇALIŞMA EMAYE PİŞİRME FIRINI VERİMLİLİK PROJESİ ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Sedat VATANDAŞ

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Atakan AVCI

Türkiye'de enerji kullanımının özellikle sanayide giderek artması, enerji verimliliğine olan ihtiyacı her geçen gün ön plana çıkartmaktadır. Enerjideki dışa bağımlılık, artan enerji maliyetleri ve rekabet unsuru, enerji verimliliğini yeni bir enerji kaynağı şeklinde ele alınması gerekliliği ortaya koymaktadır. Aynı anda, rekabetçiliğin arttırılması, enerji maliyetlerinin ve çevresel etkilerin azaltılması sadece enerji verimliliği ile sağlanabilmektedir.

Endüstriyel fırınlar kullandıkları sanayi alanlarında önemli enerji tüketici olarak değerlendirilirler. Bu nedenle fırınların yapısının bilinmesi ve en verimli şekilde işletilmesi önemlidir. Örnek çalışma yapılan fırının revizyonunda enerji verimli tasarım ve enerji verimli satın alma süreçleri üzerinde de durularak, getirdiği kazanımlar tartışılmıştır.

Bu çalışmada öncelikle boyler tank üretiminde kullanılan yüksek enerji tüketimine sahip bir emaye pişirme fırınının enerji ve ekserji analizi yapılmış ve fırının enerji geri kazanım potansiyeli değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda fırının enerji ve ekserji verimi sırasıyla %13 ve %9 bulunmuştur. Etüt çalışması sonucu belirlenen verimlilik projeleri anlatılmış ve yapılan uygulamalar detaylandırılmıştır. Verimlilik projeleri sonucu, enerji ve ekserji analizleri tekrarlanarak sırasıyla %28 ve %20,3 tespit edilmiştir. Çalışmanın sonunda sistemde enerjinin verimli kullanımı ve performansın arttırılmasına ilişkin önerilerde bulunulmuştur.

Örnek alınan fırın çalışmasında verimlilik arttırıcı proje hazırlanmış ve yıllık yaklaşık 100bin TL tasarruf planlanmıştır. Enerji maliyetlerinin giderek artması, bu tasarrufun daha da artacağını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler:

2016, vii + 82 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

ENERGY AND EXERGY EFFICIENCY OF INDUSTRIAL FURNACES; CASE STUDY PERFORMING ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF ENAMEL FURNACE THROUGH EFFICIENCY PROJECT

Sedat VATANDAŞ

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Atakan AVCI

The increasing use of energy in Turkey, especially in industry and the need for energy efficiency brings the issue in the foreground. External dependence on sources of energy, energy costs and competitive factors, addressed the energy efficiency to take into account as a new energy source. At the same time, increasing competitiveness, reducing energy costs and decreasing environmental impacts can be achieved only through energy efficiency.

Industrial furnaces are considered as significant energy users in the processes that they are used. Therefore it is important to know the structure of the furnace to operate it efficiently. Also the benefit of energy efficient design and energy efficient purchasing is discussed in the revision of case study furnace.

In this study, primarily energy and exergy analysis of enamel furnace is made which has a significant energy consumption in the production of boiler, then energy recovery potential of furnace is evaluated. In the analysis, energy and exergy efficiencies are calculated respectively %13 and %9. Projects are described which are carried out according to the results of the energy audit and implementations are disclosed. After efficiency projects energy and exergy analysis are redone and efficiencies are recalculated respectively %28 and %20,3. Finally, recommendations were made for increasing the performance and the efficiency of the system

Energy efficiency project was prepared for the case study furnace and approximately 100 thousand TL annual saving was planned. The increasing cost of energy, shows that savings will increase further.

Key words: Endüstriyel fırın, enerji, ekserji, analiz, verimlilik, yanma

2016, vii + 82 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Ülkemizin 2023 hedeflerine ulaşması için enerji verimliliğinin çok önemli olduğunun farkındalığı ile gerek profesyonel iş hayatımızda gerekse özel hayatımızda hepimize düşen görevler bulunmaktadır. Verimliliğin artırılması adına yapılan her çalışma çok değerlidir ve ülkemize katkısı önemlidir.

Sanayi tesislerinde en önemli enerji tüketicilerinden biri de endüstriyel fırınlardır. Endüstriyel fırınların bulunduğu proseslerde hammaddeden sonra en büyük girdi enerji maliyetidir. Yüksek sıcaklıkta çalışan fırınların önemli miktarda enerjisi faydalı enerjiye dönüştürülmeden kaybedilmektedir. Bu nedenle endüstriyel fırınlarda verimlilik çalışmalarının önemi daha da artmaktadır. Verimlilik artışının ekonomiye olan katkısının anlaşılması, yapılan çalışmaların doğrulanması için analizlerin gerçekleştirilmesi ve iyi uygulama örneklerinin arttırılması gerekmektedir.

Tez çalışmasında, uygulanan verimlilik projesinin enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilerek, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuçlar değerlendirilerek fırınlarda yapılabilecek iyileştirmeler ortaya konulmuştur.

Verimlilik çalışmalarının hem ekonomiye hem de çevreye olan katkılarından dolayı verimlilik projelerinde ülkemize ve dünyaya karşı sorumluluk bilinciyle hareket etmemiz gerekmektedir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında yapılan çalışmanın hedefine ulaşması için çok büyük emek sarf eden Baymak Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş çalışanlarına, Fero Makine LTD. ŞTİ. çalışanlarına ve Enervis Enerji Servis A.Ş çalışanlarına teşekkür etmek istiyorum. Ayrıca bu çalışmanın İstanbul Kalkınma Ajansı'ndan destek almasından ve iyi uygulama örneği olarak yayınlanmasından dolayı projede emeği geçen tüm arkadaşlarımı tebrik ediyorum.

Çalışmanın tez çalışması olması konusunda desteklerini esirgemeyen ve çalışma süresince beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Atakan Avcı'ya, Sayın Doç. Dr. M.Ziya Söğüt'e aynı zamanda ihtiyaç duyduğumda yanımda olan dolayısıyla ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
2.1. Literatür Taraması	8
2.2. Endüstriyel Fırınlr.....	12
2.3. Endüstriyel Fırınlrın Sınıflandırılması.....	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM	23
3.1. Materyal.....	23
3.1.1. Emaye Pişirme Fırını	23
3.1.2. Fırınlarda Enerji Verimliliği	27
3.2. Yöntem	33
3.2.1. Sanayi Fırınlrında Enerji Ve Ekserji Analizi	33
3.2.2. Yanma.....	44
4. BULGULAR	55
4.1. Uygulama Öncesi Fırın Enerji Analizi	55
4.2. Uygulama Öncesi Fırın Ekserji Analizi	58
4.3. Uygulama Projeleri.....	60
4.4. Fırın Uygulama Sonrası Enerji Analizi	63
4.5. Fırın Uygulama Sonrası Ekserji Analizi	66
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	68
KAYNAKLAR.....	71
EK 1	73
ÖZGEÇMİŞ.....	82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

Açıklama

ABD	:Amerika Birleşik Devletleri
AB	:Avrupa Birliği
AID	:Alt ısı değer
BP	:British Petrol (İngiliz Petrol Şirketi)
GSYH	:Gayri Safi Milli Hasıla
TEP	:Ton Eşdeğer Petrol
OECD	:Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
TÜİK	:Türkiye İstatistik Kurumu
UID	:Üst ısı değer
IEA	:Uluslararası Enerji Ajansı
ETKB	:Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
YEGM	:Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
IP	:Geliştirme Potansiyeli

Simgeler

Açıklama

W	:İş
Q	:Isı
E	:Enerji
V	:Hız
z	:Yükseklik
P	:Basınç
T	:Sıcaklık
μ	:Verim
h	:Entalpi
s	:Entropi
cp	:Özgül ısı kapasitesi
W_{tr}	:Tersinir iş
λ	:Hava fazlalık katsayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Türkiye birincil enerji yoğunluğu (BP 2014)	1
Şekil 1.2. Enerji yoğunluğu - Kişi başı enerji kullanımı (IEA, ETKB, 2013)	2
Şekil 1.3. 2013 yılı TÜİK verilerine göre elektrik tüketimi	4
Şekil 2.1. Mufla fırını.....	16
Şekil 2.2. Fırın ateşleme yöntemleri	16
Şekil 2.3. Elektrot düzen tipleri.....	18
Şekil 2.4. a) Ark fırını kesit görünümü b) Grafit elektrotlar	19
Şekil 2.5. a) Direnç yan ve alt tarafta b) Direnç üst ve alt tarafta	20
Şekil 2.6. Çekirdeksiz fırınlar.....	21
Şekil 3.1. Proses şeması	25
Şekil 3.2. Termal kamera görüntümleri	26
Şekil 3.3. Baca gazı analizi.....	27
Şekil 3.4. Fırın sankey diyagramı.....	27
Şekil 3.5. Optimum çalışma grafiği	28
Şekil 3.6. Fırın ön görünüm.....	32
Şekil 3.7. Sürekli akış kütlenin korunumu diyagramı.....	35
Şekil 3.8. Enerji-Ekonomi-Ekoloji ilişkisinin ekserji analizi ilişkisi.....	37
Şekil 3.9. İşlenmemiş doğal gazın temel elemanları.....	48
Şekil 4.1. Proses girdileri enerji dağılımı	56
Şekil 4.2. Sankey enerji dağılımı	57
Şekil 4.3. Reküparatif brülör	60
Şekil 4.4. P tipi radyant tüpler ve izolasyon çalışmaları.....	61
Şekil 4.5. PLC ünitesi	62
Şekil 4.6. Ekonomizer ünitesi.....	63
Şekil 4.7. Ekonomizer panosu	63
Şekil 4.8. Proses girdileri enerji dağılımı	64
Şekil 4.9. Enerji dağılımı sankey diyagramı.....	65
Şekil 5.1. Çevre sıcaklığına bağlı ekserji verimi.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

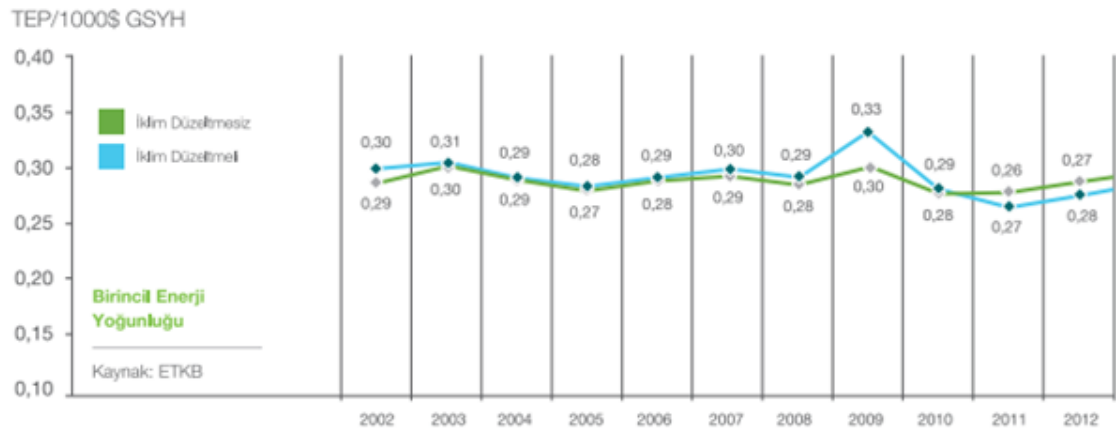
Çizelge 2.1. Malzeme ve işleme göre fırın sıcaklık değerleri	15
Çizelge 3.1. Uygulanan emaye kalınlıkları	24
Çizelge 3.2. Yüzey alanları ve sıcaklıkları	30
Çizelge 3.3. B_y parametresi	31
Çizelge 3.4. Elde edilen sonuçlar	31
Çizelge 3.5. Fosil yakıtların elektrik üretiminde CO_2 salınımı(MMO,2008).....	47
Çizelge 3.6. Doğalgaz bileşenleri	49
Çizelge 3.7. Bileşen oranlarına göre elde edilen veriler	51
Çizelge 3.8. Gibbs oluşum fonksiyonu ve standart kimyasal ekserji değerleri	52
Çizelge 3.9. Yakıt karşılaştırma (Akfel,2015).....	54
Çizelge 4.1. Proses girdileri	56
Çizelge 4.2. Proses çıktıları	57
Çizelge 4.3. Fırına giren maddeleri ekserji analizi	59
Çizelge 4.4. Fırından çıkan maddelerin ekserji analizi	59
Çizelge 4.5. Ekonomizer uygulaması sonuçları	62
Çizelge 4.6. Proses girdileri enerji dağılımı	63
Çizelge 4.7. Proses sonucunda çıkan maddeler	64
Çizelge 4.8. Fırına giren maddeleri ekserji analizi	66
Çizelge 4.9. Fırından çıkan maddeleri ekserji analizi	66

1. GİRİŞ

Ülkemizde, 2003 yılında 78 milyon TEP birincil enerji tüketimi gerçekleşirken, 2013 yılında birincil enerji tüketimi 123milyon TEP'e ulaşarak %57'lik bir artış yaşanmıştır. Bu süre zarfında dünyadaki birincil enerji tüketimi ortalama %26 oranında artmıştır. Aynı zaman zarfı içerisinde birincil enerji tüketimi ABD'de %6 azalırken, AB 'de %2 azalmıştır. (BP 2014)

Enerji yoğun sektörlerin bulunduğu ekonomik bir yapıya sahip olan ülkemizde, enerji tüketiminin yıllara bağlı olarak artış göstereceği yapılan tüm çalışmalarda belirtilmektedir. Bu nedenle birincil enerji tüketimimiz artarken, birincil enerji yoğunluğumuzu düşürebilmek, ülkemizin gelişmişlik seviyesini belirleyecek önemli bir gösterge olacaktır. Bilindiği üzere birincil enerji yoğunluğu, birincil enerji tüketiminin GSYH'ya oranlanması sonucu hesaplanır. Enerji verimliliği sağlayarak, birim GSYH üretmek için kullanacağımız enerjimizi azaltmak suretiyle enerji yoğunluğumuzu düşürmek, ekonomimiz açısından temel hedeflerimizden biridir.

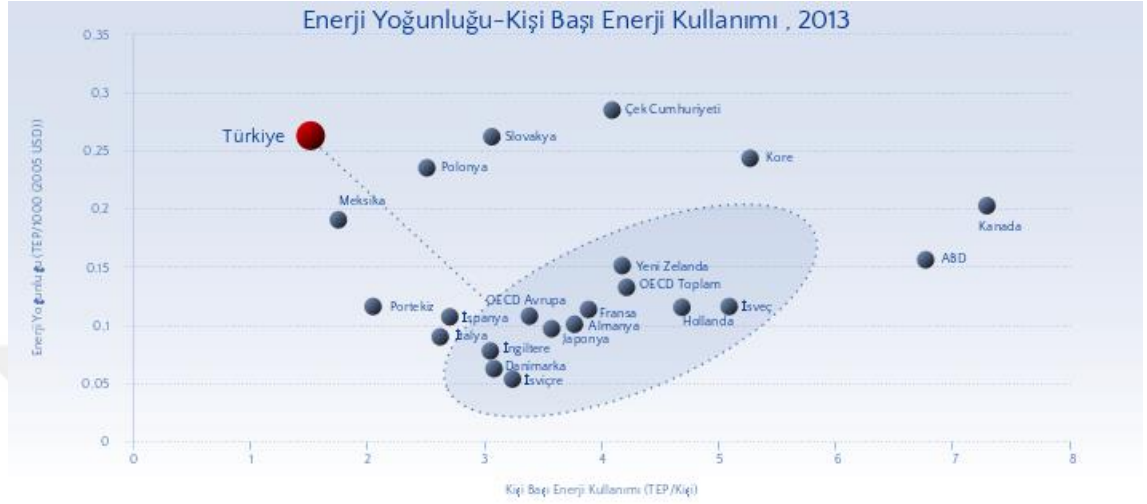
Bu hedef ayrıca sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi için enerjinin, üretiminden iletimine, iletiminden tüketimine kadar etkin kullanılması, enerjinin çevresel etkilerinin asgari seviyeye düşürülmesi açısından önemlidir.



Şekil 1.1. Türkiye birincil enerji yoğunluğu (BP 2014)

Türkiye'nin enerji yoğunluğu ile ilgili 2018 yılı hedefi 0,243 TEP/1 000 USD olarak belirlenmiştir.(Kalkınma Planı 2014-2018) Şekil 1.2 'de ise Türkiye'nin hedeflediği

enerji yoğunluğu ve kişi başına enerji tüketim değerlerine OECD ülkelerinin sahip olduğu ve Türkiye'nin de bu ülkeler arasına girme hedefi olduğu görülmektedir.



Şekil 1.2. Enerji yoğunluğu - Kişi başı enerji kullanımı (IEA, ETKB, 2013)

Dolayısı ile enerjide arz güvenliğinin sağlanması, enerji maliyetlerinin azaltılması, rekabetçiliğin artırılması, iklim değişikliği ile mücadelenin etkinliğinin artırılması ve çevrenin korunması, dışa bağımlılıktan kaynaklanan risklerin azaltılması gibi ulusal stratejik hedeflerimiz açısından enerji verimliliği kilit bir kavram olarak görülmektedir.

2007 yılı Nisan ayında kabul edilen Enerji Verimliliği Kanunu'na göre " Enerji verimliliği, binalarda yaşam standardı ve hizmet kalitesinin, endüstriyel işletmelerde ise üretim kalitesi ve miktarının düşüşüne yol açmadan enerji tüketiminin azaltılması anlamına gelmektedir."

Enerji verimliliğinin ayrıntılı tanımına göre ise enerji verimliliği, —... ısı, gaz, buhar, basınçlı hava, elektrik gibi çok değişik formlarda olabilen enerji kayıpları ile her çeşit atığın değerlendirilmesi veya geri kazanılması veya yeni teknoloji kullanılması yoluyla üretimi düşürmeden, sosyal refahı engellemeden enerji tüketiminin azaltılmasıdır (Kavak 2005).Dünya Enerji Konseyi'nin tanımına göre enerji verimliliği belirli bir

hizmet veya aktivite için, kullanılan enerjide sağlanan her tür düşüştür. Bu tüketim düşüşü teknolojik gelişmelerle ilişkilendirilebileceği gibi daha iyi yapılanma, yönetim ve bilinçlendirme gibi yollarla da sağlanabilir.¹

Türkiye’de özellikle 2000 yılından bu yana yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği konularında radikal kararlar alınarak gerekli tedbirlerin yasal temelleri atılmaktadır. Bunun bir parçası olarak 2007 yılı Nisan ayında Enerji Verimliliği Kanunu kabul edilmiştir. Kanunun yayınlanmasını müteakiben 2007 ve 2008 yıllarında ikincil düzenlemeler yürürlüğe konmuş ve bir dönüşüm süreci başlamıştır(Çalıkoglu 2012).

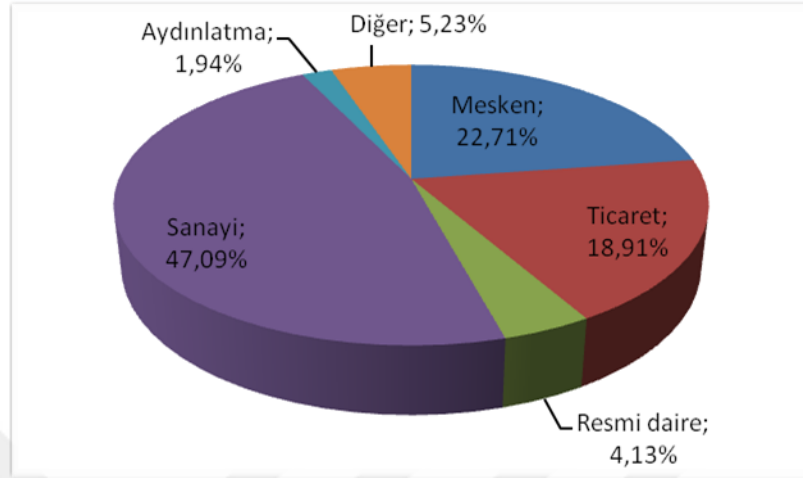
Bu çalışmalar doğrultusunda Enerji Verimliliği Strateji Belgesi 2012-2023 hazırlanarak, enerji verimliliği hedeflerin belirlenmesi ve somut adımlar atılmasını sağlamak adına önemli bir mesafe kaydedilmiştir. 2012/1 Karar No ile 20/02/2012 tarihinde yürürlüğe giren Enerji Verimliliği Strateji Belgesi 2012-2023, bugüne kadar enerji verimliliği kapsamında yürütölmüş faaliyetlerin değeriendirilmesi sonucunda alınan dersler, uygulama aşamasında karşılaşılan bariyerler ve enerji sektöründeki küresel eğilimler ışığında, Türkiye’nin enerji verimliliği yol haritasını ortaya koymayı hedeflemiştir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) 2015-2019 Stratejik Planı'nda sekiz ana temadan bir tanesi enerji verimliliği olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından 1. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı hazırlık çalışmalarına 2015 yılında başlanmıştır. Çalışma taslak olarak görüşe sunulmuştur ve yakın zamanda yürürlüğe girecektir.

2013 yılındaki doğal gaz tüketimleri 2012 yılına göre yaklaşık % 1 artmıştır. 2013 yılı doğal gaz tüketiminde en yüksek paya %45 ile sanayi tüketimi sahiptir. Şehir ve enerji santralleri ise tüketim paylarının sırasıyla %18 ve %32’sini oluşturmaktadır. 2012 yılına göre doğal gaz tüketim oranları incelendiğinde, sanayi tüketimlerinin %2 oranında

¹ World Energy Council, Energy Efficiency Policies Around the World: Review and Evaluation 2008 (London: 2007), 9.

arttığı gözlemlenmiştir (Karakış 2013). 2013 yılı TÜİK verilerine göre toplam elektrik tüketiminin %47.1'i sanayi sektöründe tüketilmektedir.



Şekil 1.3. 2013 yılı TÜİK verilerine göre elektrik tüketimi

Aynı şekilde Avrupa Birliği Enerji komisyonu tarafından kg/1 000€ birimiyle hesaplanan enerji yoğunluklarına bakıldığında, sanayi sektörü diğer sektörlerle göre enerji yoğunluğu en yüksek sektör olarak görülmektedir.

Ülkemizde sanayi alanında emek ve enerji yoğun sektörler ağırlıklı olarak faaliyet göstermektedir. Sektörlere göre ihracat verileri incelediğinde enerji verimliliğinin Türk sanayi sektörlerinin rekabet gücünün arttırması için önemli etken olduğu görülmektedir.

Tüm strateji ve eylem planlarında enerji verimliliği uygulamaları ile enerji verimliliğinin arttırılması ve enerji yoğunluğunun düşürülmesi sanayi sektörü açısından en temel amaçlardan biri olarak görülmektedir.

Enerji Verimliliği Strateji Belgesi 2012-2023 her bir sanayi alt sektöründeki indirgenmiş enerji yoğunluklarını, her bir alt sektör için %10'dan az olmamak üzere azaltılmasını hedef olarak belirlemiştir. Bu hedefe ulaşılması için, yapılması gereken çalışmalar, Enerji Kaynaklarının Ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik çerçevesinde belirlenmiştir. Yönetmeliğin 8. Maddesi olan Enerji Yönetimi ve Verimlilik Artırıcı Önlemler kısmında yapılması gereken çalışmalar sıralanmıştır.

Bu çalışmalarda en önemli aşama olarak, enerji yönetimini ve enerji yönetiminin başlangıç noktası olan, enerji etütleri öne çıkmaktadır. Enerji yönetimi; enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanılmasını sağlamak hedefiyle eğitim, etüt, ölçüm, izleme, planlama ve uygulama faaliyetlerini kapsamaktadır. Enerji etüdü ise enerji verimliliğinin artırılması için gerekli olan çalışmaların belirlenmesi için yapılan ve bilgi toplama, ölçüm, değerlendirme ve raporlama aşamalarından oluşan faaliyetleri nitelendirmektedir.

Enerji etütleri ile birlikte, tesisin enerji tüketim karakteristiği ortaya çıkartılarak;

- Enerji verimliliği fırsatlarının ortaya çıkartılması
- Alternatif yakıtların kullanılabilme imkânlarının ortaya çıkartılması
- Geleceğe enerji tüketim ve bütçe tahminlerinin yapılması
- Benzer proseslere sahip tesisler ile enerji tüketimlerinin kıyaslanması

çalışmaları yapılmaktadır.

Enerji etüdü çalışmalarında, ısıli sistemlerin performansının belirlenmesinde, genellikle enerji denkliği bağıntıları kullanılır (Hepbaşı 2008). Isı denkliği, ısının nerede ve hangi şekilde sisteme verildiğinin belirlenmesi ve enerjinin korunumu yasasının sistemde uygulanmasının sağlanmasıdır. Isı denkliği, giren ve çıkan enerjiyi belirlemek ve sistemi verimli hale getirebilmek için yapılabilecek değişikliklerin belirlenmesi amacıyla yapılır (EİE 1997a; Saibu Gas Co Hepbaşı 1999).

Isı denkliği ya da genel anlamı ile enerjinin denkliği(korunumu), Termodinamiğin birinci yasası ile ilgilidir. Bu yasa, doğanın en temel yasalarından biri olup, "enerjinin niceliğini" ortaya koymaktadır. Bir etkileşim sırasında, enerjinin bir biçimden başka bir biçime dönüşebileceğini, toplam miktarda azalma olmayacağını ifade eder (Çengel 1996).

Ancak enerjinin etkin kullanımı konusunda bilimsel alanda yapılan çalışmalar, termodinamiğin ikinci yasasının sistemlere uygulanabilirliği üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Termodinamiğin ikinci yasası enerjinin niteliği ile ilgilidir. Bu yasa; enerjinin niteliğinin bir hal değişimi sırasında, nasıl azaldığını hesaplamak için somut yöntemler ortaya koymaktadır. Başka bir deyişle, bir hal değişimi sırasında enerjinin

niteliğinin azalması, entropi üretimi ve iş yapabilme olanaklarının değerlendirilmesi bu yasanın inceleme alanıdır (Çengel,1996).

Termodinamiğin birinci yasası doğrultusunda yapılan çalışmalarda enerji kavramı üzerinde durulurken, termodinamiğin ikinci yasasında ekserji kavramı ön plana çıkmaktadır. Termodinamik bakış açısından ekserji; bir referans çevreyle denge haline gelirken, bir sistem ya da madde ve ya enerji akışıyla üretilebilecek maksimum miktarda iş olarak tanımlanır. Enerjiden farklı olarak ekserji; korunum yasasına uğramaz(ideal veya tersinir prosesler hariç). Ekserji daha çok, gerçek proseslerde tersinmezlikler nedeniyle tüketilir ya da yok edilir. Bir proses boyunca ekserji tüketimi, proses ile ilişkili tersinmezlikler nedeniyle ortaya çıkan entropiyle orantılıdır. Bu bilgiler doğrultusunda, ekserji analizi yapmanın önemi aşağıda belirtilmiştir.

- Enerji kaynaklarının kullanımının çevreye olan etkilerinin en iyi şekilde belirlenmesinde ana bir araçtır.
- Enerji sistemlerinin tasarımı ve analizi için termodinamiğin ikinci yasası ile birlikte kütle ve enerjinin korunumu prensiplerinin kullanıldığı etkin bir yöntemdir.
- Daha fazla verimli kaynak kullanıma amacını destekleyen uygun bir tekniktir. Belirlenmesi gereken atık ve kayıpların yerleri, tipleri ve gerçek büyüklükleri ortaya çıkarılır.
- Mevcut sistemlerdeki verimsizlikleri azaltarak, daha verimli sistemleri tasarlamının nasıl mümkün olup-olamayacağını gösteren etkir tekniktir.
- Sistemin sürdürülebilir kalkınmanın sağlanmasına katkı sağlayıp, sağlamadığını değerlendirir.

Bu çalışma da öncelikle literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Literatürde bugüne kadar yapılan enerji ve ekserji analizi çalışmalarından ve elde edilen sonuçlardan bahsedilmiştir. Ayrıca bulundukları işletmelerde önemli enerji tüketici olarak değerlendirilen sanayi fırınlarının çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılmış ve kullanıldıkları sektörler ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

Materyal ve yöntem bölümünde çalışma yapılan emaye pişirme fırının özellikleri anlatılarak, enerji verimliliği yöntemleri üzerinde durulmuştur. Sanayi fırınlarında enerji

ve ekserji analizlerinin gerekliliği anlatılarak özellikle fırınlar için yapılan sürekli akışlı açık sistemlerin için yapılan çözümlemeler anlatılmıştır. Ayrıca yanma konusu ve yakıt tipleri ele alınmış doğalgazda yanma konusu daha detaylı olarak ele alınmıştır. Referans olarak alınan doğalgaz değerleri üzerinden, doğalgaz alt ısı değeri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler yapılan çalışmada kullanılmıştır. Aynı zamanda referans doğalgaz değerleri üzerinden teorik yakma havası hesaplanmıştır. Doğalgazın yakıt olarak avantajları ortaya konularak 1 000 kcal ısı ihtiyacı için gerekli olan çeşitli yakıtlar için maliyet karşılaştırma tablosu oluşturulmuştur.

Bulgular kısmında fırın için yapılan ölçümler ve elde edilen bilgiler sonucunda fırının mevcut durumu ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Mevcut durum üzerinden emaye pişirme kutu fırının enerji analizi ve ekserji analizleri gerçekleştirilerek sırasıyla verimlilik değerleri tespit edilmiştir. Mevcut durum analizi sonrası uygulama projeleri ele alınmış ve fırın revizyonu sonrasında enerji ve ekserji analizleri yinelenmiştir.

Tartışma ve sonuç bölümünde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Fırının geliştirme potansiyeli irdelenerek, enerji ve ekserji analizi sonuçları arasındaki farklar irdelenmiştir. Endüstriyel fırınlar için gerçekleştirilebilecek çalışmalar da sonuç kısmında sıralanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Taraması

Endüstriyel fırınlar termal proses olarak ele alınırlar ve termodinamiğin birinci ve ikinci yasası kapsamında sürekli akışlı sistemler olarak analiz edilirler. Endüstriyel fırınlarda gerçekleştirilen iyileştirmeler ile birlikte fırınlarda yapılan enerji ve ekserji analizleri literatür taramasının kapsamını oluşturmuştur.

Endüstriyel fırınlarda harcanan enerjinin önemli bir kısmı kayıp olarak gerçekleştiği için kayıpların azaltılması ve maksimum enerjinin iş görebilmesi için yapılan iyileştirme projeleri enerji verimliliği adına önem arz eden çalışmalardır. Bu nedenle endüstriyel fırınlarda gerçekleştirilen iyileştirmeler ile ilgili literatür taranmıştır.

Örnek bir çalışmada, çelik tesislerinde bulunan ısıl işlem fırınında, baca gazı kaybı % 64 malzemeye verilen enerji % 12 olarak tespit edilmiştir. Aynı fırında menevişlemede baca gazı kaybı % 80.6 olurken malzemeye verilen ısı % 6.6 olarak tespit edilmiştir. Bu tip tesislerde ısı kayıplarının azaltılması ve en uygun işletme şartları sağlanması durumunda tespit edilen verim değerlerinden daha yüksek verimlere ulaşılabilmektedir (TÜBİTAK).

Enerji, iş yapabilme yeteneği olarak adlandırılır. Termodinamiğin birinci yasası bize enerjinin vardan yok, yoktan var edilemeyeceğini ve korunduğunu ancak bir türden diğer bir türe dönüşebileceğini söylemektedir. Fırınlar ile ilgili enerjinin korunumu yasasına uygun olarak yapılan çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

Ekserji analizlerinin sistemlerin termodinamik açıdan performanslarının değerlendirilmesine yönelik olarak 18 'nci yüzyılın yarısından itibaren kullanılmaya başlandığı gözlenmiştir. Ancak ekserji yönteminin geliştirilmesi ve kullanılması son 15 yılda yaygınlaşmıştır. Ekserji analizlerinin ilk uygulamalarının güç santralleri üzerinde yoğunlaştığı bilimsel çalışmaların yanında, gıda ve çeşitli sanayi sektörlerinde de kullanılmaya başlandığı saptanmıştır. Aynı şekilde endüstriyel fırınlarda gerçekleştirilen ekserji analizleri de literatür taraması kapsamında değerlendirilmiştir.

Ertem ve ark. (2008) endüstriyel tav fırınlarında çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada enerji kayıplarının olduğu noktalar incelenerek, verimlilik çalışması

gerçekleştirilmiştir. Tavlama fırını verimi olarak nitelendirilebilecek, ürüne aktarılan enerji tespit edilmiş ve spesifik enerji tüketim miktarı belirlenmiştir. Tavlama fırını enerji girdisi olarak, yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Tavlama fırını enerji girdisi ve enerji çıktıları değerlendirilmiş ve kayıplar tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda tavlama fırını sankey diyagramı çıkartılmıştır. Sankey diyagramına göre tavlama fırını verimi %38,3 iken baca gazı kaybı %31,6 olarak görülmüştür. Yüzey kayıpları %13 ve açıklık kayıpları %10,4 olarak belirlenmiştir.

Ertem ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada Ereğli Demir ve Çelik Fabrikasında bulunan yassı kütük fırınında özgül enerji tüketiminin azaltılması fırsatlarını incelemişlerdir. Yassı kütük fırındaki enerji kayıplarının belirlenmesi için bir model oluşturulmuştur. Bu model doğrultusunda enerji verimliliğini %64,26 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda birim enerji tüketiminin azaltılması için iki verimlilik fırsatı ortaya koyulmuştur. Bunlardan birincisi kütüklerin ön ısıtmaya tabi tutularak fırına sıcak şarj edilmesidir. Diğer ise baca gazı ısının reküperatör vasıtasıyla geri kazanılmasıdır. Geri kazanılabilecek enerji potansiyelini 81.590 kcal/TEP olarak tespti edilmiştir.

Si ve ark. (2011) yaptıkları çalışma ile bir çelik fabrikasının enerji verimliliği potansiyelini incelemişlerdir. İnceleme sonunda atık ısının geri kazanılabileceği belirlenmiştir. Etüt çalışması sonucunda, işletmede bulunan önemli enerji tüketicisi tav fırını enerji verimi %60 olarak hesaplanmıştır. Buna karşın baca gazı kayıpları %29,5 olarak tespit edilmiştir. Bu değer, kayıplar içerisinde belirgin olara en büyük kayıp ve aynı zamanda enerji verimliliği fırsatıdır. Çalışma sonucunda ayrıca kütüklerin 315°C'ye kadar ön ısıtma ile fırına girmesi durumunda birim enerji tüketiminin düşeceği belirlenmiştir.

Chen ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada bir haddehanede bulunan tavlama fırınında enerji değerlendirmesi yapmışlardır. Üretim hızının artışı ile tavlama fırınının daha verimli çalıştığı belirlenirken, ölçümler sonucunda fırın enerji girdisinin %80'i yakıt ile %15,7'sinin ise sıcak baca gazı ile sağlandığını belirlenmiştir.

Manatura and Tangtrakul (2010) reküperatör ile birleştirilmiş rejeneratif yakıcıların kullanıldığı tav fırınına enerji kullanımı açısından incelemişlerdir. Yapılan çalışmada tav fırınının özgül enerji tüketimi 31 m³ olarak tespit edilmiştir (doğalgaz ısı değeri 8 250

kcal olarak hesaplanmıştır). Ayrıca fırın verimi %80,1 olarak hesaplanmıştır. Çalışma yapılan fırın, sadece reküperatör vasıtası ile enerji geri kazanımı yapan fırınlara göre %43,4 daha verimli olarak tespit edilmiştir. Bu durum, rejeneratif yakıcı teknolojisi ile önemli bir enerji verimliliği sağlandığını göstermektedir.

Kirschen ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada, birçok elektrik ark fırınının 70 adet enerji balansı ve enerji verimlilik değerleri, yapılan ölçümler 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 incelemişlerdir. Çalışmada egzoz gazındaki oksijen konsantrasyonunun %4'ten %3'e azaltılması ile fırın veriminin %0,6 artacağını bildirmişlerdir.

G. Ertem, B. Çelik ve S. Yeşilyurt tarafından yapılan çalışma ile tav fırını enerji dengesi kurulmuştur. Çalışmaya göre tav fırını verimi %38,3 olarak tespit edilirken, baca gazı kayıpları %31,6, giriş açıklığı kayıpları %13 olarak hesaplanmıştır.

Y. Tütünoğlu, A. Güven ve T. Öztürk tarafından cam temperleme fırınında gerçekleştirilen enerji analizinde %16,23 verimlilik değerine ulaşılmıştır. Fırın verimini etkileyen hususlar olarak fırın yüzey kayıpları, tambur yataklarındaki açıklıklar ve baca gazı kayıpları olduğu değerlendirilmiştir. Baca gazının değerlendirilmesi ile verimin %27,38'e çıkacağı hesaplanmıştır.

Z. Utlu, A. Hepbaşlı ve M. Turan tarafından gerçekleştirilen endüstriyel kurutucu fırının enerji ve ekserji verimleri sırası ile %35 ve %16 bulunmuştur. 2011 yılında yapılan çalışmada fırının ekserji kaybının parasal karşılığı 23.582.155 TL olarak hesaplanmıştır(2011).

E. Mançuhan (2011) yaş tuğla kurutma prosesinde kullanılan tünel fırın enerji ölçüm sonuçları doğrultusunda enerji ve ekserji analizi çalışmaları gerçekleştirmiştir. Ekserji yıkımı, büyük oranda yaş tuğlada bulunan suyun buharlaşması ile gerçekleştiği görülmüştür. Ekserjinin yok olmasına neden olan diğer etmenler ise bacadan atılan kurutma havası, taşıyıcı paletler, kurutulmuş tuğlalardır. Tünel fırın ekserji verimi

%47,3 olarak tespit edilirken ekserji kaybı ise %52,7 olarak belirlenmiştir. Ekserji verim dağılımları; yaş tuğla serbest suyu buharlaşması için %27,8, bacadan atılan kurutma havası için %14,7' dir.

Yi ve Mao-fa çalışmalarında, çelik üretiminde enerji tüketimini azaltmak için pota ocağının ekserji analizini yaparak, optimizasyonunu değerlendirmiştir. Ekserji analizi sonuçlarına göre, kullanılamaz elektrik enerjisi ile oluşan ekserji kaybının çok yüksek olduğu belirlenmiştir. Elektrik enerji verimliliği ise % 46,2 olarak tespit edilmiştir. Kullanılamaz elektrik enerjisini azaltmak için, tozaltı ısıtma değişik cüruf kompozisyonları ile denenmiştir. Bu tozaltı ısıtmada ortalama sıcaklık oranı 0. 5 °C / dk artmış, kullanılamaz elektrik enerjisi ton çelik başına 21 730 MJ azalmıştır. Böylelikle elektrik enerji verimliliği % 14,84 artırmıştır. Rafınaj döngüsü kısaltılarak ısı ekserji kaybı düşürülmüştür.

Özkan ve ark. yaptıkları çalışmada, kojenerasyon tesisinin verimliliği artırmak ve ekserji kaybı azaltmak için ilk gözden geçirilmesi gereken sistem bileşenin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için ekserji denge denklemleri oluşturulmuş ve ekserji kaybı her bileşen için hesaplanmıştır. Isı değiştirgecinde %44,44, yanma odasında %29,59, buhar kazanında 18,68%, gaz türbininde %5,25 ve %2,03 ekserji kaybı olduğu hesaplanmıştır. Bu sonuca göre tesisin tamamının verimini arttırmak amacıyla, olası bir değişikliğin öncelikle ısı eşanjörüne yapılması belirtilmiştir.

R. Saidur ve ark. yaptıkları çalışmada kazan sistemine enerji ve ekserji analizini uygulamışlar. Kazan içinde, enerji ve ekserji verimleri, sırasıyla %72,46 ve % 24,89 olduğu tespit edilmiştir. Ekserji yıkımının büyük kısmı yanma odasında gerçekleşmiş ve onu ısı değiştirgeci takip etmiştir. Fan motor sisteminde değişken hızlı sürücü kullanılarak bacagazından ısı geri kazanımı için geri dönüş süresinin 1 yıl olduğu tespit edilmiştir. Kazanın genel enerji kullanımı 19,270.8 kJ / s ve ekserji kayıpları 10.320 kJ / s olarak bulunmuştur. Isı değiştirgecinde meydana gelen enerji kaybı % 22,5 ekserji kaybı% 52, baca gazı da % 9,2 ısı kaybına sebep olmuştur. Baca gazından ısı geri kazanım yönteminin kazanlarda enerji tasarrufunda en etkili yollarından biri olduğu belirtilmiştir.

2.2. Endüstriyel Fırınlr

Fırın veya ocak, ısıtılmak üzere içine yerleştirilen malzemelerin sıcaklığını arttırmak için yakıtın kimyasal enerjisini veya elektrik enerjisini ısıya çeviren bir araçtır.

Endüstriyel fırınlar, metalurjik üretimlerde, toprak sektörü üretimlerinde, metal sanayi, gıda sanayi gibi alanlarda ergitme, ısıl işlem, temperleme, pişirme, kurutma, fermentasyon amaçlı kullanılmaktadır.

Sanayi tesislerine toplam enerji tüketimi içinde, önemli bir paya sahip endüstriyel fırınlara örnek olarak;

- Emaye pişirme 600 °C – 1100 °C
- Metallerin ısıl işlemleri 1100 °C
- Haddeleme, ekstrüzyon, presleme gibi ısıl işlemler ve seramik malzemelerin pişirilmesi 1350 °C
- Metallerin ergitme ve izabesi 1700 °C

verilebilir.

İçerisindeki sıcaklığın 650 °C'nin altında olan fırınlara ocakadı verilmekle birlikte fırın ile ocak arasında kati bir ayırım yapılmamaktadır.

Endüstriyel fırınların bulunduğu proseslerde hammaddeden sonra en büyük girdi enerji maliyetidir. Yüksek sıcaklıkta çalışan fırınların önemli miktarda enerjisi faydalı enerjiye dönüştürülmeden kaybedilmektedir. Tipik bir fırının sankey diyagramına bakıldığında %30-40 civarında faydalı enerji oluşurken, geri kalan enerjinin büyük bölümü baca gazı, duvar kayıpları ve açıklar ile birlikte dışarı atılmaktadır. Sanayide ulaşılmak istenen enerji verimliliği hedefleri için endüstriyel fırınlar önemli bir potansiyel taşımaktadır.

Endüstriyel fırınlarda, kayıpların minimize edilmesi ve ekonomik olarak geri kazanılması, endüstriyel tesislerde enerji verimliliği sağlayarak enerji maliyetlerinin azalmasına ve dolayısıyla işletmenin rekabet gücünün artmasına olanak sağlayacaktır.

2.3. Endüstriyel Fırınlrın Sınıflandırılması

Endüstriyel fırınlar birçok açıdan sınıflandırılabilir. Yapılacak olan her sınıflandırmanın alt sınıfı olması da mümkündür. Bu yüzden bazen fırınlar özellikleri yönünden bir kaç sınıfa dahil olabilirken, bazen de sınıf dışı kalabilirler.

Isı üretme metoduna göre elektrikli fırınlar ve yanma(yakıt kullanan) oluşan fırınlar olarak iki ana gruba ayrılabilirler.

Elektrikli fırınlar, ark fırını veya indüksiyon fırını olarak çalışmaktadır. Elektrikli fırınlar ile ilgili detaylı bilgi 3.1.2 no'lu kısımda verilmiştir.

Yakıt kullanılan fırınlar daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ancak elektriksel olarak ısıtılan fırınlar yakıt maliyeti açısından avantaj sağladıkları yerlerde kullanılırlar. (Trinks vd., 2004).

Endüstriyel fırın sınıfı ne olursa olsun, kayıpları en az olacak şekilde ısıyı kullanması ve yapısının korozyon, erozyon gibi fırının veriminin ve ömrünü azaltacak etkenleri en az olacak şekilde çalışması beklenir.

Bu yüzden endüstriyel fırın tasarımı çok önemlidir. Fırınlrın, en yüksek oranda ürüne, homojen şekilde ısının yayılmasını sağlayacak şekilde yapılması gerekmektedir. Ürünlerde istenilen kalitenin sağlanmasının yanında birim ürün başına harcanan enerjinin sürekli olarak kontrol altında tutulması gerekmektedir.

Fırınlrın, belirlenen sürede mümkün olan en fazla materyali, tüm bölgede aynı sıcaklığın oluşacağı, bunu en az yakıt ve işçilikle sağlayacak şekilde tasarlanmaları enerji verimliliğinin sağlanması için ilk ve en önemli adımıdır. Bu durumun sağlanması için tasarım aşamasında aşağıdaki kriterlerin belirlenmesi gerekmektedir;

- Malzemeye ne kadar ısı aktarılacağı,
- Kayıplar ve kütlenin ısıtılması için gerekli olan ısı.

Bu hususlar belirlendikten sonra, kayıpların ne kadar minimize edileceği, izolasyon malzemesi olarak ne kullanılacağı, fırın kütlesinin sıcaklığının nasıl dengeleneceği ile ilgili çalışmalar yapılmalıdır.

Genel olarak endüstriyel fırınların 4(dört) temel bileşeni bulunmaktadır;

➤ Enerji Kaynağı

Fosil kaynaklı yakıtlar ve elektrik enerjisi kullanılabilir.

➤ Uygun refrakter malzeme

Endüstriyel fırınlarda refrakter tasarımı çok önemlidir. Belirlenen ihtiyaçlar doğrultusunda fırının termal muhafazası sağlanmalı ve belirlenen yapıda inşa edilmelidir.

➤ Isı Geri Kazanım Ekipmanı (ısı değiştirici)

Günümüzde fosil yakıtların kullanıldığı fırınlarda açığa çıkan ısıнын tekrar kullanılması için ısı değiştiriciler artık fırının bir parçası olarak görülmektedir.

➤ Fırın Kontrol Panosu

Fırın kontrol panosu ile yanma ve sıcaklık gibi parametreler takip edilerek gerekli müdahaleler gerçekleştirilebilmektedir.

Yakıt Kullanılan Fırınlar

Yakıt kullanılan fırınlar genellikle, işlem görececek olan malzemeye göre, ısıнын malzemeye transfer ediliş şekline göre, fırın ateşleme yöntemine göre ve şarj şekline göre sınıflandırılabilir.

Yanma ve yakıtlar konusu bir sonraki bölümde anlatıldığı için yakıt kullanılan fırınlarda ayrıca yakıt türlerine değinilmemiştir.

a)İşlem Görecek Malzemeye Göre

Endüstriyel fırınlar, yapılacak olan işleme, sıcaklığına ve işlem yapılacak olan malzemeye göre tasarlanırlar ve isimlendirilirler. Örn. Alüminyum Ergitme Fırını. Aşağıdaki çizelgede, malzeme ismine ve yapılacak olan işleme uygun sıcaklık değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Malzeme ve işleme göre fırın sıcaklık değerleri

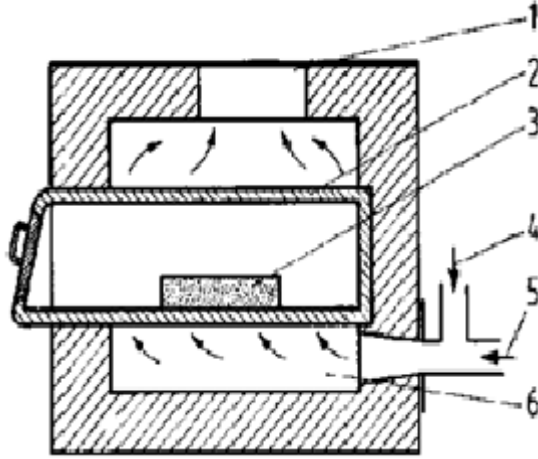
Malzeme	İşlem	Sıcaklık - °C
Alüminyum	Ergitme	1.200-1.400
Alüminyum Alaşım	Tavlama	450-775
Alüminyum Alaşım	Hadde için ısıtma	850
Pirinç	Tavlama	600-1 000
Pirinç	Haddeleme	1450
Pirinç	Sinterleme	1 550-1 600
Kurabiye	Pişirme	375-400
Bakır	Ergitme	2 100-2 300
Bakır	Döküm	2 100-2 600
Emaye-Organik	Pişirme	250-450
Emaye-Camsı	Emayeleme	1 200-1 800
Altın	Ergitme	1 950-2 150
Demir-Döküm	Temperleme	300-1 300
Demir	Sinterleme	1 283-1 422
Kurşun	Ergitme	620-750
Kurşun	İzabe	2 200
Magnezyum	Tavlama	550-850
Magnezyum	Homejenleştirme	700-800
Çelik	Tavlama	1 250-1 650
Çelik	Dövme	1 700-2 150
Çelik	Sinterleme	2 000-2 350

b)Isının Malzemeye Transfer Şekline Göre;

Eğer yanma, ısıtma odasında gerçekleşiyor veya yanma ürünleri ısıtılan parçanın yüzeyinde dolaştırılıyorsa bu tip fırınlarda ısı direk olarak malzemeye iletilir. Bu tip fırınların birçoğunda ısıtılan parça yanma ürünlerinin teması ile zarar görmez.

Isının dolaylı olarak iletildiği fırınlar, yanma ürünleri veya alevle temastan dolayı ikinci kaliteye düşen ürünler için kullanılırlar. Bu durumda, malzeme ya yakıcıların yanma

ürünleri ile dışarıdan ısıtılan bir alev gömleği içerisinde ya da alevi ve yanma ürünlerini çevreleyen ısıyan borular ile ısıtılmalıdır.

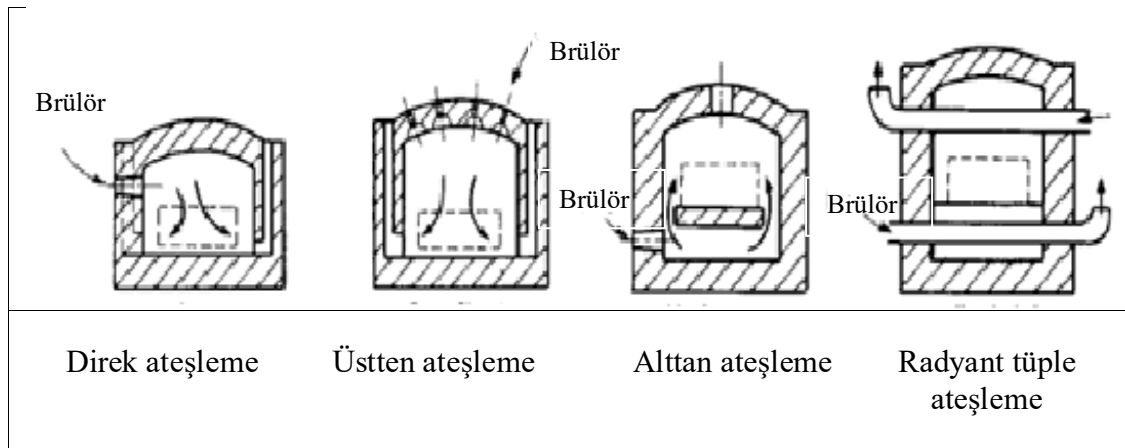


1.Baca, 2.Fırın yüzeyi, 3.Malzeme, 4.Hava girişi, 5.Gaz girişi, 6.Yanma odası

Şekil 2.1. Mufla fırını

c) Ateşleme Yöntemine Göre

Fırın ateşlemesinin, malzemenin direkt olarak üzerine, üstten, alttan ve ya radyant tüpe yapılmış olmasına göre sınıflandırılır.



Şekil 2.2. Fırın ateşleme yöntemleri

Özellikle 650°C üzerinde ısı ihtiyaçlarında, fırın tasarımında, yakıtın ve yakıcının kontrolündeki sürekli olarak iyileştirmeler, direkt ateşlemeli fırınların kullanımını

arttırmıştır. Üstten ateşlemelerde sıcaklık dağılımının çok iyi yapılabiliyor olması tercih sebeplerindendir.

400°C ile 1 000 °C arasındaki uygulamalarda, malzemenin alevden uzakta kalması nedeni ile alttan ateşlemeli fırınlar tercih edilebilmektedir.

Ancak son zamanlarda, yanan gazların ortamdan temasının kesilmesi için, ısıya dayanıklı radyant tüplerin yatay olarak dizilmesi ya da fırın duvarlarına dikey olarak monte edilmesi ile fırın tasarımları görülmektedir.

d)Şarj Şekline Göre

Yığın fırınları, aynı zamanda çevrimsel fırın veya doldur-boşalt fırını olarak da adlandırılırlar. Malzememe manuel olarak yüklenirken, tek bir sıcaklık ayarı ile kontrol edilirler. İşlem sonunda kadar malzeme sabit durur. Muhafaza, oluk, hazne, gidiş-geliş, çan, asansör ve banyo gibi bölümleri bulunmaktadır. Çan ve asansör fırınları genelde silindirikdir (Trinks vd.2004).

Araba tabanlı 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 atlıkarınca şeklindeki hazneye yerleştirilir ve tam bir tur döndüğünde fırından çıkarılır. Bu tür fırınlar özellikle silindirik yükler için uygundur (Trinks vd.2004).

Sürekli fırınlar, iş gücünü azaltırken prosesin durumuna göre yakıt kullanımı artar ve ya azalır.

Elektrikli Fırınlar

Elektrikli fırınlar, ark fırını, direnç fırını veya indüksiyon fırını olarak çalışmaktadır. Çalıştırılmasının ve yönetilmesinin kolay olması, sıcaklığın ve ısı dağılımının hassas yapılması, herhangi bir baca gazı çıkışı olmadığından dolayı baca gazı kaybının olmaması avantajları arasında sayılabilir. Ancak yakıtın pahalı olması dezavantaj olarak göze çarpmaktadır. Günümüzde plazma ark, lazer, radyo frekansı, elektromanyetik ısıtma ve ya kombinasyonları ile ısıtma sağlanabilmektedir.

a) Ark Fırınları

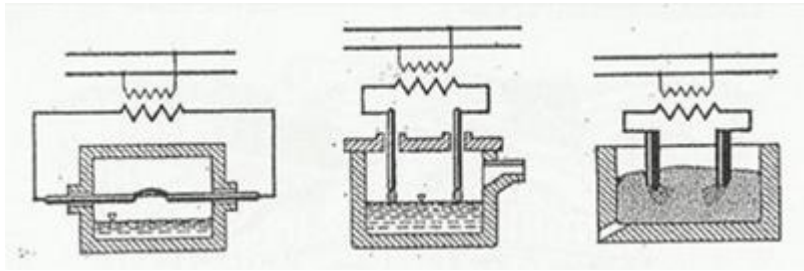
Ark fırınları demir, çelik gibi metallerin eritme işlemlerinde metalleri cevherlerinden ayırmada kullanılır. Fırınların kapasitesi 150 kg ile 200 ton arasındadır. Sıcaklık 3000 °C ye kadar çıkabilmektedir.

Elektrik ark fırınları elektrot düzeni bakımından 3'e ayrılır.

İndirekt Isıtmalı Ark Fırını: Elektrotların ucu açıkta ve karşılıklı konumlandırılır. Arada oluşan radyasyon ile metal ergitilir.

Direkt Isıtmalı Ark Fırını: Elektrotlar metale yönlendirilmiştir ve ark, elektrotlar ile metal arasında oluşur.

Örtülü Ark Fırını: Elektrotlar metalin içine gömülüdür. Elektrotlar bir iletken ile birbirleriyle temas halindedir.



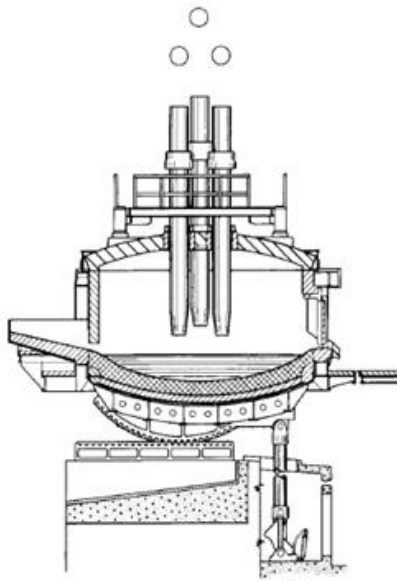
Şekil 2.3. Elektrot düzen tipleri

Ark fırınları tek fazlı yada üç fazlı olarak yapılabilir. Küçük fırınlarda çoğunlukla tek faz akım kullanılırken, büyük fırınlar üç fazlı akım kullanılır. Elektrotla metal arasında ark meydana gelmesi suretiyle fırın çalışır. Potadaki metal ise üç fazı yıldız şeklinde bağlanarak nötr noktasını oluşturur.

Fırının iç kısmı ateş tuğlası ile örülmüştür. Ergimiş metale temas eden kısımlar toz refrakter malzemenin su ile karıştırılarak elde edilen hamurun, gerekli form sağlandıktan sonra pişirilmesi ile astar şeklinde sıvanır. Aşınmanın sadece refrakter astarda olması nedeniyle, belirli sayıda eritme işleminden sonra yenilenmesi gerekmektedir.

Büyük kapasiteli üç fazlı ark ergitme fırınlarında elektrotlar çoğunlukla tavana asılı şekildedir. Elektrotlar ve ergitilecek metal arasında direkt ark meydana gelir. Yükleme ve boşaltma yan cidarlardan karşılıklı olarak yapılmaktadır. Bu tip fırınlarda kapasite 200 ton, transformatör gücü ise 800 MVA kadardır.

Bu tip fırınlarda grafit veya karbon elektrotlar kullanılır. Fırınlarda kapasitesine göre elektrotların çapı 5 cm ile 100 cm arasında değişir. Grafit elektrotlarda akım yoğunluğu, karbon elektrotlara göre üç kat daha fazladır.



a



b

Şekil 2.4. a) Ark fırını kesit görünümü b) Grafit elektrotlar

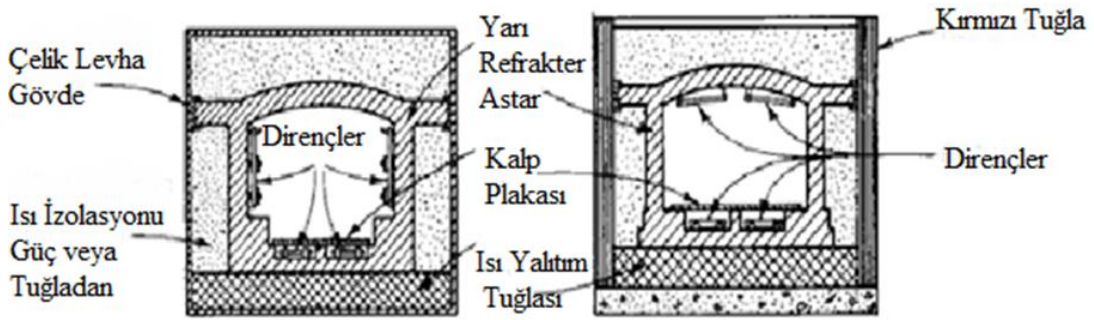
b) Direnç Fırınları

Özel olarak üretilmiş direnç tellerinden elektrik akımı geçirildiğinde, tellerin akıma karşı direnç göstermesiyle ısı enerjisi ortaya çıkar. Böylece fırın içerisindeki sıcaklık artmaya başlar. Fırın, metallerin ısıl işleminde, cam tavlama ve camı emaye pişirmede kullanılır.

Direnç fırınları, yığın ve ya sürekli fırın olabilir. Yığın fırınları, kutu fırın, asansör fırın, raylı fırın ve ya çan tipi fırın olabilir. Sürekli fırınlar ise kemer konveyör fırınlar, zincir konveyör fırınlar, döner ocak fırınlar, makaralı ocak fırınlar şeklinde çeşitlere sahiptir.

Standart direnç fırınları, 550 °C ile 1 200 °C arasında çalışmak için tasarlanmaktadır. Daha yüksek çalışma sıcaklıkları için özel tasarımlar yapılabilmektedir. Aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere standart bir direnç fırınında ısıtma haznesi, ısı yalıtımı sağlayan refrakter astar ile çevrelenmiştir. Dış çelik plaka mahfazanın seramik ve ya tuğla ile sarılması ile fırın formu verilmektedir.

Kullanılacak olan ateş tuğlası, kil tuğla vb. yarı refrakter malzeme, fırının çalışma koşullarını uygun olarak seçilerek kalınlığı tespit edilir.



Şekil 2.5. a) Direnç yan ve alt tarafta

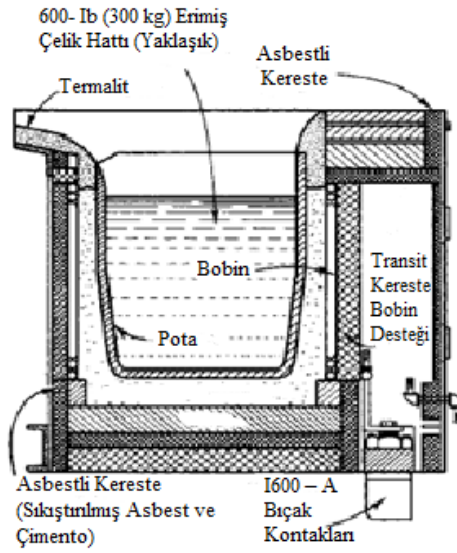
b) Direnç üst ve alt tarafta

c) İndüksiyon Fırını

İletken bir malzemenin değişken manyetik alan içinde bulunması neticesinde malzeme üzerinde potansiyel farkı oluşur, dolayısıyla elektrik akımı meydana gelir. Bu prensipten yararlanarak metal ısıtma işlemini gerçekleştiren fırınlar, indüksiyon fırınları olarak isimlendirilir.

İndüksiyon ocağının ana donanımını pota, sabit haznenin etrafında bulunan indüksiyon bobini ve ocağın içerisindeki metal oluşturmaktadır. Pota dışındaki indüksiyon bobininden geçirilen alternatif akım marifetiyle sürekli yön değiştiren alanlar oluşturulur. Malzemenin öz direnci marifetiyle bu alanlar ısı enerjisini oluşturur.

Temel olarak iki tip indüksiyon ocaklarından/fırınlarından bahsedilebilir. Çekirdeksiz tip(nüvesiz) fırınlar, pota, bakır sargı ve potanın devrilip dökülmesi için bir çerçeveden oluşmaktadır.



Şekil 2.6. Çekirdeksiz fırınlar

Özel olarak tasarlanmış endüksiyon bobini birinci transformatör olarak görev yapar. Endüksiyon ocakları, çekirdeksiz ve çekirdekli (kanallı) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Her iki ocakta da metali normal bir transformatörün birincil sargısı olarak düşünülebilecek elektrik bobini çevreler. Bu bobinden geçen alternatif akım, ikincil sargı olarak düşünülebilecek iletken metal içinde girdap akımları endükleyerek ısının açığa çıkmasına neden olur. Isı, doğrudan doğruya eritilecek metal içinde ortaya çıktığından, çok temiz ve hızlı bir eritme gerçekleşir. Erimiş metalde oluşan akımlar, metal banyosunda bir karışma hareketi de sağlar. Bu ocaklar çelik, dökme demir, alüminyum alaşımları gibi değişik metallerin eritilmesinde kullanılabilirler(Aran 2007)

Çekirdeksiz tip endüksiyon ocağında potanın etrafı su ile soğutulan bakır borudan yapılmış bir bobin ile çevrilidir. Çekirdekli veya kanallı tipte ise sıvı metal, primer sargının çekirdeği çevresinde bir kanal oluşturur. Bu ocakların güçleri daha düşük, elektriksel verimleri ise daha yüksektir. Kanallı endüksiyon ocaklarında çalışmaya ilk başlarken kanalı dolduracak kadar bir sıvı metalin doldurulması gerekir. Bu tip ocaklar genellikle eritme için değil, bekletme ve aşırı ısıtma gibi işlerde tercih edilirler (Aran 2007).

Çekirdeksiz indüksiyon ocakları potaya benzemektedir. Ocağın içi ateşe dayanıklı tuğla ile örtülmüş reflektör malzemelerle kaplanmaktadır. Sonrasında 1 700°C ye kadar ısıtılarak sinterlenir. Astar yenilenmesi belirli aralıklarda yapılır. Katı şarj yapılmayıp, metalin ocağa sıvı halde alınarak, katılaşmadan uzun süre tutulması ve gerekli alaşım kontrolünün yapılması sağlanmaktadır. Bu ocağa çekirdeksiz denmesinin sebebi, ocak içinde sıvı metali çekirdek olarak tutma zorluğundan dolayıdır.

İndüksiyon ocakları frekansa göre de sınıflandırılır;

- Hat frekanslı indüksiyon ocakları; 50 Hz
- Düşük frekanslı indüksiyon ocakları; 50-150 Hz
- Orta frekanslı indüksiyon ocakları; 150-600 Hz
- Yüksek frekanslı indüksiyon ocakları; 600 Hz üzeri

Orta ve daha düşük frekanslı ocaklar, tutma (sıvı mâdeni bekletme ve alaşım ayarlama) ocağı olarak kullanılır. Yüksek frekanslı ocaklar ise ilk ergitme ocağı olarak kullanılmaktadır. Ergitme süresinin çok kısa olması bu ocakların önemli özelliğidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Emaye Pişirme Fırını

Isıtma sektöründe faaliyet gösteren, ülkemizin önde gelen firmalarından biri olan işletmede kullanılan emaye pişirme fırınında çalışma yapılmıştır. Öncelikle çalışma yapılan fırının kullanım amacı, işletme için önemi ve yapılan verimlilik arttırıcı projenin gerekçeleri anlatılmıştır. Sonrasında ise, emaye pişirme fırınında verimlilik arttırıcı proje öncesi ve sonrasında enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda yapılan verimlilik arttırıcı proje sonuçları tartışılarak, fırınlar açısından verimlilik arttırıcı projeler değerlendirilmiştir.

İşletme, ısıtma alanında; kombi, yoğunmalı kombi, yer tipi kazan, kat kaloriferi, su ısıtıcıları ve su teknolojileri alanında ise; termosifon, termoboyler, gazlı şofben, boylerler vb. ürünleri için yarı mamül olarak ürettiği sıcak su tanklarının içine emaye uygulamaktadır.

Dünyanın en eski kaplama malzemesi olan emaye, metal malzemelerin kaplanmasında kullanılan, ısısal genleşme katsayısı bakımında ona uyum sağlayan ve düşük sıcaklıklarda eriyebilen bir frittir. Emayeleme işlemi, metalik parça yüzeyini dış etkilere korumak amacıyla yapılır. Aynı zamanda metale estetik bir görünüm kazandırır.

Emayeleme faydaları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Metalik parça da pürüzsüz yüzey oluşturulması,
- Çizilmeye ve aşınmaya karşı sert bir yüzey oluşturma,
- Koku ve tat vermeyen sağlıklı bir yüzey oluşturma,
- Metalik parçanın toksik etki göstermemesi,
- Metalik yüzeylerde bakteri oluşumunun engellenmesi
- Isı değişikliklerine ve aşınmalara karşı dayanıklı parça oluşturma,
- Asit ve alkali gibi kimyasal tesirlere karşı dayanıklı bir yüzey oluşturma,
- Metalik parçalarda zamanla renk değişimlerinin engellenmesi,
- Zamanla özelliğini kaybetmeyen bir yüzey oluşturma,

- Korozyon etmenlere karşı direnç sağlama,

İşletmede sıcak su tankları metal şekillendirme, kaynak, yağ alma ve temizleme proseslerinden geçerek emaye ve emaye kurutma işlemlerine tabi tutulur. Sonrasında çeşitli ebatlarına göre farklı sayılarda tank ve boyler, fırına alınarak 860 °C' de emayenin pişirilmesi sağlanmaktadır.

Çizelge 3.1'de uygulanan emaye kalınlıkları görülmektedir. Enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilirken tüm çalışmalar 1 000 lt'lik boyler pişirme prosesine göre gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1. Uygulanan emaye kalınlıkları

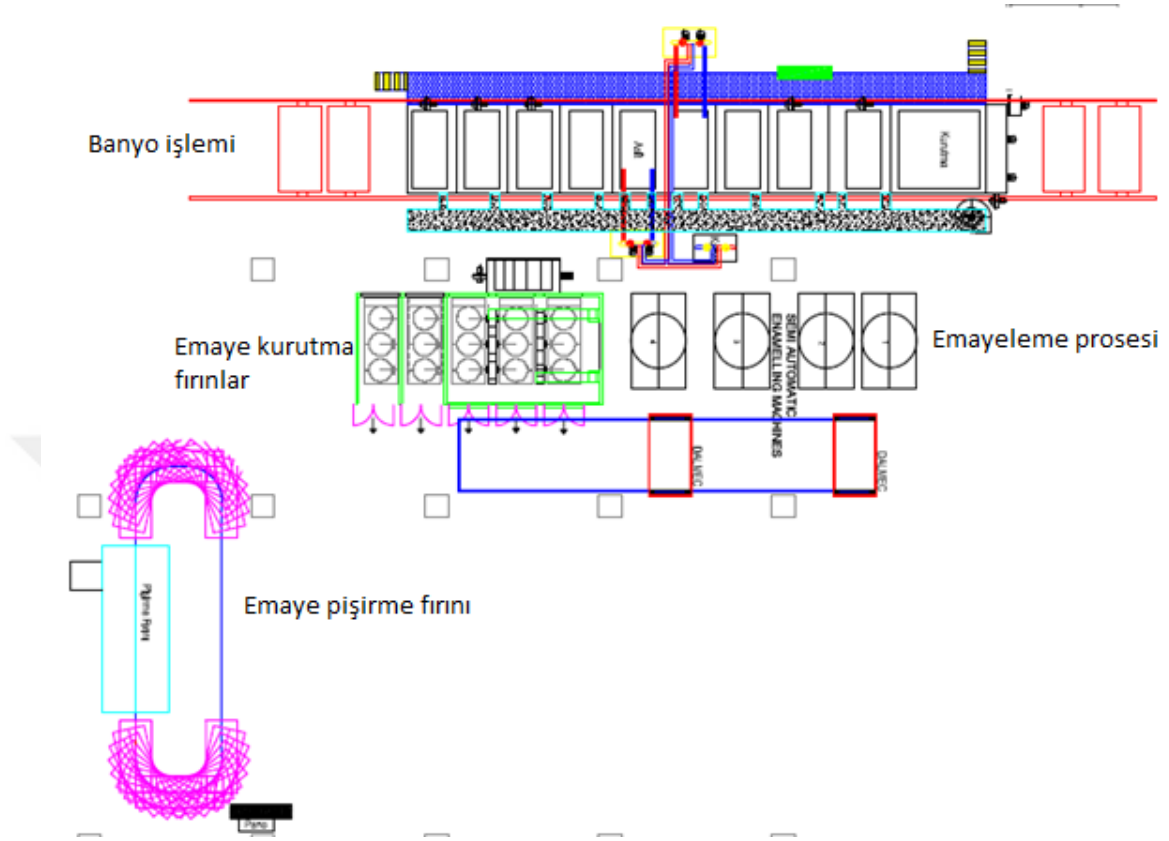
Ürün Modeli	Alt Bölme	Gövde	Üst Bölme
80-200 lt Boyler	150-500 mikron	150-500 mikron	300-800 mikron
300-1000 lt Boyler	300-1000 mikron	150-500 mikron	150-500 mikron
15-100 lt Termosifon	200-600 mikron	150-500 mikron	150-500 mikron

İşletmede emaye hattı, enerji yönetim sistemi doğrultusunda önemli enerji tüketicisi olarak belirlenmiştir. O yüzden emaye hattının enerji tüketiminin verimli kullanılması ve birim ürün başına enerji tüketiminin azaltılması, işletmenin doğrudan enerji performansını etkileyecektir.

Aşağıdaki şekilde işletme emaye hattı planı görülmektedir. Kaynak prosesi sonrası ürünler, banyoda gerekli kimyasallara tabi tutulmaktadır. Bu işlem için bir kazan vasıtası ile banyolar için su ısıtma işlemi gerçekleştirilmektedir. Suyun ısıtılması için bir kazan doğalgaz tüketmektedir.

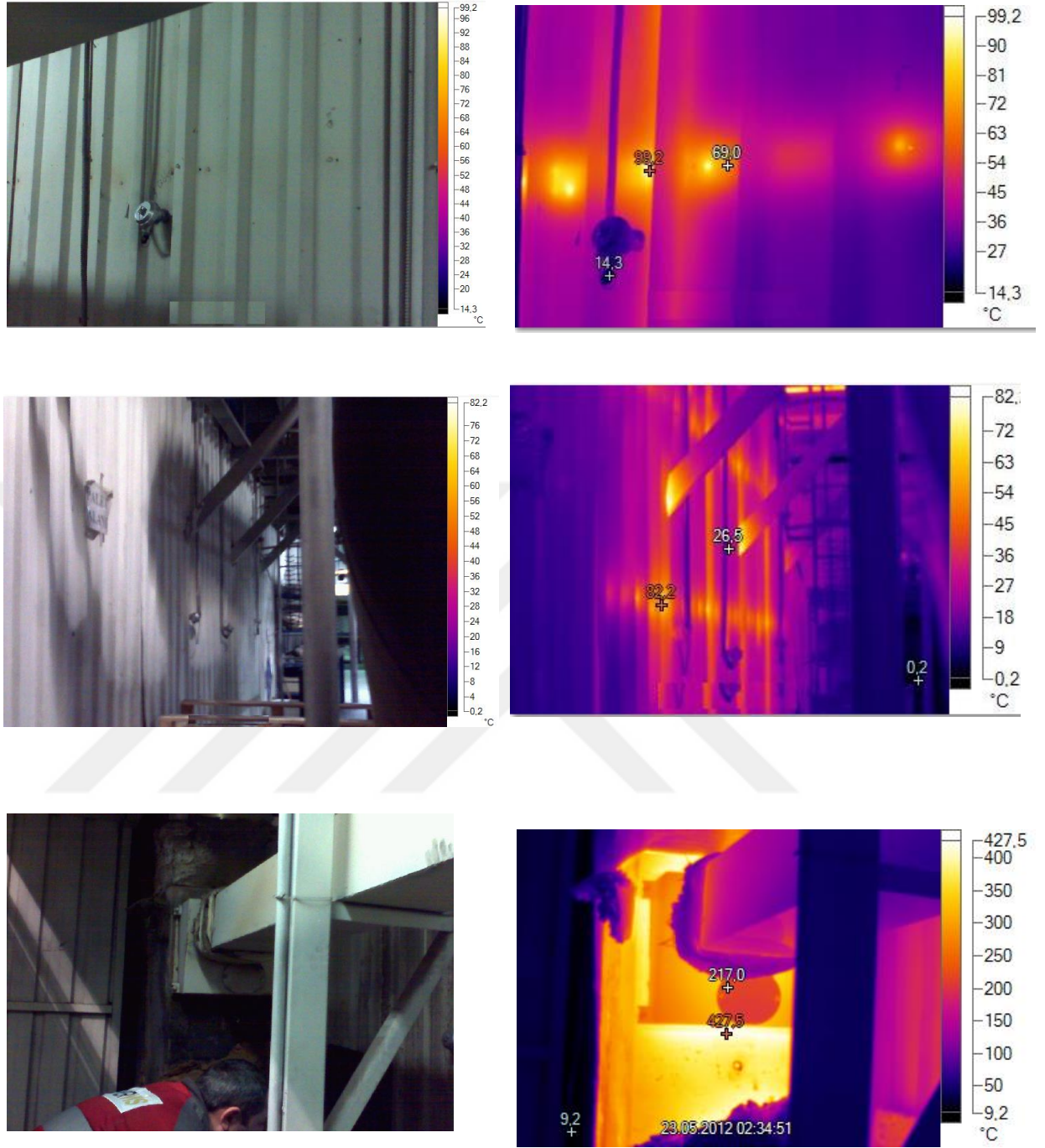
Banyo temizleme işlemleri sonrası sırasıyla emaye ve emaye kurutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Emaye kurutma işlemi sonrası, tank ve boylerler ebatlarına ve

üretim planlamasına göre tünel fırına ve ya kutu fırına sevk edilerek, emaye pişirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Fırınlarda aynı şekilde doğalgaz tüketmektedir.



Şekil 3.1. Proses şeması

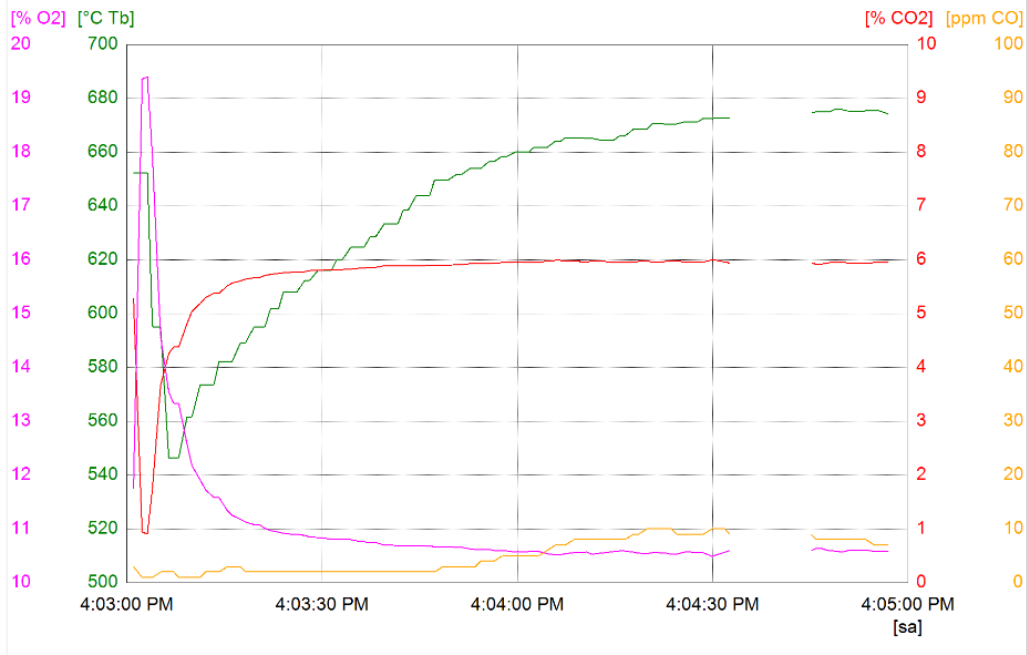
Proses bilgileri sonrasında, emaye pişirme kutu fırında çeşitli ölçüm ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki fırın termal çekimleri verilmiştir. Termal kamera çekimleri birçok noktadan yapılarak ortalama sıcaklık değerleri üzerinde hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Ölçümler ayrıca dokunmatik proplar ile de doğrulanmıştır.



Şekil 3.2. Termal kamera görüntüleri

Emaye pişirme kutu fırın doğalgaz sayacında 15 dk.'lık ölçümler alınmıştır. İlk devreye girme ve rejim anında fırın bir proseste ortalama 45 m³/h yakıt tükettiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda fırın baca gazı analizi gerçekleştirilmiştir. 860°C sıcaklığa ihtiyacı olan

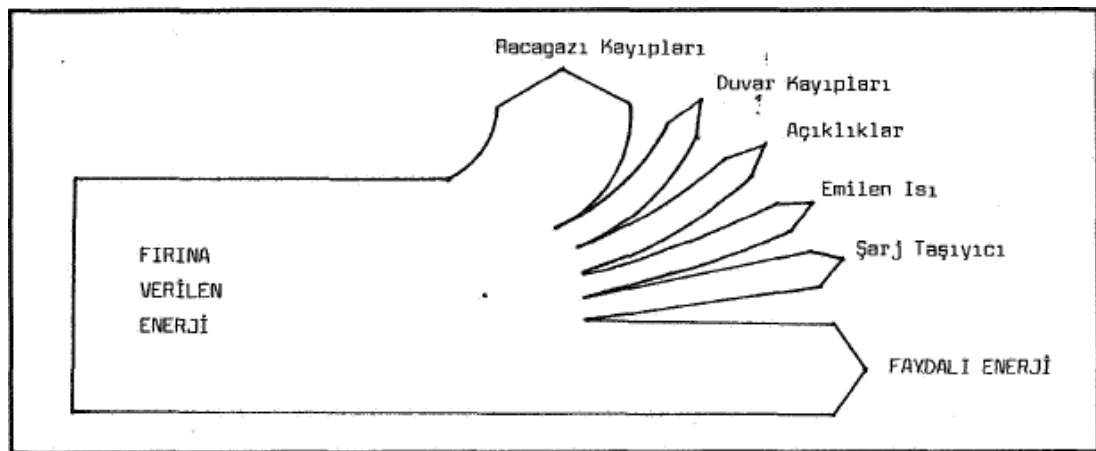
prosesin, baca gazı çıkış sıcaklığı 680°C civarında tespit edilmiştir. CO₂ oranı %6, CO 10 ppm ve O₂ oranı %11 civarında tespit edilmiştir.



Şekil 3.3. Baca gazı analizi

3.1.2. Fırınlarda Enerji Verimliliği

Aşağıda standart bir fırın enerji denkliği verilmiştir. Bu denklik çerçevesinde oluşan kayıpların detayları ve çalışma yapılan fırının bu kayıplar ile ilgili durum tespiti yapılmıştır. Sonrasında ise yapılan etüt çalışması sonrası emaye pişirme fırınında uygulanan projeler detaylı olarak ele alınmıştır.



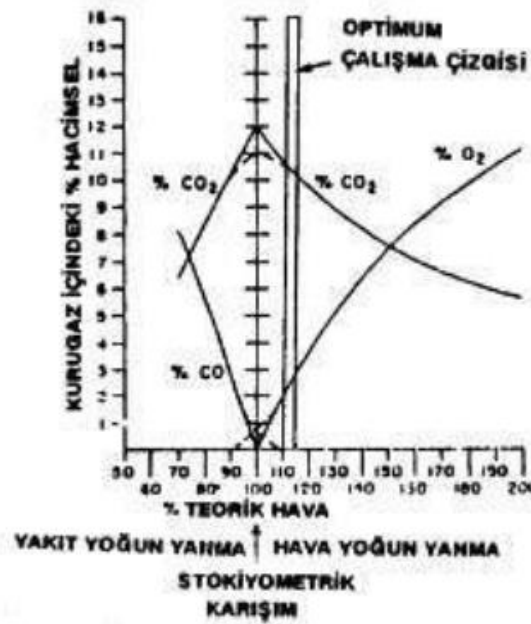
Şekil 3.4. Fırın sankey diyagramı

3.1.2.1. Enerji Kayıpları

a. 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 ısınır 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. 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 Eyidoğan, 2010).

Aşağıdaki şekilde doğalgaz için hazırlanan teorik hava eğrisi görülmektedir. λ değerinin 1,1-1,15 aralığında (Şekil 3.5) olması optimum değer olarak görülmektedir. Mevcut fırında yapılan ölçüm çalışmasında. λ değeri 1,93 olarak ölçülmüştür. Optimum değerden yüksek hava oranı genellikle ideal değerden fazla yanma havası temini ile veya aşırı baca çekişi ile ortaya çıkar. Bu durum da baca gazı sıcaklığının artmasına ve önemli oranlarda verim kaybına yol açar.



Şekil 3.5. Optimum çalışma grafiği

b. 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 sıcaklığı ısı geri kazanımlarında yoğunlaşma vb. problemleri engellemek için 130° C civarına düşürülecek şekilde hesaplamaları yapılmaktadır. Yapılan ölçümlerde 2,3 m/sn hız ve 0,4 m yarıçapa sahip olan bacadaki, gaz debisi 1 544 Nm³/h olarak tespit edilmiştir. 680 °C baca sıcaklığı doğrultusunda yapılan hesaplamalara göre kazanılacak ısı miktarı;

$$Q = V_{bg} * c_p * (T_g - T_c)$$

$$Q = 1.544 * 0,2948 * (680 - 130) = 250.344 \text{ kcal}$$

'dir. Burada Q kazanılacak ısı miktarını (kcal), c_p havanın özgül ısısını (kJ/kg·K), T_g mevcut baca gazı sıcaklığını (°C) ve T_c baca gazının çekilmesi gereken sıcaklığını (°C) temsil etmektedir.

Ortaya çıkan ısı kazancının ortalama sıcaklık değerleri, reküperatör verimi gibi hususlar göz önünde bulundurulduğunda yaklaşık %70 oranında kullanılabileceği düşünüldüğünde saatlik yaklaşık 175 000 kcal kazanç olacağı değerlendirilmektedir. 175 000 kcal 'nin yaklaşık mali değerine bakıldığında, 1 m³ doğalgazın üst ısı değerinin 9 150 kcal/Sm³ olduğu göz önünde bulundurulursa, emaye pişirme fırınının saatlik 19 m³ doğalgaz tasarruf potansiyeli olduğu görülmektedir.

Baca gazları, reküperatörden geçirilerek ısısını, yakma havasına vermesi durumunda her 20 °C ' de fırın veriminin %1 arttığı bilinmektedir. Baca gazı sıcaklığının 550 °C 'lik sıcaklık farkını kullanacağı düşünüldüğünde %27 oranında bir verim artışı olacağı görülmektedir. Saatte 60 Sm³ doğalgaz yakan fırın için yapılan her iki hesaplama da bakıldığında önemli bir potansiyelin olduğu görülmektedir.

Ancak gerçekleştirilen verimlilik projesi öncelikle atık baca gazı sıcaklığını en aza indirmek için yakıt sisteminin değiştirilmesi, izolasyon kayıplarının azaltılması gibi

daha sürdürülebilir çözümler ortaya konulmuştur böylelikle ekserji veriminin artması sağlanmıştır.

c. 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 çoğunlukla 50 °C ‘ de tutacak şekilde yapılmış bir yalıtım, bu tür kayıpları en aza indirmek açısından yeterli ve uygun olarak görülmektedir. Aşağıdaki çizelgede duvar alanları ve elde edilen yüzey sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Yüzey alanları ve sıcaklıkları

Yüzey	Alan m ²	Ortalama Yüzey Sıcaklığı °C	Ortam Sıcaklığı °C
Sağ Yan Yüzey	11	90	25
Sol Yan Yüzey	11	120	25
Üst	12,5	100	25
Ön	5,5	60	25
Arka	5,5	120	25

Çizelgedeki verilerde görüldüğü üzere uygulama öncesi fırın yüzey sıcaklıkları ortam sıcaklığına göre oldukça yüksek görülmektedir. Bu durum fırın yüzeylerinden konveksiyon ve radyasyon yoluyla ısı kaybına yol açmaktadır.

Aşağıdaki denklem de fırın yüzeylerinden oluşan toplam ısı kaybını göstermektedir.

$$Q = (Q_r + Q_k) \quad (\text{kJ/h}) \quad (3.1)$$

Burada Q_r radyasyon ile olan toplam ısı kaybını, Q_k konveksiyon ile olan toplam ısı kaybını belirtmektedir. Radyasyon yoluyla oluşan kayıp yüzeyin yayınım katsayısıyla ve yüzey sıcaklığıyla ilintilidir. Bu bağıntı fırın yüzey alanı ile çarpılarak, radyasyon yolu ile fırında oluşan kayıp tespit edilmektedir. Radyasyon yolu ile oluşan ısı kaybını (3.2) nolu denklem ile hesaplanmaktadır.

$$Q_r = \varepsilon * \sigma * \left[(273 + T_y)^4 - (273 + T_o)^4 \right] * A \quad (\text{kJ} / \text{m}^2 \text{ h}) \quad (3.2)$$

Bu ifadede ε yüzey yayınım katsayısı, σ Stefan-Boltzman sabiti, T_y yüzey sıcaklığı ve A fırın yüzey alanıdır.

$$Q_k = B_y * (T_y - T_o)^{1,25} * A \quad (\text{kJ} / \text{m}^2 \text{ h}) \quad (3.3)$$

Konveksiyon yoluyla meydana gelen ısı kaybına bakıldığında, kayıp enerji sadece yüzey sıcaklığı ile değil aynı zamanda fırın geometrisi ve konveksiyon yönü göz önünde tutularak seçilen bir B_y parametresi ile modellenmektedir. Yukarıdaki bilgiler ve Çizelge 3.2’de belirtilen veriler doğrultusunda elde edilen sonuçlar ile Çizelge 3.3 oluşturulmuştur. B_y parametresi MMO odası tarafından fırın yüzey durumuna göre ve ısı kaybı yönüne göre aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. B_y parametresi

Yatay yüzeyler ve Yukarı Yönde Isı Kaybı	6,12
Dikey yüzeyler ve Yatay Yönde Isı Kaybı	5,22
Yatay yüzeyler ve Aşağı Yönde Isı Kaybı	3,58

Çizelge 3.4. Elde edilen sonuçlar

Yüzey	Alan m^2	Q_r ($\text{kJ} / \text{m}^2 \text{ h}$)	B_y	Q_k ($\text{kJ} / \text{m}^2 \text{ h}$)	Q_{toplam} (kJ / h)
Sağ Yan Yüzey	11	1 735,168	5,22	1 1056,922	8 600,36
Sol Yan Yüzey	11	2 62,326	5,22	1 650,709	6 692,35
Üst	12,5	2 081,369	6,12	1 464,246	11 458,16
Ön	5,5	855,396	5,22	525,104	2 444,10
Arka	5,5	2 862,326	5,22	1 650,709	5 298,77
Toplam					157 090,993

d. Açıklık Kayıpları

Fırınlarda gözlem deliklerinden, açık kalan kapı aralıklarından, ateşleme deliklerinden ve benzer aralıklardan radyasyonla ısı kaybı olur. Ayrıca şarj ve deşarj 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 et al. 2004).



Şekil 3.6. Fırın ön görünüm

Çalışma yapılan fırında ürün giriş kısmında ve ürün çıkış kısmında bulunan kapılar açıldıktan sonra belirli bir mesafede tünel içinde ilerlemektedir. Bu durum hem ısı kaybını azaltmakta, hem de iş güvenliği açısından 860° C civarında çıkan malzemenin dış ortama ulaşıncaya kadar soğuması sağlanmaktadır. Çalışmada kapıların açılması ve kapanması arasında geçen sürede oluşan kayıp, diğer kayıplar içerisinde değerlendirilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Sanayi Fırınlarında Enerji Ve Ekserji Analizi

Geçen yüzyıllarda birçok tersinmez sanayi prosesinin enerji verimliliklerinin tespitinde termodinamik analiz büyük oranda kullanılmıştır. Enerji analizi, enerjinin korunumu kanunu olarak bilinen termodinamiğin birinci kanununa dayandırılır. Birçok araştırmacı, bir prosesin geleneksel enerji analizinden başka bir de ekserji analizinin gerçekleştirilmesi ile enerji hesabının yapılabileceğini iddia etmişlerdir. Enerjinin verimli kullanılması gerekliliği, araştırmacıların ekserji analizi çalışmalarına yoğunlaşmalarını sağlamıştır. Bu durum ile birlikte kullanılabilirlik, termodinamiğin ikinci kanun analizi, kayıp iş, vb. kavramlar üzerinde yapılan çalışma sayıları artmıştır.

Termodinamik sistemlerin analizinde sistem sınırlarını belirlemek çok önemlidir, belirlenen sistem sınırına göre, sistem kapalı sistem veya açık sistem olarak incelenebilmektedir. Sistem sınırlarının uygun bir şekilde seçilmesi hesapların basitleştirilmesini sağlamaktadır.

Temel olarak, sistem sınırları içerisinde sistem içine veya dışına kütle transferi oluyorsa sistem, "açık sistem" olarak tanımlanır, olmuyorsa sistem "kapalı sistem" olarak tanımlanmaktadır.

Termodinamik yasaları çerçevesinde, sanayi fırınları sürekli akışlı açık sistemler olarak enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilerek verimlilikleri tespit edilir.

3.2.1.1. Enerji Analizleri

Enerji analizleri termodinamiğin birinci yasası veya enerjinin korunumu ilkesine göre yapılmaktadır. Birinci yasaya göre sistemle çevrenin etkileşimi sırasında, sistemin kazandığı enerji, çevresinin kaybettiği enerjiye eşit olması gerekmektedir.

Termodinamiğin birinci yasanın en önemli sonuçlarından biri toplam enerji E adı verilen özelliğin varlığının ortaya konması ve tanımının yapılmasıdır. Kapalı bir sistemin belirli iki hal arasındaki tüm adyabatik hal değişimleri için net işin aynı olması, net işin sadece ilk ve son hallere bağlı olduğunu, bu nedenle de sistemin bir özelliğindeki değişimle ilişkili olması gerektiğini göstermektedir. Bu özellik toplam enerjidir. Birinci yasa

sadece, adyabatik bir hal değişimi sırasında, sistemin toplam enerji değişiminin net işe eşit olduğunu belirtmektedir (Çengel ve Boles 2011).

Aynı zamanda, sistemle çevre arasında iş etkileşimlerinin olmadığı durumlarda, kapalı sistemin bir hal değişimi sırasındaki toplam enerji değişimi, sistemle çevresi arasındaki net ısı geçişine eşittir. Bu tanımlama aşağıda matematiksel anlatımla ifade edilmiştir.

$W = 0$ olması durumunda $Q = \Delta E$

Kapalı bir sistemde adyabatik hal değişimi sırasında yapılan iş, sistemin toplam enerji değişimine eşittir.

$Q = 0$ olması durumunda $-W = \Delta E$

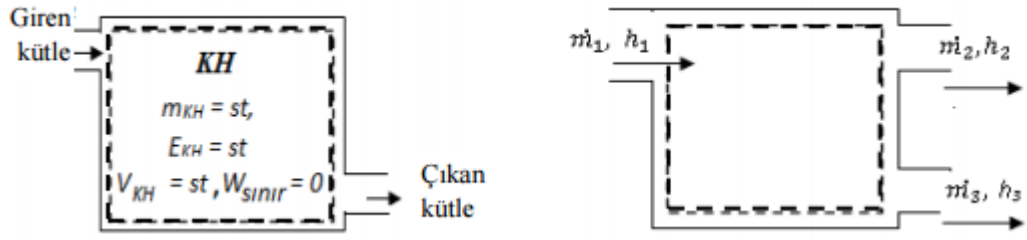
Bu bilgiler doğrultusunda, belirli sınırlar içinde bulunan sabit bir kütle için enerjinin korunumu ilkesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Sisteme ve ya sistemden} \\ \text{ısı ve ya iş olarak net enerji geçişi} \end{array} \right) = (\text{Sistemin toplam enerjisindeki net değişim})$$

$$Q - W = \Delta E \quad (\text{kW}) \quad (3.4)$$

Sürekli Akışlı Açık Sistemler

Sürekli akışlı açık sistemlerde, akışkanın kontrol hacminden sürekli bir akışı vardır ve akışkanın özellikleri kontrol hacmi içinde bir noktadan diğer bir noktaya farklılıklar gösterdiği halde verilen bir noktada zamanla değişmez (sürekli; zamanla değişmeyen). Kontrol hacmi içinde, kapasite veya şiddet özelliklerinden hiçbirisi zamanla değişmez. Dolayısıyla kontrol hacminin kütlesi m , hacmi V ve toplam enerjisi, E , sürekli akışlı açık sistemde sabittir. Kontrol hacmine giren toplam kütle ve enerji, çıkan toplam kütle ve enerjiye eşit olmak zorundadır. Kontrol hacminin sınırlarındaki hiçbir özellik zamanla değişmediğinden, giren ve çıkan akışkanın özellikleri zamana göre sabittir. Kontrol hacminin herhangi bir noktasında tüm özellikler zamana göre değişmediğinden sürekli akışlı açık sistemin herhangi bir giriş veya çıkış kesitindeki kütle debisi de sabittir (Çengel ve Boles 2011).



Şekil 3.7. Sürekli akış kütle korunumu diyagramı

Sürekli akışlı açık sistemin çevresiyle ısı ve iş etkileşimleri zamanla değişmediğinden, sistemin çevresiyle birim zamanda yaptığı iş veya ısı alışverişi sabittir.

Kütlenin Korunumu

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacmi içindeki toplam kütle zamanla değişmez ($m_{KH} = \text{sbt}$) Bu sistemlerde birim zaman süresince sisteme giren veya çıkan kütleden çok, birim zamanda akan kütle veya kütleli debi önem kazanır. Birçok giriş ve çıkışı olan genel bir sürekli akışlı açık sistem için kütle korunumu ilkesi aşağıdaki gibi yazılır;

$$\left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{KH'ne giren toplam kütle} \end{array} \right) = (\text{Birim zamanda KH'den çıkan toplam kütle})$$

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\text{ç} \quad (\text{kg/s}) \quad (3.5)$$

Enerjinin Korunumu

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacminin toplam enerjisi sabit olduğundan ($\Delta E_{KH} = 0$), bu sistemlerde kontrol hacmine ısı, iş veya kütle akışı ile giren enerji, çıkıştaki enerjiye eşit olmak zorundadır. Sürekli akışlı açık sistem için termodinamiğin birinci yasası veya enerjinin korunumu ilkesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned}
& \left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{sistem sınırlarından} \\ \text{ısı ve iş olarak geçen toplam enerji} \end{array} \right) \\
& = \left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{kütle ile birlikte KH'den çıkan} \\ \text{toplam enerji} \end{array} \right) \\
& - \left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{kütle ile birlikte KH'ne giren} \\ \text{toplam enerji} \end{array} \right)
\end{aligned}$$

$$Q - W = \sum m \dot{c} \theta_c - \sum m \dot{g} \theta_g \quad (\text{kW}) \quad (3.6)$$

Akışkanın birim kütesinin toplam enerjisi, $\theta=h+ke+pe$ olduğundan, açık sistemlerde birinci kanun ifadesinin en genel hali;

$$\sum_{giren} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) - \sum \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) + Q - W = \frac{\partial E}{\partial t} \quad (\text{kW}) \quad (3.7)$$

şeklinde. Bu eşitliğin sol tarafı kontrol hacmi içindeki enerji transferini, sağ taraf ise kontrol hacmi içindeki enerji miktarı değişimini ifade eder. Sürekli akışlı sürekli açık sistemlerde kontrol hacmi içerisindeki enerji miktarı değişimi sıfırdır. Buna göre, sürekli akışlı sürekli açık sistemler için termodinamiğin birinci kanunu (3.8) nolu denklemde gösterilmiştir (Çengel ve Boles 2011).

$$\sum_{giren} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) - \sum \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) + Q - W = 0 \quad (3.8)$$

3.2.1.2. Ekserji Analizi

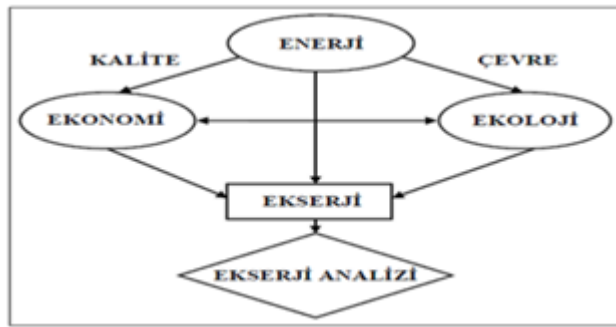
Ekserji; bir sistemin termodinamik sürecinde, referans alınan çevreyle denge haline gelirken, sistemde madde veya enerji akışıyla üretilebilecek maksimum miktarda iş olarak tanımlanmaktadır (Özgener ve Hepbaşlı 2003). Bir sistemin ekserjisinden bahsedebilmek için, çevrenin mutlak tanımlanması gerekmektedir. Ekserji, gerçekte tamamen kararlı dengede olmayan sistemlerde, referans alınan çevreye göre, akış ya da sistemin gerçek enerji potansiyelinin bir ölçüsüdür (Dinçer ve Rosen 2005). Ekserji, termodinamik bir sistemin ihtiva ettiği potansiyel enerjisinin, herhangi bir referans haline göre kullanılabilirliğinin bir göstergesi olup, tersinir bir süreç sonucunda sistem çevre ile denge sağladığı takdirde, oluşan entropi sonucu kullanılamaz hale gelen enerji düşüldükten sonra, teorik olarak elde edilebilecek maksimum faydalı iş miktarı olarak da tanımlanabilir. Termodinamik bakış açısından ekserji, bir sistemin referans çevre ile

denge haline gelirken, enerji akışıyla üretilebilecek maksimum miktarda iş olarak tanımlanır. Enerjiden farklı olarak ekserjinin korunumu durumu yoktur.

Enerji, bir proste her koşulda korunabilirken, ekserji ise sadece tersinir proseslerde korunabilmekte ancak gerçek proseslerde tersinmezlikler nedeniyle tüketilmektedir. Bir enerji türünün ne kadarının işe yarayan enerji olduğunun belirlenebilmesi için ekserjinin bilinmesi gereklidir. Diğer enerji türlerine dönüştürülebilen enerjiye kullanılabilir enerji veya ekserji adı verilir, diğer enerji türlerine dönüştürülmesi imkânsız olan enerji ise kullanılamaz enerji ya da anerji diye tanımlanır.

Birbiri ile etkileşim halindeki farklı iki sistemden her zaman yararlı iş elde etmek mümkündür. Prensip olarak, bu iki sistem kendi aralarında denge konumuna kadar iş üretirler. Sistemlerden bir tanesi çevre diye adlandırılan ideal sistem, diğeri de bununla etkileşim halinde bir sistem olursa, sistemler dengeye gelinceye kadar elde edilebilecek teorik yararlı maksimum iş ekserji denir. Bir başka deyişle, çevre şartlarından belirli bir şarta sistemi getirebilmek için gerekli minimum teorik yararlı iş ekserji denilmektedir (Bejan ve ark. 1995).

Ekserji analizi verimlilik çalışmalarında bize en doğru ve sağlıklı yöntemdir. Ekserji analizi ile belirli bir çıktı için ihtiyaç olan enerjinin tespit edilmesini sağlayan enerji akışını net olarak tespit edilebilir.



Şekil 3.8. Enerji-Ekonomi-Ekoloji ilişkisinin ekserji analizi ilişkisi

Niceliğin ölçüldüğü enerji analizleri sonuçları; sistemlerin verimliliklerinin değerlendirilmesinde yeterli değildir. Çünkü ısı sistemlerde gerek duyulan enerji kullanılabilir enerjidir. Bu nedenlerle; verimlilik analizleri; önemli bir parametre olan

çevre şartlarının da göz önüne alındığı termodinamiğin ikinci yasasına göre yapılmalıdır (Dinçer ve Rosen 2005) (Söğüt 2009).

Enerjiden farklı olarak ekserji, gerçek sistemlerde tersinmezlikler nedeniyle tüketilir veya yok edilir. Bir sistemde ekserji tüketimi tersinmezlikler nedeniyle ortaya çıkan entropiyle orantılıdır. Termodinamiğin ikinci yasasına göre sistemlerde yapılan ekserji analizlerinin sonuçları; bir sistemde enerji tüketen bölümlere daha fazla duyarlılık gösterilmesini sağlamak için göz önüne alınmaktadır (Keenan), (Wall ve Cong 2001).

Bu nedenle ekserji analizleri, sistemlerin enerjiye dayalı verimsizliklerini azaltmaya ve daha verimli sistemleri tasarlamaya yönelik değerlendirmeler için önemli bilgiler içerir. Bu durum ekserji analizlerinin önemini ortaya koymaktadır.

Sistemlerde enerji tüketim ve maliyet verilerine yönelik yapılan bu analizlerin değerlendirilmesi sonucunda, sistemlerin iyileştirilmesi için eksergoekonomik optimizasyon gerçekleştirilmelidir. Eksergoekonomik optimizasyonun amacı; termodinamik analizlerle (enerji ve ekserji analizleri) ortaya çıkan ve sistemin verimi olumsuz etkileyen etkenlerin giderilerek, ekserjetik verimin yükseltilmesi ve sisteme ait maliyetlerin (ürün, yakıt, tasarım vb.) minimum seviyeye düşürülmesidir (Şenel 2003).

Ekserji Bileşenleri

II. Kanun göre; tersinir süreçlerde ekserji sabit kalır, tersinmez süreçlerde ise ekserji tüketilir ve tüketilen ekserjinin bir kısmı veya tamamı enerjiye dönüşür. Bu durumda, termodinamik süreçlerde ekserji (3.9) nolu matematiksel bağıntı ile ifade edilir.

$$Ex = Ex_{kin.} + Ex_{pot.} + Ex_{fiz.} + Ex_{kim.} \quad (kW) \quad (3.9)$$

Bu bağıntıda $Ex_{kin.}$, $Ex_{pot.}$, $Ex_{fiz.}$, $Ex_{kim.}$ sırasıyla kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal ekserjileri tanımlar (Shukuya, Hammache 2002).

Kinetik, potansiyel ve fiziksel ekserji literatürde termomekanik ekserji olarak özetlenir. (3.10) nolu denklemde gösterildiği üzere birim kütle başına ekserji belirtilen dört ekserji miktarının toplanması ile elde edilir.

$$e_x = e_{kin.} + e_{pot.} + e_{fiz.} + e_{kim.} \quad (\text{kW}) \quad (3.10)$$

Sistemin kinetik ve potansiyel enerjisinin tamamının işe dönüşebilmesi durumunda aşağıdaki eşitlikler yazılabilir. Bu durum ekserjinin çevreyle ilişik olması durumunda geçerlidir.

$$e_{kin.} = 0,5V^2 \quad (3.11)$$

$$e_{pot.} = gz \quad (3.12)$$

Burada V hız, z ise çevreden olan yükseklik farkıdır. Sistem ve çevrenin aynı şartlarda olduğu düşünülürse; $E_{x_{kin.}} = 0$ ve $E_{x_{pot.}} = 0$ olur. Bu durumda fiziksel ekserji en yüksek düzeyde elde edilebilir. Benzer şekilde, T sıcaklığında ve P basıncındaki sistem, T_0 sıcaklığında ve P_0 basıncındaki çevreyle etkileşim neticesinde teorik maksimum kimyasal iş elde edilebilir. Böylelikle sistem sınırlı denge halinden denge haline geçer (Hepbaşlı ve Utlu, 2007).

Fiziksel Ekserji

Fiziksel ekserji sürekli akışlı açık tersinir sistemlerde, çevre basıncı (P_0) ve sıcaklığında (T_0), sürece etki eden madde veya cisimlerden elde edilebilen maksimum iş olarak adlandırılır. Verilen herhangi bir durum için sistemin fiziksel ekserjisi entalpi ve entropi parametrelerinin çevreye bağlı fonksiyonu olarak da tanımlanabilir (Wall 1986). Herhangi bir durumda sistemin fiziksel ekserjisi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$\dot{E}x_{fiz} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (3.13)$$

dir. Burada H entalpiyi ve S entropiyi ifade etmektedir. Fiziksel ekserji mekanik harekette ısı ve basınç bileşenlerine bağlı olarak üretilen iş şeklinde ifade edilebilir. Fiziksel ekserji aşağıda gösterildiği gibi iki bileşenden oluşmaktadır.

$$\dot{E}x_{fiz} = \dot{E}x_{\Delta T} + \dot{E}x_{\Delta P} \quad (3.14)$$

(3.14) nolu denklemde birinci terim $\dot{E}x_{\Delta T}$, fiziksel ekserjinin ısı bileşeni olup ürün ve çevre sıcaklığı arasındaki farkın integrasyonu olarak ortaya çıkmaktadır.

$$\dot{E}x_{\Delta T} = \int_{T_1}^{T_0} \frac{T-T_0}{T} dh \quad (3.15)$$

İkinci terim $\dot{E}x_{\Delta P}$ ise, basınç bileşeni olup basınç farkından dolayı meydana gelmektedir. Basınç bileşeni aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{E}x_{\Delta P} = T_0(s_0 - s_1) - (h_0 - h_1) \quad (3.16)$$

Kimyasal Ekserji

Sistemin ya da maddenin sınırlı denge halinden denge haline geçmesi ile kimyasal ekserjiden maksimum iş elde edilebilir.

Çevre dengesi (T_0, P_0) iken saf bileşenlerin konsantrasyonlarının kısmi basınçlarından ($P_{00,i}$) gidilerek her bir bileşenin kimyasal ekserjileri aşağıda verilen bağıntıdan hesaplanır (Hepbaşlı ve Utlu, 2007).

$$E_{oi} = RT_0 \ln(P/P_{\infty,i}) \quad (3.17)$$

Aynı zamanda gaz karışımları ve ideal sıvıların ekserjileri (3.18) nolu denklemden bulunur.

$$e_{KM} = \sum_i x_i (e_{oi} + RT_0 \ln[x_i]) \quad (3.18)$$

χ_i maddenin bileşimindeki molar kesri, e_{oi} standart kimyasal ekserjiyi gösterir. Kimyasal enerjinin gerçek çözümü için aşağıdaki bağıntıdan yararlanılır:

$$e_{KM} = \sum_i x_i (e_{oi} + RT_0 \ln[\gamma_i x_i]) \quad (3.19)$$

γ_i bileşenin aktiflik katsayısıdır.

3.2.1.3. Sürekli Akışlı Açık Sistemlerin İkinci Yasa Çözümlmeleri

Sürekli akışlı açık bir sistem ele alındığında sisteme birden çok giriş çıkışın olabileceği ve sistemin P_0 basıncında ve T_0 sıcaklığındaki çevre ortamla ısı alışverişinde bulunabileceği kabul edilmektedir. Sürekli akışlı açık sistem için termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları aşağıdaki gibi yazılabilir.

Termodinamiğin birinci yasası;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\text{çıkan}} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) - \sum_{\text{giren}} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) \quad (\text{kW}) \quad (3.20)$$

Termodinamiğin ikinci yasası;

$$\dot{W} = \sum_{\text{giren}} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz - T_o S_g \right) - \sum_{\text{çıkan}} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz - T_o S_{\text{ç}} \right) - T_o S_{\text{üretim}} \quad (\text{kW}) \quad (3.21)$$

Denklemlerde verilen $\dot{W}$, açık sistemde yapılan gerçek iştir, bu aynı zamanda yararlı işe eşittir, çünkü sürekli akışlı açık sistemlerin sınırları sabit olup çevre işi söz konusu değildir.

Tersinir iş, (3.21) nolu denklemde toplam entropi üretimi terimi $S_{\text{üretim}}$ sıfıra eşitlenerek bulunur.

$$\dot{W}_{tr} = \sum_{\text{giren}} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz - T_o S_g \right) - \sum_{\text{çıkan}} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz - T_o S_{\text{ç}} \right) \quad (3.22)$$

Sürekli akışlı açık sistemin bir giriş ve bir çıkışı var ise (3.22) nolu denklem basitleştirilerek (3.23) nolu denklem oluşturulur.

$$\dot{W}_{tr} = \dot{m} (h_g - h_{\text{ç}}) - T_o (s_g - s_{\text{ç}}) + \left(\frac{1}{2} V_g^2 - \frac{1}{2} V_{\text{ç}}^2 + g(z_g - z_{\text{ç}}) \right) \quad (3.23)$$

Sistemden geçen birim kütle için aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$w_{tr} = (h_g - h_{\text{ç}}) - T_o (s_g - s_{\text{ç}}) + \left(\frac{1}{2} V_g^2 - \frac{1}{2} V_{\text{ç}}^2 + g(z_g - z_{\text{ç}}) \right) \quad (3.24)$$

$$= T_o \Delta s - \Delta h - \Delta ke - \Delta pe \quad (3.25)$$

Akış kullanılabilirliği, sürekli akışlı açık sistem için verilen termodinamiğin ikinci yasa denkleminde (3.21) giriş hali indissiz olarak ve çıkış hali de ölü hal olmak üzere 0 indisiyle gösterilirse (3.26) nolu denklem oluşturulur.

$$\psi = (h - h_o) - T_o (s - s_o) + \left(\frac{1}{2} v^2 + gz \right) \quad (3.26)$$

Bu bağıntıdan yararlanarak, tersinir işi akış kullanılabilirliğiyle göstermek mümkündür.

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_{\text{ç}} \psi_{\text{ç}} \quad (\text{kW}) \quad (3.27)$$

Bir giriş ve bir çıkışlı sürekli akışlı açık sistem için,

$$\dot{W}_{tr} = \dot{m}(\psi_g - \psi_\zeta) \text{ ve}$$

$$W_{tr} = \psi_g - \psi_\zeta \text{ (kW) elde edilir.}$$

Ekserji Kaybı

Ekserjinin yok oluşu veya ekserji kayıpları olarak adlandırılan tersinmezlik, tüm giren ve çıkan ekserjiler arasında ekserji balansı kurularak hesaplanır. Tersinmezlik (I) ile gösterilir. Termodinamik süreçlerde tersinmezlik (3.28) nolu denklem ile bulunur.

$$\dot{I} = \sum_g \dot{E}x_g - \sum_\zeta \dot{E}x_\zeta \quad (\text{ kW }) \quad (3.28)$$

Tersinmezlikleri hesaplamanın bir başka yöntemi de “Gouy-stodola” tarafından yapılmıştır. Burada, entropi artışları çevresel sıcaklığa bağlı arttığı ifade edilmiştir.

$$\dot{I} = T_0 \sum_\zeta \dot{S}_\zeta - T_0 \sum_g \dot{S}_g = T_0 \Delta \dot{S} \quad (3.29)$$

Burada T_0 referans alınan çevre sıcaklığını, $\Delta \dot{S}$ entropi değişimini ifade etmektedir (Cornelissen 1997).

Ekserji Verimliliği

Isıl sistemlerin ekserji verimliliği; basit verimlilik, rasyonel verimlilik, geçişli ekserji ile verimlilik olmak üzere üç farklı şekilde hesaplanır.

Basit (Temel) Verimlilik

Temel ekserji verimi formudur. Basit verimlilik formu, giren ve çıkan materyallerin ekserji dengesinin kurulması ile oluşturulur. Basit verimliliğin en kısa tanımı; toplam çıkan ekserji akışının, toplam giren ekserji akışına oranıdır.

$$\eta_u = \frac{\dot{E}x_\zeta}{\dot{E}x_g} \quad (3.30)$$

Basit verimlilik, bir termodinamik sistemin tüm ünitelerinde kullanılabilir. Basit verimlilik giren ekserji akışının bir üniteden diğerine transfer edildiği ısı sistemde,

sistemin termodinamik yeterliliğinin iyi bir görünümünü verir. Ancak bu verimlilik güç istasyonları gibi ekserji transferinin olmadığı kısımlarda fabrikaların proses veya ünitelerin değerlendirilmesinde yanlış bir etki verir. Basit (temel) verimliliğin duyarlılığı; transfer edilmeyen ekserjinin fabrika proseslerinde veya ünitelerinde azalması ile değişir (Cornelissen 1997).

Rasyonel Verimlilik

Rasyonel verimlilik, 1995 yılında Kotas tarafından; istenilen ekserji çıkışının kullanılan ekserjiye oranı olarak tanımlanmıştır (Cornelissen 1997). Rasyonel verimlilik;

$$\Psi = \frac{\dot{E}x_{istenilen\ çıkış}}{\dot{E}x_{kullanılan}} \quad (3.31)$$

dir. $\dot{E}x_{istenilen\ çıkış}$ sistemden transfer edilen ve istenilen çıktıyı oluşturan ekserjilerin toplamıdır. İstenilen ekserji çıkışı, sistem fonksiyonlarının denemeleri yolu ile belirlenmiştir. Eğer $\dot{E}x_{istenilen\ çıkış}$ ve $\dot{E}x_{kullanılan}$ bir kontrol yüzeyinde doğru tanımlanırsa, ortaya çıkan tersinmezliklerin tamamı göz önünde bulundurularak (3.32) nolu eşitlik yazılır. Bu durumda sisteme giren ekserji, çıkan ekserji ile tersinmezliğin toplamına eşittir.

$$\dot{E}x_{kullanılan} = \dot{E}x_{istenilen\ çıkış} + I \quad (3.32)$$

Eşitlik (3.33) kullanılan ekserjinin istenilen çıkışı için kullanılabilir. Yukarıdaki denklikler birleştirildiğinde, rasyonelliğin alternatif formu elde edilebilir (Cornelissen 1997).

$$\Psi = 1 - (I / \dot{E}x_{kullanılan}) \quad (3.33)$$

Rasyonel verimlilik tamamen yutucu olmayan her sistem için kullanılabilir.

Geçişli Ekserji ile Verimlilik

Kostenko tarafından açıklanan, Brodyansky, Sorin ve Lee Goff (1994) tarafından daha da geliştirilen geçişli ekserji ile verimlilik basit verimliliğin gelişmiş bir formudur. Bu

verimin hesaplanmasında giren ve çıkan akışkanların ekserjisinden, transfer edilmeyen parçaların ekserjisi çıkarılır.

$$\eta_e = \frac{\dot{E}x_{\dot{c}} - \dot{E}x_{tr}}{\dot{E}x_{\dot{g}} - \dot{E}x_{tr}} \quad (3.34)$$

$\dot{E}x_{tr}$ geçiş ekserjisi Sorin (1994) tarafından "ekserjinin sistem içerisinde herhangi bir mekanik, termal ve ya kimyasal değişime uğramayan kısmı" olarak nitelendirilmiştir.

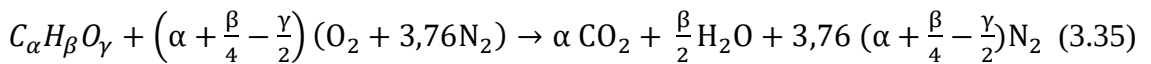
3.2.2. Yanma

Yanma, yakıtların oksijenle kimyasal tepkimeye girmesi ile oluşur. Tepkime sonucunda yakıt içindeki kimyasal enerji açığa çıkar. Açığa çıkan enerjinin önemli kısmı ısı (sıcak gazlar), geri kalan kısmı ise elektromanyetik dalgalar (ışık), elektrik (çevreye saçılan serbest elektronlar ve iyonlar) ve mekanik enerji (ses) şeklinde çevreye yayılır. Ancak elektrik ve mekanik enerji olarak ortaya çıkan enerjiler genellikle dikkate alınmazlar.

Yanma işlemi sırasında tepkimeden önce bulunan bileşenlere girdiler ve tepkimeden sonra bulunan bileşenlere ürünler denir. Buna göre yanma işleminde girdiler yakıt ve hava (veya O_2) iken yanma sonunda ürün olarak başta karbondioksit (CO_2), su buharı (H_2O) ve azot (N_2) olmak üzere değişik miktarlarda başka gazlar da bulunur. Yanma sırasında kimyasal tepkimeler, çok ince bir tabaka olan alev içinde gerçekleşir.

Kimyasal tepkimeler kütleinin korunumu ilkesine dayanarak denkleştirilmektedir. Kütleinin 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. Bu nedenle bir kimyasal tepkimede toplam mol sayısı sabit kalmayabilir.

Genel hidrokarbon yakıtlar $C_{\alpha}H_{\beta}O_{\gamma}$ için hava ile yanma stokiyometresi şu şekilde ifade edilebilir.



Denklem (3.35)' de α , β ve γ sırasıyla C, H ve O elementlerinin atom sayılarıdır.

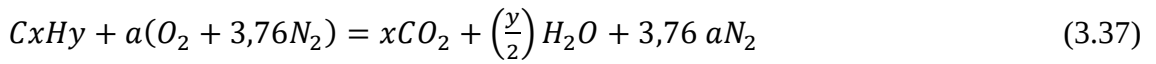
Stokiyometrik Yanma

Yanma işlemi sırasında, eğer yakıt içindeki karbonun tamamı CO₂'ye, hidrojenin tümü H₂O'ya ve varsa kükürtün tümü SO₂'ye dönüşüyorsa, yanma tam yanmadır. Yanma sonunda yanmamış yakıt veya C, H₂, CO gibi bileşenler var ise yanma işlemi tam yanma değildir.

Bir yakıtın tam yanması için gereken minimum hava miktarına stokiyometrik veya kuramsal hava denir. Yanmayı tam sağlamak için yanma odasına gönderilen gerçek hava miktarı, daima teorik hava miktarından bir miktar fazladır (Anonim 1999). Stokiyometrik miktardan fazla kullanılan hava miktarına fazla hava denir ve λ ile gösterilir. λ eşdeğerlik oranı gerçek hava-yakıt oranının, stokiyometrik hava-yakıt oranına bölünmesi ile elde edilir.

$$\lambda = \frac{\text{Gerçek hava yakıt oranı}}{\text{Teorik hava yakıt oranı}} \quad (3.36)$$

Burada $\lambda < 1$ olursa eksik yanma, $\lambda = 1$ olursa stokiyometrik yanma, $\lambda > 1$ olursa fazla hava ile yanma olur. Yakıtın doğalgaz olduğu yanmalarda λ değerinin 1,1-1,15 aralığında olması optimum değer olarak görülmektedir. Hidrokarbon bir yakıt için, stokiyometrik yanma denklem (3.37)'de olduğu gibi ifade edilir.



$$a = x + y/4 \quad (3.38)$$

Havadaki O₂ oranı %21, N₂ oranı ise %79 olarak kabul edilirse havadaki her 1 mol O₂ için 3,76 mol N₂ bulunmaktadır.

Bu durumda stokiyometrik hava yakıt karışımı aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} = \frac{4,76a}{1} \frac{M_{hava}}{M_{yakıt}} \quad (3.39)$$

Yakıtların yanması ile bağlantılı olarak kullanılan diğer bir terim yakıtın ısı değeri ve bir yakıtın tamamen yandığında ve girdiler ürünler haline döndüğünde ortaya çıkan ısı miktarı olarak tanımlanır. Ürünlerde bulunan suyun fazı ısı değerini belirler.

Ürünlerdeki su, sıvı halde olduğunda ısı değerine üst ısı değer (ÜİD), ürünlerdeki su buhar fazında ise alt ısı değer (AİD) denir.

3.2.2.1. Yakıtlar

Yakıtlar kimyasal reaksiyonlar yoluyla ısı üretimine elverişli olan ve esas itibarıyla hidrokarbon olan maddelerdir (Telli 1984). Yakıtları fiziksel özelliklerine göre, katı, sıvı ve gaz ayrıca üretildikleri kaynaklara göre de yapay ve doğal olarak sınıflandırmak mümkündür. En çok kullanılan katı yakıtlar kömür ve odundur. Sıvı yakacak olarak petrol ve türevleri ile katran yağı kullanılmaktadır. Gaz yakıtlar olarak ise doğal gaz (NG), sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), hava gazı ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) sayılabilir.

Katı Yakıtlar

Yakıtlar içinde yanma ve taşıma bakımından katı yakıtlar dezavantajlı durumdadır. Yanma sırasında kül bırakırlar ve ızgaralara gereksinme gösterirler. Çoğu zaman yanma olayı tam gerçekleşmez. Ortaya çıkan kurum nedeniyle tesisatın sık temizlenmesi gerekir. Katı yakıtlar başlıca kömür, kok, odun ve odun kömürüdür.

Katı yakıtlar çok iyi pülverize edilirse sıvı ve gaz yakıtlar gibi iyi bir türbülans ile havada yakılabilir. Fakat katı yakıtlar genellikle parça halinde yakılırlar.

Kömür, ızgara üzerinde, içerisinden geçen hava ile yanar. Fakat yanma bu esnada tamamlanamaz. Kömürün cinsine göre ısı değerinin % 40 veya % 60'ına sahip uçucu gazlar ocağı yanmadan terk ederler. Ocak sonrası bu ısı değerini yüksek gazları yakmak için mutlaka ilave sekonder yanma hücreleri gerekmektedir(Kartal 2001).

Sıvı Yakıtlar

Akaryakıtlar katı yakıtlara göre daha kolay alevlenirler, taşınmaları kolaydır. Yanma sonucu kül bırakmazlar.

Gaz Yakıtlar

Gaz yakıtlar, genellikle temiz olmaları ve temiz yanmaları açısından, sıvı yakıtlar kadar kolay ve ucuz olmasa da depolanma, taşıma ve kullanımlarının yaygınlıkları açısından önemlidirler. Gaz yakıtlar, havada kolaylıkla dağıldığı için yanma işleminde ön hazırlığa

gerek duyulmaz. Tutuşma sıcaklığına ulaşıldığında ve uygun bir türbülans sağlandığında, yanma süresi kısadır.

Endüstride kullanımının yaygın olması ve inceleme yapılan fırınında doğalgaz kullanması nedeniyle, doğalgaz ve doğalgazın yanması konuları aşağıda ele alınmıştır.

Doğal gaz fosil yakıtlar içerisinde yer almaktadır. Temel olarak metan (CH_4) ve daha düşük oranlarda etan (C_2H_6), Propan (C_3H_8) ve daha ağır hidrokarbonları içeren doğal gaz, düşük oranlarda azot (N_2), oksijen (O_2), karbondioksit (CO_2), kükürtlü bileşikler ve su gibi safsızlıklar içerebilir.

En temiz fosil yakıt olması nedeniyle çevresel performans açısından öne çıkmaktadır. Gaz halinde olması nedeniyle hava ile daha iyi bir karışım oluşturarak kolay yanar, tam yandığında mavi bir alev oluşturur. Gaz halinde olması nedeniyle daha hassas kontrol edilebilme olanağı bulunmaktadır. Doğal gaz renksiz, kokusuz, zehirli olmayan ve havadan hafif bir yakıttır.

Doğal gaz, diğer fosil enerji kaynaklarına göre çevreye daha uyumlu, karbon salınımları diğer fosil yakıtlara göre daha düşük olan bir enerji kaynağıdır. Doğal gaz, yandığı zaman havayı kirletici kükürt oksitleri ve karbon tanecikleri gibi atık maddeler meydana getirmemektedir. Ayrıca sera gazları üretiminin düşük olması nedeniyle önemli avantaja sahiptir. Doğal gaz elektrik üretiminde en düşük CO_2 miktarına sahiptir (MMO,2008). Çizelge 3.4'te fosil yakıtların elektrik üretiminde CO_2 salınımları belirtilmiştir.

Çizelge 3.5. Fosil yakıtların elektrik üretiminde CO_2 salınımı(MMO,2008)

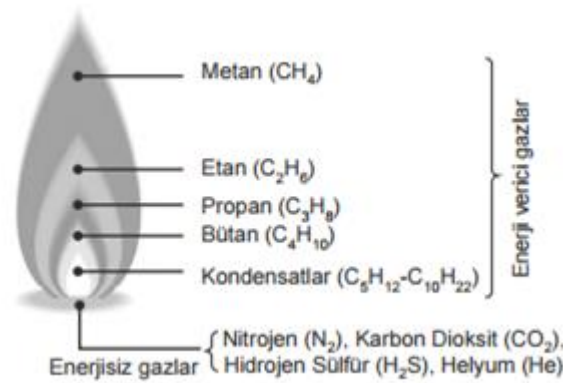
Elektrik Üretiminde Kullanılan Yakıt Salınım Faktörü	kg CO_2/kWh
Taşkömürü	0,97-0,98
Linyit	0,98 – 1,14
Fuel Oil	0,85 – 0,91
Doğal Gaz	0,46 – 0,56

3.2.2.2. Doğal Gaz'da Yanma

Doğal gaz, içindeki karbon oranı kömürden ve fuel oil den az olmasına karşılık, hidrojen oranı kömüre göre 7 kat, fuel oil e göre 2 kat daha fazladır. Karbon oranının

artması alevin rengini kırmızı yapar. Parlak kırmızı alevde radyasyonla ısı transferi daha fazladır. Hidrojen oranının artması ise baca gazındaki su buharını artırır.

Ayrıca doğal gaz içindeki azot miktarı fuel oil den 35 kat, kömürden 2 kat fazladır. Diğer fosil yakıtlarda muhtelif oranlarda bulunan oksijen, kükürt, su ve kül doğal gazda hiç yoktur. Doğal gazda yanma havası oranı diğer yakıtlara göre daha azdır (Akgüngör, 2000).



Şekil 3.9. İşlenmemiş doğal gazın temel elemanları

Stokiyometrik şartlarda karbon ve hidrojenin tam yanması halinde doğalgazda yanma reaksiyonları aşağıdaki gibidir.



Karbon ve hidrojen oksijenle birleşerek yanma oluşur. Yanma esnasında yakıt partikülleri kendilerini oluşturan hidrojen ile karbon atomlarına ayrılır ve elementler havanın oksijeni ile ayrı ayrı birleşir.

3.2.2.3. Yanma Hesabı

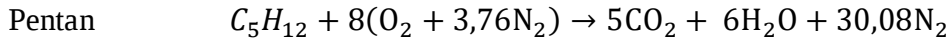
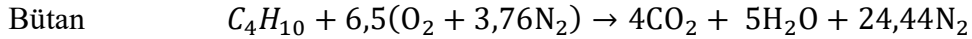
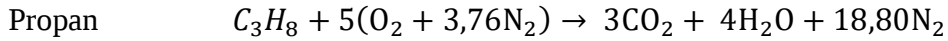
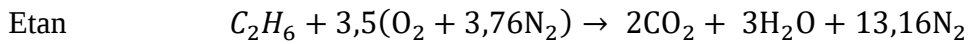
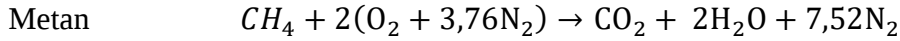
Doğalgaz bileşenleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi Metan %94.53 yüzdesi ile ilk sırada yer almaktadır.

Çizelge 3.6. Doğalgaz bileşenleri(Temmuz 2016 Bursagaz Kromotograf Değerleri)

Bileşen	Sembolü	M(kg/kmol)	%Dağılımı
Metan	CH ₄	16.043	%94,53
Etan	C ₂ H ₆	30.070	%2,73
Propan	C ₃ H ₈	44.097	%0,88
Bütan	C ₄ H ₁₀	52.121	%0,31
Pentan	C ₅ H ₁₂	72.148	%0,07
Kükürt	S	32.064	%0,00
Oksijen	O ₂	31.999	%0,00
Karbondioksit	CO ₂	44.009	%0,26
Azot	N ₂	28.013	%1,22
Toplam		104.60	100%

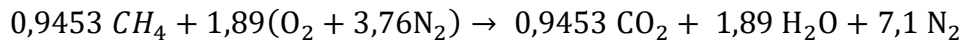
Hidrokarbonların tam yanması halinde yanma reaksiyonu aşağıdaki gibi yazılır.

$$C_{\alpha}H_{\beta} + \left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right)(O_2 + 3,76N_2) \rightarrow \alpha CO_2 + \frac{\beta}{2}H_2O + 3,76 \left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right)N_2 \quad (3.45)$$

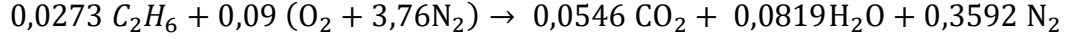


Çizelge 3.5'te belirtilen doğalgaz bileşenleri yüzde dağılımına göre aşağıdaki hesaplamalar yapılabilir.

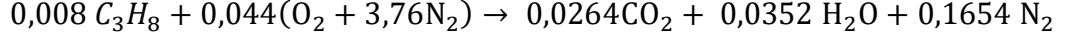
% 94,53 Metan için;



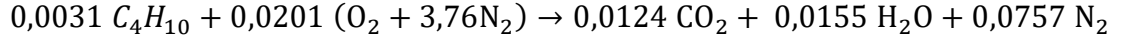
% 2,73 Etan için;



% 0,88 Propan için;



% 0,31 Bütan için;



% 0,07 Pentan için;



Bileşenlerin yanması için gerekli oksijen miktarı, tüm oksijen miktarları toplanarak bulunur;

$$(1,8906 + 0,0955 + 0,044 + 0,0201 + 0,0056) = 2,056 Nm^3/Nm^3$$

$$\text{Teorik yakma havası} = v_{h_\sigma} = \frac{100}{21} (2,056) = 9,789 Nm^3/Nm^3 \text{ olarak bulunur.}$$

Hava fazlalık katsayısı λ ile gösterilecek olursa;

Gerçek hava miktarı $V_h = \lambda * v_{h_\sigma}$ formülü ile hesaplanır. Teorik baca gazı miktarı ise yanma denklemlerinin sağ tarafındaki CO_2 , H_2O , N_2 gazlarının toplamı ile bulunur.

Teorik özgül baca gazı miktarı:

$$v_{g_0} = 1,0422 CO_2 + 2,0274 H_2O + 7,7301 N_2 = 10,79 Nm^3/Nm^3$$

$$\text{Gerçek baca gazı miktarı} = V_g = v_{g_0} + (\lambda - 1)v_{h_0}$$

Yakıtın alt ısı değeri hesabı;

$$H_u = 0,9453 * 8.560 + 0,0273 * 15.370 + 0,0088 * 21.800 + 0,0031 * 28.354 + 0,0007 * 34.899 = 9.021 kcal/Nm^3$$

Yakıttaki bütün karbon ve hidrojen atomlarının hesaplanması ile

$$C = 0,9453 * 1 + 0,0273 * 2 + 0,0088 * 3 + 0,0031 * 4 + 0,0007 * 5 = 1,042$$

C: 1,042

$$H = 0,9453 * 4 + 0,0273 * 6 + 0,0088 * 8 + 0,0031 * 10 + 0,0007 * 12 = 4,0548$$

H: 4,0548

değerleri elde edilir.

Bu durumda doğal gaz bileşiminin metan (CH_4) yakıtına çok yakın olduğu görülmektedir. Tüm bu hesaplamalar aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir.

Çizelge 3.7. Bileşen oranlarına göre elde edilen veriler

BİLEŞEN	%	% / 100	x	y	O ₂ çarpım faktörü	CO ₂ çarpım faktörü	H ₂ O çarpım faktörü	Oluşacak CO ₂ miktarı	Oluşacak H ₂ O miktarı (Nm ³)Gwf	Gerekli Teorik O ₂ Miktarı	Gerekli teorik hava miktarı (Nm ³)A ₀	Hidrokarbo n faktörleri	Teorik Yaş Bacagazı Miktarı (Nm ³)G ₀	Teorik Kuru Bacagazı Miktarı (Nm ³)G ₀
CH ₄	94,53	0,94530	1	4	2	1	2	0,9453	1,8906	1,8906		0,000000		
C ₂ H ₆	2,73	0,0273	2	6	3,5	2	3	0,0546	0,0819	0,0956		0,013650		
C ₂ H ₄	0	0,00000	2	4	3	2	2	0,0000	0,0000	0,0000		0,000000		
C ₃ H ₈	0,88	0,0088	3	8	5	3	4	0,0264	0,0352	0,0440		0,008800		
C ₄ H ₁₀	0,31	0,0031	4	10	6,5	4	5	0,0124	0,0155	0,0202		0,004650		
C ₅ H ₁₂	0,07	0,0007	5	12	8	5	6	0,0035	0,0042	0,0056		0,001400		
CO	0	0,00000	0	0	0,5	1	0	0,0000	0,0000	0,0000				
H ₂	0	0,00000	0	0	0,5	0	1	0,0000	0,0000	0,0000				
O ₂	0	0,00000	0	0						0,0000				
CO ₂	0,26	0,00260								0,0000				
N ₂	1,22	0,01220												
Toplam	1,00	0,9852						1,042	2,027	2,056	9,790	0,029	10,819	8,791

3.2.2.4. Doğalgaz Ekserji Hesaplaması

Kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edildiği ve ısı alışverişinin sadece T₀ sıcaklığındaki çevreyle olduğu sürekli akışlı bir yanma işlemi için tersinir iş aşağıdaki formülle bulunur,

$$W_{tr} = \sum n_g(\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o - T_0\bar{s})_g - \sum n_{\dot{c}}(\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o - T_0\bar{s})_{\dot{c}} \quad (\text{kJ}) \quad (3.46)$$

Yanma işlemine girenler ve yanma işleminden çıkanlar, çevre sıcaklığı T₀' da oldukları zaman tersinir iş Gibbs fonksiyonu ile ifade edilebilir. Gibbs serbest enerjisi, bir sistemin sabit basınç ve sıcaklık altında üretebildiği kullanılabilir iş miktarını belirtmektedir.

$$W_{tr} = \sum n_g(\bar{g}_{0,g}) - \sum n_{\bar{c}}(\bar{g}_{0,f}) \quad (\text{ kJ }) \quad (3.47)$$

$\bar{g}_0$, T_0 sıcaklığındaki bir maddenin birim molünün Gibbs fonksiyonudur. Çizelge 3.7’de (Kotas, 1995) Gibbs oluşum fonksiyonu ve standart kimyasal ekserji değerleri (Kotas, 1995) verilmektedir. Çizelgedeki değerleri (3.47) nolu denklemde uygulayarak fiziksel ve kimyasal ekserji değerleri bulunur.

Çizelge 3.8. Gibbs oluşum fonksiyonu ve standart kimyasal ekserji değerleri

Bileşen	g_f^0	ε^0
	kJ/kmol	kJ/kmol
Metan	-50 490	836,51
Etan	-31 920	1 504,36
Propan	-24 390	2 163,19
Bütan	-16 700	2 818,93
Pentan	-8,4	3 461,3
Kükürt		609,6
Oksijen	0	3,79
Karbondiyoksit	-394 370	20,140
Azot	0	0,69

Fiziksel ekserji

Fiziksel ekserji değerleri yukarıda belirtilen doğalgaz bileşen oranları doğrultusunda hesaplanır. 1kmol üzerinden yapılan hesaplamada W_{tr} - 44.460 kJ/kg bulunur.

Kimyasal ekserji

Kimyasal ekserji değerleri yukarıda belirtilen doğalgaz bileşen oranları doğrultusunda hesaplanır. 1kmol üzerinden yapılan hesaplamada $W_{tr,kimyasal}$ 918,5 kJ/kg bulunur. Toplam ekserji değeri bulunurken ekserji değerinin vektörel olduğu göz önünde bulundurularak hesaplar yapılmıştır.

$$W_{tr,toplam} = \dot{W}_{tr} + \dot{W}_{tr,kimyasal} = 43.541,5 \text{ kJ/kg bulunur.}$$

3.2.2.5. Doğal Gaz'ın Getirdiği Avantajlar

Ülkemiz birincil enerji tüketimine bakıldığında doğalgaz tüketiminin %30'lar seviyesinde olduğu görülmektedir. Doğal gaz'ın ithal bir enerji olması nedeniyle ülkemizin dış ticaret açığı açısından dezavantajlı bir durum oluştursa da, kullanımı işletmelere aşağıdaki avantajları getirmektedir.

- Doğalgazlı sistemlerde yanma hassas olarak kontrol edilerek yakıt kaybı en aza indirilir.
- Zamanla yakıt kalitesi değişmez.
- Hava ile çok iyi karışmasından dolayı diğer yakıt türlerine görece yanma verimi yüksektir.
- Doğalgaz kullanımı işletmelere, yakıt hazırlama vb. yanma öncesi herhangi bir ek maliyet getirmez.
- Alev boyunun kısa olması nedeni ile yanmanın tamamlanması için gerekli süre diğer yakıt türlerine göre daha kısadır.
- Katı ve sıvı yakıtlar yanma ürünü olarak kükürt içerdiği için, baca gazlarının suyun yoğunlaşma noktasına kadar soğutulması ve böylece suyun gizli ısısından faydalanılması imkânı yoktur. Doğal gaz kullanılan işletmelerde ekonomizer ilavesi ile baze gazı sıcaklığı diğer yakıtlara göre daha düşük sıcaklıklara getirilerek ısı geri kazanımı gerçekleştirilebilir. Proje konusu fırında da benzer uygulama yapılmıştır.
- Doğalgaz tesisatı ve cihazları düşük basınçla çalıştığı için patlama tehlikesi daha düşüktür.
- Doğalgazda yanma için gerekli olan hava diğer yakıt türlerine göre daha azdır.
- Diğer yakıt türlerinde kurum ve is gibi atık ürünler bulunması nedeniyle bakım maliyetleri fazladır. Aynı zamanda ısı transfer yüzeyleri temiz kalmadığı için verim zamanla azalır. Bu durum doğalgazda oluşmaz.
- Doğalgaz kullanan tesis çok az bakım ve denetleme gerektirir.
- İçeriğinde kükürt bulunmamasından dolayı, birçok sektörde kullanılabilirken sistem veriminin ve ürün kalitesinin daha iyi olmasını sağlar.
- Depolama gerektirmez ve taşıma maliyeti yoktur. İlk yatırım maliyeti dışında, taşıma maliyeti ve riski yoktur.

2015 yılı Kasım ayı verilerine göre sanayide 1 000 kcal ısı ihtiyacı için gerekli olan çeşitli yakıtlar için maliyet karşılaştırma çizelgesi aşağıda verilmiştir. Çizelgeye bakıldığında yakıt maliyeti olarak toz linyit kömürün doğalgaza göre azda olsa avantajlı olduğu görülmektedir. Ancak yukarıda bahsedilen, ilk yatırım, işletme ve bakım maliyetleri, çevre performansı gibi hususlar göz önüne getirildiğinde doğalgazın daha avantajlı yakıt türü olduğu değerlendirilebilir.

Çizelge 3.9. Yakıt karşılaştırma (Akfel,2015)

Yakıt Çeşidi	Yakıt Alt Isıl Değeri	Ort. İşletme Verimi	Birim Fiyat	10.2015 Fiyatlarıyla TL/1 000 kcal	
Yerli Linyit 0,5-10 mm Yıkanmış Açık – Toz	4 724 kcal/kg	%65	0,293850 TL/kg	$(0,293850 \times 1.000) / (4.724 \times 0,65)$	0,095698
Doğalgaz	8 250 kcal/m ³	%93	0,816464 TL/m ³	$(0,816464 \times 1.000) / (8.250 \times 0,93)$	0,106414
Yerli Linyit 10-18 mm Yıkanmış Fındık – Torba	4 932 kcal/kg	%65	0,457000 TL/kg	$(0,457000 \times 1.000) / (4.932 \times 0,65)$	0,142554
İthal Sibirya Kömürü Ceviz tipi	7000 kcal/kg	%65	0,728814 TL/kg	$(0,728814 \times 1.000) / (7.000 \times 0,65)$	0,160179
Fuel-oil No: 6 Kalorifer Yakıtı	9 562 kcal/kg	%80	1,279661 TL/kg	$(1,279661 \times 1.000) / (9.562 \times 0,80)$	0,167285
LNG - Büyük Sanayi Sıvılaştırılmış Doğalgaz	8 250 kcal/m ³	%93	1,524317 TL/m ³	$(1,524317 \times 1.000) / (8.250 \times 0,93)$	0,198673
Elektrik Sanayi	860 kcal/kwh	%99	0,289120 TL/kWh	$(0,289120 \times 1.000) / (860 \times 0,99)$	0,339582
Motorin (VP Diesel)	10 256 kcal/kg	%84	3,750878 TL/kg	$(3,750878 \times 1.000) / (10.256 \times 0,84)$	0,435387

4. BULGULAR

4.1. Uygulama Öncesi Fırın Enerji Analizi

Yapılan ölçümler, işletmeden alınan bilgiler doğrultusunda emaye pişirme fırını kütle ve enerji dengeliği oluşturulmuştur. Emaye pişirme prosesine çeşitli ebatlarda emaye kaplanmış boyler ve tanklar girmektedir. Çalışmalarda 1 000 lt kapasiteye sahip boyler emaye pişirme prosesi referans alınmıştır. 1 000 lt boyler ağırlığı 280 kg olarak tespit edilmiş ve analizlerde bu değerler kullanılmıştır. Enerji verimliliği projeleri uygulanmadan önce kutu fırın pişirme prosesine 2 adet 1 000 lt'lik boylerler girmektedir.

Brülörlerin elektrik tüketimi gaz açma ve hava açma manyetik ventilleri tarafından tüketilen elektrik enerjisi olarak düşünülmüştür. Ayrıca egzoz fanı ve yakma fanı enerji tüketimleri de göz önünde bulundurularak elektrik enerjisi tüketimi hesaplanmıştır.

Hava tüketimi 2 nolu bölümde hesaplanan teorik yakma havasının, λ çarpılması ile elde edilmiştir. Aynı şekilde baca gazı hesabı 3 nolu bölümdeki hesaplamalar doğrultusunda tespit edilmiştir.

Emaye pişirme prosesi öncesi boylerlere emaya tatbik edilmektedir. İlgili personelden 1 000 lt 'lik boyler için tatbik ettikleri emaye miktarı alınmış ve hesaplama dahil edilmiştir. Proses çıktısı bölümünde emaye boyler içinde hesaplanmış, eksilen emaya miktarı ihmal edilmiştir. Aşağıdaki çizelgede proses girdileri gösterilmiştir.

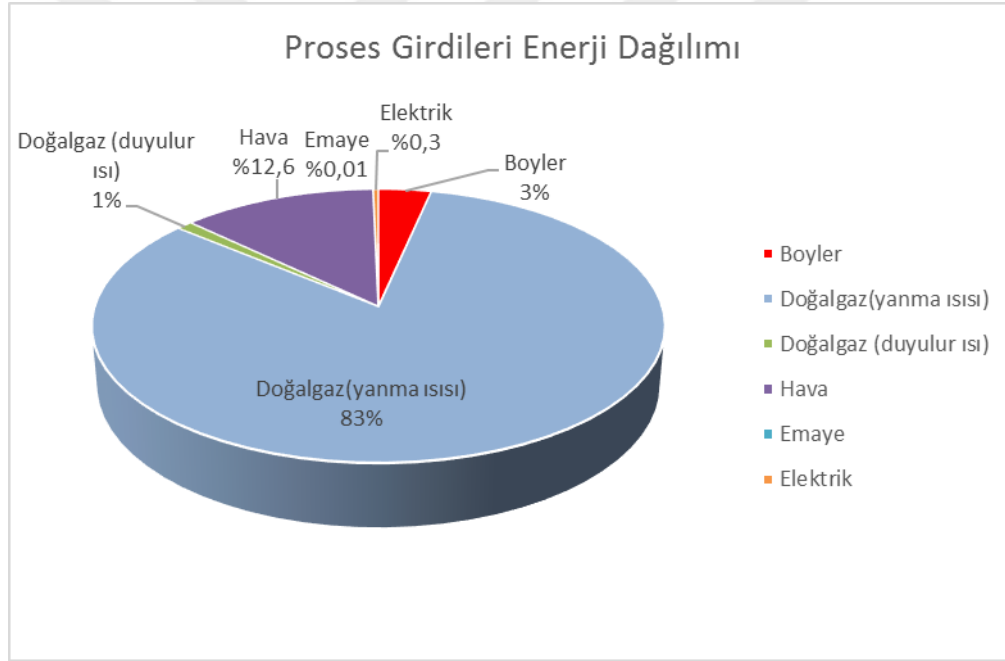
Sürekli akışlı sürekli açık sistemler için (3.8) nolu denklem doğrultusunda her bir girdi ve çıktı için entalpi terimini özgül ısı ile ifade edersek; $\Delta h = m (c_x T_x - T_o c_x)$ bağıntısı elde edilir.

$$\Delta KE = 0, \Delta PE = 0, T_o = 295 \text{ K}$$

Çizelge 4.1. Proses girdileri

Girdiler	M	T1	Cp	Δh
	kg/h	K	kJ/kgK	kJ/h
Boyer	560,0	298	0,434	72 425,9
Doğalgaz(yanma ısısı)				1 757 680,5
Doğalgaz (duyulur ısı)	37,4	298	2,22	24 709,3
Hava	895,5	298	1,005	268 193,3
Emaye	4,1	298	0,35	212,2
Elektrik				43 199,5
Toplam	1 497,0			2 166 420,7

Girdilerin kütle dağılımı Şekil 4.1'de pasta grafiği olarak gösterilmiştir.



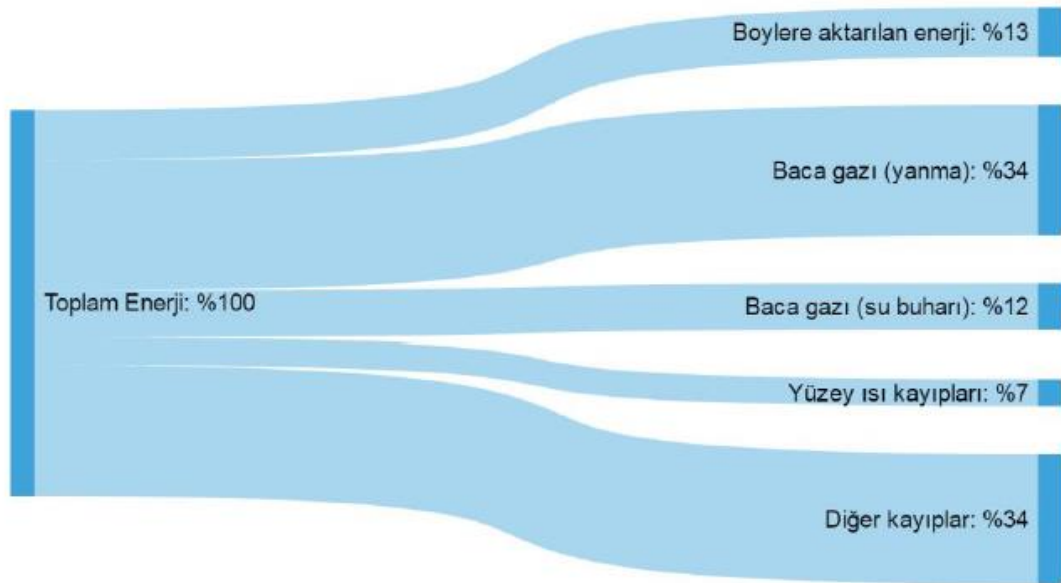
Şekil 4.1. Proses girdileri enerji dağılımı

Proses sonucunda çıkan maddelerin verileri ve elde edilen entalpi değerleri Çizelge 4.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.2. Proses çıktıları

Çıktılar	M	T1	c _p	Δh
	kg/h	K	kJ/kgK	kJ/h
Boylar	562,3	1133	0,434	276 514,9
Baca gazı(yanma)	550,9	953	1,409	739 735,8
Baca gazı(su buharı)	169,7	953	1,565	253 098,2
Yüzey ısı kayıpları				157 091,0
Diğer kayıplar	214,1			739980,7
Toplam	1 497,0			2 166 420,7

Proses sonucu çıkan maddelerin Sankey enerji dağılımı aşağıda gösterilmiştir. Enerjinin korunumu yasasına göre toplam enerjinin nerelere aktarıldığı gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Sankey enerji dağılımı

Ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir;

- Malzemeye aktarılan enerjinin %13 civarında belirlenmesi fırının verimsiz çalıştığını göstermektedir. Yapılan analiz sonucunda malzemeye aktarılan enerjinin düşük çıkmasının önemli bir sebebi ise fırının kapasitesinden daha az malzeme ile yüklenmiş olmasındandır. Fırın yüksekliğinden dolayı eğik şekilde

2 adet boyler fırına yüklenebilmektedir. Bu durum hem emayenin pişmesini zorlaştırmakta ve kaliteyi etkilemekte hem de maliyetleri artırmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurularak gerekli revizyon işlemleri uygulama aşamasında yapılmıştır.

- Baca gazı oranının %40'lar seviyesinde olması fırın veriminin düşük olduğunu, baca gazı analiz sonuçlarının ise verimsiz yanmanın oluştuğunu göstermektedir. Bu durumun oluşmasındaki nedenlerden biri de brulörlerin ekonomik ömrünü tamamlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. O₂ kontrolünün yapılmaması gibi hususlarda yanmanın verimsiz olmasına neden olmaktadır.
- Yüzeylerden kaynaklı ısı kayıpları yaklaşık %7 olarak hesaplanmıştır. Alınan sıcaklıklar ortalara değerler olurken yer yer daha fazla sıcaklıklar tespit edilmiştir. Özellikle brulörlerin olduğu bölümlerde yüksek ısı kayıpları bulunmaktadır. Fırının ömrü nedeniyle de kayıpların giderek arttığı izolasyon malzemesinin özelliklerini yitirdiği değerlendirilmektedir.
- Ayrıca malzeme fırın içine girerken ve çıkarken kapıların açılması ve kapanması ayrıca önemli bir kayba yol açmaktadır.

Tüm bu hususlar değerlendirilerek fırında 4.3 nolu bölümde anlatılan verimlilik çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

4.2. Uygulama Öncesi Fırın Ekserji Analizi

$$\dot{W}_{tr} = \sum_{giren} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz - T_o S_g \right) - \sum_{çıkan} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz - T_o S_c \right)$$

$$\Delta KE = 0, \Delta PE = 0, T_o = 295 \text{ K}$$

$$\dot{W}_{tr} = \sum_{giren} \dot{m} (h_g - T_o S_g) - \sum_{çıkan} \dot{m} (h_c - T_o S_c)$$

Her bir girdi ve çıktı için entalpi ve entropi terimlerini özgül ısılar ile ifade ederek ekserji miktarları bulunur;

$$\dot{W}_x = \dot{m} (c_x T_x - T_o c_x \ln(T_x/T_o))$$

Yukarıdaki bağıntı üzerinden hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Doğalgaz ekserjisi, 3.2.2.4 nolu bölümdeki hesaplama doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.3. Fırına giren maddeleri ekserji analizi

Girdiler	m	c_i	T_i	T_0	$\ln T_i/T_0$	W_i
	kg/h	kJ/kgK	K	K		kW
Boylar	560,0	0,434	298	295	0,0101	19,92
Doğalgaz	37,4	2,22	298	295	0,0101	452,00
Hava	895,5	1,005	298	295	0,0101	73,75
Emaye	4,1	0,35	298	295	0,0101	0,12
Elektrik						12,00
Toplam	1 497,0					545,8

Aynı şekilde proses sonrası çıktılar doğrultusunda hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve Çizelge 4.4' te yansıtılmıştır.

Çizelge 4.4. Fırından çıkan maddelerin ekserji analizi

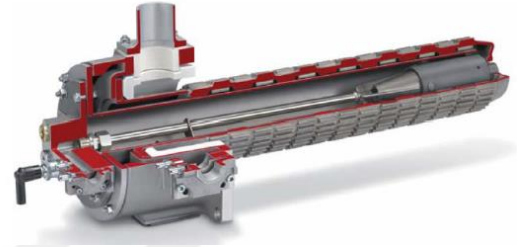
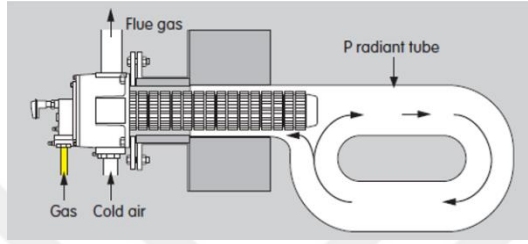
Çıktılar	m	c_i	T_i	T_0	$\ln T_i/T_0$	W_i
	kg/h	kJ/kgK	K	K		kW
Boylar	562,3	0,434	1 133	295	1,345649	49,90
Baca Gazı	720,6	1,015	953	295	1,17264	123,34
Diğer Kayıplar	214,1					
Total	1 497,0					173,20

Ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir;

- İstenilen yani boyler ekserjisinin giren ekserjiye oranı %9 civarında belirlenmiştir.
- Enerji analizine göre kıyaslandığında daha düşük verim değerinin çıktığı görülmüştür. Ekserji analizinde çevre koşullarının da devreye girmesi verimin azalmasına neden olmuştur.
- Gerçek fırın prosesler için bulunduğu çevre koşulları verimliliği doğrudan etkiler. Bu nedenle referans çevre koşulları dış sıcaklık $T_0 = 295$ K ve basınç $P_0 = 1$ bar olarak alınmıştır. Ekserji analizinde, fırında yapılan işlem sürekli akışlı açık sistem olarak kabul edilmiştir.

4.3. Uygulama Projeleri

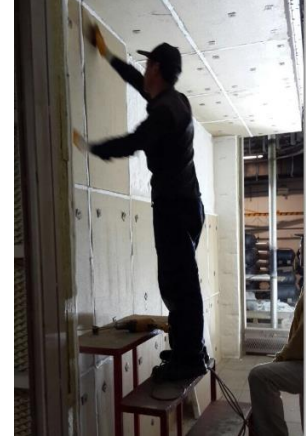
Fırının yakma sistemleri incelenmiş olup sistemin verimsiz çalıştığı tespit edilmiştir. Yakıcı brülörlerin reküperatörlü sistem ile değiştirilmesi verim artışı sağlayacağı öngörülmüştür. Mevcut sistemde 8 adet Parlock NP 20 konvansiyonel brülör bulunmaktadır. Her biri 100 kW olan brülörler ile toplam ısı kapasite 688.000 kcal/h'dir.



Şekil 4.3. Reküperatif brülör

Emaye fırına yapılan etüt çerçevesinde öncelikle gelişen teknoloji ile yakıt sisteminin değişmesinin öncelikli olarak çalışılması sonrasında geri kazanım çalışmalarının yapılmasına karar verilmiştir. Bu nedenle 6 adet reküperatif brülör (Krom Schroder Eco Max) kullanımı ile sistemin çalıştırılabileceği hesaplanmıştır. Her biri 100 kW olan brülörlerin oluşturduğu toplam ısı kapasite 516.000 kcal olmuştur. Böylelikle fırın çalışma sıcaklığı olan 860° C de 1 000 kg/saat pişirme kapasitesi sağlanmıştır. Şekil 4.3'te reküperatif brülör kesiti görülmektedir. Yanan gazların tahliyesi yapılırken aynı zamanda giriş havası ısıtılmaktadır. Böylelikle verim arttırılmaktadır.

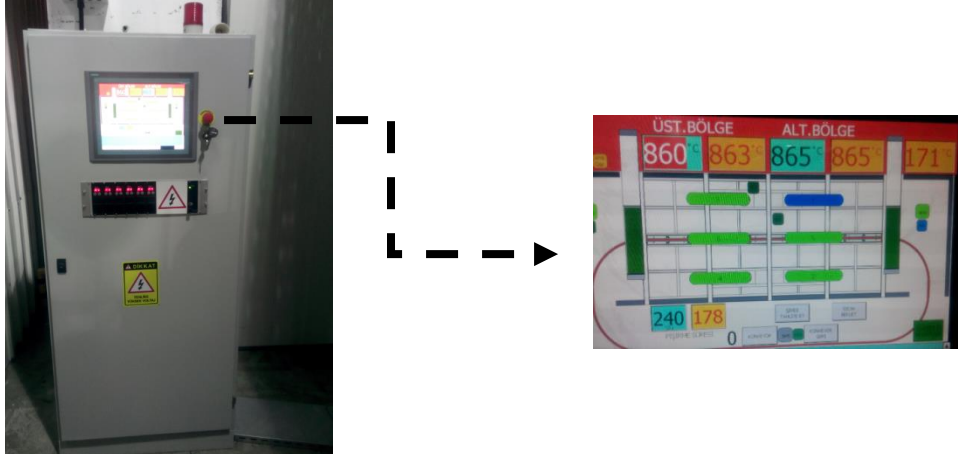
Aşağıdaki şekilde ise, fırın içerisine yerleştirilen reküperatif brülörler görülmektedir. 2 sağ yanda, 2 sol yanda ve 2 alt kısımda olmak üzere toplam 6 adet reküperatif brülör ile fırın yakıt sistemi değiştirilmiştir. Ayrıca ısının malzemeye transferi dolaylı yoldan olması gerektiği için P tipi radyant tüpler kullanılmıştır. Fırının yaklaşık 15 yıllık çalışma süresi olduğu için ve yapılan etüt çalışmasında duvar ısı kayıplarının olmasından dolayı izolasyon malzemesinin de değiştirilmesi öngörülmüştür. Toplamda 30 cm kalınlığının olacağı fırın duvarları Kalsiyum silikat plaka (240 kg/ m³ yoğunluk) + vermuculite (375 kg/m³) + izole tuğla (550 kg/m³ yoğunluk) şeklinde yapılmıştır.



Şekil 4.4. P tipi radyant tüpler ve izolasyon çalışmaları

Endüstriyel fırınların, enerji verimli kullanılması için malzemeye ne kadar ısı aktarılacağını belirlenmesi, kayıp ve kaçakların azaltılmasının yanında en fazla malzemenin de yüklenebilmesi sağlanacak şekilde tasarlanması çok önemlidir. Çalışma yapılan fırın da emaye pişirilmesi yapılan 1.000 lt 'lik boylerlerden, boylerin boyutu nedeniyle çapraz 2 adet boyler emayesi pişirilebiliyordu. Fırın yüksekliğinin 30 cm yükseltilmesi ile 2 adet yerine 3 adet dik 1.000 lt'lik boyler emayesi pişirilebilir duruma gelindi. Böylelikle hem üretim kapasitesi artırılmış oldu. Hem de ürünlerin dik pişirilmesi ile ürün kalitesinde bir artış sağlandı böylelikle işçilik maliyetlerinde de bir azalma gerçekleşmiştir.

Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda fırında yapılan analizler sonucu baca gazı ısısından hala faydalanma potansiyeli olduğu görülmüştür. Yapılan analiz sonucunda yaklaşık 280 °C civarında atık ısı sıcaklığı tespit edilmiştir. Bu atık ısının, emaye prosesine girmeden önce tank ve boylerlerin temizlendiği banyodaki sıcak suyu ısıtmak üzere kullanılan sıcak su kazanına destek vereceği planlanmıştır. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda 40 000 kcal kapasiteye sahip ekonomizer seçilmiştir. Uygulama sonrası sonuçlar Çizelge 4.5'te belirtilmiştir.



Şekil 4.5. PLC ünitesi

Yapılan çalışmalar doğrultusunda kumanda panosu da revizyonu gerçekleştirilen sisteme uygun olarak değiştirilmiştir. Fırın kontrolü PLC ile sağlanmıştır. PLC üzerinde zaman ayarlamaları kontrol edilerek, proses iyileştirme çalışmaları da yapılabilmektedir.

Çizelge 4.5. Ekonomizer uygulaması sonuçları

Ekonomizer Devrede Değilken	
Baca Gazı Sıcaklığı	281 °C
Ekonomizer Devrede İken	
Baca Gazı Sıcaklığı	145 °C
Ekonomizer Su Giriş Sıcaklığı	78 °C
Ekonomizer Su Çıkış Sıcaklığı	85 °C

Ekonomizer yapımı esnasındaki görüntüler ve ekonomizer panosundan alınan veriler aşağıdadır. Ekonomizer ile kazan arasına, kazan dönüş suyunun ekonomizere girmesini sağlayan, ekonomizerden de ısınan suyun kazana dönmesini sağlayan yaklaşık 85 mt. sirkülasyon hattı çekilmiştir.



Şekil 4.6. Ekonomizer ünitesi



Şekil 4.7. Ekonomizer panosu

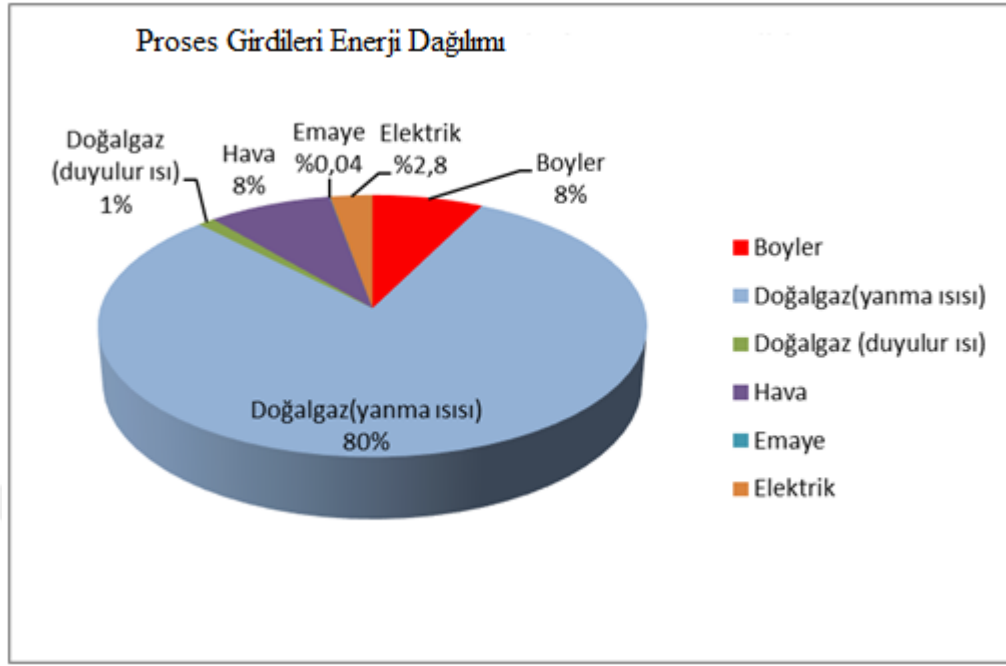
4.4. Fırın Uygulama Sonrası Enerji Analizi

Emaye pişirme fırını verimlilik uygulamaları sonrasında elde edilen sonuçların tespiti için yapılan ölçümler ve analizler tekrarlanmıştır.

Çizelge 4.6. Proses girdileri enerji dağılımı

Girdiler	M	T1	Cp	Δh
	kg/h	K	kJ/kgK	kJ/h
Boylar	840,0	298	0,434	108 638,9
Doğalgaz(yanma ısısı)				1 171 787,0
Doğalgaz (duyulur ısı)	24,9	298	2,22	16 472,8
Hava	403,8	298	1,007	121 174,7
Emaye	6,21	298	0,35	647,7
Elektrik				41 399,5
Toplam	1 274,9			1 460 120,7

Girdilerin kütle dağılımı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Proses girdileri enerji dağılımı

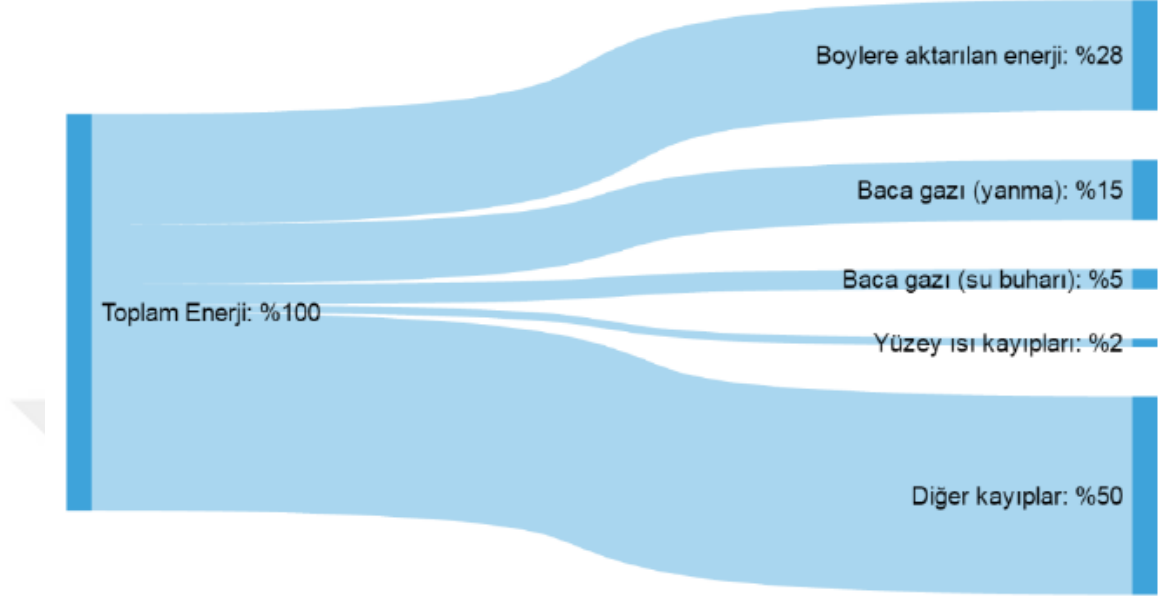
Pasta grafiğinden görüldüğü üzere giren enerji miktarları azalmış olsa da birbirine yakın oranda malzeme girişi sağlanmıştır. Ayrıca bir proseste iki olan boyler sayısı üçe çıkartılmış kütsel giriş 840 kg'a çıkmıştır. 1ton kapasitesi olan fırının daha iyi kapasitede çalışmasına olanak sağlanmıştır.

Proses sonucunda çıkan maddeler Çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Proses sonucunda çıkan maddeler

Çıktılar	M	T1	Cp	Δh
	kg/h	K	kJ/kgK	kJ/h
Boyerler	844,1	1133	0,434	415 082,2
Baca gazı(yanma)	284,2	554	1,354	213183,0
Baca gazı(su buharı)	84,6	554	1,47	68 896,5
Yüzey ısı kayıpları				22 932,0
Diğer kayıplar	62,0			740027,0
Toplam	1.274,9			1 460 120,7

Proses sonucu çıkan maddelerin Sankey enerji dağılımı aşağıda gösterilmiştir. Enerjinin korunumu yasasına göre toplam enerjinin nerelere aktarıldığı gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Enerji dağılımı sankey diyagramı

Ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir;

- Malzemeye aktarılan enerji yaklaşık %28 olarak belirlenmiştir. Uygulama öncesine göre önemli bir artış yaşanmıştır. Bu durumun birim kütle artışı ile spesifik enerji tüketiminin azalması ile oluştuğu değerlendirilmektedir.
- Toplam enerjinin %15'i baca gazı ile atılmaktadır. Baca gazının hala kullanılabilir olduğu değerlendirilerek, emayeleme prosesi öncesi olan banyo prosesi sıcak suyunun baca gazı atık ısısından faydalanılarak elde edilmesi planlanmıştır. Aşağıdaki hesaplama doğrultusunda banyo prosesi için saatlik 35 000 kcal'nin atık ısıdan elde edildiği hesaplanmıştır.

$$Q = m * c * (T_g - T_c)$$

$$Q = 5\,000 * 1 * (85 - 78) = 35\,000 \text{ kcal/h}$$

- Toplam enerji miktarının 1 460.120,7 kJ olduğu göz önünde bulundurulduğunda yaklaşık %10 verim elde edildiği görülmüştür.
- Yüzey ısı kayıplarının oldukça azaldığı tespit edilmiştir. Yüzey kayıplarının en aza indirgenmesi için uygulama sürecinde teknik şartnamede, fırın yüzey ısısının ortam sıcaklığında en fazla 20 °C fazla olabileceği belirtilmesi ile sağlanmıştır. Yüklenici firma da bu şartları sağlayabileceği izolasyon malzemesini kullanmak durumunda kalmıştır.
- Diğer ısı kayıplarının uygulama öncesi enerji miktarlarına yakın olmasına rağmen oran olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin açıklık kayıplarının fırının yapısı gereği değişmemesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Toplam enerji miktarının azalması bu kaybın sabit kalması yüzdesel olarak oranı artırmıştır.

4.5. Fırın Uygulama Sonrası Ekserji Analizi

Elde edilen yeni değerler üzerinden ekserji analizi tekrar gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.8. Fırına giren maddeleri ekserji analizi

Girdiler	m	c_i	T_i	T_0	$\ln T_i/T_0$	ψ_i
	kg/h	kJ/kgK	K	K		kW
Boyer	840,0	0,434	298	295	0,010118	29,88
Doğalgaz	24,9	2,22	298	295	0,010118	305,00
Hava	403,8	1,005	298	295	0,010118	33,26
Emaye	6,2	0,35	298	295	0,010118	0,18
Elektrik						11,50
Toplam	1 274,9					368,30

Ortaya çıkan sonuçlar doğrultusunda fırından çıkan maddelerin ekserji analizler gerçekleştirilerek, uygulama öncesi yapılan değerlendirmeler gözden geçirilmiştir.

Çizelge 4.9. Fırından çıkan maddeleri ekserji analizi

Çıktılar	m	c_i	T_i	T_0	$\ln T_i/T_0$	ψ_i
	kg/h	kJ/kgK	K	K		kW
Boyer	844,1	0,434	1 133	295	1,34565	74,90
Baca Gazı	368,8	1,015	554	295	0,6319	38,27
Diğer Kayıplar	62,0					
Total	1 274,9					113,2

Ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir;

- Boyler ekserjisinin, giren ekserjiye oranı %20.3 olarak tespit edilmiştir.
- Uygulama öncesi ekserji verimi ile kıyaslandığında iki katından daha fazla verim artışı gözlemlenmiştir. Referans alınan çevre koşulları değiştirilmemiştir.
- Ortaya çıkan sonuçların hem giren ekserjinin azalmasına hem de çıkan ekserjinin artışına bağlıdır.



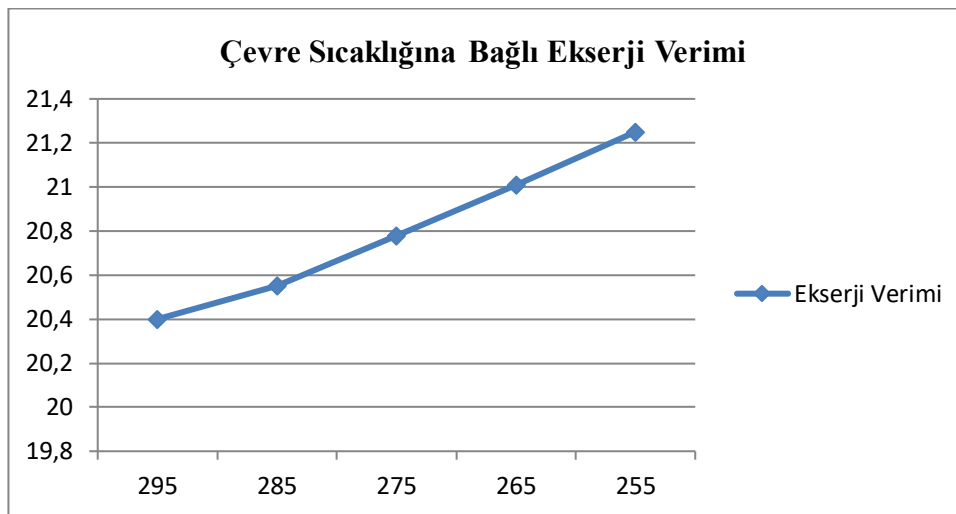
5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tez çalışmasında model alınan endüstriyel fırın için kütle dengesi sağlanarak öncelikle enerji analizleri ve referans alınan çevre koşullarına göre ekserji analizi yapılmıştır. Verimlilik projelerinin uygulanması sonrasında analizler tekrar gerçekleştirilmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Endüstriyel fırınların verimliliği, bulunduğu çevre koşullarından doğrudan etkilir. Enerji analizinde, çevre faktörleri tamamen göz ardı edildiğinden dolayı prosesle karşılaştırılırken enerji yönünden karşılaştırma yeterli olmayacaktır. Endüstriyel fırınların etkileşimde olduğu çevre, çalışma şartlarını değiştirmektedir. Bu sebeple ekserji analizi ile elde edilen ekserji verimi yönünden sistemlerin karşılaştırılması daha yerinde olacağı görülmüştür.

Fırının bulunduğu koşullar için çevrenin referans basıncı (P_0) 1 atm. Sıcaklığı 295 K alınmıştır. Ekserji analizleri için fırın yönüyle bazı kabuller yapılmıştır. Buna göre; fırına giren ve çıkan maddelerin entalpi ve entropi özellikleri üzerinde basıncın etkisi ihmal edilmiştir. Fırına giren ve çıkan madde akışlarında gazlar, ideal gaz karışımı olarak ele alınmıştır. Fırın sürekli akış halindedir ve fırına giren ve çıkan maddelerin kinetik ve potansiyel enerjiye ilişkin ekserji değerleri ihmal edilmiştir.

295 K sıcaklık referans alınarak yapılan analizler, sıcaklık değeri her seferinde 10 K düşürmek kaydı ile analizler tekrarlanmış ve aşağıdaki şekil sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.1. Çevre sıcaklığına bağlı ekserji verimi

Çevre sıcaklığına bağlı ekserji veriminde %4 'lük br değişim gözlenmektedir. Özellikle düşük çevre sıcaklıklarında ekserji verimi üretilen entropideki düşüme bağlı olarak yükselmektedir. Bu yönüyle fırınlarda tersinmezliklerin değerlendirilmesi üretilen entropiye bağlı ekserji yıkımı ile açıklanabilir.

Ekserji analizinin sonucunda sistem veriminin artırılması hedeflenir. Ekserji veriminin artırılabilmesi için tersinmezliklerin azaltılması gerekmektedir. Ekserji analizi sayesinde sistemdeki tersinmezliklerin yerleri belirlenip, alınacak önlemler sırlanır. Böylelikle tersinmezlikler azaltılarak verim arttırılır.

Bu prosesler için mühendislik çalışmalarında hedef potansiyel “IP” geliştirme potansiyeliyle tanımlanır.

$$IP = (1 - \eta)(\sum \dot{E}x_{giriş} - \dot{E}x_{çıkış}) \quad (5.1)$$

Bu tür endüstriyel fırınlarda yüksek ekserji yıkımı, mühendislik yönüyle enerji geri kazanımı çalışmalarında dikkate alınması gereken parametredir. Fırında ekserji yıkım için geliştirme potansiyeli doğrudan fırının ekserji veriminin bir fonksiyonudur. Bu nedenle çevre sıcaklığının artması ekserji verimini azaltırken, geliştirme potansiyelini de arttırmaktadır. Referans alınan sıcaklık değeri olan 295 K' de geliştirme potansiyeli 174 kW olarak belirlenirken, bu değer 320 K' de 180,7 olarak tespit edilmiştir.

Verimliliğin artırılması ve birim maliyetlerin azaltılması için enerji verimli tasarımın da önemi çalışmada görülmüştür. Özellikle fırınlar planlama aşamasında en fazla materyali prosese dahil edecek şekilde tasarlanması tersinmezliklerin azaltılması ve verimin artırılması için önemli noktalardan biridir. Çalışma yapılan fırın ilk aşamada iki adet boyler prosese dahil olabılırken, revizyon ile bu sayı üçe çıkartılmıştır.

Yapılan çalışmada örnek bir fırın üzerinden yapılan çalışma ile birlikte, sanayi de önemli kullanım alanı olan fırınlarda verimlilik potansiyeli belirlenmeye çalışılmıştır. Bu potansiyelin kullanılması için yapılabilecek çalışmalar aşağıda sıralanmıştır;

- Optimum yalıtım kalınlıkları belirlenerek, kayıplar azaltılabilir.
- Tünel fırın kullanımı yaygınlaştırılarak, proses kayıpları azaltılabilir.
- Üretim planlaması yaparak, fırın optimum kapasitede kullanılması sağlanabilir.

- Yakma havası sıcaklığı kontrol altına alınarak verimlilik sağlanabilir.
- Atık ısı kullanılarak, reküperatör vasıtası ile yakma havasında ön ısıtma sağlanabilir.
- Reküperatif veya rejeneratif brulör kullanılarak, atık ısı kullanılabilir.
- Atık ısı, ekonomizer vasıtası ile sıcak su kullanabiliriz.
- Yakıt-hava karışımı optimizasyonu ile enerji verimliliği sağlanabilir.

Her geçen gün enerji kullanımı artan sanayimizde, önemli enerji tüketicilerinin verimlilik potansiyeli kullanılarak, rekabet gücümüzü arttırmak sanayimizin güçlü kalmasını sağlayacaktır. Örnek alınan fırın çalışmasında verimlilik arttırıcı proje hazırlanmış ve proje bedelinin %50'si hibe olarak İstanbul Kalkınma Ajansından alınmıştır. Yıllık yaklaşık 100bin TL tasarruf planlanmış ve uygulama sonrası ölçümler ile tasarruf tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 1999.** Baca Gazı Emisyon Ölçümü, Mühendis El Kitabı, Makina Mühendisleri Odası, Yayın No:233.
- Anonim, 2009.** TÜBİTAK TTGV Bilim Teknoloji Sanayi Tartışmaları enerji Teknolojileri Politikası, I. Alt Grubu Enerjinin Etkin Kullanımı Ve Enerji Tasarrufu Çalışma Taslağı
- Anonim, 2014.** BP Statistical Review of World Energy
- Anonim, 2015.** Akfelgaz, Sanayide 1.000 kcal Isı İhtiyacı İçin Gerekli Olan Çeşitli Yakıtlar İçin Maliyet Karşılaştırma Tablosu. http://www.akfelgaz.com/wp-content/uploads/2013/03/price_table_ind_nov_15_tr.pdf(Erişim tarihi:28.02.2016).
- Aran, A. 2007.** Döküm Teknolojisi “İmal Usulleri Ders Notları”, İTÜ Makina Fakültesi, s. 83-89.
- Arıkol, A. 1984.** Ekserji Analizine Giriş, Ders Notları
- Bejan, A. Tsatsaronis, G. Moran, M. 1995.** Thermal Design And Optimization, Wiley – Interscience Publication, New York
- Brodyansky, V.M., Sorin, M.V. ve Le Goff, P., 1994,** The Efficiency of Industrial Processes: Exergy Analysis and Optimization, Elsevier Science B.V.
- Cornelissen, R. L. 1997.** Thermodynamics and sustainable development The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. <http://doc.utwente.nl/32030/>
- Çalikoğlu, E. 2012.** Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Ve Enerji Verimliliği, Yeşil Enerji’de Danimarka ile Fırsatlar Konferansı, İstanbul
- Çengel, Y.A. Boles, M.A. 2011.** Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla, Çeviri:Pınarbaşı. A, Güven Bilimsel, İzmir, s. 753-764.
- Dinçer, İ. Rosen, M. A. 2005.** Thermodynamic Aspects Of Renewable And Sustainable Development, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 9, s. 169-189.
- Hepbaslı, A. Gunerhan, H. Ulgen, K.** “Enerji Yönetim Sisteminin Altın Anahtarları: Enerji Denklığı ve Enerji Tasarrufu Etüdü, V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi.
- Karakış, E. 2013.** Türkiye 2013 Yıllık Enerji İstatistikleri Raporu, Enerji İstatistikleri Daire Başkanlığı
- Kavak, K. 2005.** Dünya’da Ve Türkiye’de Enerji Verimliliği Ve Türk Sanayiinde Enerji Verimliliğinin İncelenmesi, DPT İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü

Kaya, D. ve Eyidogan, M. 2010. “Energy Conservation Opportunities in an Industrial Boiler System”, J. Energy Engineering, Cilt 136, No 1, s. 18-25.

Kartal, E. 2001. Yanma ve Yanmanın Optimizasyonu, TTMD Dergisi 16

Keenan, J. H. Thermodynamics, 3 Rd. Ed. Wiley, New York

Mançuhan, E. 2009. Analysis And Optimization Of Drying Of Green Bricks İn A Tunnel Dryer, Drying Technology, s. 707-713.

McAllister, S. Chen, J. and Fernandez-Pello, A. C. 2011. Fundamentals of Combustion Processes, 1st Edition. Springer, USA, s. 18-20.

Özgener, L. Hepbaşlı, A. 2003. HVAC Sistemlerinde Ekserji Analizinin Gerekliliği Ve Uygulamaları, Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, Sergisi, İzmir, s. 609-610.

Shukuya, M. Hammache, A. 2002. Introduction to the Concept of Exergy - for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems, Research Notes 2158 VTT Building and Transport, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland

Söğüt, M.Z.2009. Çimento Sektöründe Döner Fırın Prosesinin Eksergoekonomik Optimizasyonu, Balıkesir Üniversitesi, Doktora Tezi Balıkesir

Şenel, A. 2003. Buhar Püskürtmeli Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemlerinin Termoekonomik Optimizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul

Utlu, Z. Hepbaşlı, A. Turan, M. 2011. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, Bir Endüstriyel Kurutucu Fırınının Termodinamik Analizi

Vatandaş, S. Söğüt, Z. Kipoğlu, O. 2015. Endüstriyel Fırınlarda Enerji ve Ekserji Analizi, 6. Enerji Verimliliği Forum ve Fuarı, İstanbul

Wall, J. Cong, M.2001. “An Exergy And Sustainable Development- Part 2; Indicators And Methods”, Exergy Int. J, 1(4), s. 217–233.

Wall, G. 1986. Exergy Flow in industrial processes”, Physical Resource Theory Group, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, s. 412

Yazıcı, N. 2004. Emaye Kaplama Yöntemleri ve Organik Toz Boyalarla Metal Yüzeylerin Kaplanması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Temel Bilimler Fakültesi, s. 9-15.

EK 1

**8th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEES-8), May
1-4, 2016, Antalya, Turkey**

IEEES – 2016 –0256

Emaye Fırınlarda CO2 Emisyon Ölçümleri ile Tersinmezliklerin İncelenmesi

^{1*}Sedat Vatandas, ²Atakan Avcı, ³M.Ziya Söğüt,

¹Enervis Enerji Verimliliği ve Yönetimi Birim Yöneticisi ²Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

³Piri Reis Üniversitesi Denizcilik Fakültesi

E-mail: sedat.vatandas@enervis.com.tr, atakan@uludag.edu.tr, mzsogut@gmail.com

Özet

Türkiye’de enerji kullanımının özellikle sanayide giderek artması, enerji verimliliğine olan ihtiyacı her geçen gün ön plana çıkartmaktadır. Enerjideki dışa bağımlılık, artan enerji maliyetleri ve rekabet unsuru, enerji verimliliğini yeni bir enerji kaynağı şeklinde ele alınması gerekliliği ortaya koymaktadır. Aynı anda, rekabetçiliğin artırılması, enerji maliyetlerinin ve çevresel etkilerin azaltılması sadece enerji verimliliği ile sağlanabilmektedir. Bu çalışmada öncelikle işletmenin yüksek enerji tüketimine sahip bir emaye pişirme fırınının enerji ve ekserji analizi yapılmış ve fırında yapılan iyileştirme çalışmaları değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerde tersinmezlik oranı yaklaşık %88,71 bulunmuştur. Daha sonra, yapılan iyileştirme doğrultusunda emisyon azaltımı ile sağlanan ekonomik tasarruf da incelenmiştir. Çalışmada tersinmezlik’e bağlı CO2 emisyonları bunlardaki değişimler de ayrı ayrı ele alınmıştır. Çalışmanın sonunda, yapılan iyileştirmenin ekserji ve çevresel etkiler değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler; Emaye fırınları, enerji analizi, ekserji analizi, CO₂ emisyonu, tersinmezlik

Abstract

“The increasing use of energy in Turkey, especially in industry, the need for energy efficiency raises to the forefront every day. External dependence on sources of energy, energy costs and competitive factors, addressed the energy efficiency to take into account as a new energy source. At the same time, increasing competitiveness, reducing energy costs and decreasing environmental impacts can be achieved only through energy efficiency. In this study, primarily energy and exergy analysis of enamel oven is made which has a significant energy consumption in the facility then energy efficiency improvements are evaluated. Due to the analysis, exergetic irreversibility found approximately 88.71%. Finally, economic savings provided by emission reductions are evaluated in accordance with improvements. Exergetic irreversibility due to changes in their CO₂ emissions are discussed separately in this study. Exergetic and environmental effects of improvements are assessed.

Keywords:“Enamel Ovens, energy analysis, exergy, analysis, CO2 emissions, irreversibil

I. Giriş

Küresel ısınmanın oluşturduğu tehditlerin gittikçe arttığı günümüzde, çözüm önerileri için birçok çalışma yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucu ortaya koyulan çözüm önerilerinin uygulanabilirliğine ve maliyetlerine bakıldığında enerji verimliliğinin önemi bir kat daha artmaktadır. (sülfür yağmuru, aynalar 2bin m²) Enerji giderlerinin azaltılması ve karbon emisyonlarının azaltılması sadece enerji verimliliği ile sağlanabilmektedir. Enerjinin yaklaşık yarısının kullanıldığı sanayi alanında enerji verimliliğinin sağlanması rekabet gücü ve çevresel etkilerin azaltılması açısından son derece önemlidir. Enerji ihtiyacının ve maliyetlerinin giderek arttığı günümüzde kuruluşların birim ürün enerji maliyetlerini düşürmeden rekabete devam etmeleri olanaksızdır.

Sanayi tesislerinde en önemli enerji tüketicilerinden biri de endüstriyel fırınlardır. Endüstriyel fırınların bulunduğu proseslerde hammaddeden sonra en büyük girdi enerji maliyetidir. Yüksek sıcaklıkta çalışan fırınların önemli miktarda enerjisi faydalı enerjiye dönüştürülmeden kaybedilmektedir. Sanayide ulaşılmak istenen enerji verimliliği hedefleri için endüstriyel fırınlar önemli bir potansiyel taşır. Endüstriyel fırınlarda, kayıpların minimize edilmesi ve ekonomik olarak geri kazanılması endüstriyel tesiste enerji verimliliği sağlayarak kazanç olarak geri dönecektir.

Bu çalışmada, emaye pişirme fırını örnek alınarak mevcut durumu tespit etmek amacıyla, fırına aktarılan enerji ve proses sonrası faydalı enerjiye dönüşen kısım hesaplanarak enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Sonrasında fırının iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Verimlilik artırıcı çalışmalar sonrası enerji ve ekserji analizleri

yenilenerek çalışmalar değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre enerji geri kazanım potansiyeli değerlendirilmiş ve bu potansiyelin kullanılabilmesi için gerekli hususlar tespit edilmiştir.

II. Endüstriyel Fırınlr

Endüstriyel fırınlar, metalurjik üretimlerde ve toprak sektörü üretimlerinde yüksek sıcaklıklarda ergitme, ısıl işlem, temperleme amaçlı çalıştırılmakla birlikte gıda sanayi gibi bazı alanlarda düşük sıcaklıklarda pişirme, kurutma, fermentasyon amaçlı kullanılmaktadır.

Toplam sanayi enerji tüketimi içinde önemli bir paya sahip olan metal ana sanayinde yüksek ısı bölgelerinde çalışan fırınlara örnek olarak;

- Emaye pişirme 600 °C - 1100 °C
- Metallerin ısıl işlemleri 1100 °C
- Haddeleme, ekstrüzyon, presleme gibi ısıl işlemler ve seramik malzemelerin pişirilmesi 1350 °C
- Metallerin ergitme ve izabesi 1700 °C

verilebilir.

Fırınlr ısı üretme metoduna göre elektrikli fırınlar ve yanma(yakıt kullanan) oluşan fırınlar iki ana gruba ayrılabilirler. Yanma oluşan fırınlar, kullandıkları yakıt türlerine göre katı, sıvı ve gaz yakıtlı fırınlar olarak sınıflandırılabilir.

Elektrikli fırınlar, ark fırını ve ya indüksiyon fırını olarak çalışmaktadır. Çalıştırılmasının ve yönetilmesinin kolay olması herhangi bir baca gazı çıkış olmadığından dolayı baca gazı kaybının olmaması avantajları arasında sayılabilir. Ancak yakıtın pahalı olması dezavantaj olarak göze çarpmaktadır. Günümüzde plazma ark, lazer, radyo frekansı, elektromanyetik ısıtma ve ya

kombinasyonları ile ısıtma sağlanabilmektedir.

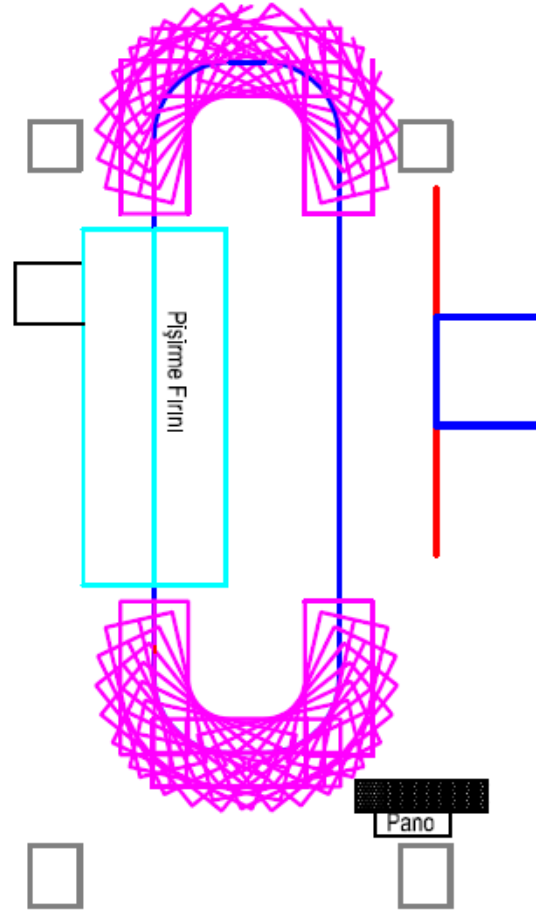
Yakıt kullanılan fırınlarda ısıнын transfer edilme şekline göre, çalışma durumuna göre, ısı geri kazanımının sağlama şekline göre, farklı şekillerde sınıflandırılır.

Endüstriyel fırın tasarımı, maksimum oranda ürüne homojen şekilde ısıнын yayılmasını sağlayacak şekilde yapılması gerekmektedir. Ürünlerde istenilen kalitenin sağlanmasının yanında birim ürün başına harcanan enerjinin sürekli olarak kontrol altında tutulması gerekmektedir.

Fırınlarda, belirlenen sürede mümkün olan en fazla materyali, tüm bölgede aynı sıcaklığın oluşacağı, bunu en az yakıt ve işçilikle sağlayacak şekilde tasarlanmaları enerji verimliliğinin sağlanması için ilk ve en önemli adımdır. Bu durumun sağlanması için tasarım aşamasında aşağıdaki kriterlerin belirlenmesi gerekmektedir;

- Malzemeye ne kadar ısı aktarılacağını belirlenmelidir.
- Kayıplar ve kütlenin ısıtılması için gereken ısıнын belirlenmesi.

Bu hususlar belirlendikten sonra, kayıpların ne kadar minimize edileceği, izolasyon malzemesi olarak ne kullanılacağı, fırın kütlesinin sıcaklığının nasıl dengeleneceği ile ilgili çalışmalar yapılmalıdır.



Çalışma yapılan fırın ısıtma sektöründe kullanılmak üzere üretilen tank ve boyler içine tatbik edilen emayenin pişirilmesi için kullanılmaktadır. Metal şekillendirme, kaynak, yağ alma ve temizleme proseslerinden geçen tank ve boyler emayeleme ve kurutma işlemi sonrası emaye pişirme kutu fırınına alınmaktadır. Ebatlarına göre farklı sayıda tank ve boyler, fırına alınarak 860 °C işleme alınmaktadır.

III. Teorik Analiz

Endüstriyel fırınlar termal proses olarak ele alınırlar ve termodinamiğin birinci ve ikinci yasası kapsamında sürekli akışlı sistemler olarak analiz edilirler. Bu tür sistemlerde enerji ve ekserji analizlerin yapılabilmesi için öncelikle prosese giren ve çıkan maddelerin sıcaklık, özgül ısı kapasitesi ve kütleli debileri ile çevre şartlarının tanımlanması gerekir. Fırınların performans değerlendirilmesinde öncelikle giren ve çıkan maddeler için oluşturulan kütle dengesi (Sogut ve Oktay, 2006);

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Enerji, birinci yasa kapsamında korunur bir özelliktir. Bu durumda fırın için kütleli debi, iş ve ısı etkisiyle oluşan genel enerji dengesi ise;

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\zeta \quad (2)$$

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W} + \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir (Sogut ve Oktay, 2006; Balkan vd., 2005). $\sum \dot{E}_g$ Giren toplam enerji miktarını, $\sum \dot{E}_\zeta$ çıkan toplam enerji miktarını, denklem (3)'te ise; $\dot{Q} = \dot{Q}_{net} = \dot{Q}_g - \dot{Q}_\zeta$ toplam ısı miktarını, $\dot{W} = \dot{W}_{net} = \dot{W}_\zeta - \dot{W}_g$ ise çıkan net iş miktarını ifade eder. "h" ise giren ve çıkan maddelerin entalpi değeridir. Termodinamiğin birinci yasası sistemlerde yöne bağlı bir özellik vermezken sadece enerjinin nicel ölçüsünü tanımlar. Gerçek sistemlerde tersinmezlikler ve çevresel şartların değişmesiyle birlikte enerji kaybederler. Süreçte entropi üretimi olarak değerlendirilen bu durum termodinamiğin ikinci yasasına göre ekserji kavramı ile ifade edilir. Ekserji bir sistemde sahip olduğu çevre koşulları için maksimum iş

yapabilme yeteneği olarak tanımlanır. Bir proseste genel ekserji dengesi (Szargut vd., 1998);

$$E_x = E_{x_k} + E_{x_p} + E_{x_{fiz}} + E_{x_{kim}} \quad (4)$$

Burada E_k kinetik ekserjiyi, E_p potansiyel ekserji, E_{fiz} fiziksel ekserji, E_{kim} kimyasal ekserjiyi ifade etmektedir.

Fırınlar sürekli akış özelliği dikkate alındığında ekserji dengesi;

$$\sum \dot{E}_{x_g} - \sum \dot{E}_{x_\zeta} = \sum \dot{I} \quad (5)$$

dir (Söğüt, 2005). $\sum \dot{E}_{x_g}$ giren ekserjiyi,

$\sum \dot{E}_{x_\zeta}$ çıkan ekserjiyi, $\sum \dot{I}$ ekserji yıkımını tanımlar. Bu sistemlerde potansiyel, kinetik ve kimyasal ekserjiler ihmal edilmesi durumunda genel ekserji dengesi ;

$$\sum (1 - \frac{T_0}{T_1}) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\zeta \psi_\zeta = \sum \dot{I} \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\dot{Q}_k$, $\dot{T}_k$ ürün sıcaklığında sistem sınırlarından geçen ısı transfer oranı, $\dot{W}$ iş miktarı, ψ akış ekserjisi, s entropi, 0 indisi ise çevrenin ölü hal (P_0 ve T_0) şartlarındaki durumu ifade etmektedir. Bu durumda kütle ve materyal akışının ekserjisi;

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (7)$$

dir. Sistemlerde performans değerlendirmesi verimlilik ile tanımlanır. Verimlilik kısaca sistemlerde elde edilen çıktının girdiye oranı olarak tanımlanır. Birinci yasa kapsamında yapılan analizlere bağlı olarak prosesin enerji verimliliği;

$$\eta_i = \frac{\sum \dot{E}_\zeta}{\sum \dot{E}_g} \quad (8)$$

denklemleriyle bulunur. Burada $\sum \dot{E}_g$ prosessten çıkan toplam enerjiyi, $\sum \dot{E}_g$ prosese giren toplam enerjiyi gösterir. Prosesin ekserji verimliliği ise

$$\eta_{ii} = \frac{\sum \dot{E}_{x_g}}{\sum \dot{E}_{x_g}} \quad (9)$$

denklemleri ile hesaplanır (Cornelissen 1997). Termal sistemlerde enerji kayıplarının yol açtığı CO₂ emisyonu, kullanılan yakıt türüne ve atık enerji potansiyelinin bağlıdır. Emisyon miktarı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$CO_2 = \frac{\omega_{CO_2} \sum \dot{Q}_w}{\eta_{ii}} \quad (10)$$

Bu ifade de ω_{CO_2} birim enerji CO₂ emisyon faktörü, ve $\sum \dot{Q}_w$ ise toplam atık enerji miktarıdır. Atık enerjinin geri kazanılabilme potansiyeli olan çalışmalarda, endüstriyel fırının neden olduğu toplam CO₂ emisyonu dikkate alınmalıdır. Bundan dolayı toplam CO₂ emisyonu ($\sum CO_2$) 11 nolu denklemde ifade edilmiştir.

$$\sum CO_2 = CO_{2,i} + \Delta CO_{2,j} = \left(\frac{\omega_{CO_2,i} \sum \dot{Q}_{w_i}}{\eta_{ii}} \right) + \left(\frac{\omega_{CO_2,j} \sum \dot{Q}_{w_j}}{\eta_{ij}} \right) (1 - \psi_{Ri}) \quad (11)$$

Bu denklemde $\sum \dot{Q}_w$ toplam enerji (çalışmada iyileştirme potansiyeli üzerinden hesaplama yapılmıştır), ψ ise rasyonel ekserji verimidir. ψ çevre sıcaklığının, fırın giriş ve atık ısı sıcaklığının fonksiyonudur.

Bir prosesin ve ya sistemin ekserji veriminin maksimum hale getirilmesi için, ekserji kaybı ve ya tersinmezliğin ($\dot{E}_{x_{in}} - \dot{E}_{x_{out}}$) minimize edilmesi gerekliliği

Van Gool tarafından belirtilmiştir. Sonuç olarak, farklı prosesleri veya ekonomide sektörleri analiz ederken 'iyileştirme potansiyeli' kavramını kullanmanın yararlı olduğunu öngörmüştür.

Hammond ve Stapleton iyileştirme potansiyelini IP olarak ifade ederek denklem 12'de oran formunda belirlemiştir.

$$IP = (1 - \eta) (\sum \psi_g - \sum \psi_c) \quad (12)$$

IV. Enerji ve ekserji analizler

Model alınan emaye pişirme fırınının öncelikle kütle dengesi sağlanarak öncelikle enerji analizleri ve referans alınan çevre koşullarına göre ekserji analizi yapılmıştır.

Tablo 1.

Giren maddeler				
Madde	M	T1	Cp	Δh
	kg/h	K	kJ/kgK	kJ/h
Tank	279,28	293	0,434	35513,31
Doğal gaz	40,2	293	1,89	1387945
Hava	35,7	293	1,007	10435,17
Emaye	2,07	293	0,35	212,21
Elektrik				4,3
Toplam	357,25			1434110
Çıkan maddeler				
Madde	M	T1	Cp	Δh
	kg/h	C	kJ/kgK	kJ/h
Tank	279,28	1133	0,434	137326,2
Baca gazı	77,64	923	1,55	111070,9
Toplam	356,91			248397,1

Yapılan bu analizlere göre fırının enerji verimliliği eşitlik 8'den yararlanılarak fırından çıkan madde enerji miktarının fırına giren enerji miktarına oranı olarak tanımlanır. Buna göre fırının enerji verimi %17,3 bulunmuştur.

$$\eta_{ii} = \frac{\sum m_c h_c}{\sum m_g h_g} = \frac{248397,1}{1434110} = 0,173$$

Gerçek fırın prosesler için bulunduğu çevre koşulları verimliliği doğrudan etkiler. Bu yönüyle termodinamiğin ikinci yasasına bağlı ekserji analizleri önem kazanır. Ancak ekserji analizleri için öncelikle çevre parametrelerinin tanımlanması gerekir. Fırının bulunduğu koşullar için çevrenin referans basıncı (P_0) 1 atm. Sıcaklığı 25 °C alınmıştır. Ekserji analizleri için fırın yönüyle bazı kabuller yapılmıştır. Buna göre; fırına giren ve çıkan maddelerin entalpi ve entropi özellikleri üzerinde basıncın etkisi ihmal edilmiştir. Fırına giren ve çıkan madde akışlarında gazlar, ideal gaz karışımı olarak ele alınmıştır. Fırın sürekli akış halindedir ve fırına giren ve çıkan maddelerin kimyasal, kinetik ve potansiyel enerjiye ilişkin ekserji değerleri ihmal edilmiştir. Kabullere göre fırının ekserji analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2.

Giren maddeler						
Madde	M	T1	Cp	Δh	Δs	ψ
	kg/h	C	kJ/kgK	kJ/h	kJ/K	kJ/h
Tank	279,2761	293	0,434	35513,31	8,569	33173,87711
Doğal gaz	40,2	293	1,89	1387945	5,372	1386478,724
Hava	35,36733	293	1,007	10435,17	2,518	9747,755379
Emaye	2,06932	293	0,35	212,21	0,051	198,2307858
Elektrik				4,3	0	4,3
Toplam	356,9128			1434110	16,51027	1.429.602,89
Çıkan maddeler						
Madde	M	T1	Cp	Δh	Δs	ψ
	kg/h	C	kJ/kgK	kJ/h	kJ/K	
Tank	279,28	1133	0,434	137326,2	172,4968	90234,5888
Baca gazı	77,64	923	1,55	111070,9	146,5955	71050,2978
Toplam	356,91			248397,1	319,0923	161.284,89

Fırının ekserji verimi, fırından çıkan maddelerin toplam ekserjisinin giren maddelerin toplam ekserjisine oranı olarak tanımlanır. Buna göre fırının ekserji verimi;

$$\eta = \frac{\sum \dot{E}_{X_c}}{\sum \dot{E}_{X_g}} = \frac{1429602,89}{161284,89} = 0,1128$$

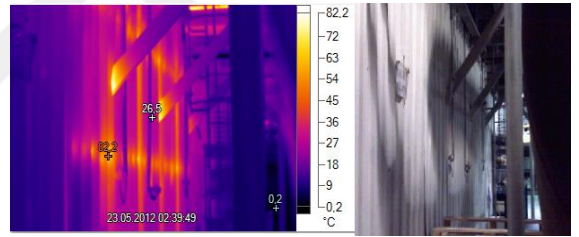
bulunmuştur.

Analizler sonuçlarına göre fırın verimliliğin çok düşük olduğu tespit edilmiş ve nedenleri araştırılmıştır. Nedenlere bakıldığında fırın yüzey alanlarındaki ısı kayıplarının çok olması, yakma sisteminin verimsiz olması ve malzemeye göre optimum tasarımın olmadığı görülmüştür. Aynı zamanda atık ısının değerlendirilmesi gerekliliği de değerlendirilmiştir.

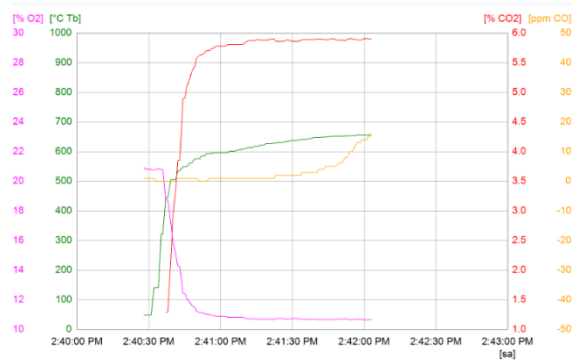
Resim 1. İzolasyon kayıpları



Resim 2. İzolasyon kayıpları



Grafik 1.

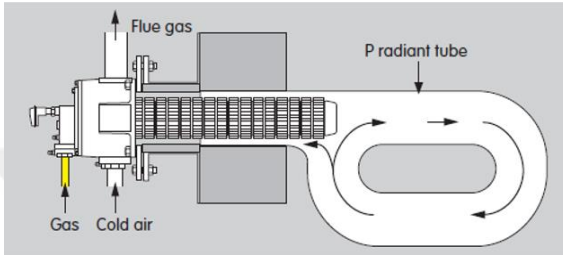


Bu bilgiler doğrultusunda fırın yakma sistemi değiştirilerek 8 adet konvansiyonel brülör yerine 6 adet reküperatif brülör kullanılmıştır. Aynı zamanda değiştirilen yakma sistemine uygun şekilde kontrolün sağlanması için fırın panosu da yenilenmiştir.

Fırın izolasyon sistemi kayıp kaçağı engelleyecek şekilde yenilenmiştir.

Rekuperatif brülör ile atık ısının düşürülmüş olmasına rağmen atık ısının azami seviyede kullanılması amacıyla yağ alma prosesinin olduğu banyo bölümü suyunun ısıtılması için ekonomizer kullanılmıştır.

Resim 3. Reüperatif brülör



Resim 4. Fırın içi yerleşim



Yapılan çalışmalar sonrasında enerji ve ekserji analizleri yenilenmiştir.

Tablo 3.

Giren maddeler				
Madde	M	T1	Cp	Δh
	kg/h	C	kJ/kgK	kJ/h
Tank	449,9449	293	0,434	57215,8883
Doğal gaz	26,8	293	1,89	925296,8
Hava	58,49283	293	1,007	17258,3685
Emaye	3,10398	293	0,35	318,313149
Elektrik				4,3
Toplam	538,3417			1.000.094
Çıkan maddeler				
Madde	M	T1	Cp	Δh
	kg/h	C	kJ/kgK	kJ/h
Tank	449,945	1133	0,434	221247,786
Baca gazı	88,397	923	1,55	126464,899
Toplam	538,342			347.713

Yapılan bu analizlere göre fırının enerji verimliliği eşitlik 8'den yararlanılarak fırından çıkan madde enerji miktarının fırına giren enerji miktarına oranı olarak tanımlanır. Buna göre fırının enerji verimi %35 bulunmuştur.

Tablo 4.

Giren maddeler						
Madde	M	T1	Cp	Δh	Δs	ψ
	kg/h	C	kJ/kgK	kJ/h	kJ/K	kJ/h
Tank	449,9449	293	0,434	57215,89	13,806	53446,80
Doğal gaz	26,8	293	1,89	925296,8	3,581	924319,15
Hava	58,49283	293	1,007	17258,37	4,164	16121,48
Emaye	3,10398	293	0,35	318,3131	0,077	297,34
Elektrik				4,3		4,3
Toplam	538,3417			1000094	21,629	994.189,07
Çıkan maddeler						
Madde	M	T1	Cp	Δh	Δs	ψ
	kg/h	C	kJ/kgK	kJ/h	kJ/K	kJ/h
Tank	449,945	1133	0,434	221247,8	277,908	145379,0063
Baca gazı	88,397	923	1,55	126464,9	166,906	80899,58467
Toplam	538,342			347712,7	444,814	226.278,59

Yapılan bu analizlere göre fırının ekserji verimliliği eşitlik 9'dan yararlanılarak % 22,73 bulunmuştur.

V. CO₂ Emisyon Ölçümleri

Yapılan çalışmalar sonucunda ekserji verimleri sırasıyla %11,28 ve %22,73 bulunmuştur.

Denklem 12' den yararlanarak fırın iyileştirme potansiyeli (IP) proje öncesi 1.125.229, proje sonrası ise 594.060 olarak belirlenmiştir. Denklem 10 kullanılarak aşağıdaki tablo hazırlanmıştır.

Tablo. 5

CO2 Emisyon	Ekserjetik Verim	İyileştirme Potansiyeli	CO2 Emisyon Faktörü	CO2 (kg CO2/h)
İyileştirme Öncesi	11,28%	1.125.229	0,2	1.995.087
İyileştirme Sonrası	22,73%	594.060	0,2	522.710

İyileştirme öncesi ve sonrası CO₂ miktarları üzerinden

$$(CO_{2iö} / CO_{2is})/CO_{2iö}$$

denklemini ile %74 oranında CO₂ bir tasarruf potansiyeli belirlenmiştir.

VI. Sonuç ve Değerlendirmeler

Yapılan çalışmalarda, enerji verimliliği projelerinin, enerji üretme projelerinden daha kısa sürede kendisini ödediği görülmektedir. Bu yüzden işletmelerin enerji verimliliği projelerini sürekli olarak düşünmeleri ve sistematik olarak bu projeleri gerçekleştirmesi gerekmektedir. Enerji verimliliği çalışmalarında, enerjinin yoğun olarak kullanıldığı proseslere odaklanılması yüksek oranda enerji verimliliği elde edilmesini sağlayabilmektedir.

Yapılan çalışmada işletmede önemli tüketici olarak tespit edilen emaye pişirme fırını incelenmiştir. Öncelikle kayıp ve kaçaklar tespit edilmiş sonrasında ise teknolojik gelişmeler doğrultusunda fırının verimi artırılmıştır. Birim zamanda daha fazla üretimi sağlayabilmek için fırın yüksekliği artırılmış ve proses başına daha önce 2 adet 1.000 lt 'lık boylerler pişirme işlemine tabi tutulurken iyileştirme sonrası 3 adet boyler pişirilmektedir. Ayrıca teknolojik

gelişmelere bağlı olarak, fırın yakıt sistemi değiştirilmiştir.

Fırının, proje öncesi enerji ve ekserji verimi ile proje sonrası enerji ve ekserji verimi arasında yaklaşık iki kat bir değer artışı görülmektedir. Aynı şekilde emaye pişirme fırını iyileştirme potansiyeli iki kat azalmıştır. Ekserji verime bağlı CO₂ emisyonu ise dört kat azalmıştır.

Ayrıca fırında yapılan tasarımsal değişikle birim zamanda daha fazla üretim sağlanarak, birim üretim başına CO₂ azalımı gerçekleşmiştir. Bu durum, enerji verimli tasarımının da enerji verimliliğinde ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Referanslar

- Balkan, F., Colak N., Hepbasli, A., Performance evaluation of a triple-effect evaporator with forward feed using exergy analysis, Int. J. Energy Res. 29 (2005) 455-470.
- Chen X., Zhang Y., Zhang S., Chen Y., Liu S., Exergy analysis of iron and steel eco-industrial systems The third international Exergy, energy and Environment symposium
- Cornelissen R.L., Thermodynamics and sustainable development: The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility, Ph.D thesis, University of Twente, The Netherlands, 1997.
- G.P. Hammond, A.J. Stapleton, Exergy analysis of the United Kingdom energy system, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, 215 (2) (2001) 141–162.
- Hazi A., Badea A., Hazi Gh., Necula H., Grigore R., Exergy Evaluation of Renewable Use in the Pulp and Paper Industry, Paper accepted for presentation at 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th-July 2nd, Bucharest, Romania
- <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=httpA2F2Fieeexplore.ieee.org2Fie52F52718562F52817812F05281935.pdf3Farnumber3D5281935&authDecision=-203>
- http://www.beeindia.in/energy_managers_auditors/documents/guide_books/2Ch4.pdf
- Utlü Z., Hepbasli A., Turan M., Thermodynamic analyses of a Industrial dryer mill, X National Sanitary Engineering congress, 13/16 April 2011, İzmir/Turkey

Söğüt M. Ziya, Çimento fabrikasında enerji taraması ve üretim hattı ısı proseslerinde enerji ve ekserji analizi yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Mayıs, 2005

Söğüt Z., Oktay Z. Karakoç H., “Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln” Applied Thermal Engineering 30 (2010) 817–825

Szargut, J., Morris, D.R., Steward, F.R., Exergy Analysis of Thermal and Metallurgical Processes, Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

Tübitak TTGV Bilim Teknoloji Sanayi Tartışmaları Enerji Teknolojileri Politikası

W.Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, R. J. Reed, J. R. Garvey ”Industrial Furnaces” Sixth Edition



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sedat VATANDAŞ
Doğum Yeri ve Tarihi : İzmir.28.09.1982
Yabancı Dili : İngilizce (İyi), Almanca (Başlangıç)

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : İzmir Şemikler Lisesi 2000
Lisans : Uludağ Üniversitesi 2005

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Enervis Enerji Servis San. Ve Tic. A.Ş (2013-...)
BEBKA(2010-2013)
Mako Elektrik San. Ve Tic. A.Ş (2007-2010)
Atalan Makine Ltd. Şti. (2006-2007)

İletişim (e-posta) : sdtvatandas@gmail.com

Yayınları :

Avcı, A. Söğüt, Z. Vatandaş, S. 2016. Emaye Pişirme Fırını Verimlilik Projesi Enerji Ve Ekserji Analizlerinin Gerçekleştirilmesi, 8. Uluslararası Ekserji, Enerji ve Çevre Sempozyumu, Antalya

Vatandaş, S. Söğüt, Z. Kipoğlu, O. 2015. Endüstriyel Fırınlarda Enerji ve Ekserji Analizi, 6. Enerji Verimliliği Forum ve Fuarı, İstanbul

Vatandaş, S. Yıldız, S. Kipoğlu, O. İnciroğlu, E. 2014. Tekstil Sektöründe Enerji Verimliliği, 14. AUTEX Dünya Tekstil Konferansı, Bursa

Vatandaş, S. Kipoğlu, O. İnciroğlu, E. 2014. Sanayide Aydınlatmanın Önemi, 5. Enerji Verimliliği Forum ve Fuarı, İstanbul