

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ BİLİM DALI**

BİR ISIL İŞLEM FIRINININ TERMODİNAMİK ANALİZİ

Gülay Ahu TURGUTLU

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Ali YURDDAŞ**



MANİSA-2015

TEZ ONAYI

Gülay Ahu TURGUTLU tarafından hazırlanan "**BİR ISIL İŞLEM FIRINININ TERMODİNAMİK ANALİZİ**" adlı tez çalışması 05/11/2015 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Ali YURDDAŞ
Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Hakan BOYACI
Celal Bayar Üniversitesi

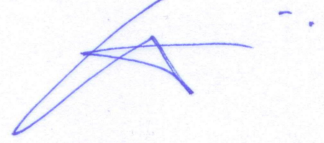
Jüri Üyesi

Prof. Dr. Yunus ÇERÇİ
Adnan Menderes Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Gülay Ahu TURGUTLU



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	II
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLO DİZİNİ	VI
TEŞEKKÜR.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ	1
2. SİSTEMİN TANIMI.....	7
2.1. Araştırmanın Yeri.....	7
2.2. Sementasyonun Tanımı	7
2.3. Atmosfer Kontrollü Fırının Özellikleri	8
2.4. Atmosfer Kontrollü Fırın İle Sementasyon Süreci.....	15
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	19
4. SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ	24
4.1. Sistem Kabulleri	24
4.2. Kütle Denklikleri	28
4.3. Enerji Denklikleri	31
4.4. Ekserji Denklikleri	35
4.5. Kütle Denklikleri Çözümü	38
4.6. Enerji Denklikleri Çözümü	39
4.7. Ekserji Denklikleri Çözümü.....	43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	51

SİMGELER DİZİNİ

A	Yüzey Alanı, m ²
C	Özgül Isı, kJ/kg K
Ex	Ekseji, kJ
<i>E_x</i>	Ekserji , kW
<i>e_x</i>	Molar Ekserji, kJ/kmol
E	Enerji, kJ
<i>E</i>	Enerji Transferi, kW
g	Yer Çekimi İvmesi, m/s ²
Gr	Grashof sayısı
H	Taşınım İle Isı Transferi Katsayısı, W/m ² K
h	Özgül Entalpi, kJ/kg
<i>h</i>	Molar Entalpi, kJ/kmol
HY	Yanma Havaının Yakıtı Kütleli Oranı
k	Isıl İletim Katsayısı, W/m ² K
L	Karakteristik uzunluk, m
M	Mol Kütleli, kg/kmol
m	Kütle, kg
<i>m</i>	Kütleli Debi, kg/s
Nu	Nusselt Sayısı
n	Mol sayısı
<i>n</i>	Molar Debi, kmol/s
P	Basınç, kPa
p	Çevre Uzunluğu, m
Pr	Prandtl Sayısı
<i>R</i>	Üniversal Gaz Sabiti, kJ/kmol K
Q	Isı Enerjisi, kJ
<i>Q</i>	Isı Transferi, kW
Ra	Rayleigh Sayısı
<i>Ra_L</i>	Karakteristik Uzunluğa Göre Rayleigh Sayısı
<i>S</i>	Entropi, kW/ K
<i>s</i>	Molar Entropi, kJ/kmol K
T	Sıcaklık, K
t	Zaman, s
ÜY	Yanma Ürünlerinin Yakıtı Kütleli Oranı

V	Hacim, m ³
\dot{V}	Hacimsel Debi, m ³ /s
y	Mol Kesri

Yunan Alfabeti

β	Termal Genleşme Katsayısı, 1/K
ϵ	Yayıcılık Katsayısı
v	Kinematik Viskozite, m ² /s
ρ	Özgül Kütle, kg/m ³
ϕ	Kimyasal Ekserji Katsayısı
η	Verimlilik
σ	Stefan-Boltzmann Sabiti, W/m ² K ⁴
λ	Hava Yakıt Molar Oranı

Alt İndisler

I	1. Yasa
II	2. Yasa
a	Aparat
bg	Baca Gazı
dg	Doğal Gaz
ç	Çıkan
d	Diğer Kayıplar
eg	Endogaz
g	Giren
h	Hava
ı	Işınım
k	Kayıp
KH	Kontrol Hacmi
p	Parça
t	Taşınım
ü	Yanma Ürünü
y	Yüzey
0	Çevre Koşulları

Üst İndisler

e Çevre

fiz Fiziksel

kim Kimyasal

KISALTMALAR LİSTESİ

AKF Atmosfer Kontrollü Fırın

KE Kinetik Enerji

LHV Yakıt Alt Isıl Değeri, kJ/kg

PE Potansiyel Enerji kJ

SG Spesifik Gravite kJ

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Atmosfer Kontrollü Fırın Kesit - Yan Görünüş.....	10
Şekil 2.2 Atmosfer Kontrollü Fırın Kesit – Ön Görünüş.....	11
Şekil 2.3 Batı Isıl İşlem Sementasyon Süreci İş Akış Adımları	16
Şekil 2.4 AKF Isıtma Bölümü Sementasyon Süreci Sıcaklık-Süre Grafiği.....	17
Şekil 4.1 AKF Alt Yüzey Termal Kamera Görüntüsü.....	27
Şekil 4.2 AKF Dış Kapak Termal Kamera Görüntüsü	27
Şekil 4.3 AKF Sağ Yüzey Termal Kamera Görüntüsü.....	27
Şekil 4.4 AKF Sol Yüzey Termal Kamera Görüntüsü.....	27
Şekil 4.5 AKF Isıtma Bölümünün Kontrol Hacminin Kütle Akışı Şematik Gösterimi	28
Şekil 4.6 AKF Isıtma Bölümünün Kontrol Hacminin Enerji Akışı Şematik Gösterimi	32
Şekil 5.1 Enerji Akış Diyagramı	48
Şekil 5.2 Ekserji Akış Diyagramı	48

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1 AKF Yüzey Alanları.....	12
Tablo 2.2 Endo Gaz İçeriği.....	12
Tablo 3.1 Isıl İşlem Gören Aparat ve Malzeme Özellikleri.....	19
Tablo 3.2 Doğal Gaz Tüketimi ve Zaman.....	20
Tablo 3.3 1. Ölçüm Yüzey Sıcaklıkları Raporu.....	21
Tablo 3.4 2. Ölçüm Yüzey Sıcaklıkları Raporu.....	22
Tablo 3.5 3. Ölçüm Yüzey Sıcaklıkları Raporu.....	23
Tablo 4.1 Doğal Gaz Kompozisyonu.....	26
Tablo 4.2 Nusselt Sayısı Hesaplama Tablosu.....	34
Tablo 4.3 Kuru Havanın Bileşenlerinin Hacimsel Olarak Oranı.....	36
Tablo 4.4 Nemli Havanın Bileşenleri Ve Yanma Gazının Bileşenleri.....	37
Tablo 4.5 Doğal Gazın Özellikleri.....	38
Tablo 4.6 Kütle Değerleri Tablosu.....	39
Tablo 4.7 Yanma Özellikleri Tablosu.....	39
Tablo 4.8 Sıcaklık Ölçümü Ortalamaları.....	40
Tablo 4.9 Isıl İşlem Gören Parça Ve Aparatların Isı Kapasiteleri Tablosu.....	40
Tablo 4.10 Baca Gazının Bileşenlerinin Moleküler Ağırlıkları, entalpileri ve Entropileri.....	40
Tablo 4.11 Endo Gaz Bileşenlerinin Moleküler Ağırlıkları, Entalpileri ve Entropileri.....	41
Tablo 4.12 Enerji Değerleri Tablosu.....	42
Tablo 4.13 Ekserji Değerleri Tablosu.....	44
Tablo 5.1 Ölçüm Günlerine Göre Enerji Verimi, Ekserji Verimi ve Ekserji Yıkımı Oranları.....	45
Tablo 5.2 Toplam Enerji Verimi, Ekserji Verimi ve Ekserji Yıkımı Oranı.....	46

TEŞEKKÜR

Öncelikle evimi, mutlu bir yuva yapan eőim Timuçin Turgutlu'ya ve oğlum Tibet Turgutlu'ya sonsuz teőekkürler.

Tez danıőmanım, Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Ali YURDDAŞ' a bana olan güveni ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Hakan BOYACI' ya bana olan güveni ve akademik kariyerimdeki desteklerinden dolayı őükranlarımı sunarım.

Batı Isıl İşlem San. Ltd. A.Ő. firmasına ve işletme müdürü Sayın İlker SEYMEN' e ve Kalite Müdürü Sayın Elif NUMAN KINALI' ya firmalarının kapılarını tez çalışmam için sonuna kadar açtıkları için teşekkür ederim.

Analizlerimde ölçüm cihazı desteklerinden dolayı İZÇEV Çevre Koruma Hizmetleri İnő. San. ve Tic. A.Ő. firmasına ve firma işletme müdürü Sayın Barıő ÖZEL ve firma çalışanları Sayın Metin SALAR ve Sayın Necdet ARIKAN' a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Bir Isıl İşlem Fırınının Termodinamik Analizi

Gülay Ahu TURGUTLU

Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ali YURDDAŞ

Günümüzde küresel anlamda enerji ihtiyacı sürekli olarak artması ile birlikte verimsiz şekilde kullanılan yenilenemez enerji kaynakları da hızla tükenmektedir. Azalan enerji kaynakları ve artan talep dengesizliği nedeni ile de enerji maliyetleri artmaktadır. Bununla birlikte fosil yakıtların enerji kaynağı olarak kullanılması ile artan karbon salınımı, küresel ısınmanın etkilerini arttırmaktadır.

Yerel kaynaklarla karşılanamayan enerji talebi ülkemizde de önemli dar boğazlara sebep vermektedir. 2014 verilerine göre doğal gaz tüketiminin sadece %1,7'sinin yurt içinde üretilmesi enerjide dışa bağımlılığımızın önemli bir göstergesidir.

Küresel ve yerel anlamdaki ekonomik ve çevresel sıkıntılar alternatif enerji arayışlarının yanı sıra özellikle enerji yoğun sektörlerde enerjinin verimli kullanılmasının ne derece önemli olduğuna işaret etmektedir. Bu sebeple bu çalışmada enerji yoğun sektörlerden biri olan bir ısıtma işlem firmasında, enerji kaynağı olarak doğal gaz kullanan atmosfer kontrollü bir ısıtma işlem fırınında termodinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada atmosfer kontrollü fırının kütle, enerji ve ekserji denklilikleri tanımlanıp, enerji ve ekserji verimleri tespit edilmiştir.

Enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %25,52 ve %19,99 elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde ısıtma geri kazanım yöntemleri ile baca gazının değerlendirilmesine ve aparatın ısıtma kapasitesi daha düşük bir malzeme seçilmesine karar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Ekserji, Atmosfer Kontrollü Fırın, Fırın, Isıtma İşlem

2015, 51 sayfa.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Thermodynamic Analysis of A Heat Treatment Furnace

Gülay Ahu TURGUTLU

**Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Ass. Prof. Dr. Ali YURDDAŞ

With the increase of energy need on our globe, non-renewable energy resources are being rapidly consumed. On account of the reduction of energy sources and the increase of energy demand, energy costs increase. Moreover, carbon emissions increase by the utilization of fossil fuels and as a result, effects of global warming increase.

Energy demand that can not be fulfilled by local resources has great negative effects for Turkish economy. One of the important index of foreign source dependency of our country is the local production rate of natural gas which is only 1.7% of the consumption according to 2014 data.

Investigation for alternative energy resources for both globally and locally has become very important. On the other hand, economical and environmental effects refer to how utilization of energy efficiently is important especially at energy intensive industries. Therefore, a sealed quench furnace which is operated by natural gas at a heat treatment company is thermodynamically analyzed in this thesis. Mass, energy and exergy equations of the sealed quench furnace are defined and efficiencies of energy and exergy are performed.

Energy and exergy efficiencies are found %25,52 and %19,99 respectively. With respect to the findings; it is determined to evaluate energy of flue gas by heat recovery techniques and select apparatus material which has lower heat capacity.

Key Words: Energy, Exergy, Sealed Quench Furnace, Furnace, Heat Treatment

2015, 51 pages.

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel anlamda enerji ihtiyacı sürekli olarak artması ile birlikte verimsiz şekilde kullanılan yenilenemez enerji kaynakları da hızla tükenmektedir. Azalan enerji kaynakları ve artan talep dengesizliği nedeni ile de enerji maliyetleri artmaktadır. Bununla birlikte fosil yakıtların enerji kaynağı olarak kullanılması ile artan karbon salınımı, küresel ısınmanın etkilerini arttırmaktadır. Tüm bu ekonomik ve çevresel faktörlerden dolayı enerji yönetimi konusunun önemi hızla artmaktadır.

Termodinamiğin birinci yasasını, enerjinin korunumunu, temel alan enerji yönetimi çevresel atıkları azaltmaya ve enerji verimliliğini %15'e kadar arttırmaya imkan tanımaktadır [1]. Daha yüksek seviyede enerji tasarrufu yapabilmek için termodinamiğin ikinci yasasını yani ekserji dengesini tanımlamak gerekmektedir.

Literatürde enerji yoğun sektörlerde, demir-çelik üretim tesislerinde, perlit genleştirme fırınlarında, seramik üretim tesislerinde, alüminyum ergitme fırınlarında ekserji araştırmaları yapılmıştır. Bunun yanı sıra katı atıktan enerji elde etme, hidrojen üretimi tesisleri ve ısı geri kazanımı ile enerji elde etme yöntemlerinin de ekserji açısından incelendiği çalışmalar bulunmaktadır.

Bisio, G. (1996) yüksek fırınlarda, cüruftan elde edilen cam içeren granüllü bir ürünün atık ısını değerlendirme üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmada atık ısının buhara dönüştürülmesi ve buhardan elektrik enerjisi elde edilmesi veya atık ısının yanma havasını ısıtmak için kullanılması üzerine durulmuştur [2].

Bisio, G. ve arkadaşları (2000) ultra yüksek güçte elektrik ark ocaklarının enerji ve ekserji denklemlerini çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmayı iki ayrı şekilde analiz etmişlerdir. Ultra yüksek güçteki elektrik ark ocaklarında kullanılan soğutma sistemlerinde çekilen ısının, doğrudan atmosfere atılması ve etkin bir şekilde değerlendirilmesi durumlarındaki enerji ve ekserji verimliliklerini kıyaslamışlardır. Çekilen ısının doğrudan atmosfere atılması durumunda enerji ve ekserji verimliliklerini sırasıyla %73 ve %52, çekilen ısının etkin bir şekilde değerlendirilmesi durumunda ise enerji ve ekserji verimliliklerini sırasıyla %81 ve %55 olarak tespit etmişlerdir [3].

Çamdalı ve arkadaşları (2001) çelik üreten bir fabrikada pota fırınına, termodinamiğin ikinci yasa analizine göre incelemişlerdir. Çalışmalarında ekserji verimliliğini %45 ile %58 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Ergimiş çeliğin farklı sıcaklık aralıklarının, üretim sürelerinin ve baca gazı sıcaklıklarının ekserji verimliliğine etkisini incelemişlerdir. Baca gazı sıcaklığının 1400 K ile 1850 K arasındaki değişiminin ekserji verimliliği üzerinde %0,4 oranında küçük bir artışa sebep verdiğini raporlamışlardır. Buna karşılık çeliğin 1820 K ile 2000 K sıcaklıkları arasındaki değişimi ekserji verimliliğinde %13 oranında artışa, üretim süresinin 20 ile 70 dakika arasındaki değişimi ise ekserji verimliliğinde %2 düşüşe neden olmaktadır[4].

Petela, R. ve arkadaşları (2002) kok fırını ve yüksek fırından oluşan demir üretim sürecini CO₂ emisyonu, enerji ve ekserji tüketimi açısından incelemişlerdir. Çeşitli kömür tipleri için birim demir üretimi başına CO₂ emisyonunu, enerji ve ekserji tüketimini tespit etmişlerdir. Düşük uçuculu kömür kullanımı ve oksijen ile patlamanın zenginleştirilmesi ile CO₂ emisyonunun, enerji ve ekserji tüketiminin düşük olması sağlanmıştır [5].

Çamdalı, Ü. ve Tunç, M. (2003) çelik üretim prosesinde 55 ton kapasiteli AC elektrik ark fırınının optimum tasarım parametreleri ve işletme koşulları için ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, toplam ekserji kaybını %44,5 olarak tespit etmişlerdir ve bu kayıpların sebebinin kimyasal reaksiyon, ısı transferi ve diğer sebeplerden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yaptıkları kıyaslamada ekserji kayıplarının literatürdeki çalışmalarına göre %14,5 daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra, AC elektrik ark fırınının enerji verimini %96, ekserji verimini ise %55 olarak hesaplamışlardır [6].

Ostrovski ve arkadaşları (2005) yüksek fırınlarda demir üretimi ve doğrudan demir ergitme fırınlarının enerji ve ekserji denklemlerini tanımlamışlardır. Enerji verimliliği için baca gazının değerlendirilmesinin önemini vurgulamışlardır. Baca gazı etkin şekilde değerlendirilemediğinde ise ısı transferi verimini arttırmak ve ön-yanma oranı, yakıt verimini arttırmak için önemli duruma gelmektedir [7].

Taniguchi ve arkadaşları (2005) çalışmalarında yanmanın ekserji analizini ve enerji dönüşüm proseslerini incelemişlerdir. Çalışmalarında güç üretimi için ısı pompası, kazan ve yanma proseslerindeki enerji ve ekserji dengeleri ile ilgili örnekler vermişlerdir. Yaptıkları incelemede bir termik santralde, maksimum ekserji kaybının yanma ve ısı transferi ile %46

oranında ve en fazla enerji kaybının yoğunlaşma prosesinde %46 olarak gerçekleştiğine değinmişlerdir [8].

Min, Y. ve Jiang, M. (2010) enerji verimliliğini arttırmak için modern çelik üretimi için kullanılan pota fırınının enerji ve ekserji denklüklerini çıkarmışlardır. Prosesi kısaltmak elektrik fırınının enerji verimini %14,84 arttırırken, ısı ile kaybolan ekserjiyi ton başına 19,455 MJ'dan 11,066MJ'a düşürmüşlerdir [9].

Kalıncı, Y. ve arkadaşları (2011) atıkları gaza dönüştürerek, yüksek enerji yüklü sentez gazı elde etmeye yarayan plazma gazlaştırma sistemini ekserjoekonomik açıdan incelemişlerdir. Çalışmalarında plazma gazlaştırma sisteminin, plazma gazlaştırma fırınının, gaz temizleme sürecinin, sentez gazı kompresörünün, iki adet ısı eşanjörünün ve basınç salınlı adsorpsiyon prosesinin spesifik ekserji maliyeti cinsinden incelemesini yapmışlardır [10].

Chen, B. ve arkadaşları (2012) metandan buhar reformasyonu ile hidrojen eldesini ekserji verimi ve CO₂ emisyonu etkileri açısından incelemişlerdir. İncelemelerinde reformasyon sıcaklığının ve buhar/karbon oranının ekserji üzerine etkilerini değerlendirmişlerdir. İnceledikleri sistem; reaksiyon alt sistemi, yedi ısı eşanjörü içeren ısı eşanjörü ağı, fırın ve basınç salınlı adsorpsiyon sisteminin yer aldığı ayırma alt sistemini içeren dört alt sistemden oluşmaktadır. Chen, B. ve arkadaşları reformasyon basıncını ve buhar/karbon oranını optimum değerlerde sabit tutarak, reformasyon sıcaklığının sistem verimine ve CO₂ emisyonuna etkisini incelemişlerdir. Buna göre, ekserji verimi reformasyon sıcaklığı 1033K iken %68,1 maksimum değerine ve CO₂ emisyonu ise 0,422mol CO₂/ mole H₂ minimum değerine ulaşmaktadır. Basınç salınlı adsorpsiyon sisteminden çıkan egzoz gazının fırının ihtiyacı olan enerjiye eşit olmasından dolayı bu etkin değerlere ulaştıklarını belirtmişlerdir [11].

Seepana, S. ve Jayanthi, S. (2012) pulverize kömür yakıcı için yeni bir oksijen-kömür yanma çeşidini sunmuşlardır. Çalışmalarında karbondioksitçe zenginleştirilmiş baca gazının bir kısmını kazana ön ısıtma uygulayarak, yanma tepkimesi için yollamışlardır. Yeni tasarım ile geleneksel linyit yakıtlı bir güç çevrim tesisine göre %1,6 daha fazla termal verim elde etme ve geleneksel bir fırına göre %9 daha az CO₂ ayırma işlemi yapıldığını belirtmişlerdir [12].

Gürtürk, M. ve arkadaşları (2013) 800 ile 1150°C sıcaklıkları arasında ısıtıldığında hacmi 10 ile 30 kat arasında artan perlit malzemesinin genişleme prosesinin enerji ve ekserji analizi ile çevresel etkilerini incelemişlerdir. Enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %66 ve %26 olarak tespit etmişlerdir. Bunların yanı sıra değişen çevre sıcaklığının ekserji verimine etkisini de incelemişlerdir [13].

Takla, M. ve arkadaşları (2013) enerji ve ekserji analizini iki gerçek, bir de teorik silikon üretimi prosesi için gerçekleştirmişlerdir. Endüstriyel analizlerini baca gazının değerlendirilmesi ve değerlendirilmemesi durumlarında tekrar etmişlerdir. Her bir durum için ekserji verimini hesaplamışlardır. Baca gazının değerlendirilmemesi durumunda ekserji verimi %33, değerlendirilmesi durumunda ekserji verimi %41, ideal yani teorik durumda ise %51 olarak belirlenmiştir [14].

Zhang ve arkadaşları (2013) enerji alanında en popüler konulardan biri olan atığı enerjiye dönüştürme konusuna dikkati çekmişlerdir ve bu alanda belediye atıklarının değerlendirilmesi hususuna değinmişlerdir. Bu amaçla tasarlanmış yeni plazma gazlaştırma teknolojisi olan Plazma Gazlaştırma Ergime prosesinin ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla soğuk gaz verimi veya toplam enerji verimi olmak üzere iki tip enerji ve ekserji verimliliği tanımlamışlardır. Oluşan sentez gazının doğrudan gaz ocağında yakılması ile içindeki ziftin de yakılması söz konusudur ve böylece ziftten de enerji üretimi olmaktadır. Oluşan sentez gazının doğrudan yakılması durumunda toplam enerji verimi kullanılmaktadır. Sentez gazının doğrudan değerlendirilmediği uygulamalarda ise soğuk gaz verimi kullanılmaktadır. Zhang ve arkadaşları gerçek uygulama ile doğrulamasını yaptıkları simülasyonlarında soğuk gaz enerji verimini %50,8, ekserji verimini %44,9 bulurken; toplam enerji verimini %94,4, ekserji verimini ise %86,5 tespit etmişlerdir [15].

Gürtürk, M. ve arkadaşları (2014) yüksek kapasiteli perlit fırınının enerji ve ekserji verimini tespit etmek amaçlı fırının ısı kayıplarını, tersinmezliklerini ve tasarımını çalışmışlardır. Sırasıyla enerji ve ekserji verimlerini %69 ve %37 tespit etmişlerdir. Fırında gerçekleşen 1,23 denklik oranındaki, yakıtça zengin tepkime sonucu enerjinin %51,84'ü, ekserjinin %32,81'i baca gazı ile atıldığını tespit etmişlerdir [16].

Hosseini, S.E. ve Wahid, M.A. (2014) laboratuvar ölçekli bir fırında metan ile geleneksel yanma ve alevsiz yanmayı ekserji açısından incelemişlerdir. Ekserji yıkımlarını CFD

kullanarak farklı denklik oranları, oksijen konsantrasyonları ve seyrelticilerin etkilerini incelemek amaçlı programlamışlardır. Sırasıyla geleneksel ve alevsiz yanma için ekserji verimlerini %75 ve %88 tespit etmişlerdir [17].

Suetens, T. ve arkadaşları (2014) elektrik ark fırınında çelik hurdanın ergitilmesi sırasında ortaya çıkan elektrik ark fırını tozunun işleme teknolojilerini termodinamik açıdan incelemişlerdir. Altı ayrı elektrik ark fırını toz işleme teknolojisini toplam ekserji verimi açısından değerlendirmişlerdir [18].

Utlu, Z. ve Hepbaşı, A. (2014) seramik üretiminde kurutma sürecinin ekserjoekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, kurutma süreci sırasıyla sprey kurutucu, düşey kurutucu ve fırın olmak üzere üç aşamada gerçekleşmektedir. Tüm kurutma sürecinin ekserji verimi %11,9 ile %64,10 aralığındadır. Ekserjoekonomik analiz ile tüm sürecin ekserji kayıplarını ekonomik boyuta taşımışlardır [19].

Acevedo, L. ve arkadaşları (2015) termodinamiğin ikinci yasasını temel alarak elektrikli bekletme fırınının değişken ekserji transfer analizini araştırmışlardır. Alüminyum ergimiş şekilde 24 saat bekletme fırınında bekletilmiş şekilde simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon dört kısma ayrılmıştır. Sırasıyla; rezistans ısıtma modeli sunulmuştur, rezistans odasındaki ışıma modeli analiz edilmiştir, taşınım ve bekletme fırınının ışımasını analiz edilmiştir ve tüm fırın boyunca iletim ile ısı transferi elde edilmiştir. Simülasyon sonucunda enerji verimliliği %75 bulunurken, ekserji verimliliği %30 olarak tespit edilmiştir [20].

Gürtürk ve arkadaşları (2015) gerçek çalışma verilerine dayanarak kıyaslama amaçlı iki ayrı perlit genişleme fırınının ekserjoekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Kompleks termal sistemler için ekserjoekonomik analizin önemini vurgulayacak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu sayede enerji verimsizliklerine ayrılan maliyeti, ekserji kayıpları ve ekserji yıkımları ile tanımlamışlardır [21].

Literatürde, yüksek sıcaklıklarda çalışan perlit geliştirme fırınları, alüminyum ergitme fırınları ve demir-çelik üretimi fırınları ile ilgili ekserji çalışmaları yapılmaktadır, ancak enerji yoğun proseslerden biri olan atmosfer kontrollü fırınlar ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada da bir ısıtım işlem firmasında enerji kaynağı olarak doğal gazı kullanan atmosfer kontrollü bir fırının gerçek verilerden oluşturulmuş kütle, enerji ve ekserji dengesi analiz edilmiştir. Enerji ve ekserji verimlilikleri çıkartılarak, iyileştirme önerileri sunulmuştur.

2. SİSTEMİN TANITIMI

2.1. Araştırmanın Yeri

Araştırma Batı Isıl İşlem Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasının, atmosfer kontrollü fırınlar bölümünde gerçekleştirilmiştir.

Firma, 1990 yılında İzmir'de kurulmuştur. 2002 yılında İzmir Kemalpaşa'da faaliyete başlayan yeni tesisinde hizmetini sürdürmektedir. Bünyesindeki atmosfer kontrollü fırınlar, vakum fırını, nitrasyon fırını, alüminyum yaşlandırma fırını, indüksiyon ünitesi ile Türkiye'nin dört bir yanına hizmet vermektedir [22].

Firma ISO 9001:2008 ve TS 16949 kalite sistemlerinin belgelendirmelerine sahip olup ısıtma işlemi için özel bir kalite standardı olan CQI-9'un standartlarının gereklerini yerine getirmektedir [22].

Tez çalışması firmanın atmosfer kontrollü fırınlar bölümünde gerçekleştirilmektedir. Sementasyon, ıslah, karbonitrasyon, normalizasyon, karbon emdirme, ferritleme tavlama, gerilim giderme, yumuşatma, izotermik tavlama proseslerinin gerçekleştirildiği atmosfer kontrollü fırınların en büyük özelliği tam otomasyon sistemine sahip olmalarıdır. Bu fırınlardaki otomasyon sistemi ile insan faktörünü ortadan kaldıran, prosesin tüm adımlarının tanımlanabildiği, herhangi bir arızanın ve çözümünün kolayca tespit edilebildiği, difüzyonun otomatik olarak kontrol edilebildiği, proses parametrelerinin tamamının kaydedilebildiği bir ısıtma işlemi sunulmaktadır. Etkin atmosfer kontrolü ve soğutma sistemleri ile homojen sertlikler ve sementasyon derinlikleri kolayca yakalanabilmektedir [22].

Firmada 7 adet atmosfer kontrollü fırın bulunmaktadır ve toplam doğal gaz tüketiminin %83'ünü bu fırınlar gerçekleştirilmektedir [22].

2.2. Sementasyonun Tanımı

Isıl işlemler, metal veya metal alaşımlarına uygulanan genellikle yüksek sıcaklıkta ısıtma ve ani soğutma işlemleridir. Isıl işlemler ile malzemenin mikroyapıları değiştirilir.

Mikroyapıdaki bu değişimler sayesinde malzemenin mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler elde edilir.

Metalin cinsine ve istenilen mekanik özelliklere göre farklı ısıl işlem süreçleri uygulanır. Metalin çalıştığı yerde sürtünme etkisi gibi aşındırıcı etkiler mevcutsa metal parça zaman içerisinde aşınır. Aşınmayı azaltmak için en çok kullanılan yöntemlerden biri sertleştirmedir. Ancak dişliler gibi bazı makine parçalarında aşınmaya dayanıklı dış yüzey istenirken, iç kısımlarda sünek bir yapı tercih edilir. Buna benzer durumlarda makine parçalarının hem aşınmaya karşı dayanıklı hem de darbe ve yorulmaya dayanıklı olması için yüzey sertleştirme işlemleri yapılır.

Yüzey sertleştirme işlemleri temelde termokimyasal işlemler veya bölgesel ısıtma işlemleri olarak iki farklı şekilde gerçekleşir. Termokimyasal işlemler, difüzyon ile yüzeyin kimyasal kompozisyonu değiştirilerek gerçekleştirilen sertleşme işlemidir. Bölgesel ısıtma ise parçanın tamamının sertleşmesinin istenmediği, yalnız aşınmaya maruz kalan kısmının sertleşmesinin istenildiği durumlarda, sertleşme özelliği olan metal malzemenin ilgili kısmının bölgesel olarak ısıtılıp sertleştirilmesi işlemidir.

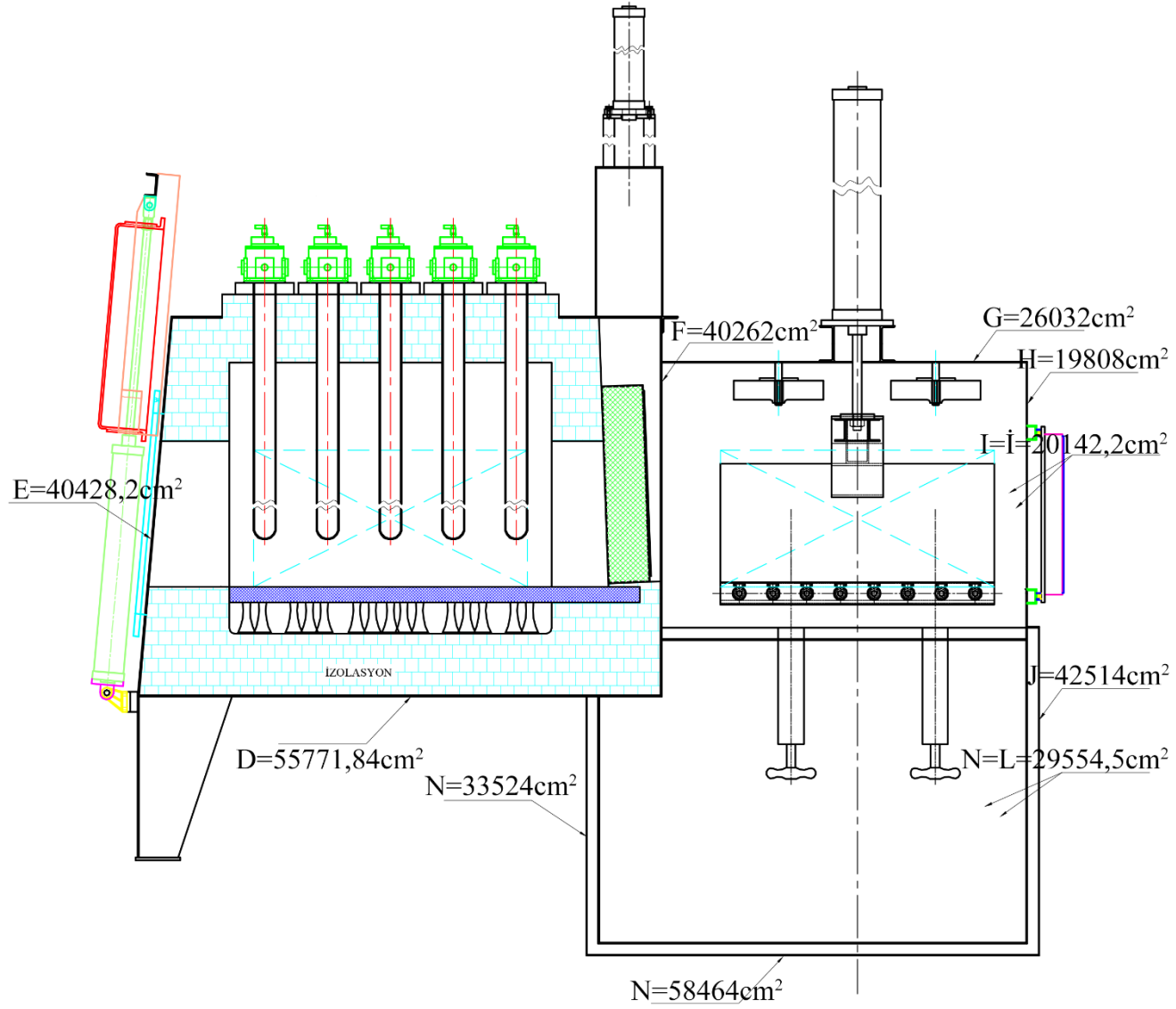
Termokimyasal ısıl işlemlerden en çok kullanılanlarından biri sementasyondur. Sementasyon, yüksek sıcaklıkta istenilen elementlerin difüzyonu işlemidir. Sementasyon işlemi katı, sıvı ve gaz ortamda gerçekleşebilir. Katı ortamda sementasyon işleminde kömür, sıvı ortamda sementasyonda siyanürlü tuz, gaz ortamda ise yaygın olarak doğal gaz, propan veya bütan gazları kullanılır.

2.3. Atmosfer Kontrollü Fırının Özellikleri

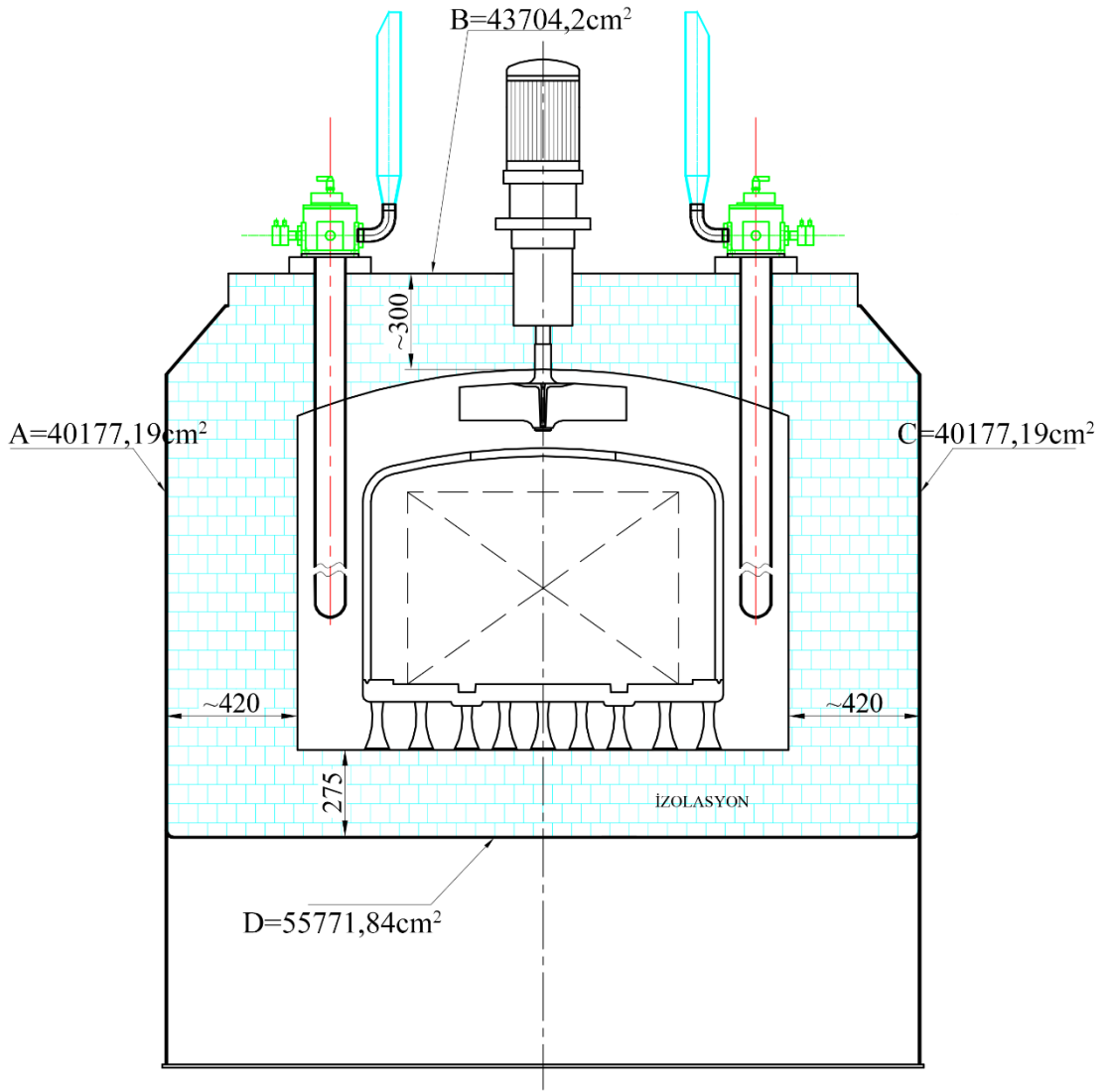
Atmosfer Kontrollü Fırın adını kontrollü atmosfer altında çalışması özelliğinden alır. Koruyucu atmosfer (endo gaz karışımı) sayesinde ısıl işleme giren parçaların yüzeyinde oksidasyon engellenebilmektedir. Aynı zamanda karbon potansiyeli de koruyucu atmosfer (endo gaz karışımı) sayesinde ayarlanabilmektedir. Çalışmanın devamında Atmosfer Kontrollü Fırın'dan 'AKF' olarak bahsedilecektir.

AKF Şekil 2.2'de görüldüğü gibi ana iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım ısıtma kısmı, ikinci kısım ise soğutma kısmı olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de fırının

dış yüzey alanları A'dan N'ye kadar kodlanmıştır ve yüzey alanı ölçüleri Tablo 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Atmosfer Kontrollü Fırın Kesit - Yan Görünüş [23]



Şekil 2.2 Atmosfer Kontrollü Fırın Kesit – Ön Görünüş [23]

Tablo 2.1 AKF Yüzey Alanları

Kod	Yüzey Alanı (m²)
A	4,017
B	4,370
C	4,017
D	5,577
E	4,042
F	4,026
G	2,632
H	1,980
I	2,014
İ	2,014
J	4,251
K	2,955
L	2,955
M	5,846
N	3,352

Isıtma kısmına Tablo 2.2’de içeriği belirtilen endo gaz sabit debide verilmektedir. Endo gazın yanı sıra ısı işlem görecekt parçaya ve istenilen mekanik özelliklere göre değişen oranlarda doğal gaz, hava, azot ve amonyak otomatik kontrol üniteleri ile fırın atmosferine verilmektedir.

Tablo 2.2 Endo Gaz İçeriği [23]

Gazın Cinsi	Hacimsel Oran
CO	20
H ₂	40
N ₂	40

Fırın çalışırken iki kısım arasındaki sızdırmaz kapı, kapalı şekilde tutulmaktadır. Bu sayede ısıtma kısmına verilen yukarıda bahsi geçen gaz karışımının ve ısıtma kısmındaki yüksek ısının soğutma kısmına geçişi önlenmiş olur.

Fırının ısıtma kısmında; bir adet gaz besleme sistemi, 10 adet yakıcı ve bir adet fan bulunmaktadır. Gaz besleme sistemi ile ortama sabit debide ve istenilen konsantrasyonda gaz karışımı verilmektedir ve böylelikle ortamın karbon konsantrasyonu istenilen değere getirilmektedir. Yakıcılar yardımı ile doğal gaz ve hava uygun miktarda karıştırılarak fırına ısı enerjisi sağlanmaktadır.

Fırında istenilen sıcaklığa ulaşmak için yakıcılar, istenilen karbon konsantrasyonuna ulaşmak için ise gaz besleme sistemi açık tutulur. Isıl işlem sürecinde ısının ve gaz karışımının homojen dağılımı çok önemlidir.

Isıl işlem görecektir şarjın doğrudan fırına konulması durumunda, yakıcılardan çıkan ışınım dalgaları, şarjın dış yüzeyine yoğun şekilde temas edeceği için bu kısımlarda radyasyon ile ısınma gerçekleşir. Dış yüzeylerin tersine iç kısımlara ışınım dalgaları yeterince ulaşamaz ve dış kısım ile iç kısım arasındaki önemli büyüklükte ısı farkı oluşur. Farklı sıcaklıklar farklı mikro yapılara ve dolayısıyla farklı fiziksel özelliklere sebep olacağı için bu heterojen dağılım ısıl işlem sürecinde kesinlikle istenmeyen bir özelliktir. Parçalar üzerindeki ışınım kaynaklı heterojen ısı dağılımını engellemek için, parçalar mufla (muffle) adı verilen alüminyum esaslı seramik malzemeden yapılan koruyucu bir kafes içerisinde muhafaza edilir. Bu kafes sayesinde ısıl işleme giren şarj ile ısı kaynağının arasına ince bir duvar girer ve şarjın radyasyon ile ısınması önlenir. Bunun yanı sıra sürekli olarak çalışan fan da gaz karışımının ve ısının homojen olarak dağılmasına katkıda bulunur.

Şarjın istenilen sıcaklık aralıklarında ve gaz konsantrasyonunda yeterli süre bekletilmesinin ardından ısıtma kısmı ile soğutma kısmı arasındaki kapı açılır. Bu kapının açılması ile birlikte şarj çok hızlı bir şekilde soğutma kısmına taşınsa da ısının bir kısmı ve ısıtma kısmındaki gaz karışımının bir kısmı soğutma kısmına transfer olur. Taşınan gaz zehirli bir gaz olduğu için soğutma kısmındaki bacadan dışarı yakılarak atılır. Şarjın soğutma kısmına taşınması ile birlikte aradaki sızdırmaz kapı kapanır.

AKF’de soğutma havada veya yağda gerçekleştirilmektedir. Fırının soğutma kısmında iki adet fan, iki adet karıştırıcı ve bir adet asansör mekanizması bulunmaktadır. Havada soğutma

için zincir mekanizması ile mufla içerisinde taşınan şarj, fanlar yardımı ile soğutulurken, yağda soğutma için uygun sıcaklıkta bekleyen yağın içerisine daldırılmaktadır ve şarjın yağa daldırılması ile birden ısınan yağın karıştırıcılar yardımı ile soğuması sağlanmaktadır.

2.4. Atmosfer Kontrollü Fırın ile Sementasyon Süreci

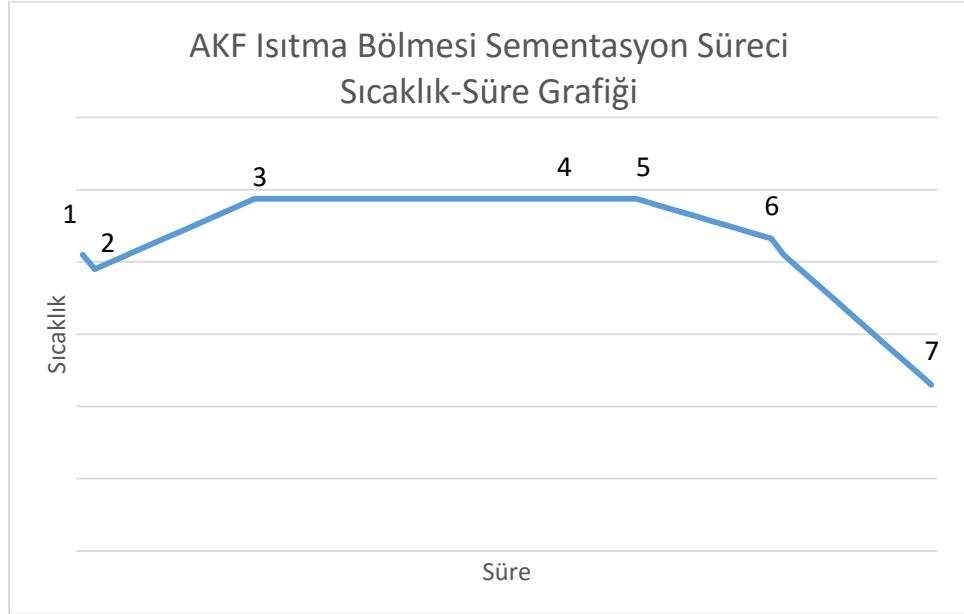
Araştırmanın gerçekleştirildiği atmosfer kontrollü fırınlarda farklı ısıl işlem tipleri uygulanmaktadır. Bununla birlikte yaygın olarak sementasyon ve normalizasyon uygulamalarında fırının kullanımı tercih edilmektedir.

Sementasyon sürecinde amaç; yüzeye karbon emdirerek sertlik sağlarken, iç kısımlardaki sünekliği korumaktır. Bu amaçla ısıl işlem göreceğ parça firmaya girişinden itibaren Şekil 2.3’de şematik olarak gösterilen iş akış adımlarından geçer. Bu aşamalar sırasıyla; giriş kalite kontrol, aparatlama, ön yıkama, ön ısıtma fırını, atmosfer kontrollü fırın, yıkama, ara sertlik kontrolü, meneviş, sertlik kontrolü, mikro yapı kontrolü, final kalite kontrol ve sevkiyattır.



Şekil 2.3 Batı Isıl İşlem Sementasyon Süreci İş Akış Adımları [23]

Sementasyon görece parça, giriş kalite kontrol, aparatlama ve ön yıkama aşamalarından sonra ön ısıtma fırınına girmektedir. Ön ısıtma fırınında yaklaşık 500°C sıcaklığa getirilen parça; parçanın et kalınlığına, istenilen sertliğe ve sertlik derinliğine göre farklı fırın sıcaklığı, ısıtma süresi ve karbon oranına ayarlı AKF'ye girmekte ve fırın içerisinde sırasıyla aşağıdaki adımlardan geçmektedir. Bu adımlar grafiksel olarak şekil 2.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.4. AKF Isıtma bölümü sementasyon süreci sıcaklık-süre grafiği

Sementasyon için AKF adımları;

1. Parçalar önceden en az 750°C'ye ısıtılmış fırının ısıtma kısmına alınır. Bu sırada parçalar ön ısıtma sıcaklığındadır.
2. Fırına giren parçalar fırın sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta ön ısıtma fırınından çıktığı için fırının sıcaklığının bir miktar düşmesine sebep olur. Bu düşüş; parçanın ön ısıtma sıcaklığına ve parçanın kütlesine bağlı olarak değişir. Bu sırada fırına sürekli olarak sabit debide gaz karışımı sağlanır ve fan sürekli olarak çalıştırılır.
3. Düşen fırın sıcaklığı yakıcıların sürekli çalıştırılması ile proses dizaynına göre karar verilen 860°C ile 1000°C arasında değişen bir difüzyon sıcaklığına çıkarılır. Parçaların ve fırının denge sıcaklığına ulaşması sağlanır. Difüzyon sıcaklığında, hedef sertlik derinliğine göre değişen difüzyon süresi kadar beklenir. Isıtma sırasında işleme

sınırının aşağısında kalmak koşulu ile karbon potansiyeli yükseltilir. Bu adıma Zengin Karışım Verme (BOOST) adımı denir.

4. Sıcaklık bir önceki aşamadakiyle aynı olacak şekilde sabit tutulur ve karbon oranı %0,65-%1,00 arasına düşürülür ve efektif sertlik derinliğine göre tasarlanmış difüzyon süresi kadar beklenir.
5. Birden soğuma ile parçanın deformasyonunun engellenmesi için soğuma iki aşamada gerçekleştirilir. Soğumanın birinci aşaması, ısıtma kısmında yakıcılar kapatılarak yakıcılara verilen hava ile sıcaklığın 780°C ile 900°C arasına düşmesi ile sağlanır.
6. Isıtma ve soğutma kısımları arasındaki kapı açılır ve ısı transferinin sıcak kısımdan soğuk kısma doğru gerçekleşmesinin engellenmesi için parça hızlı bir şekilde zincir mekanizması ile taşınır.
7. Parça, soğutma kısmındaki 60°C ile 150 °C aralığında süreç tasarımına göre değişen sıcaklıktaki özel soğutma yağına daldırılır ve soğutmanın sağlanması için 400 dev/dk ile 1400 dev/dk aralığında yağ karıştırıcılarının çalışması sağlanır. Karıştırıcı hızı, ani soğuma ile deformasyon oluşturmayacak kadar yavaş olacak şekilde ayarlanır ve soğumanın ikinci ve son aşaması gerçekleşir.

Sementasyon gören parça AKF'den çıktıktan sonra önce yıkamaya girerek üzerindeki ısı işlem yağlarından arınır, daha sonra da AKF sürecini doğrulamak amaçlı ara sertlik kontrolü yapılır. Burada parça henüz istenilen sertlik ve mikro yapı özelliklerine sahip değildir. AKF aşamasından sonra parça istenilenden daha fazla sertliğe sahip olduğu gibi soğutma sonrasında parçada gerilim oluşmuştur. Üzerindeki gerilimi gidermek ve sertliği istenilen değere getirmek için “meneviş” işlemine tabii tutulur. Meneviş işlemi parçada istenilen sertlik değeri ve parçanın et kalınlığına göre farklı sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilir. Bu sıcaklık aralığı yaklaşık 140°C ile 650°C arasındadır.

Meneviş işleminden sonra parça sırasıyla sertlik, mikro yapı ve final kalite kontrol işlemlerinden geçirilerek istenilen fiziksel özelliklerde olduğu doğrulanır.

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu çalışmada, Batı Isıl İşlem A.Ş. firmasında yer alan 7 numaralı Atmosfer Kontrollü Fırının üç ayrı sementasyon işleminde, gerçek üretim ortamında alınan ölçümlerinin termodinamik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Ölçümler termal kamera, kızılötesi termometre ve baca gazı analizörü ile gerçekleştirilmiştir. Yüzey sıcaklığının dağılımı termal kamera ile, yüzey sıcaklıklarının ölçümü kızıl ötesi termometre ile ve baca gazının sıcaklığının ölçümü ise baca gazı ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen ölçüm sonuçları Tablo 3.1'den Tablo 3.5'e kadar sırasıyla aparat ve malzeme özellikleri, doğal gaz tüketimi ve zamanı ile ölçüm yapılan günlere ait yüzey sıcaklıkları olarak aşağıdaki gibi verilmiştir.

Yapılan tüm ölçümlerde sementasyon gören parça malzemesinin ve aparat malzemesinin cinsi aynıdır. Aparat malzemesi 310S, parça malzemesi ise 1.7131 çelik malzemedir. Sementasyon ön ısıtma sıcaklığı her ölçüm için 500°C ve son ısıtma sıcaklığı da her ölçüm için 925°C'dir.

Tablolarda (Tablo 3.2, Tablo 3.3, Tablo 3.4 ve Tablo 3.5) bahsi geçen "Adım No" kısım 2.3 ile açıklanan ve Şekil 2.4 ile grafiklenen sementasyon adımlarını simgeler.

Tablo 3.1 Isıl İşlem Gören Aparat ve Malzeme Özellikleri

	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
Aparat Malzemesi/ Ağırlığı	310S/ 195 kg	310S/ 345 kg	310S/ 312 kg
Parça Malzemesi/ Ağırlığı	1.731/ 467kg	1.731/ 675 kg	1.731/ 753 kg

Tablo 3.2 Doğal Gaz Tüketimi ve Zaman

Adım No	1. Ölçüm		2. Ölçüm		3. Ölçüm	
	Doğal Gaz Sayacı (m ³)	Süre	Doğal Gaz Sayacı (m ³)	Süre	Doğal Gaz Sayacı (m ³)	Süre
1	829,4	10:30	902,4	10:06	076,9	10:14
3	844	11:15	924,5	11:00	100,1	11:12
6	858,5	13:47	937	13:16	13:30	113,5

Tablo 3.3 1. Ölçüm Yüzey Sıcaklıkları Raporu

1. Adım Yüzey Sıcaklıkları (Isıl İşlem Öncesi Yüzey Sıcaklıkları) (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	58	61	66,5	63	62,125
B	Tavan	117	115	135	140	126,75
C	Yan Yüzey 2	65	72,5	76,5	74	72
D	Taban	94	83,5	96,5	80	88,5
E	Kapı	94	95,5	99	91	94,875
3. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	60,5	66	66	60,5	63,25
B	Tavan	160	130	90	120	125
C	Yan Yüzey 2	66	72	77	80	73,75
D	Taban	96,5	84	87,5	91	89,75
E	Kapı	95	94	93,5	92	93,625
4. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	65	68	67	62	65,5
B	Tavan	154	118	89	103	116
C	Yan Yüzey 2	80	78	76	77	77,75
D	Taban	94	85	98	98	93,75
E	Kapı	98	101	99	105	100,75
5. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	67	71,5	72,5	72	70,75
B	Tavan	143	116	85	102	111,5
C	Yan Yüzey 2	87	81	78,5	82	82,125
D	Taban	86,5	103	101	100	97,625
E	Kapı	104	106	105,5	104	104,875

Tablo 3.4 2. Ölçüm Yüzey Sıcaklıkları Raporu

1. Adım Yüzey Sıcaklıkları (Isıl İşlem Öncesi Yüzey Sıcaklıkları) (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	41	41,5	43	42	41
B	Tavan	135	128	137	140	135
C	Yan Yüzey 2	48	55	56,5	58	56
D	Taban	78,5	55	82	64	69,87
E	Kapı	93	84	83	87	86,75
3. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	46	46,5	45	47	46,12
B	Tavan	131	133	130	134	132
C	Yan Yüzey 2	55	55	50	56,5	54,13
D	Taban	73,5	74,5	64,5	52,5	66,75
E	Kapı	92	93	89	90	91
4. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	48	52	50	47,5	49,37
B	Tavan	137	129	136	134	134
C	Yan Yüzey 2	62	71	58	60,5	62,75
D	Taban	89	75	82,5	76,5	80,75
E	Kapı	96	95,5	95	96	95,62
5. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	56	49,5	56	56,5	54,5
B	Tavan	136,5	130	129,5	132	132
C	Yan Yüzey 2	68	61,5	62	58	62,37
D	Taban	89,5	87,5	89	88	88,5
E	Kapı	101	99	96	97	98,25

Tablo 3.5 3. Ölçüm Yüzey Sıcaklıkları Raporu

1. Adım Yüzey Sıcaklıkları (Isıl İşlem Öncesi Yüzey Sıcaklıkları) (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	60,5	61,5	69,5	70	65,37
B	Tavan	127,5	131,5	120,5	135,5	128,75
C	Yan Yüzey 2	78,5	80	100,5	93,5	88,12
D	Taban	105	92	73	72,5	85,62
E	Kapı	102	107	102,5	99,5	102,75
3. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	67,5	64	69	73	68,37
B	Tavan	130	128,5	112	136	126,63
C	Yan Yüzey 2	81,5	81,5	110	95	92
D	Taban	111,5	90,5	72,5	76	87,62
E	Kapı	104	106,5	98,5	102	102,75
4. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	72,5	70	74	67	70,87
B	Tavan	137	129,5	136	131,5	133,5
C	Yan Yüzey 2	84	85	77	79,5	81,37
D	Taban	108	101	85	102,5	99,12
E	Kapı	108	105	105,5	101,5	105
5. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	76	69,5	74	76	72,4
B	Tavan	126	128	132,5	130,5	131,4
C	Yan Yüzey 2	86	90,5	80,5	76	82,3
D	Taban	113,5	90	114	113	103,4
E	Kapı	109	110,5	106,5	102,5	106,1

4. SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Bu çalışmada, AKF' nin enerji kullanımını anlamak için fırının termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Analize kütlenin korunumu ilkesi ile başlanacaktır ve sırasıyla sistem, termodinamiğin birinci ve ikinci yasası ile incelenmiştir. Bu bakış açıları ile incelenen sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri çıkarılacaktır.

Tüm hesaplamalar aksi belirtilmediği sürece Çengel ve Boles'da (2013) belirtilen teori ve denklemleri temel almaktadır. Benzer şekilde aksi belirtilmediği sürece tüm entalpi, entropi ve gazların diğer özellikleri Çengel ve Boles (2013) Termodinamik kitabından alınmıştır [25].

4.1. Sistem Kabulleri

İkinci Bölüm'de de bahsedildiği gibi AKF içerisindeki süreç yedi adımda gerçekleşmektedir. Bu çalışmada termodinamik analizi gerçekleştirilen sistem, kontrol hacmi fırının ısıtma bölümü olan, Şekil 2.4'de gösterilen 1-3 ve 3-5 adımları arasını kapsam içine alan ısıtma sürecidir.

Sistemin termodinamik analizini gerçekleştirmeden önce, analizi kolaylaştırmak amacı ile yapılan kabuller aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

1. AKF'ye girmeden önce yaklaşık 30 dakika 500°C ön ısıtma fırınında bekletilen parçanın, AKF giriş sıcaklığı yaklaşık olarak 300°C kabul edilmiştir. ($T_{p,1}=T_{a,1}=300^{\circ}\text{C}$)
2. AKF içerisinde ısıl işlem gören parça, sementasyonun amacına uygun olarak süreç boyunca yüzeyindeki karbon kütlesini artırır. Ancak bu artış, karbon oranı %0,2'den az olan çeliklerin %0,8 ile %1,3 arasındaki bir artış ile sınırlıdır [23]. Bu artışın dışında parçanın ve aparatın kütlesinde bir değişiklik gerçekleşmemektedir. Malzeme kütlesindeki bu artışın küçüklüğünden dolayı parçanın ve aparatın kütlesi korunuyor kabul edilmiştir. ($\sum m=\text{sabit}$)
3. Şekil 2.4'de tanımlandığı gibi süreç 3. adıma ulaştığında parça ile AKF'nin iç sıcaklıkları birbirine eşitlendiği için sistem ısıl dengeye ulaşır. Süreç boyunca otomatik kontrol sistemi ile ölçülen sıcaklık farkları yakıcıların uygun miktarda çalıştırılması ile ısıl dengeye getirilir. Bu sebepten dolayı 3-5 arasındaki fırın iç sıcaklığı ve parça sıcaklığı sabit kabul edilmiştir ($\Delta T_{p,3-5}=0$, $\Delta T_{a,3-5}=0$).

4. Fırın içerisine sürekli olarak 10 m³/h sabit debide endo gaz verilmektedir. Endo gaz dışında değişen oranlarda doğal gaz, hava, azot ve amonyak endo gaz ile karışım haline getirilip, fırın içerisine verilmektedir. Ancak endo gaz dışındaki bu gaz karışımın toplamı yaklaşık 0,5 m³/h kadar küçük ve karışımdaki konsantrasyon değişiminin verilerinin kaydı mümkün olmadığı için gaz karışımının sadece endo gazdan oluştuğu kabul edilmiştir.
5. Yukarıda da açıklandığı gibi parçanın yüzeyi ile tepkimeye giren karbon oranı çok düşük olduğu için kontrol hacmine giren endo gazın kütlelerinin kayba uğramadan çıktığı kabul edilmiştir ($\dot{m}_{eg,g} = \dot{m}_{eg,\zeta}$).
6. AKF ısıtma bölgesi içinde ısının ve gaz karışımının homojen dağılımını sağlamak amacı ile çalışan fan elektrik enerjisi tüketmektedir. Tüm sistemin tükettiği elektrik enerjisi, sisteme doğal gaz ile giren enerjinin kalorifik olarak yaklaşık %7'si kadardır. Bu %7'nin de tamamı fan işine aktarılamamaktadır. Zincir mekanizması ve brülörlerin çalıştırılması için de elektrik enerjisi tüketilmektedir. Göreceli olarak tüketilen elektrik enerjisi çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir.
7. Doğal gazın sıcaklık ve basıncının yanma odasına aktarılırken değişmediği kabul edilmiştir. Bu sebeple doğal gaz kaynağından fırına aktarılırken sıcaklık ve basınç farklarından kaynaklanabilecek özgül kütle değişimlerinin oluşmadığı kabul edilmiştir ($\rho_{dg}=\text{sabit}$).
8. Tablo 4.1'de, tedarik edilen doğal gazın kompozisyonu hacimsel olarak verilmektedir. Doğal gaz kompozisyonunun zaman içerisinde değişmediği kabul edilmektedir. Bu yüzden doğal gazın ısıl değer, ısı kapasitesi, yoğunluk özellikleri de sabit kabul edilmiştir.

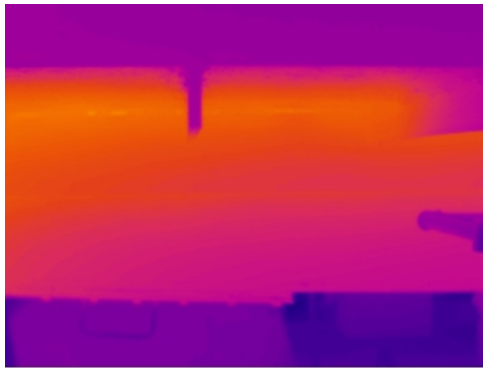
Tablo 4.1 Doğal Gaz Kompozisyonu[26]

Bileşik	Formül	Hacimsel Oran (%)
Metan	CH ₄	92,72
Etan	C ₂ H ₆	2,96
Propan	C ₃ H ₈	1,01
Bütan	C ₄ H ₁₀	0,42
Pentan	C ₅ H ₁₂	0,09
Hekzan	C ₆ H ₁₄	0,05
Azot	N ₂	2,2
Karbondioksit	CO ₂	0,5

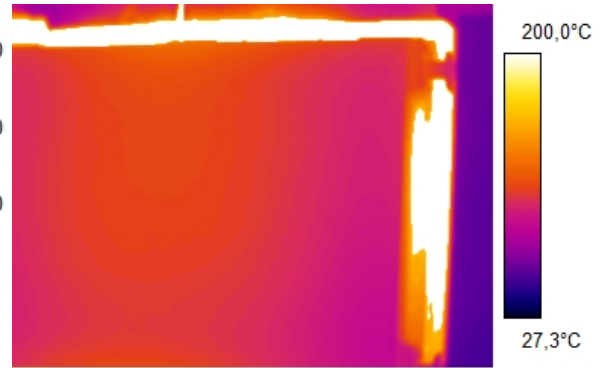
9. Doğal gaz karışımı Tablo 4.1’de görüldüğü gibi %92,72 oranında metandan oluşurken az miktarda diğer bileşiklerden oluşmaktadır. Bu çalışmada yakıcı, yaygın olduğu gibi %100 metandan oluşuyor kabul edilmektedir ve yanma denklemi bu kabüle uygun oluşturulmaktadır[13].
10. Havanın yalnızca azot ve oksijenden oluştuğu kabul edilmiştir. Hava karışımının 1 mol O₂’ne 3,76 mol N₂ oranında olduğu kabul edilmiştir.
11. Yanma havasının miktarı otomasyon sistemi ile kontrol edilmediği için doğal gazın havaya molar oranı 0,05 kabul edilmiştir. Ölçüm boyunca brülör ayarları değiştirilmediği için sabit kabul edilmiştir [27].
12. Yanma tam yanma kabul edilmektedir. Bu sebeple fazla hava ile yanan metanın denklemi aşağıdaki gibi kabul edilmektedir.
$$CH_4 + 4,2(O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 2,2 O_2 + 15,8N_2$$
13. Hava ve yanma gazları analiz boyunca mükemmel gaz olarak kabul edilmiştir.
14. Yanmanın kararlı akım koşullarında gerçekleştiği kabul edilmiştir.
15. Sisteme, atmosferik havanın ölü halde giriş yaptığı kabul edilmiştir ve havadaki nem ihmal edilerek kuru hava olarak alınmıştır.
16. Sistemdeki kinetik ve potansiyel enerji değişimleri çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir ($\Delta KE=0$, $\Delta PE=0$).
17. Sürtünme ve kimyasal tepkime esnasındaki kayıplar ihmal edilmiştir.
18. Fırının dış yüzeyleri Şekil 4.1-4.4’deki termal kamera görüntüleri sonucu dört ayrı bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler içinde sıcaklığın eşit dağıldığı kabulü yapılmıştır ve dört bölgenin sıcaklık ortalaması yüzey alanının sıcaklığı kabul edilmiştir. Ölçülemeyen

ara kapının sıcaklığı dış kapının sıcaklığı ile ısıl dengede kabul edilmiştir. Isı transferini büyük miktarda arttıracak şekilde girinti çıkıntılar olmadığı için tüm yüzeyler düzgün geometride kabul edilmiştir.

19. AKF'ye diğer fırınlardan ışıyım ile gerçekleşen ısı transferi ihmal edilmiştir.
20. Termodinamik hesaplamalarda kolaylık sağlamak için ölü hal olan çevre sıcaklığı ve çevre basıncı sabit ve sırasıyla 300K ve 1 atm kabul edilmiştir ($T_0=300K$, $P_0=1$ atm).
21. Doğal gaz ve endo gazın sisteme normal atmosfer koşullarında yani ölü halde girdiği kabul edilmiştir. Gerçekleşen küçük basınç ve sıcaklık değişimleri ihmal edilmiştir.
22. Çıkan endo gazın sıcaklığını bir otomasyon sistemi ile kontrol etmek mümkün değildir. AKF ise denge sıcaklığına ulaştıktan sonra sabit sıcaklıkta çalışmaktadır. Bu sebeplerden dolayı endo gazın giriş sıcaklığı çevre şartlarında çıkış sıcaklığı ise sistem boyunca sabit ve fırın sıcaklığı ile ısıl dengede kabul edilmiştir.
23. Baca gazı sıcaklığı, baca gazı analizörü ile üç ayrı ölçümün ortalaması $477^{\circ}C$ olarak tespit edilmiştir. Süreç boyunca bu sıcaklık sabit kabul edilmiştir.



Şekil 4.1 AKF Alt Yüzey Termal Kamera Görüntüsü



Şekil 4.2 AKF Dış Kapak Termal Kamera Görüntüsü



Şekil 4.3 AKF Sağ Yüzey Termal Kamera Görüntüsü



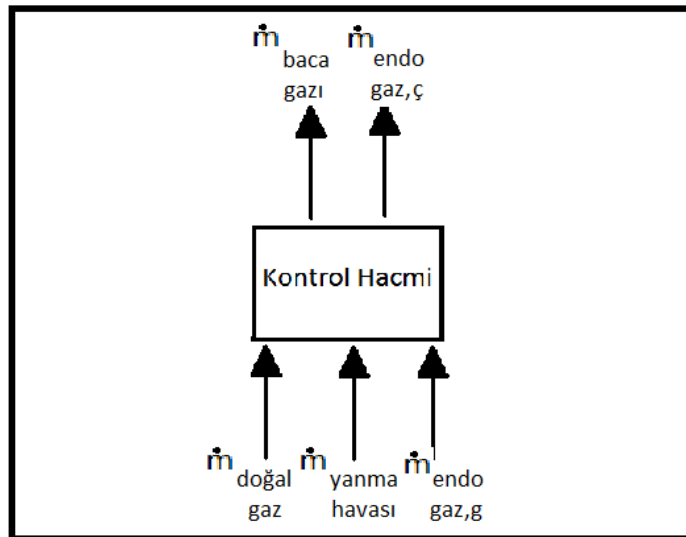
Şekil 4.4 AKF Sol Yüzey Termal Kamera Görüntüsü

4.2. Kütle Denklikleri

Doğanın en temel ilkelerinden biri olan kütle korunumu ilkesine göre kütle var veya yok edilemez. Kapalı sistemlerde sistemin kütlesi değişmezken, AKF’de olduğu gibi kontrol hacimlerinde ise kontrol hacmi sınırlarından kütle geçişi gerçekleşmektedir. Kütle, enerji ve ekserjinin büyüklüğünü doğru orantılı olarak etkileyen bir faktör olduğu için öncelikli olarak analiz edilmelidir.

AKF ısıtma bölümünün kontrol hacmi ve kütle akışı aşağıdaki gibi Şekil 4.5 ile gösterilmektedir. Burada da görüldüğü gibi doğal gaz, doğal gazın yanmasının sağlanması için yanma havası adı verdiğimiz atmosfer koşullarındaki hava ve endo gaz girişi olmaktadır. Endo gaz yukarıdaki kabullere uygun olarak ısı olarak ve kütlesi sabit kalarak kontrol hacminden çıkmaktadır. Doğal gaz ve yanma havası ise kimyasal tepkimeye girerek baca gazını oluşturmaktadır.

Bunun dışında şematik olarak gösterilmeyen bir durum daha yer almaktadır. Sistem analiz edilen süreç içerisinde fırında ısıl işlem göreceği parça ve bu parçaları birbirinden belirli bir mesafede tutmak için kullanılan aparatları içermektedir. Parça ve aparatlar analiz başlangıcında fırının sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıktadır ve sistem dengeye gelene kadar ısı almaktadır.



Şekil 4.5 AKF Kontrol Hacminin Kütle Akışı Şematik Gösterimi

Kütlenin korunumu ilkesi aşağıdaki gibi (1) numaralı denklem ile tanımlanmaktadır. Buna göre bir kontrol hacminde Δt zaman aralığında olan kütle değişimi, yine aynı zaman aralığındaki kontrol hacmine veya kontrol hacminden olan kütle geçişine eşittir. Oransal olarak ise denklem (2)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$m_g - m_{\zeta} = \Delta m_{KH} \text{ (kg)} \quad (1)$$

$$\dot{m}_g - \dot{m}_{\zeta} = d\dot{m}_{KH}/dt \text{ (kg/s)} \quad (2)$$

Isıl işlem görecekt parçalar, ısı transferinin tüm yüzeylere eşit dağılması için yığın halinde AKF'ye verilmek yerine aparatlar ile birbirinden ayrılarak verilmektedir. Çoğu zaman aparat malzemesinin cinsi ile parçaların cinsi birbirinden farklı olduğu için bir arada bulunan bu kütleleri ayrı ayrı incelemek daha doğru olacaktır. Analiz boyunca kontrol hacmindeki “parça kütlesi” ve “aparat kütlesi” sabit olup sırasıyla “ m_p ” ve “ m_a ” olarak tanımlanacaktır.

Analiz boyunca doğal gaz ölçümü doğal gaz sayaçları ile yapılmakta olup, 1-3 ve 3-5 noktaları arasında hacimsel debileri değişmektedir. Sayaçlardan okunan hacim değişimi, “Sistem Kabulleri” alt başlığında da belirtildiği gibi basınç ve sıcaklık değerleri ve doğal gaz karışımının içeriğinin değişmediği kabulü ile aşağıdaki gibi denklem (3) ve denklem (4) ile hacimsel debi ve doğal gazın yoğunluğu bulunduktan sonra denklem (5) ile kütleli debiye çevrilir.

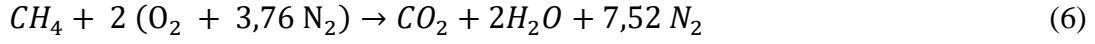
$$\dot{V}_{dg} = \frac{V_{dg}}{t} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

$$\rho_{dg} = \rho_h \text{ SG}_{dg} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (4)$$

$$\dot{m}_{dg} = \dot{V}_{dg} \rho_{dg} \quad (\text{kg}/\text{s}) \quad (5)$$

“Sistem Kabulleri” alt başlığında havanın içeriği ve doğal gazın içeriği hakkında yapılan kabuller ışığında oluşturulan yanma denklemi aşağıdaki gibi denklem (6) ile açıklanmaktadır. Denklem (6) ile açıklanan yanma tam yanmadır. Tam yanma, yanma tepkimesinde ürün olarak yer alan tüm karbonun yanarak CO_2 'e, tüm hidrojenin yanarak H_2O 'ya ve eğer varsa tüm kükürdün yanarak SO_2 'ye dönüşmesine denir [28]. Yanmayı sayısal olarak tanımlamak için sıklıkla kullanılan ifadelerden biri Hava-Yakıt (HY) oranıdır [25]. Yanma sonucu havanın yakıtla kütleli oranına olarak denklem (7)'deki gibi ifade edilmektedir. Benzer şekilde denklem (8) ile ifade edildiği gibi Ürün-Yakıt (ÜY) oranı da kullanılan ifadelerden biridir ve yanma sonu

ürünlerinin birim yakıt cinsinden ifadesidir. Denklem (9) ile de verilen yakıtın havaya molar oranı (λ) görülmektedir.



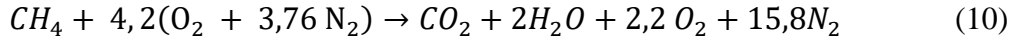
$$HY = \frac{m_h}{m_{dg}} \quad (7)$$

$$\dot{U}Y = \frac{m_{\ddot{u}}}{m_{dg}} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{n_{dg}}{n_h} \quad (9)$$

Ancak yukarıda tanımlanan yanma teoriktir ve gerçekte çoğu zaman bu şekilde gerçekleşmemektedir. Yeterli miktarda oksijen olmasına rağmen yanma tam olarak gerçekleşmeyebilir ve bu sebepten uygulamada Hava-Yakıt karışımı teorik miktardan daha fazla olacak şekilde ayarlanır.

Doğal gaz ve hava ile tepkime sonucu baca gazı oluşmaktadır ve fazla hava oranına uygun olarak stokiyometrik denklik sağlandığında aşağıdaki gibi denklem (10) elde edilmektedir. Baca gazı sıcaklığı baca gazı analizörü ile ölçülmüştür ve ortalama 477°C olarak tespit edilmiştir.



Yanma havası ve yanma sonu ürünleri olan baca gazının kütleli debisi, kütleli korunumu yasasına göre doğal gazın kütleli debisinin bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon denklem (9)'a göre tanımlanmaktadır. Aşağıdaki gibi denklem (11) ve denklem (12) ile tanımlanan yanma havasının ve baca gazının kütleli debisi, hava yakıt oranı ve ürün yakıt oranının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

$$\dot{m}_h = \dot{m}_{dg} HY \quad (\text{kg/s}) \quad (11)$$

$$\dot{m}_{bg} = \dot{m}_{dg} \dot{U}Y \quad (\text{kg/s}) \quad (12)$$

Endo gaz sistem boyunca sürekli olarak 10 m³/h hacimsel debide verilmektedir. Endo gaz karışımı Tablo 2.2'de hacimsel olarak gösterilmektedir. Karışımın kütleli debisi aşağıdaki gibi denklem (13) ile tanımlanmaktadır, burada \sum_i^n i'den n'ye kadar sırasıyla karışım

içerisindeki tüm elementleri (CO, H₂, N₂) temsil eder. Ekserji analizinde kullanılacak diğer bir ifade ise molar debidir ve denklem (14)'de tanımlanmaktadır.

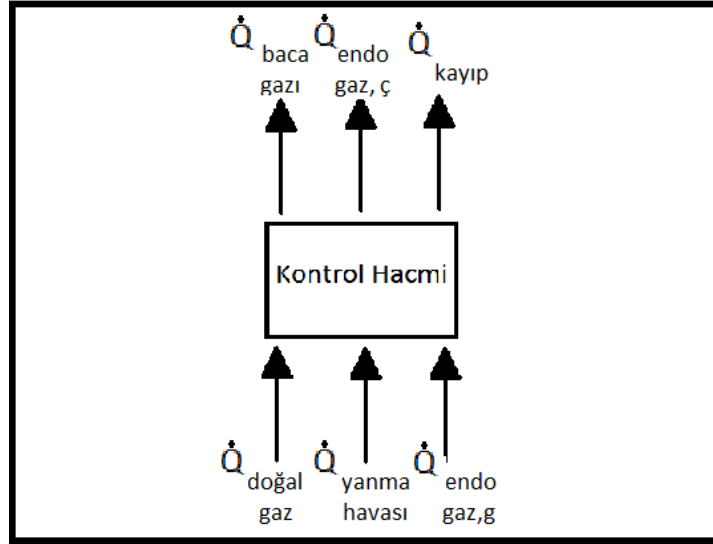
$$\dot{m}_{eg} = \sum_i^n \dot{m}_i = \sum_i^n \dot{V}_i \rho_i \quad (\text{kg/s}) \quad (13)$$

$$\dot{n}_{eg} = \sum_i^n \dot{n}_i = \sum_i^n \frac{\dot{m}_i}{M_i} \quad (\text{kmol/s}) \quad (14)$$

4.3. Enerji Denklikleri

Enerjinin var veya yok edilemeyeceğini ancak bir biçimden diğer bir biçime dönüşebileceğini açıklayan termodinamiğin birinci yasası veya diğer adıyla enerjinin korunumu ilkesi enerjinin değişik biçimleri arasındaki ilişkileri ve genel olarak enerji etkileşimlerini incelemek için sağlam bir temel oluşturur [25].

Enerji verimliliğini tespit etmek amacı ile termodinamiğin birinci yasasını temel alarak AKF kontrol hacmindeki tüm enerji etkileşimleri Şekil 4.6'daki gibi tanımlanmıştır. Şekil 4.6'da da belirtildiği gibi sisteme doğal gaz, yanma havası ve endo gaz ile enerji girişi olurken, doğal gaz ve yanma havasının yakılması sonucu oluşan baca gazı, fırından ısı olarak kontrol hacmini terk eden endo gaz ve fırından çevreye doğru sıcaklık farkından oluşan ısı kayıpları ile de enerji çıkışı olmaktadır. Bu enerji dönüşümlerinin dışında, fırına ön ısıtma sıcaklığında giren parça ve aparatların, fırın sıcaklığına ısıtılması ile kontrol hacminde oluşan bir enerji artışı da söz konusudur.



Şekil 4.6 AKF Kontrol Hacminin Enerji Akışı Şematik Gösterimi

Zamanla değişen açık sistemde kontrol hacminin enerjisi denklem (15) ve denklem (16) ile açıklandığı gibi zamanla değişir.

$$E_g - E_ç = \Delta E_{KH} \quad (\text{kJ}) \quad (15)$$

$$\dot{E}_g - \dot{E}_ç = dE_{KH}/dt \quad (\text{kW}) \quad (16)$$

Doğal gaz ile giren enerji; sistem kabulleri alt başlığında yapılan kabullerle, alt ısı değeri ve sisteme giriş sıcaklığı sabit kabul edilerek, denklem (17) ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_{dg} = \dot{m}_{dg} (LHV + C_{dg} T_{dg}) \quad (\text{kW}) \quad (17)$$

Doğal gazın yanması için kullanılan yanma havası atmosferik havadır. Yanma havasının sisteme ölü halde giriş yaptığı kabul edilmiştir ve yanma havasının enerjisi denklem (18) ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h h_h \quad (\text{kW}) \quad (18)$$

Doğal gaz ve havanın yanma tepkimesi sonucunda baca gazı adı verilen yanma sonu ürünleri çıkmaktadır. Baca gazı analizi ve stokiyometrik denklem ile tespit edilen bu gazlar denklem (10)'da açıklanmıştır. Baca gazlarının, birim mol doğal gaz tüketimi başına çıkardığı

enerji denklem (19) ile verilmiştir. Baca gazının ısı gücü ise denklem (20)'deki gibi doğal gaz tüketiminin molar debisi ile çarpımı sonucu bulunmaktadır.

$$\bar{h}_{bg} = 1\bar{h}_{CO_2} + 2\bar{h}_{H_2O} + 2,2\bar{h}_{O_2} + 15,8\bar{h}_{N_2} \quad (\text{kJ/kmol CH}_4) \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{bg} = \dot{n}_{dg} \bar{h}_{bg} \quad (\text{kW}) \quad (20)$$

Sisteme sürekli olarak sabit debide verilen endo gaz, sistem kabullerinde açıklanan kabullerle kütlesi eksilmeden sistemden dışarı atıldığı kabul edilmektedir. Kütlesi eksilmemesine rağmen sistemden belirli bir miktarda ısı alarak sistemden çıktığı için önemli bir ısı kaybıdır. Herhangi bir kimyasal tepkime gerçekleşmeksizin sistemden atılan endo gazın entalpisi ve ısı gücü, baca gazına benzer şekilde aşağıdaki gibi denklem (21) ve denklem (22) ile hesaplanmaktadır.

$$h_{eg} = 0,32 \frac{\bar{h}_{CO}}{M_{CO}} + 0,05 \frac{\bar{h}_{H_2}}{M_{H_2}} + 0,63 \frac{\bar{h}_{N_2}}{M_{N_2}} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{eg} = \dot{m}_{eg} h_{eg} \quad (\text{kW}) \quad (22)$$

Isıl işlem göreceğ parça ve onları birbirinden ayrı tutmaya yarayan aparatlar AKF'ye ön ısıtma sıcaklığında girmektedir ve fırının ayarlı olduğu sıcaklığa kadar ısınmaktadır. Dolayısıyla bu sırada kontrol hacminin enerjisinde artış gözlemlenmektedir. Bu süreç 1-3 adımları arasında gerçekleşmektedir. 3-5 adımları arasında ise sıcaklık artık sabittir ve kontrol hacminin içinden olabilecek ısı kayıpları ihmal edilmektedir. Dolayısıyla 3-5 adımları arasında kontrol hacminin enerjisi değişmemektedir.

1-3 adımları arasında gerçekleşen enerji artışı, parça ve aparatın aldığı enerjiden kaynaklandığı için aşağıdaki gibi denklem (23) ve denklem (24) ile açıklanmaktadır. Denklem (25) ve denklem (26) ile de bu enerji birim zaman cinsinden açıklanmaktadır.

$$\Delta Q_p = m_p C_p \Delta T_p \quad (\text{kJ}) \quad (23)$$

$$\Delta Q_a = m_a C_a \Delta T_a \quad (\text{kJ}) \quad (24)$$

$$\dot{Q}_p = \frac{\Delta Q_p}{\Delta t} \quad (\text{kW}) \quad (25)$$

$$\dot{Q}_a = \frac{\Delta Q_a}{\Delta t} \quad (\text{kW}) \quad (26)$$

Sıcak tezgah yüzeyinden enerji, doğal taşınım ve ışınım yoluyla iki şekilde çevreye atılmaktadır. Doğal taşınım ve ışınım ile ısı transferi denklemleri sırası ile denklem (33) ve denklem (34) ile açıklanırken, sırasıyla Grashof Sayısı, Rayleigh Sayısı, Isı Taşınım Katsayısı denklem (27)-(29) ile hesaplanmaktadır. Denklem (30)-(32) ile düşey veya yatay plaka olması ve plakanın sıcaklığının üst veya alt yüzeyde olması ve uygun Rayleigh sayısı aralığına göre Nusselt sayıları hesaplanmaktadır [29].

$$Gr = \frac{g\beta(T_y - T_0)L^3}{\nu^2} \quad (27)$$

$$Ra = GrPr \quad (28)$$

$$H = \frac{kNu}{L} \quad (29)$$

Tablo 4.2 Nusselt Sayısı Hesaplama Tablosu

Geometri	Açıklama	Karakteristik Uzunluk	Ra Aralığı	Nu	Denklem Numarası
Düşey Plaka	-	L	-	$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^{(2)}$	(30)
Yatay Plaka	Sıcak bir plakanın üst yüzeyi	A_y/p	10^7-10^{11}	$Nu = 0,15Ra_L^{1/3}$	(31)
Yatay Plaka	Sıcak bir plakanın alt yüzeyi	A_y/p	10^5-10^{11}	$Nu = 0,27Ra_L^{1/4}$	(32)

$$\dot{Q}_t = HA(T_y - T_0) \quad (\text{kW}) \quad (33)$$

$$\dot{Q}_l = \varepsilon\sigma A(T_y^4 - T_0^4) \quad (\text{kW}) \quad (34)$$

Sistemi tanımak, enerji verimliliğini tespit etmek ve ekserji hesaplarını gerçekleştirebilmek için tanımlanan enerji dönüşümleri; aşağıdaki gibi giren enerji, çıkan enerji, toplam enerji kaybı ve enerji verimi olarak denklem (35)-(38) ile özetlenebilir.

$$\dot{Q}_g = \dot{Q}_{dg} + \dot{Q}_h + \dot{Q}_{eg,g} \quad (\text{kW}) \quad (35)$$

$$\dot{Q}_\zeta = \dot{Q}_{bg} + \dot{Q}_{eg,\zeta} + \dot{Q}_k \quad (\text{kW}) \quad (36)$$

$$\dot{Q}_k = \dot{Q}_g - (\dot{Q}_{bg} + \dot{Q}_{eg,\zeta} + \dot{Q}_p + \dot{Q}_a) = \dot{Q}_d + \dot{Q}_t + \dot{Q}_l \quad (\text{kW}) \quad (37)$$

$$\eta_l = \frac{\dot{Q}_p + \dot{Q}_a}{\dot{Q}_g} \quad (38)$$

4.4. Ekserji Denklikleri

Ekserji özelliği, belirli bir çevrede bulunan bir sistemin iş potansiyelidir ve sistemin, çevre ile dengeye gelmesiyle elde edilebilen en fazla yararlı iş miktarını temsil eder [25]. Bir sistemde nükleer, manyetik, elektrik ve yüzey gerilimi etkilerinin yokluğunda kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal ekserji söz konusudur. Bu çalışmada potansiyel enerji ve kinetik enerjiden kaynaklanan ekserji ihmal edilmiştir. Ekserji, fiziksel ekserji ve kimyasal ekserjinin toplamı olarak denklem (39)'daki gibi incelenmiştir. Çevre ile denge hali söz konusu olduğunda ekserji "0" dır. Kimyasal denge söz konusu ise kimyasal ekserji, fiziksel denge söz konusu ise fiziksel ekserji "0" dır.

$$\dot{E}x = \dot{E}x^{fiz} + \dot{E}x^{kim} (\text{kW}) \quad (39)$$

Enerjiden farklı olarak ekserjinin korunumu olmamaktadır. Bunun sebebi artan düzensizlik ile oluşan entropi üretimidir. Sistemde ısıl kayıplar, kimyasal tepkime, türbülans oluşumu vs gibi sebeplerden dolayı entropi üretimi olmaktadır bu durum denklem (40) ve (41)'deki gibi ekserji yıkımına yani tersinmezliklere sebep vermektedir.

$$\dot{E}x_g - \dot{E}x_\zeta - \dot{E}x_{yok olan} = \Delta \dot{E}x_{KH} \quad (\text{kW}) \quad (40)$$

$$\dot{E}x_{yok olan} = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (\text{kW}) \quad (41)$$

Sisteme sürekli olarak giren doğal gazın ekserjisi Kotas TJ [30]'nin tanımladığı gibi denklem (42) ile verilmektedir. Doğal gaz için kimyasal ekserji katsayısı 1,04 seçilmektedir [30].

$$\dot{E}x_{dg}^{kim} = \dot{m}_{dg} \varphi LHV \quad (\text{kW}) \quad (42)$$

Atmosferik hava; bir fan ile herhangi bir sıkıştırma yapılmadan, doğal gaz ile tepkimeye girmesi için yakıcılara verilmektedir. Bu nedenle basıncı 1 atm, sıcaklığı çevre hava sıcaklığı

olan 300K'dir. Yanma havası, çevre hava koşullarında sisteme giriş yaptığı için ölü haldedir, yani ekserjisi "0" dır.

Baca gazı hem fiziksel hem de kimyasal olarak denge halinde olmadığı için fiziksel ve kimyasal ekserjisi aşağıdaki gibi ayrı ayrı incelenmektedir ve toplamı denklem (43)'deki gibi baca gazının ekserjisini oluşturmaktadır. Denklem (45) ile baca gazının fiziksel ekserjisi, bir mol doğal gaz başına açığa çıkan baca gazı için hesaplanmaktadır. Benzer şekilde kimyasal ekserjisi de denklem (47) ile hesaplanmakta ve doğal gazın molar debisi ile çarpılarak toplam ekserji, denklem (44) ve (46) ile sırasıyla fiziksel ve kimyasal olarak hesaplanmaktadır. Denklem (47)'de yer alan y_i ve y_i^e sırasıyla; H₂O, N₂, O₂ ve CO₂ bileşenlerinin baca gazı ve atmosfer bileşimine göre molar kesridir, n_i ise bileşenlerin mol sayılarıdır [31, 32]. Tablo 4.3'te atmosferik kuru havanın bileşenlerinin hacim yüzdesi, Tablo 4.4'de ise nemli havanın bileşenleri n_i , y_i ve y_i^e değerleri listelenmiştir. Burada H₂O oranı, ölçüm yapılan günlerin ortalaması olan %2,7 bağıl nem değerine göre hesaplanmıştır.

$$\dot{E}x_{bg} = \dot{E}x_{bg}^{fiz} + \dot{E}x_{bg}^{kim} \quad (\text{kW}) \quad (43)$$

$$\dot{E}x_{bg}^{fiz} = \dot{n}_{dg} \bar{e}x_{bg}^{fiz} \quad (\text{kW}) \quad (44)$$

$$\bar{e}x_{bg}^{fiz} = \sum n_i [(\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0(\bar{s} - \bar{s}_0)]_i \quad (\text{kJ/kmol CH}_4) \quad (45)$$

$$\dot{E}x_{bg}^{kim} = \dot{n}_{dg} \bar{e}x_{bg}^{kim} \quad (\text{kW}) \quad (46)$$

$$\bar{e}x_{bg}^{kim} = \bar{R}T_0 \sum_i n_i \ln\left(\frac{y_i}{y_i^e}\right) \quad (\text{kJ/kmol CH}_4) \quad (47)$$

Tablo 4.3 Kuru Havanın Bileşenlerinin Hacimsel Olarak Oranı

Molekül Simgesi	Hacimsel Oran (%)	Molekül Simgesi	Hacimsel Oran (%)
N ₂	78,084	Kr	0,000114
O ₂	20,9476	H ₂	0,00005
Ar	0,934	Xe	0,0000087
CO ₂	0,0314	O ₃	0,000007
Ne	0,001818	NO ₂	0,000002
He	0,000524	I ₂	0,00001
CH ₄	0,0002	Diğer	0,0002753

Tablo 4.4 Nemli Havanın Bileşenleri ve Yanma Gazının Bileşenleri

Molekül Simgesi	y_i^e	y_i	n_i
N ₂	0,041227	0,71808	7,896
O ₂	0,20083	0,009094	0,1
CO ₂	0,000301	0,090942	1
H ₂ O	0,041227	0,181884	2

Endo gaz adı verilen karışım, kimyasal bir tepkimeye girmeksizin yüksek sıcaklıktaki fırından, ısı farkı nedeni ile bir miktar ısı alarak sistemi terk eder. Kimyasal olarak dengede olan endo gazın sadece fiziksel ekserjisinde değişme söz konusudur. Endo gazın fiziksel ekserjisi denklem (48) ve denklem (49) ile aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır. Endo gazın debisi ve çıkış sıcaklığı sabit kabul edildiği için ekserji değişimi tüm sistem boyunca sabittir.

$$\dot{E}x_{eg}^{fiz} = \dot{n}_{eg} \bar{e}x_{eg}^{fiz} \quad (\text{kW}) \quad (48)$$

$$\bar{e}x_{eg}^{fiz} = \sum n_i [(\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0(\bar{s} - \bar{s}_0)]_i \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (49)$$

Isıl işlem boyunca AKF içinde ısıya maruz bırakılan parçanın ve aparatın, AKF'ye giriş sıcaklığı ile fırın sıcaklığı arasında bir fark oluştuğu için parça ile aparat ısı depolar. Bu sebepten dolayı kontrol hacminde yani sistemin toplam ekserjisinde denklem (40) ile ifade edildiği gibi bir değişim gerçekleşir. Isı transferinden kaynaklanan bu değişim denklem (50) ve denklem (51) ile sırasıyla parça ve aparat için aşağıdaki gibi ayrı ayrı verilmiştir.

$$\Delta \dot{E}x_p^{fiz} = \dot{m}_p c_p [(T_2 - T_1) - T_0 \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)]_p \quad (\text{kW}) \quad (50)$$

$$\Delta \dot{E}x_a^{fiz} = \dot{m}_a c_a [(T_2 - T_1) - T_0 \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)]_a \quad (\text{kW}) \quad (51)$$

Bir önceki konuda bahsedildiği gibi enerjinin bir kısmı sıcaklık farkından dolayı atılmaktadır. Bilindiği gibi ısı makinesi yardımı ile atık ısının bir kısmı ile iş üretmek mümkündür. Denklem (52) ile ısı geçişinden elde edilebilecek ekserji aşağıdaki gibi açıklanmaktadır.

$$\dot{E}x_k = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \dot{Q}_k \quad (\text{kW}) \quad (52)$$

Yukarıda tanımlanan ekserji denklikleri ile ekserji veriminin çıkarılması için aşağıdaki gibi giren ekserji, çıkan ekserji ve ekserji değişimi sırasıyla denklem (53)-(55)'de düzenlenmiştir. Son olarak ikinci yasa verimi ve ekserji yıkımı oranı da denklem (56) ve denklem (57) ile aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\dot{E}x_g = \dot{E}x_{dg}^{kim} + \dot{E}x_h \quad (\text{kW}) \quad (53)$$

$$\dot{E}x_{\zeta} = \dot{E}x_{bg} + \dot{E}x_{eg}^{fiz} + \dot{E}x_k \quad (\text{kW}) \quad (54)$$

$$\Delta\dot{E}x = \Delta\dot{E}x_p^{fiz} + \Delta\dot{E}x_a^{fiz} \quad (\text{kW}) \quad (55)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}x_{\zeta}}{\dot{E}x_g} \quad (56)$$

$$\eta_{yok\ olan} = \frac{\dot{E}x_{yok\ olan}}{\dot{E}x_g} \quad (57)$$

4.5. Kütle Denklikleri Çözümü

Doğal gaz ile ilgili hesaplamaları doğru yapabilmek için doğal gazın özellikleri aşağıdaki gibi Tablo 4.5'de verilmiştir. φ , kimyasal ekserji katsayısı ise Kotas TJ [30]'nin kaynağında doğal gaz için belirttiği değer alınmıştır.

Tablo 4.5 Doğal gazın özellikleri

Özellikler	Tanımı	Değeri
SG	Spesifik gravite	0,60274
ρ	Özgül kütle	0,738357 kg/m ³
LHV	Alt ısı değer	45.000 kJ/kg
c	Isı kapasitesi	2 kJ/kg K
φ	Kimyasal ekserji katsayısı	1,04

Yapılan ölçümler sonucunda ilgili denklemler aracılığıyla yapılan hesaplamalar ile Tablo 4.6'daki değerler elde edilmiştir. Burada ve bundan sonraki tüm analizlerde, (1-3) ile başlangıç aşamasından 3. aşamaya kadar olan kısım ve (3-5) ile 3. aşamadan 5. aşamaya yani ısıtma bölümünün son aşamasına kadar olan kısım simgelenmektedir. Bu aşamalarda süreç farklı özellikler gösterdiği için belirtildiği gibi iki ayrı kısımda incelenmiştir. Endo gaz tüm

süreç boyunca sabit debide verilmektedir. Tablo 4.7’de ise hava yakıt oranı, ürün yakıt oranı ve hava fazlalık katsayısı görülmektedir.

Tablo 4.6 Kütle değerleri tablosu

	Ölçüm Tarihi					
	1. Ölçüm		2. Ölçüm		3. Ölçüm	
Kütle/ Kütlesel Debi	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)
m_a (kg)	195	195	345	345	312	312
m_p (kg)	467	467	675	675	753	753
\dot{m}_h (kg/s)	0,14354155	0,04220478	0,18106553	0,04066384	0,17696903	0,04295987
\dot{m}_{dg} (kg/s)	0,00399259	0,00117392	0,00503632	0,00113106	0,00492238	0,00119492
\dot{n}_{dg} (kmol/s)	0,00022948	0,00002792	0,00028947	0,00006500	0,00028292	0,00006880
\dot{m}_{bg} (kg/s)	0,14758966	0,18617189	0,18617189	0,04181063	0,18195986	0,04417141
\dot{m}_{eg} (kg/s)	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021
\dot{n}_{eg} (kmol/s)	0,000121	0,000121	0,000121	0,000121	0,000121	0,000121

Tablo 4.7 Yanma özellikleri tablosu

Tanım	Değer
Hava/Yakıt Kütlesel Oran	35,95
Ürün/Yakıt Kütlesel Oran	36,96
Yakıt/Hava Molar Oran	0,05

4.6. Enerji Denklikleri Çözümü

Yapılan ölçümler sonucu Bölüm 4.3’teki denklemler kullanılarak, giren ve çıkan enerji ile kontrol hacmi içerisindeki enerji değişimleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar için gerekli sıcaklık ölçümü ortalamaları ile ısı kapasiteleri, sırasıyla Tablo 4.8 ve Tablo 4.9’da yer almaktadır. Baca gazı ve endo gaz için sırası ile Tablo 4.10 ve Tablo 4.11’de molekül ağırlıkları, entalpileri ve entropileri verilmiştir. Bir otomasyon sistemi olmadığı için baca gazı ve endo

gazın çıkış sıcaklıkları üç ölçümde de sabit kabul edilmiştir. Bölüm 4.3'teki denklemlere ilgili entalpi değerleri ve ölçüm sonuçları eklenerek Tablo 4.12 enerji değerleri tablosu elde edilmiştir.

Tablo 4.8 Sıcaklık Ölçümü Ortalamaları

	Açıklama	Ölçüm Tarihi		
		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
T_{a,p1}	Aparat ve parçanın 1 anındaki sıcaklığı (K)	573	573	573
T_{a,p3}	Aparat ve parçanın 3 anındaki sıcaklığı (K)	1198	1198	1198
T_{a,p5}	Aparat ve parçanın 5 anındaki sıcaklığı (K)	1198	1198	1198
T_{y1-3}	Fırın yüzeyinin 1-3 arasındaki ortalama sıcaklığı (K)	363	352	370
T_{y3-5}	Fırın yüzeyinin 3-5 arasındaki ortalama sıcaklığı (K)	367	361	374

Tablo 4.9 Isıl İşlem Gören Parça ve Aparatların Isı Kapasiteleri Tablosu

	Açıklama	Değer (kJ/kg.K)
c_a	Aparatın ısı kapasitesi	0,452
c_p	Parçanın ısı kapasitesi	0,5

Tablo 4.10 Baca Gazı Bileşenlerinin Moleküler Ağırlıkları, Entalpileri ve Entropileri

	Moleküler Kütle (kg/kmol)	\bar{h} (kJ/kmol) (300K)	\bar{h} (kJ/kmol) (750K)	\bar{s} (kJ/kmol K) (300K)	\bar{s} (kJ/kmol K) (750K)
CO₂	44,01	9431	29629	213,915	254,117
H₂O	18,015	9966	25977	188,928	221,215
O₂	31,999	8736	22844	205,213	233,649
N₂	28,013	8723	22149	191,682	218,889

Tablo 4.11 Endo Gaz Bileşenlerinin Moleküler Ağırlıkları, Entalpileri ve Entropileri

	Moleküler Kütle (kg/kmol)	\bar{h} (kJ/kmol) (300K)	\bar{h} (kJ/kmol) (1198K)	\bar{s} (kJ/kmol K) (300K)	\bar{s} (kJ/kmol K) (1198K)
CO	28,011	8.723	37.026	197,723	240,595
H₂	2,016	8.522	35.200,3	130,754	171,629
N₂	28,013	8.723	36.709,7	191,682	234,058

Tablo 4.12 Enerji Değerleri Tablosu

	Ölçüm Tarihi							
	1. Ölçüm		2. Ölçüm		3. Ölçüm		Ortalama	
Enerji (kW)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)
$\Delta \dot{Q}_a$	22,6	0	33,3	0	28,02	0	27,95	0
$\Delta \dot{Q}_p$	48,9	0	58,9	0	61,13	0	56,28	0
\dot{Q}_h	43,1	12,7	54,4	12,2	53,12	12,90	50,19	12,59
\dot{Q}_{dg}	182	53,5	229,6	51,6	224,43	54,48	212,03	53,19
\dot{Q}_{bg}	110,6	32,5	139,5	31,3	136,31	33,09	128,78	32,31
$\dot{Q}_{eg,g}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\dot{Q}_{eg,\zeta}$	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
\dot{Q}_t	8,01	8,45	7,29	7,71	9,05	9,38	8,11	8,51
\dot{Q}_i	13,36	14,29	12,10	12,45	15,21	16,35	13,55	14,36
\dot{Q}_d	18,4	7,6	29,7	9	24,52	5,23	24,21	7,27
\dot{Q}_k	39,8	30,4	49,1	29,1	48,77	30,96	45,88	30,15

4.7. Ekserji Denklikleri Çözümü

Enerji denkliklerinin elde edilmesinin ardından ekserji değerleri Bölüm 4.4'teki denklemler kullanılarak Tablo 4.13'deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 4.13'de üç ayrı ölçümün hesaplamaları sırasıyla verilmiştir ve ortalama ekserji değerleri elde edilmiştir. Aparatın, parçanın, yanma havasının, doğal gazın, baca gazının, endo gazın ve kayıpların ekserjisi sırasıyla listelenmiştir. Ekserji yıkımı tespit edilmiştir.

Tablo 4.13 Ekserji Değerleri Tablosu

	Ölçüm Tarihi							
	1. Ölçüm		2. Ölçüm		3. Ölçüm		Ortalama	
Ekserji (kW)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)
$\Delta \dot{E}x_a$	14,58	0	21,50	0	18,10	0	18,06	0
$\Delta \dot{E}x_p$	31,56	0	38,02	0	39,49	0	36,36	0
$\dot{E}x_h$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\dot{E}x_{dg}$	186,85	54,94	235,70	52,93	230,37	55,92	217,64	54,60
$\dot{E}x_{bg}$	55,97	16,46	70,61	15,86	69,01	16,75	65,20	16,36
$\dot{E}x_{eg}$	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81
$\dot{E}x_k$	6,91	5,54	7,25	4,92	9,23	6,13	7,79	5,53
$\dot{E}x_{yok olan}$	76,02	31,13	96,52	30,35	92,73	31,24	88,42	30,90

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada AKF'nin enerji ve ekserji analizleri çıkarılmıştır. Süreç, ısı olarak farklı iki karakteristik yapı gösterdiği için iki ayrı aşamada incelenmiştir. Bu aşamalar difüzyon gerçekleştirilirken ısı dengeye ulaştığı (1-3) aşaması ve ısı denge içerisindeki ortamda difüzyon süresinin tamamlandığı (3-5) aşamasıdır. Aşağıdaki gibi tablo 5.1'de ölçüm günlerine göre ve günlerin ortalamasına göre enerji verimi, ekserji verimi ve ekserji yıkımı oranları (1-3) ve (3-5) aşamaları için ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 5.1 Ölçüm Günlerine Göre Enerji Verimi, Ekserji Verimi ve Ekserji Yıkımı Oranları

%	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama
Enerji Verimi (1-3)	31,58	32,32	32	32,11
Enerji Verimi (3-5)	0	0	0	0
Ekserji Verimi (1-3)	24,70	25,25	25	25
Ekserji Verimi (3-5)	0	0	0	0
Ekserji Yıkımı (1-3)	40,68	40,95	40,26	40,63
Ekserji Yıkımı (3-5)	56,66	57,33	55,85	56,60

Enerji verimi (1-3) aşaması için parça ve parçaların bağlı olduğu aparatların istenen sıcaklığa getirilmesi için gerekli net enerjinin, toplam enerji girişine oranı olarak hesaplanmıştır ve ortalama enerji verimi %32,11 olarak tespit edilmiştir. Ekserji verimi de benzer şekilde parça ve aparatın ekserji değişiminin, toplam giren ekserjiye oranı olarak hesaplanmıştır ve ortalama % 25 olarak tespit edilmiştir.

Sürtünme, kimyasal tepkime ve ısı kayıpları gibi tersinmezlikler nedeni ile iş yapabilme potansiyelinin bir kısmı kaybedilmektedir. Ekserji yıkımı olarak da adlandırılan bu kayıplar (1-3) aşaması için ortalama % 40,63 oranındadır.

Aparatlar, ısı transferinin düzgün şekilde gerçekleşmesi amacı ile kullanılmaktadır. Bu aparatlar ısı transferinin düzgün şekilde gerçekleşmesini sağlarken, önemli oranda kütleleri ve ısı kapasiteleri nedeni ile enerjinin bir bölümünü taşımaktadırlar. (1-3) aşamasında parça ve aparatın aldığı ısı enerjisi, toplam giren

enerjinin ortalama %31,99'unu oluşturmaktadır. Bununla birlikte parça ve aparatın aldığı ısının %33,18'i aparattan kaynaklanmaktadır. Bu sebepten aparat tasarımı, kütlesi ve ısı kapasitesi düşürülecek şekilde gerçekleştirilmelidir.

Enerji verimi ve ekserji verimi (3-5) aşamalarında % 0 çıkmaktadır. Çünkü; artık parça ve aparat denge sıcaklığına gelmiştir ve ısı almamaktadır. Ancak buna rağmen sementasyon sürecinin bir gereği olan difüzyon süresi henüz tamamlanmamıştır. Endo gaz ve yüksek sıcaklığın korunması ile sürdürülen sementasyon süreci sırasında ısı kaybı devam etmektedir. Difüzyon süresi tamamlanırken, parçanın ısı sabit kalmakta fakat ısı kayıplarını gidermek için enerji tüketimi sürmektedir. Bu durumda da ekserji yıkımı oranlarını kıyaslamak daha doğru olmaktadır. Bu oran (3-5) sürecinde ortalama %56,60'tır. Literatürde kıyaslanabilecek bir çalışma olmaması ile birlikte (3-5) sürecinde, (1-3) sürecine göre ekserji yıkımı %15,97 daha fazladır.

Bir diğer yaklaşım da, tüm sürecin (1-3) ve (3-5) toplam enerji tüketimi incelenmiştir. Buna göre enerji verimi, ekserji verimi ve ekserji yıkımı oranlarını tespit edilmiştir. Tablo 5.2'de de gösterildiği gibi toplam enerji verimi, toplam ekserji verimi ve toplam ekserji yıkımı sırasıyla %25,52, %19,99 ve %43,83'tür.

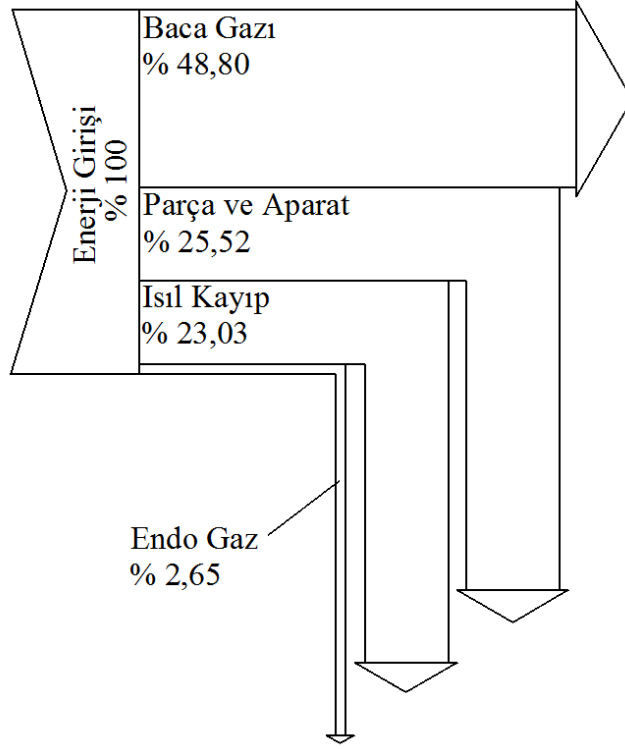
Tablo 5.2 Toplam Enerji Verimi, Ekserji Verimi ve Ekserji Yıkımı Oranı

	%
Enerji Verimi	25,52
Ekserji Verimi	19,99
Ekserji Yıkım Oranı	43,83

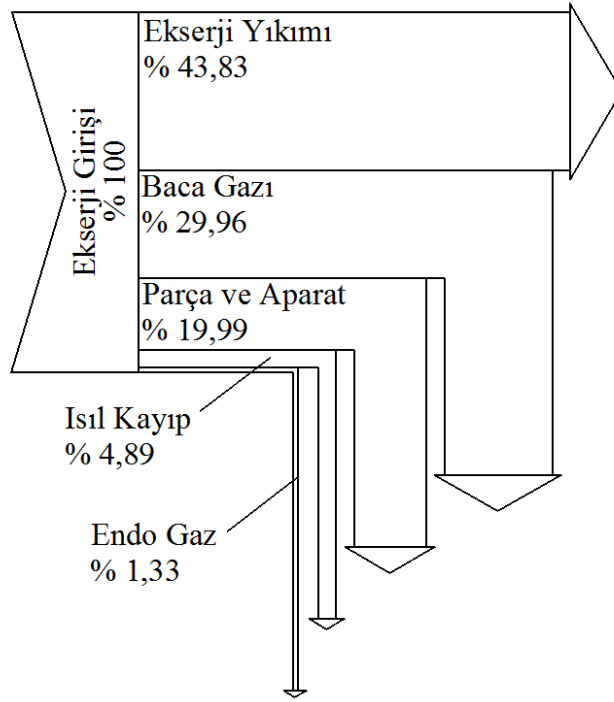
Toplam enerji dağılımı Şekil 5.1'deki gibi incelendiğinde, enerjinin %48,80'ninin baca gazı ile atıldığını, %25,52'sinin parça ve aparat üzerinde depolandığını, %23,03'nün ısı kayıp olarak çevreye atıldığını ve %2,65'inin ise endo gaz üzerinde depolanarak çevreye atıldığını göstermektedir. Ekserji yani kullanılabilirlik kavramının ise Şekil 5.2'deki gibi %43,83'ünün yok olduğu, %29,96'sının baca gazından kaynaklandığı, %19,99'unun parça ve aparat üzerinde

depolandığı, %4,89'unun ısıı kayıptan kaynaklandığı ve %1,33'ünün endo gazdan kaynaklandığı Sankey diyagramında gör÷lmektedir.

Ekserji yıkımından sonra en yüksek oran %29,96 olan baca gazının ekserjisidir. Baca gazı enerjisi doğrudan çevreye atılmaktadır. Baca gazı ile çevreye atılan ısı, ısıı geri kazanım yöntemleri ile yeniden değerlendirilebilir. Bu enerji, parçaların ön ısıtma fırınlarında kullanılabilir ve enerji ile ekserji verimi önemli oranda arttırılabilir. Bu sayede atığın çevreye zararlı etkileri de önemli ölçüde azalır.



Şekil 5.1 Enerji Akış Diyagramı



Şekil 5.2 Ekserji Akış Diyagramı

KAYNAKLAR

1. Rivero, R., Application of the exergy concept in the petroleum refining and petrochemical industry, *Energy Conversion and Management*, 2002, 43, 1199–1220.
2. Bisio, G., Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovered energy, *Energy*, 1996, 22, 501-509.
3. Bisio, G., Rubatto, G. and Martini, R., Heat transfer, energy saving and pollution control in UHP electric-arc furnaces, *Energy*, 2000, 25, 1047–1066.
4. Çamdalı, Ü., Tunç, M. and Dikeç, F. A thermodynamic analysis of a steel production step carried out in the ladle furnace, *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21, 643-655.
5. Petela, R., Hutny, W. and Price, J.T., Energy and exergy consumption and CO emissions in 2 an ironmaking process, *Advances in Environmental Research*, 2002, 6, 157-170.
6. Camdalı, Ü. and Tunc, M., Exergy analysis and efficiency in an industrial AC electric ARC furnace, *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23, 2255–2267.
7. Ostrowski, O. and Zhang, G., Energy and exergy analyses of direct ironsmelting processes, *Energy*, 2005, 30, 2772-2783.
8. Taniguchi, H., Mouri, K., Nakahara, T. and Arai, N., Exergy analysis on combustion and energy conversion processes, *Energy*, 2005, 30, 111–117.
9. Min, Y. and Jiang, M., Exergy analysis and optimization of ladle furnace refining process, *Journal of Iron and Steel Research International*, 2010, 17(11), 24-28.
10. Kalinci, Y., Hepbasli, A. and Dincer, İ., Exergoeconomic analysis of hydrogen production from plasma gasification of sewage sludge using specific exergy cost method, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36, 11408-11417.
11. Chen, B., Liao, Z., Wang, J., Yu, H. and Yang, Y., Exergy analysis and CO2 emission evaluation for steam methane reforming, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37, 3191-3200.
12. Seepana, S. and Jayanti, S., Optimized enriched CO2 recycle oxy-fuel combustion for high ash coals, *Fuel*, 2012, 102, 32-40.
13. Gürtürk, M., Öztop, H.F. and Hepbaşlı, A. Energy and exergy assessments of a perlite expansion furnace in a plaster plant, *Energy Conversion and Management*, 2013, 75, 488-497.
14. Takla, M., Kamfjord, N.E., Tveit, H. and Kjelstrup, S., Energy and exergy analysis of the silicon production process, *Energy*, 2013, 58, 138-146.
15. Zhang, Q., Wua, Y., Dor, L., Yang, W. and Blasiak, W., A thermodynamic analysis of solid waste gasification in the Plasma Gasification Melting process, *Applied Energy*, 2013, 112, 405-413.
16. Gürtürk, M., Oztop, H. F. and Hepbasli, A. Energy management and environmental aspects of a high capacity perlite furnace through exergetic analysis, *Energy Conversion and Management*, 2014, 82, 188-201.
17. Hosseini, S. E. and Wahid, M. A., Enhancement of exergy efficiency in combustion systems using flameless mode, *Energy Conversion and Management*, 2014, 86, 1154-1163.
18. Suetens, T., Klaasen, B., Acker, K.V. and Blanpain, B., Comparison of electric arc furnace dust treatment technologies using exergy efficiency, *Journal of Cleaner Production*, 2014, 65, 152-167.

19. Utlu, Z. and Hepbaşı, A. Exergoeconomic analysis of energy utilization of drying process in a ceramic production, *Applied Thermal Engineering*, 2014, 70, 748-762.
20. Acevedo, L., Uson, S. and Uche, J., Exergy transfer analysis of an aluminum holding furnace, *Energy Conversion and Management*, 2015, 89, 484-496.
21. Gürtürk, M., Öztıp, H.F. and Hepbaşı, A., Comparison of exergoeconomic analysis of two different perlite expansion furnaces, *Energy*, 2015, 80, 589-598.
22. Anon., 2015, Batı Isıl İşlem Firma Tanıtımı, <http://www.batiisil.com/>
23. Batı Isıl İşlem San. ve Tic. A.Ş.
24. Anon. 2015, Kromschroder Kendinden Reküperatörlü Yakıcı Özellikleri, http://www.kromschroeder.de/fileadmin/kromschroeder/PW/LBE/pb_ecomax_gb_02.pdf
25. Çengel, Y.A. ve Boles, M. A., Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik (A. Pınarbaşı, Çev.), Ankara, Palme Yayıncılık, 2013, 978 s.
26. Manisa Organize Sanayi Bölgesi Müdürlüğü (BOTAŞ)
27. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Sanayide enerji yönetim esasları, 2014, Cilt II.
28. Acaroğlu, M., Ünaldı, M. ve Aydoğan, H., Yakıtlar ve Yanma, Ankara, Nobel Yayın Dağıtım, 2010, 163 s.
29. Çengel, Y.A., Isı ve Kütle Transferi Pratik Bir Yaklaşım, (Tanyıldızı, V. ve Dağtekin, İ. Çev.) Güven Bilimsel, İzmir, Türkiye, 2011, 879 s.
30. Kotas, T.J., The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA, 1995, 328 pages.
31. Özkan, M. , Özkan, D.B., Özener, O. and Yılmaz, H., Experimental study on energy and exergy analyses of a diesel engine performed with multiple injection strategies: Effect of pre-injection timing, *Applied Thermal Engineering*, 2013, 53, 21-30.
32. Lee, D., Exergy analysis and efficiency evaluation for an aluminium melting furnace in a die casting plant, Ryerson University, Mechanical Engineering, Toronto, Ontario, Canada, 2003, 94 pages. (Doctorate *Thesis*)

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Gülay Ahu TURGUTLU
Doğum Yeri ve Tarihi : İzmir, 1983
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : gahuturgutlu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Makine Müh.	Celal Bayar Üniversitesi	Devam Ediyor
Yüksek Lisans	Endüstri Müh.	Dokuz Eylül Üniversitesi	2009
Lisans	Makine Müh.	Dokuz Eylül Üniversitesi	2007
Lise	Fen Bilimleri	Bornova Anadolu Lisesi	2001

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013-...	Celal Bayar Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010-2012	Feko Makine	Fabrika Müdürü
2009-2010	Lisi Aerospace	Kalite Güvence Müh.
2006-2009	Feko Makine	Üretim Müdürü