

BİR PORSELEN PİŞİRME FIRINININ ENERJİ-EKSERJİ ANALİZİ

Musa Hilal GÜRBÜZ

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Ramazan KÖSE

Temmuz-2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

Musa Hilal GÜRBÜZ tarafından hazırlanan “BİR PORSELEN PIŞİRME FIRINININ ENERJİ-EKSERJİ ANALİZİ” adlı tez çalışması, aşağıda belirtilen jüri tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek OY BİRLİĞİ ile Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

14/07/2020

Prof. Dr. Şahmurat ARIK
Enstitü Müdürü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Prof. Dr. Ramazan KÖSE
Anabilim Dalı Başkanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Ramazan KÖSE
Danışman, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Sınav Komitesi Üyeleri

Prof. Dr. Ramazan KÖSE
Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Oğuzhan ERBAŞ
Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Merve ŞENTÜRK ACAR
Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Kütahya Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının %14 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Prof. Dr. Ramazan KÖSE

Musa Hilal GÜRBÜZ

BİR PORSELEN PİŞİRME FIRINININ ENERJİ-EKSERJİ ANALİZİ

Musa Hilal GÜRBÜZ

Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 2020

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ramazan KÖSE

ÖZET

Türkiye'nin enerji ihtiyacı her geçen yıl artmaktadır ve enerji kaynakları da kısıtlıdır. Bu sebeple endüstride ve diğer enerji tüketimi olan alanlarda enerji verimliliği üzerine yapılan çalışmaların artırılması gerekmektedir. Ayrıca enerji zengini ülkelerin istikrarsız yapıda olmaları genellikle enerji arz güvenliğini tehlikeye sokmaktadır. Dolayısıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına ve nükleer enerji gibi sürdürülebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, seramik sektörünün bir dalı olan porselen sofraya pişirme fırında enerji ve ekserji analizi yapılarak tasarruf yöntemleri önerilmiştir. Fırının enerji tüketimi 3868 kJ/s olarak hesaplanmıştır. Fırına giren enerjinin %11,06'sı fiziksel ve kimyasal dönüşüm için kullanılmaktadır. Giren enerjinin %14,78'i Ana Egzoz Bacası Gazı ile %28,58'i Soğutma Egzoz Gazı ile kaybedilmektedir. Dolayısıyla egzoz gazlarından kaybedilen enerji %43,36 'yı bulmaktadır. Fırın duvarlarından, fırın sıcaklık ölçüm noktalarından, fırın içi gözetleme noktalarından ve fırın arabalarından toplamda %38,9'luk enerji kaybedilmektedir. Sırlı ham ürünlerin fiziksel ve kimyasal dönüşümler sonucu porselen olması için gerekli enerjiyi toplam tüketilen enerjiye oranlandığında fırın performansı %11 olarak çıkmaktadır. Sonuç olarak, fırında yapılan analizlerde enerji kayıplarının yüksek olduğu prosesler üzerine öneriler verilmiş ve amortisman hesapları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji-ekserji analizi, Enerji verimliliği, Porselen sofraya pişirme.

ENERGY-EXERGY ANALYSIS OF A PORCELAIN FIRING KILN

Musa Hilal GÜRBÜZ

Mechanical Engineering, M. Sc. Thesis, 2020

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Ramazan KÖSE

SUMMARY

Energy demanding of Turkey is increasing every year. Also it has got limited energy sources. Due to this facts, Energy efficiency studies should be increased at industry and other energy consumption areas. Further more, Energy-rich countries have an unstable structure endangers the security of energy supply. Therefore, renewable energy sources and sustainable energy sources such as nuclear energy are needed. In this study, saving methods are proposed by analyzing energy and exergy in porcelain tableware firing kiln which is a branch of the ceramics industry. Energy consumption of the kiln has been calculated as 3868 kJ/s. Incoming energy is lost around % 14,78 by main exhaust flue gas and %28,58 by cooling exhaust gas. Therefore, the energy lost from the exhaust gases reaches %43,36. A total of %38,9 energy is lost from kiln walls, kiln temperature measurement points, kiln checking points and kiln cars. When the energy required for the glazed raw products to be porcelain as a result of physical and chemical transformations is compared to the total consumed energy, the kiln performance rises to %11. As a result, in the kiln analysis, suggestions were made on the processes with high energy losses and depreciation calculations were made.

Keywords: Energy and exergy analysis, Energy efficiency, Porcelain tableware production.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana her açıdan yardımcı olan başta danışman hocam Prof. Dr. Ramazan KÖSE'ye, canımdan aziz bildiğim ve dualarını esirgemeyen anne ve babama, desteğini hep yanımda hissettiğim sevgili eşim Gülsevrim Can Gürbüz'e, varlığıyla motivasyon kaynağım olan oğlum Mete Gürbüz'e, üzerimde emeği olan tüm hocalarıma, çalışmalarımnda beni destekleyen Güral Porselen üst yönetimine ve emeği geçen herkese teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	2
2.1. Porselenin Tarihçesi	2
2.2. Sofra Eşyası Porselen Üretiminin Ülkemiz Açısından Önemi ve Konumu	2
2.3. Önceki Çalışmalar	3
3. TÜRKİYENİN ENERJİ DURUMU	9
3.1. Elektrik Tüketimi	9
3.2. Doğalgaz Tüketimi.....	11
4. PORSELEN SOFRA EŞYASI ÜRETİMİ.....	13
4.1. Sofra Eşyası Porselen Üretimi ve Aşamaları.....	13
4.2. Şekillendirme Prosesi.....	15
4.3. Fırınlama Prosesi.....	17
5. MATERYAL VE METOD	18
5.1. Genel Tanım ve Kavramlar	18
5.1.1. Kütle ve enerji tanımlamaları.....	18
5.1.2. Ekserji tanımlamaları	19
5.2. Malzemelerin Karakteristikleri	23
5.2.1. Yakıt	23
5.2.2. Ana egzoz baca gazı ve soğutma egzoz baca gazı karakteristikleri	23
5.2.3. Ham mamul ve pişmiş ürün kompozisyonu.....	24
5.3. Ölçüm Cihazları	25
5.3.1. Portatif baca gazı ölçüm cihazı	25
5.3.2. Kızılötesi termometre ve termal kamera	26

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.3.3. Isıl çift sıcaklık ölçer.....	28
5.3.4. XRD Cihazı.....	29
5.3.4. XRF Cihazı	30
5.4. Sır Fırını	30
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
6.1. Teorik Yaklaşım ve Kabuller.....	33
6.2. Fırın Ölçümleri ve Belirsizlik Analizi.....	33
6.3. Kütle Dengesi.....	38
6.4. Enerji Dengesi.....	39
6.5. Ekserji Dengesi	41
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	45
7.1. Sonuçlar	45
7.1.1. Kütle dengesi	45
7.1.2. Enerji dengesi.....	46
7.1.3. Ekserji dengesi	48
7.2. Öneriler	51
7.2.1. Fırın duvarlarından ve diğer bölgelerden kaynaklı ısı kayıpları için öneriler.....	51
7.2.2. Soğutma egzoz bacası gazı ile yanma havasının ısıtılması.....	53
7.2.3. Hava yakıt optimizasyonu.....	56
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	57
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sofra ve mutfak eşyaları sektörü dış ticaret verileri.....	3
3.1. Kaynaklara göre Eylül 2019 kurulu güç dağılımı	9
3.2. Nüfus ve enerji projeksiyonu	10
3.3. Türkiye doğalgaz tüketimi	11
3.4 Sektörlere göre doğalgaz tüketiminin 2019 yılı dağılımı.....	12
4.1. Granül görüntüsü.....	13
4.2. Sofra eşyası üretim aşamaları.....	14
4.3. Isostatik pres kalıbının membran üretimi.....	15
4.4. Isostatik pres ve kalıbı.....	16
4.5. Rötüş yapan robot kollar	16
5.1. Kızılötesi termometre cihazı	27
5.2. Termal kamera görüntüleri	28
5.3. Isıl çift sıcaklık – mV eğrileri	29
5.4. Sır fırını ısııl çift ölçümleri.....	31
5.5. Sır fırını görünümü.....	32
6.1. Sır fırını sıcaklık ölçüm noktaları	35
6.2 Sır fırını proses şeması	39
6.3 Fırın duvar ve tavan ısı kayıpları	41
7.1. Sır fırını enerji akışları şeması	46
7.2. Enerji sankey diyagramı.....	47
7.3. Ekserji sankey diyagramı	49
7.4. Fırın soğutma bölgesi ve tavanı ısı kayıpları	52
7.5. Fırın içi yıpranmış izolasyon görüntüsü.....	52
7.6. Örnek reküperatör görüntüsü	53
7.7. Reküperatör enerji geri kazanım grafiği	54
7.8. Reküperatör çıkış sıcaklıkları grafiği	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Faturalanan elektrik tüketiminin tüketici türü bazında dağılımın dönemler arası karşılaştırılması	10
5.1. Doğalgazın özellikleri	23
5.2. Ana egzoz bacası ve soğutma bacası gazları kimyasal analizi	23
5.3. Ham mamül kimyasal kompozisyonu	24
5.4. Ham ve pişmiş ürün faz analizi	24
5.5. Kimyasal reaksiyonlar	25
5.6. Baca gazı ölçüm cihazı teknik bilgileri	26
5.7. Kıızıl ötesi termometre teknik bilgileri	26
5.8. Kıızıl ötesi termal kamera teknik bilgileri	27
5.9. XRD cihazı teknik bilgileri	29
5.10. XRF Cihazı teknik bilgileri	30
5.11. Sır fırını teknik bilgileri	32
6.1. Ölçüm cihazlarının teknik özellikleri	33
6.2. Sır fırını ölçümleri	37
6.3. Ölçüm cihazlarının belirsizliği	38
6.4. Ekserji formülleri tablosu	42
7.1. Fırın kütle dengesi tablosu	45
7.2. Fırın enerji dengesi tablosu	46
7.3. Fırın ekserji dengesi tablosu	48
7.4. Tersinmezlik sonucu fırında oluşan ekserji kayıpları tablosu	50
7.5. Soğutma egzoz gazı bacası reküperatör geri kazanım tablosu	54
7.6. Reküperatör amortisman süresi tablosu	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Alan (m ²)
c_p	Sabit basınçta özgül ısı (kJ / kg K)
$\bar{c}_{p,i}$	Bileşenin molar özgül ısı (kJ / kmol K)
\dot{E}	Enerji (kJ/s)
$E\dot{x}$	Ekserji (kJ/s)
$E\dot{x}^{CH}$	Kimyasal ekserji (kJ/s)
$E\dot{x}^{KN}$	Kinetik ekserji (kJ/s)
$E\dot{x}^{PH}$	Fiziksel ekserji (kJ/s)
$E\dot{x}^{PT}$	Potansiyel ekserji (kJ/s)
$E\dot{x}_K$	Ekserji kaybı (kJ/s)
$e\dot{x}$	Özgül ekserji (kJ/kg)
$\bar{e}x_i^{CH}$	Akışın molar kimyasal ekserjisi (kJ / kmol)
$\bar{e}x_j^{CH}$	Bileşenlerin standart molar kimyasal ekserjisi (kJ / kmol)
h_t	Isı taşınım katsayısı (W/ m ² K)
h_i	Bileşenin spesifik entalpisi (kJ/kg)
\bar{h}_i	Bileşenin molar entalpisi (kJ/kmol)
$h_{gü}$	Doğalgazın yanma üst ısı değeri (kJ/Nm ³)
h_{ga}	Doğalgazın yanma alt ısı değeri (kJ/Nm ³)
\dot{m}	Kütle debisi (kg/s)
M_i	Akışın moleküler ağırlığı (kg/kmol)
P	Basınç (kPa)
\dot{Q}	Isı akışı (kJ/s)
\bar{R}	Üniversal ideal gaz sabiti (8,3143 kJ/kmol K)
s_i	Bileşenin özgül entropisi (kJ/kg K)
s	Saniye
\dot{S}	Birim zamanda entropi akışı (kJ/s K)
T	Sıcaklık (K)
V	Hız (m/s ²)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**Simgeler****Açıklama**

y_j	Bileşen j'nin toplam mol ağırlığına oranı
z	Yükseklik (m)

Kısaltmalar**Açıklama**

BOTAŞ	Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi
EPDK	Enerji Piyasası Denetleme Kurumu
PLC	Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici)
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
TSKB	Türkiye Sınai Kalkınma Bankası
XRD	X-Ray Diffraction (X Işını Kırınımı)
XRF	X-Ray Fluorescence (X Işını Floresanı)
ZÜCDER	Züccacıyeciler Derneği

1. GİRİŞ

Seramik sektöründe endüstrinin diğer alanlarında da olduğu gibi maliyetler global rekabet koşullarında pazara hâkim olmak için büyük önem taşımaktadır. Seramik sektöründe maliyetleri etkileyen en büyük kalem enerji maliyetidir. Buna ilaveten, seramik sektörünün kendi içindeki en büyük enerji gideri fırınların yakıtı olan doğalgazdır. Ülkemiz doğalgaz kaynakları açısından oldukça fakirdir. Yurtdışından doğalgaz ithal edilmektedir. Bu durum ülkemizin cari açığı problemini oluşturmaktadır. Döviz kurunda meydana gelen pozitif dalgalanmalar işletme maliyetlerini artırmaktadır.

Seramik sektörünün bir dalı olan “porselen sofraya eşyası üretiminde sırlı fırını pişirimi” enerji tüketiminin en büyük olduğu prosestir. Bu çalışmanın amacı sırlı fırınında enerji ve ekserji analizi yapmak, çıkan sonuca göre de verimlilik artırıcı öneriler ve hesaplamalar yapmaktır. Çalışmada ayrıca porselen sofraya eşyası üretimi detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Porselen sofraya eşyası üretimi; seramik kaplama malzemeleri ve seramik sağlık gereçleri üretimlerine kıyasla seramik sektörü bünyesinde görece daha ufak yer almaktadır. Türkiye’de ve Dünya’da geçmiş yıllarda, bu iki alanla ilgili enerji verimliliği bağlamında birçok çalışma yapılmıştır. Fakat porselen sofraya eşyası üretimi ile ilgili enerji verimliliği projeleri ve araştırmaları daha kısıtlıdır. Seramik üretiminde, nihai ürün haline dönüştüren sırlı pişirim aşaması (en yüksek sıcaklık olan 1360-1370°C) ile porselen sofraya eşyası üretimidir. Bu çalışmanın önemi, porselen sofraya eşyası üretiminin en yüksek pişirim sıcaklığı ile yapılan sert porselen üretimi üzerine yapılmış bir araştırma olmasıdır. Sert porselenin özelliği, pişirim sıcaklığının yüksekliği nedeniyle su emme oranının sıfır olmasıdır. Porselen sofraya eşyalarında su emme oranı porselen kalitesini belirleyen en önemli özelliktir. Çünkü porselen sofraya eşyası ürünlerinin zariflik ve dayanıklılığı dışında hijyenik olması gerekmektedir ve su emmesi sıfır olan porselen ürün, bakteri ve mikropların yaşama ve çoğalma olanaklarını yok etmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada seramik sektöründe spesifik yeri olan sert porselen sofraya eşyası üretiminde bulunan yüksek enerji tüketen ve bu enerjiyi dışa bağımlı olarak tedarik edilmesi kaynaklı problemin enerji ve ekserji çalışması ile en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Porselenin Tarihçesi

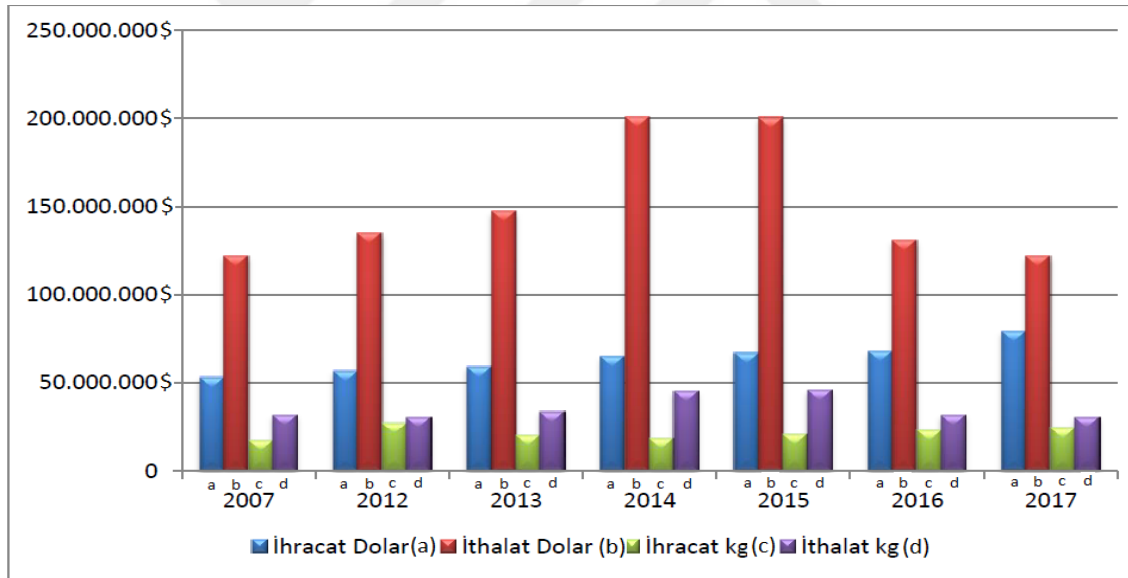
Porselenin doğum yeri Çin olarak bilinmektedir. Özellikle milattan sonra 7 yy. itibaren Tang Hanedanı'nda yapılmaya başlanmıştır. Çin sarayları için porselen üretim fabrikaları kurulmuştur. Porselen hammaddesi olarak feldispat, kuvars ve ince taneli mika içeren malzeme kullanılırken, ilave olarak da beyaz ve plastik kil kullanılmıştır. Milattan sonra 12. ve 16. yüzyıllar arasında porselen üretimi Kore ve Japonya'da yayılmıştır. Özellikle Japonya'da porselen üretimi farklı tekniklerle zenginlik kazanmış gelişmiştir. Çin porselenleriyle yarışır konuma geçmiştir. Daha sonra porselen ticaret yolları vasıtasıyla Avrupa'ya geçmiştir. Flörence'de Medici, porselen olarak adlandırdığı yarı saydam bünyeyi 1580 yılında üretmiştir. Bu, gerçek anlamda bir Çin porseleni değil, çeşitli beyaz pişen killer ve firit karışımından oluşan yumuşak porselendir. Sert porselenin (gerçek porselen) sırrı öğrenilene kadar yumuşak porselen Fransa, İtalya ve İngiltere'ye kadar yayılmıştır (Seramik Bilimi, Seramik Sanatları ve Teknolojileri Forumu, 2019).

Porselen isminin kesin olmamakla birlikte, Latince istiridyeye anlamına gelen Porsella kelimesinden geldiği düşünülmektedir. Avrupa'da teknik açıdan porselen olarak tanımlanabilen ilk ürün, Almanya'nın Meissen kentinde, 1709 yılında Johann Friederich Böttger tarafından yapılmıştır. Mükemmel sert porselenin sırlarının keşfi 18. yüzyılın son çeyreğinde Danimarka Kopenhag'da yapılmıştır. İlk büyük porselen fabrikası 1814'te Bavyera Hohenberg'de kurulmuştur (Compton's Encyclopedia, 2010). Türk çini sanatını canlandırmak, Osmanlı saraylarının sofrası eşyası gereksinimlerini sağlamak için Sultan 2. Abdülhamit tarafından 1891 yılında Yıldız Porselen kurulmuştur (Milli Saraylar İdaresi Başkanlığı, 2019).

2.2. Sofra Eşyası Porselen Üretiminin Ülkemiz Açısından Önemi ve Konumu

Sofralarda porselen sofrası eşyası kullanımı geçen yıllarla beraber Osmanlı Sarayından Cumhuriyet kurumlarının mutfaklarına, daha sonra da Türk halkının yoğun kullanımına girmiştir. Talep edilmiştir, çünkü porselen sofrası eşyası ürünleri %0,02 mertebesinde sifra yakın su emme özelliğine sahiptir. Bu özellik onu anti bakteriyel yapıda ve sağlıklı kılarken, insan sağlığı ve hijyeni açısından da kullanılmasını gerekli kılmaktadır. İlave olarak, porselen zarıflığı ile sofraları şıklaştırması sayesinde günlük hayatta geniş kullanım alanı bulmuştur. Otel, kafeterya, restaurant gibi işletmelerin büyük çoğunluğunda porselen ürünler masalarda yer almaktadır. Ayrıca günümüzde her evde porselen sofrası eşyası ürünler mutfaklarda yerini almıştır. Bu sebeplerden dolayı porselen sofrası eşyası pazarı nüfus artışıyla her geçen gün büyümektedir. Buna bağlı olarak büyüyen Pazar, porselen ithalatının hızla artmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla milli ve yerli

porselen üretimi ülke ekonomisi açısından elzem duruma gelmiştir. Sofra eşyası ithalatı ihracatın 2 katı olmasına rağmen ithalat ihracattan dolar olarak 3 kat fazladır. Bunun sebebi yurtdışından ithal edilen sofras eşyasının katma değerinin yüksek olmasıdır. İhraç edilen sofras eşyasının üretiminin kg fiyatı 2,57 dolar iken, ithalat kg fiyatı 4 dolardır. Bu bağlamda, sofras eşyası üretiminde dış ticaret açığı verildiği görülmektedir (Züccaciyeciler Derneği Dış Ticaret Raporu, 2018). Şekil 2.1'de görüldüğü gibi 2007 yılından 2014 yılına kadar ithalat sürekli artmaktadır. Porselen sofras eşyası ithalatı 2014 yılında 201 milyon doları bulmuştur. Bunun yanında, ihracat 55 milyon dolar seviyelerinde seyrettiği görülmektedir. İthalat 2015 yılından sonra kademeli olarak 120 milyon dolara kadar düşmüştür. İhracat geliri ise 2017 yılında 79,2 milyon dolara çıkmıştır. İhracat yapılan ürünlerin kg değeri parasal değerine göre paralellik göstermektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki ihracat yapılan porselen sofras eşyası ürünlerin katma değeri hala düşük devam etmektedir. Yine bu verilere göre, dış ticaret açığının azaltılması için sofras eşyası üretiminin hem nicelik hem de nitelik olarak artırılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.1. Sofra ve mutfak eşyaları sektörü dış ticaret verileri (Züccer Raporu, 2018).

2.3. Önceki Çalışmalar

Kılıçaslan (2004) tarafından, yüksek lisans tezinde mevcut bir seramik fabrikası kojenerasyon sistemine enerji ve ekserji analizleri uygulanmış, ünitelerin enerji ve ekserji kayıpları belirlenmiştir. Buna göre en büyük kayıplı üniteler tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada Çanakkale seramik fabrikaları kojenerasyon sistemlerinin termodinamik analiz ve sistem

optimizasyonunda etkin olarak kullanılabilir olan ekserji analizine geniş bir şekilde yer verilmiştir.

Utlu vd. (2006) bu çalışmada, enerji yoğun endüstrilerden biri olan çimento üretiminde kullanılan döner fırının enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Hammadde ünitesinde klinker ve döner fırın yaygın olarak kullanılmakta olup çalışmada fiili operasyon verileri kullanılmıştır. Fırın kapasitesi 82,9 ton olup döner fırının hem enerji hem de ekserji verimliliği hesaplanmış. Değerler sırasıyla %84,3 ve %25,2 bulunmuştur.

Apak (2007), ülkemizde bulunan seramik işletmelerinde birçok enerji ve ekserji kayıpları olduğundan bahsedilen çalışmada ülkemizde ve dünyadaki seramik sektörünün konumu üretim adetleri ve maliyetleri detaylı bir şekilde verilmiştir. Daha sonra enerji ve ekserji ile ilgili genel tanımlar ve kavramlar verilmiştir. Seramik fabrikasında bulunan spray dryer kurutucu ve fırın için sırasıyla enerji ve ekserji analizleri ve verimliliği çalışmaları yapılmıştır. Sırasıyla; püskürtmeli kurutucunun %65, dikey kurutucunun %87 ve fırınların enerji verimliliği %43,4 olarak bulunmuştur. Ekserji verimlilikleri ise püskürtmeli kurutucunun %30, dikey kurutucunun % 61, fırınların ise %11 olarak ifade edilmektedir. Çalışmada ısı kayıpları belirlenmiş, kayıpların ve verimliliğin düşük olduğu fırın ve püskürtmeli kurutucu için yapılabilecek verimlilik çalışmaları önerilmiştir.

Turan (2009), bu çalışmada İzmir bölgesinde bulunan bir seramik fabrikasındaki kurutucu ve fırın referans olarak, seramik sektöründe kullanılan kurutucuların enerji ve ekserji analizlerini yapılmıştır. Seramik sektörünün genel enerji durumu ve seramik sektörünün diğer sektörlerle göre kıyaslaması ve seramik üretim aşamaları anlatılmıştır. Yapılan analizler sonucu maliyet çalışmaları yapılmış ve enerji kayıpları belirlenmiştir. Enerji verimlilikleri sırasıyla; püskürtmeli kurutucunun %66, dikey kurutucunun %39 ve fırınların %35'i bulunmuştur. Ekserji verimlilikleri ise sırasıyla püskürtmeli kurutucunun %54, dikey kurutucuların %43, fırınların ise %16'yı bulunmuş olup kayıplara göre izolasyon gibi önerilerde bulunulmuştur.

Feng (2010) tarafından, Dünya'da artan enerji fiyatları yüzünden ısı geri kazanım projelerinin önemi vurgulanmıştır. Geçmişte ısı geri kazanım projeleri genellikle demir çelik sektörü ve çimento sektörü üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada, Çin'de üretim yapan RHI refrakter üretim fabrikasında bulunan tünel fırın üzerine atık ısı geri kazanım projesi yapılmıştır. Yapılan projelerin emisyon salınımlarını azaltılmasına katkı sağlayacağı ifade edilmiştir

Afşar (2011) tarafından, daha önce yapılmış benzer çalışmalarda olduğu gibi seramik genel olarak tanıtıldığı çalışmasında, seramik karo üretim adetleri, firmalara göre kıyaslamıştır.

Seramik fabrikasının üretim aşamaları ele alındığı çalışmada, enerji ve ekserji tanımlamaları yapılmıştır. Püskürtmeli kurutucu, dikey kurutucu ve fırınların enerji verimlilikleri sırasıyla; %79, %56, %79 bulunmuştur. Ekserji verimlilikleri ise yine sırasıyla; %86, %66, %89 bulunmuştur. Araştırma, Kale seramiğin Yerköy fabrikasında yapılmıştır. Enerji ve ekserji hesaplamalarında, sırasıyla spray dryer, kurutucu ve fırın için yapılmıştır. Bunlara göre enerji verimlilikleri ortaya konulmuştur.

Ayna (2012)'nin çalışmasında, doğalgazla çalışan bir seramik fırınının yakıtı elektroliz sistemi ile elde edilmiştir. Hidrojenin farklı seramik üretimleri için farklı oranlarda, çok noktadan (her yanma hücresine-brülöre ayrı ayrı) ve tek noktadan (ana doğalgaz hattına doğrudan) ilavesinin verime ve doğalgaz tüketimine etkisinin deneysel sonuçları ile değerlendirilmesi, termodinamik ve ekonomik analizinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Uşak ilinde faaliyet gösteren bir seramik fabrikasında bulunan 102 brülör içeren seramik fırınında hidrojenle zenginleştirilmiş doğalgaz yanma deneyleri gerçekleştirilmiş, birinci ve ikinci yasayı kapsayan enerji ve ekserji analizi ortaya konmuş, "Net Bugünkü Değer" yöntemi izlenerek sistem ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Hidrojen zenginleştirme uygulamasının, enerji yoğun bir sektör olan seramik sektöründe kullanılan fırınlarda, enerji tasarrufu ve enerji verimliliği için büyük bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştır.

Çağlayan (2015), bu çalışmada, enerji etütleri ve analizleri yapılmıştır. Doğalgaz tüketiminin fazla olduğu bölümlerin enerji maliyetine olan etkisinin büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlemler sonucunda işletmede yer alan püskürtmeli kurutuculara fırınlardan atık ısı geri kazanım projesi uygulaması yapılarak bu sistemin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Maliyet analizi yapılarak amortisman hesaplanmıştır. Proje maliyeti hesaplandığında amortisman süresi 11 ay çıkmıştır.

Mohammadi vd. (2016) yaptıkları çalışmada, çimento fabrikası için farklı ısı geri kazanım sistemlerini elektrik üretimi ve ekserji analizi açısından karşılaştırmışlardır. Isı kaynakları yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık olarak ikiye ayrılmıştır. Yüksek sıcaklık bölümü için çift basınçlı Rankine çevrimi, basit çift basınçlı organik Rankine döngüsü ve rejeneratif çift basınçlı organik Rankine döngüsü karşılaştırılmıştır. Ayrıca, düşük sıcaklık bölümü için basit bir organik Rankine döngüsü trans kritik karbon dioksit döngüsü ile karşılaştırılmıştır. En iyisini bulmak için sistemde, önerilen tüm döngülere bir optimizasyon algoritması uygulanmıştır. Sonuç olarak, yüksek sıcaklık bölümü için, rejeneratif organik Rankine döngüsünün en yüksek ekserji verimliliği ile yaklaşık 7 MW elektrik üretim kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir. Düşük sıcaklık bölümü için enerji üretimi 300 kW olarak hesaplanmıştır.

Johnson ve Langrish (2017) tarafından, ekserji analizi yapılarak bir sprey kurutma sisteminin ekserji verimliliğini değerlendirilmiştir. Ekserji açısından, kurutucunun ekserji verimliliği (buharlaştırma bazında) %38 hesaplanmıştır. 722 kJ/s'lik enerji tüketiminin 575 kJ/s kısmının geri kazanılabileceği değerlendirilmiştir. Ekserji kaybı yönteminin kaçınılmaz olarak Carnot verimliliğine dayanan potansiyel bir kısa yol tekniği olduğu belirtilmiştir. Çalışma, çoğunlukla kurutucu ekserji verimliliği konusundaki çalışmaların kısa bir incelemesidir.

Yazıcı (2018), yüksek lisans tezinde, Eskişehir'in Seyitgazi ilçesinde yer alan Kırka Bor Üretim Tesisindeki 75 t/h buhar kapasiteli dolaşımli akışkan yataklı kazanının enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Analizler için gerekli ölçümler ile baca gazı ve kömürün kimyasal analizini kazanın tam yükte çalışma periyodunda yapılmıştır. Kazan bir bütün olarak kabul edilmiştir. Hava ısıtıcının kazandan bağımsız olarak enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Enerji verimliliği açısından değerlendirdiğinde ise, dolaşımli akışkan yataklı kazanın enerji verimliliği hesabında kullanılan parametrelerinin referans çevre koşullarından bağımsız olduğu görülmüştür. Ancak hava ısıtıcısının enerji verimliliğinin hesaplanmasında kullanılan girdi ve çıktılar referans çevre koşullarından etkilendiği ve buna göre verimin değiştiği tespit edilmiştir.

Filkoski vd. (2018), refrakter üretiminde hammadde olarak kullanılan sinterlenmiş dolomitin temel kalsinasyon işlemi için çalışmışlardır. İşlemin genellikle şaft veya döner fırınlarda yüksek sıcaklıkta ısıtılma tabii tutulduğundan, dolomit kalsinasyonundan, fırın çıkışında büyük bir sıcak gaz akışı üreten sinterlenmiş dolomit (CaO, MgO) üretmek için önemli miktarda termal enerji gerektiren endotermik bir reaksiyon olduğundan bahsedilmiştir. Bu çalışmada, teknoloji sürecinin genel enerji verimliliğini artırmak için bir şaft fırınından egzoz gazlarının atık ısısının kullanılma olasılıkları değerlendirilmiştir. Birkaç farklı seçenek analiz edilmiştir; (a) bir ham maddenin ön ısıtılması, (b) ağır yakıtın ön ısıtılması, (c) yanma havasının ön ısıtılması, (d) yanma havasının ve ham maddenin baca gazı ile ön ısıtılması ve (e) yanma ve bir ham maddenin kurutulması için havanın ön ısıtılması. Bu seçenekler içerisinde en cazip olarak yanma ve bir ham maddenin ön ısıtılması seçilmiş ve bu nedenle daha ayrıntılı olarak analiz edilerek yıllık önemli ölçüde enerji tasarrufu ve yatırımda nispeten kısa basit geri ödeme süresi gösterilmiştir.

Çağlayan vd. (2018), seramik sektöründe yüksek rekabet koşullarında enerji maliyetlerinin büyük önem taşıdığını belirtmişlerdir. Özellikle fosil yakıtlarla sağlanan birim enerji maliyetindeki artışın, toplam %33 enerji maliyetiyle seramik endüstrisi için en büyük sorun olduğu vurgulanmıştır. Seramik endüstrisi kurutma, ısıtma, ateşleme gibi birçok termal işleme sahip olduğu ifade edilen çalışmada, ısı üretiminde kullanılan doğalgazın, enerji maliyetinin %

71'ine tekabül ettiği belirtilmiştir. Toplam doğalgaz tüketiminin % 43'ü sprey kurutucularda, % 53'ü fırınlarda tüketildiği belirtilerek, püskürtmeli kurutucuya giren ve çıkan bir maddenin enerji ve ekserjisi bulunmuş, ayrıca enerji kaybı, ekserji kaybı ve ekserji tahribatı hesaplanmıştır. Bu bilgiler kullanılarak ekolojik performans fonksiyonu (-509,49 kW) ve ekolojik performans katsayısı (0,734) belirlenmiştir. Sistemde ekserji kaybının azaltılmasının sprey kurutucunun termo-ekolojik parametrelerini olumlu yönde etkileyebileceği ön görülmüştür.

Costa vd. (2019), atık ağaç biyo kütlelerini yakıt olarak kullanan akışkan yataklı yanma teknolojisini ile çalışan 50 MW'lık bir termik santralde enerji dönüşüm sürecinin kütle, enerji ve ekserji analizlerini ele almışlardır. Buradaki ağaç atığı Portekiz kağıt hamuru ve kağıt endüstrisinde hammadde olan okaliptüs ağacı biyo kütlelerinden enerji üretimi hakkında temsili bir vaka çalışmasıdır. Kütle, enerji ve ekserji akışları ve sistemin ana bileşenlerinde, yani yanma odası, kazan, tambur, kızdırıcı, ekonomizer ve yanma havası ön ısıtıcılarında nasıl değiştiklerine dair analizler yapılmıştır. Sankey ve Grassmann diyagramları kütle, enerji ve ekserji akışlarını göstermiştir. Biyo kütle nem içeriğinin enerji ve ekserji verimliliği etkisi araştırılmıştır. Temel amaç, enerji verimliliği iyileştirmeleri için nerede ve hangi potansiyelin bulunduğunu bulmaktır. Çalışmanın sonucu, ana ekserji kaybının yanma sürecinde meydana geldiğini ve sistemin iyi ısı yalıtımı sayesinde enerji ve ekserji kayıplarının minimum olduğunu göstermektedir. Ayrıca, iyileşme için ana potansiyelin, biyo kütle nem içeriğinin azaltılması olduğunu göstermektedir.

Çağlayan ve Çalışkan (2019), seramik tesisinin pişirme işleminde kullanılan fırınlara ekolojik amaç fonksiyonu "ECO" ve ekolojik performans katsayısı "EPK" kullanılarak termo-ekolojik analiz uygulamışlardır. Beş farklı çevresel (ölü durum) sıcaklık 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C ve 30 °C dikkate alınarak hesap yapılmıştır. Ekolojik performansı etkileyen en önemli kriter olan "tersinmezlik" in, brülörlerde ısı transferi ve fırında soğutma sırasında ortaya çıktığı vurgulanmıştır. Tersinmezlik ve ekserji değerleri farklı çevre sıcaklıkları altında karşılaştırılmıştır. ECO ve EPK değerleri ortam sıcaklıklarıyla ters orantılıdır. Maksimum ECO ve EPK değerleri sırasıyla -2387.156 kW ve 0.051 olarak belirlenirken, karşılık gelen minimum değerleri sırasıyla -2577.394 kW ve 0.026'dır. Elde edilen sonuçlar endüstriyel fırınların termo-ekolojik tasarımı için bir rehber olabilir. Fırın kayıpları yüksektir. Performansı ve ekolojik gösterge sonuçlarını arttırmak için kayıpları azaltmak gerektiği, kayıpları azaltmak için fırınların yan, alt ve üst yüzeyleri için daha iyi yalıtım olması değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, daha iyi verimlilik ve çevresel değerlendirme için gazlar için atık ısı geri kazanımı dikkate alınabileceği vurgulanmıştır.

Ferrer vd. (2019) tarafından, seramik sektöründe kullanılan endüstriyel roller fırınlarında ekserji analizi yapılmıştır. Mevcut roller fırınında porselen karo üretimi yapılmaktaymış. Termodinamik ölçümlerde ve hesaplamalarda fırının enerji performansı % 15 olarak ölçülmüştür. Yapılan ekserji analizinde girdi enerjinin %83 kaybedildiği bildirilmiştir. Sadece verilen enerjinin %10 karo üretiminde fiziksel ve kimyasal dönüşüm ve üretim için kullanıldığı tespit edilmiştir. Ana tersinemezlik kaynakları olarak doğalgazın yanması, karoların soğutma prosesindeki enerji transferi ve fırın yüzeyi boyunca ısı transferleri belirlenmiştir. Bu çalışmada sonuç olarak atık ısının %61'nin tekrar kazanılabileceği vurgulanmıştır. Bu durumun da doğrudan fırın enerji performansını artıracığı belirtilmiştir.



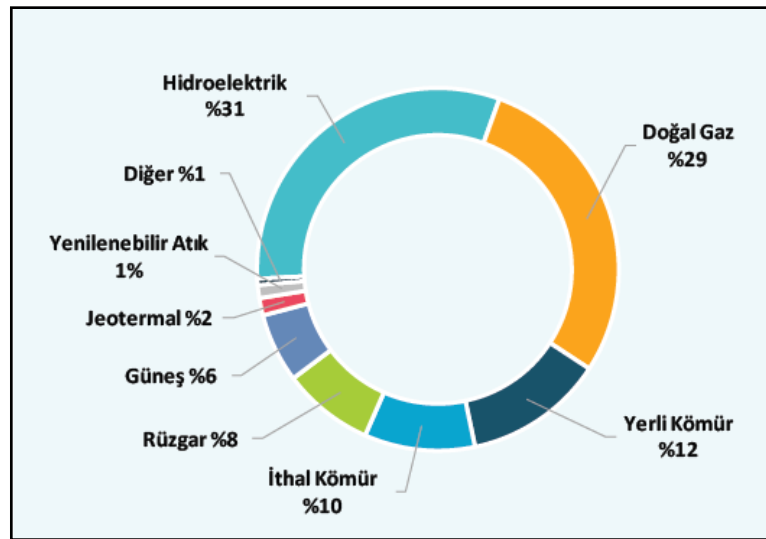
3. TÜRKİYENİN ENERJİ DURUMU

Elektrik enerjisi tüketimi, 2019 yılında bir önceki yıla göre % 0,6 azalarak 290,4 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. Elektrik üretimi ise yıllık % 0,9 gerileyerek, 291 milyar kWh olarak kayıtlara geçmiştir.

Türkiye'nin toplam kurulu gücü, 2019 yılı sonunda 91.267 MW seviyesine ulaşmış, 2020 yılı Temmuz ayında 92.105 MW olmuştur (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2020). Ülkemizde 2020 yılı Temmuz ayında kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımında yenilenebilir enerjiler %49 seviyesine yükselmiştir.

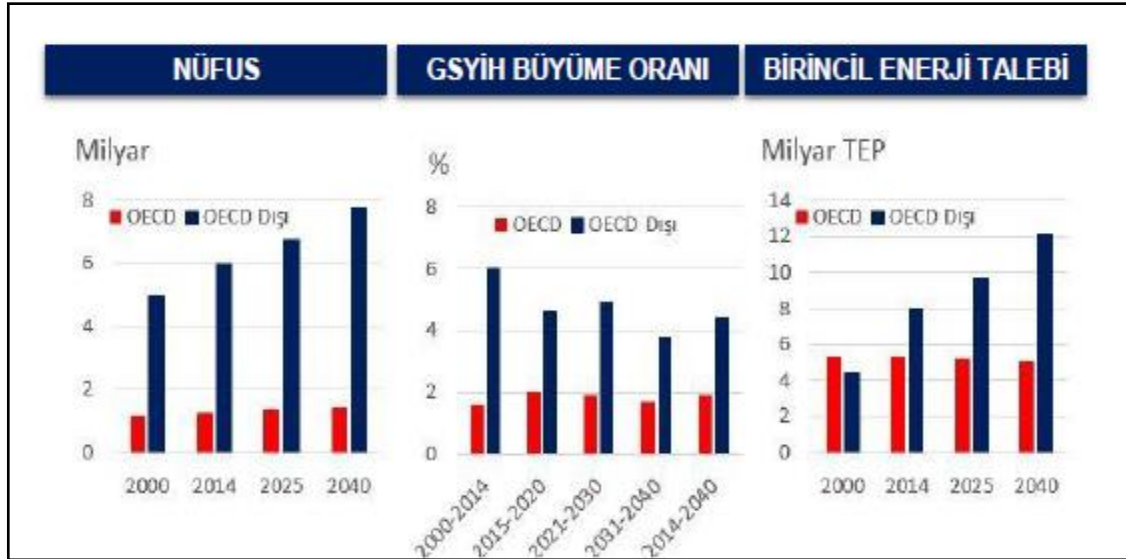
3.1. Elektrik Tüketimi

Yıllara göre Türkiye'nin kurulu gücünün gelişimine bakıldığında, 1923 yılında nüfus 12,4 milyon, kurulu güç 32,8 MW, kişi başına elektrik tüketimi 3,3 kWh iken, 1970 yılında nüfus 35,3 milyona yükselmiş, kurulu güç 2235 MW olmuştur. Ayrıca kişi başına tüketim 62 kat artarak 207 kWh'e gelmiştir. 2019 yılı Eylül ayı sonu itibarıyla 90,7 GW'a ulaşmıştır. Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarından ve yerli kaynaklardan elektrik üreten santrallere verilen teşviklerin etkisi yüksektir (TSKB, 2019). Şekil 3.1'de Türkiye'nin 2019 yılı Eylül ayı itibarıyla kaynaklara göre kurulu güç dağılımı verilmiştir. Bu bağlamda, hidroelektrik enerji %31 ile en büyük kaynak olurken Doğalgaz enerjisi ile elektrik üretimi %29'luk paya sahip olduğu görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları olan rüzgâr, güneş ve jeotermal enerji sırasıyla %8, %6 ve %2'lik paya sahip olmuştur.



Şekil 3.1. Kaynaklara göre Eylül 2019 kurulu güç dağılımı (TSKB, 2019).

Enerji ihtiyacının ve talebinin gerek dünyada gerekse ülkemizde artmasındaki temel etkenler, nüfus artışı ve ülkenin gelişmişlik düzeyi olarak sıralanabilir. Şekil 3.2’de Nüfus artışının enerji talebi üzerine projeksiyonu gösterilmektedir. Buna göre nüfus artışıyla enerji talebi orantılı bir şekilde artması ön görülmektedir.



Şekil 3.2. Nüfus ve enerji projeksiyonu (EPDK, 2017).

EPDK 2019 yılı elektrik piyasası raporuna göre elektrik tüketiminde %40,3 ile “sanayi” birinci sırada yer almaktadır. Konutların tüketimi ise %24,2 ile üçüncü sırada görülmektedir. Çizelge 3.1’de faturalanan elektrik tüketiminin tüketici bazında dönemler arası karşılaştırılması verilmiştir. Burada, sanayi elektrik tüketimi 2019 yılı eylül ayında bir önceki yıla göre %4,11 artarken, konutların elektrik tüketimi 2018 eylül ayına göre %1,25 azaldığı görülmektedir (EPDK, 2019).

Çizelge 3.1. Faturalanan elektrik tüketiminin tüketici türü bazında dağılımın dönemler arası karşılaştırılması (EPDK, 2019).

Tüketici Türü	2018 Eylül		2019 Eylül		Değişim (%)
	MWh	Pay(%)	MWh	Pay (%)	
Sanayi	7.888.240,50	38,145	8.212.221,07	40,307	4,11
Ticarethane	6.050.821,85	29,260	5.770.164,26	28,321	-4,64
Konut	4.993.222,97	24,146	4.930.839,40	24,202	-1,25
Tarımsal Sulama	1.336.748,27	6,464	1.047.395,16	5,141	-21,65
Aydınlatma	410.389,66	1,985	413.370,89	2,029	0,73
Genel Toplam	20.679.423,23	100	20.373.990,78	100	-1,48

3.2. Doğalgaz Tüketimi

Küresel ölçekte yapılan enerji tüketim tahminlerine göre, 2040 yılına kadar tüketimi artmaya devam edecek tek fosil yakıtın doğalgaz olması beklenmektedir. Dünya birincil enerji tüketiminde halihazırda 3. sırada bulunan doğalgazın, önümüzdeki yıllarda kömürü geçerek 2. sıraya çıkacağı öngörülmektedir. Kaya gazındaki gelişmelerin ve sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) üretiminin artması ile doğalgaz tüketim noktaları da dünya genelinde artmaktadır. Doğalgaz, elektrik ile birlikte sanayinin ihtiyacı olan enerjinin büyük bölümünü karşılamaktadır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin daha temiz yakıt kullanımı stratejisine paralel olarak, önümüzdeki yıllarda elektrik ve doğalgazın, sanayinin ihtiyacı olan enerjinin üçte ikisini karşılayacağı tahmin edilmektedir. 2018 yılı sonu itibarıyla ispatlanmış doğal gaz rezervlerinin miktarı 196,9 trilyon m³'tür. Bu miktarın yaklaşık %71'i birbirine yakın sayılabilecek 5 ülkede (Rusya, İran, Katar, Suudi Arabistan ve Türkmenistan) bulunmaktadır (TSKB, 2019).

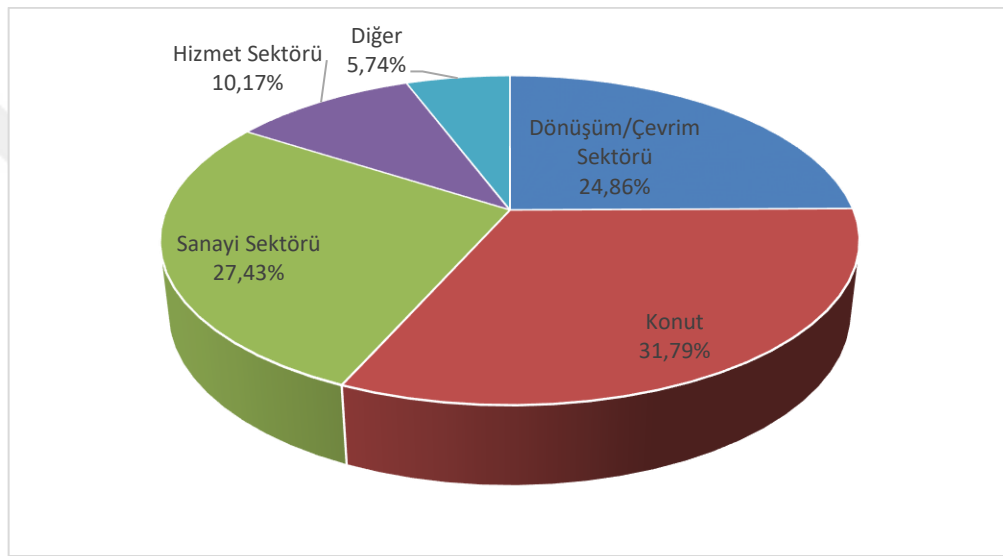
Şekil 3.3'de gösterildiği gibi, doğalgaz kullanımı 2018 yılına gelindiğinde, bir önceki yıla göre yaklaşık %8,4 azalarak, 49,3 milyar Nm³ olarak gerçekleşmiştir. 2018 yılında doğal gaz fiyatlarında yaşanan artışların ve yılın ikinci yarısında izlenen ekonomik daralmanın etkisiyle birlikte doğal gaz kullanımında düşüşler yaşanmıştır (EPDK, 2018).



Şekil 3.3. Türkiye doğalgaz tüketimi (EPDK, 2018).

Doğalgaz tüketimi 2019 yılında Şekil 3.4'deki gibi sektörel olarak gösterildiğinde; konut tüketimi %31,79, elektrik üretimi için tüketim %24,86 ve sanayi tüketimi %27,43 olarak gerçekleşmiştir. Doğal gaz tüketimi 2018 yılına kıyasla %7,96 oranında azalarak 45.285.498.424,37 Nm³ olarak gerçekleşmiştir. Bu durum büyük oranda, elektrik üretiminde,

ulaşımda kullanılan doğal gaz miktarlarındaki azalmadan kaynaklanmıştır. Bu iki sektörde bir önceki yıla göre toplamda 6.953,08 milyon Nm³ daha az doğal gaz kullanılmıştır. Elektrik üretimi için kullanılan doğal gaz miktarı 2019 yılında bir önceki yıla oranla %38,11 azalmıştır. Ulaşım sektöründe kullanılan doğal gazın miktarı %4,52 azalmıştır. Konut tüketimi, hizmet sektörü ve enerji sektöründe ise 2018 yılına göre artış görülmüştür. Doğal gaz tüketim miktarının en düşük aylık değeri 2.189,28 milyon Nm³ olarak Haziran ayında gerçekleşmiştir. En yüksek aylık tüketim ise 6.183,72 milyon Nm³ olarak Ocak ayında gerçekleşmiştir (EPDK, 2019).



Şekil 3.4. Sektörlere göre doğalgaz tüketiminin 2019 yılı dağılımı (EPDK Doğalgaz Piyasası Sektör Raporu, 2019).

4. PORSELEN SOFRA EŞYASI ÜRETİMİ

4.1. Sofra EŞyası Porselen Üretimi ve AŞamaları

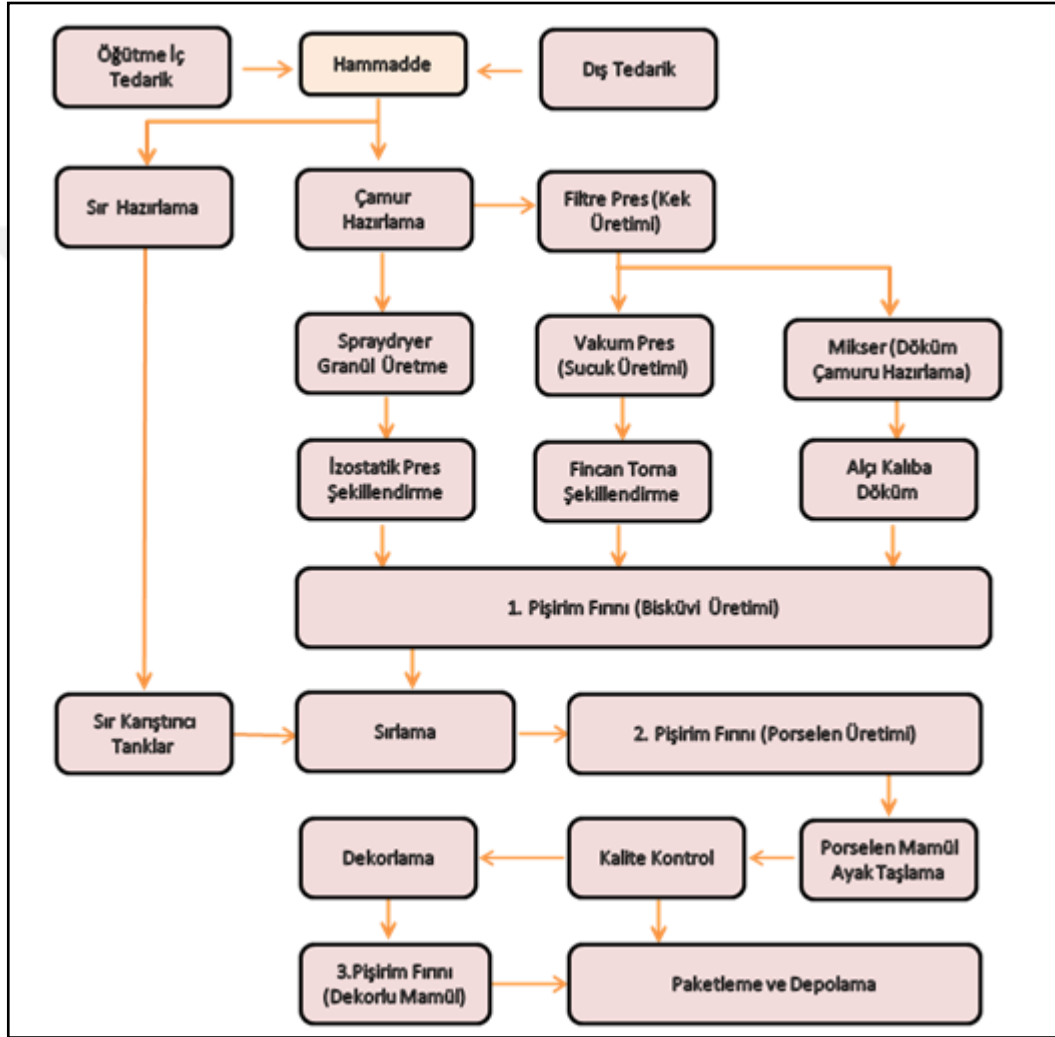
Porselen üretimi hammadde hazırlama ünitesi ile başlar. Hammadde ünitesinde masse (bünye) ve sır reçetelerine göre kullanılacak olan hammaddeler, dökme veya çuval (bigbag) olarak bakslarda stoklanırlar. Daha sonra hammaddeler otomatik yükleme silolarına depolanır. Sistem verilen reçeteye göre silolardan loadcell ile tartımı yapılarak masse çamuru hazırlanacaksa, mikserlere sır hazırlanacaksa sır değırmenlerine dozajlama yapılır. Şekillendirme süreci 3ana üretim metodu ile gerçekleştirilir. Birincisi, üretimin yaklaşık %80'ini karşılayan "isostatik presleme üretimi", ikincisi fincan, kase ve mug gibi derin formların üretildiği "fincan torna üretimi", üçüncüsü peçetelik çorbalık, demlik gibi şekillendirmesi diğer 2 metot ile yapılamayan formların üretildiği "dökümhane üretimi" denebilir. Isostatik presleme üretiminde girdi mamul olan granül için spray dryer kullanılır. Spray dryer ünitesi presler için granül üretim prosesidir. Hammadde ünitesi spray dryer ünitesi için otomatik yükleme sistemini kullanarak, masse reçetesine uygun olan dozajlamayı mikserlere yapar ve çamuru hazırlar. Spray dryer ünitesinin kuyularına gelen çamur pres şekillendirmesi için gerekli bağlayıcı ve kimyasalların ilavesiyle hazır hale gelir. Hazırlanan çamur buharlaştırma kulesinin içindeki 450-500 °C'de sıcak havanın içine püskürtülür ve çamur içindeki su buharlaştırılır. Bu hızla buharlaşmanın etkisiyle granül elde edilir. Elde edilen granül nemi, sağlıklı pres şekillendirmesi için %3-3,5 arasında olmalıdır.



Şekil 4.1. Granül görüntüsü.

Spray dryer ünitesinden preslere çuvallar halinde getirilen preslerin basımına hazır granül görüntüsü Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Burada, granüllere yakından bakıldığında içi boş küreler halinde olduğu gözlemlenecektir.

Şekil 4.2’de porselen sofraya üretiminin genel proses akışı gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Sofra eşyası üretim aşamaları.

Fincaan torna üretimi için hammadde ünitesinde reçete dahilinde çamur hazırlanır ve filtre preslere gönderilerek kek haline getirilir. Daha sonra kekler vakum preslere verilir. Fincaan torna ünitesinde kullanılacak olan %15-20 arası nemde ve havası alınmış çamur sucukları üretilir. Dökümhane ünitesi için aynı şekilde üretilen kekler mikser ile tekrar açılarak kullanılır.

4.2. Şekillendirme Prosesi

Şekillendirme 3 ana üretim metodu ile gerçekleştirilir. Bunlardan “isostatik presleme metodu” şekillendirmenin yaklaşık % 80’ini oluşturur. Fincan, mug ve kase türü derin mamuller “fincan torna metodu” ile yapılır. Diğer metot ise alçı kalıplar kullanılarak yapılan “döküm metodu”dur. Bu üretim yönteminde daha karmaşık ve diğer 2 yöntem ile üretilmeyecek formlar üretilir.

Isostatik presleme yöntemiyle şekillendirme, hidrolik sistem ile yapılır. Form yapısına göre 250-280 bar arası basınç membran kalıp yardımıyla granül ezilerek şekillendirme gerçekleştirilir.



Şekil 4.3. Isostatik pres kalıbının membran üretimi.

Pres kalıplarının membran üretimi için, Şekil 4.3’de gösterilen ayrı membran kalıbı üretilmesi gerekmektedir. Bu kalıp üretildikten sonra membran üretim ünitesinde membran dökülmektedir. Isostatik presleme, 2 ayrı aşamada yapılmaktadır. Birinci aşama, kalıpların kapatılması ve kapama basıncı uygulanmasıyla yapılır. İkinci aşamada kalıbın içine granül doldurulur ve kapanmış kalıbın içindeki membrana hidrolik yağ vasıtasıyla basınç uygulanır. Sonuç olarak Şekil 4.4’te görüldüğü gibi yağ ve membran sayesinde formun her yerine eşit basınç uygulanmış olur.



Şekil 4.4. Isostatik pres ve kalıbı.

Daha sonra şekillenen form kalıp çapaklarının temizlenmesi için rötuş ünitesine taşıma bandı ile sevk edilir. Rötuş ünitesinde sırasıyla çapak kırma, zımparalama ve süngerleme yapıldıktan sonra ürün fırın arabalarına yüklemeye hazır olur. Rötuş ünitesi form yapısına göre değişiklik gösterir. Özellikle asimetrik ve köşeli formlar Şekil 4.5'te görünen robot kollar ile rötuşlanır.



Şekil 4.5. Rötuş yapan robot kollar.

4.3. Fırlama Prosesi

Sert porselen üretiminde pişirim 2 ayrı fırınlamadan oluşur. Birincisi şekillendirilen ham mamulleri organiklerden uzaklaştırmak ve belli bir poroziteye kavuşturmak için yapılan 960 °C - 980 °C derecedeki bisküvi pişirimi, ikincisi; bisküvilerin sırlandığı 1350 C° - 1380 C°'de yapılan sır fırını pişirimidir. Fırlama sıcaklığı kullanılan reçeteye göre ufak değişiklikler gösterebilir. Bu proses sonucu mamul camsı görünüşe kavuşur ve porselen oluşur. Porselen üretiminde enerji tüketiminin %85'i fırınlama prosesinde harcanmaktadır. Bunun içindeki en büyük enerji tüketimi, yüksek sıcaklıktan dolayı sır fırını pişirimidir.



5. MATERYAL VE METOD

5.1. Genel Tanım ve Kavramlar

Enerji kısaca formdan forma dönüşebilen iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Enerji; elektrik, manyetik, kimyasal, ısı, kinetik, potansiyel nükleer gibi değişik biçimler alabilir. Kullanılışına göre yenilenemez (tükenir) ve yenilenebilir (tükenmez) enerji olarak ikiye ayrılır. Doğrudan kullanılabilir enerjiye “birincil enerji”, enerji dönüşüm yöntemleriyle farklı formlarda kullanılan enerjiye “ikincil enerji” denir. Termodinamikte sistemin sınırı dışında kalan her şey “çevre”, içerdiği değişik fazların yoğun özellikleri sistemin geçirdiği termodinamik durum sürece bağlı olarak değişmeyen ve üniform olan çevrenin bir parçası da “ortam” olarak tanımlanır.

5.1.1. Kütle ve enerji tanımlamaları

Termodinamiğin 1. kanunu enerjinin korunumu prensibine dayanmaktadır. Bu yasaya göre enerji yok edilemez fakat şekil değiştirebilir. Enerjinin şekil değiştirmesi bir enerji türünün bir diğer enerji türüne dönüşümünü ifade etmektedir. Termodinamiğin birinci yasası deneysel gözlemlere dayanarak, enerjinin var veya yok edilemeyeceğini, ancak bir biçimden diğerine dönüşebileceğini vurgular (Çengel ve Boles, 1996).

Açık ve sürekli akış halindeki sistemlerde, kontrol haciminde enerji transferleri ve yapılan iş ek olarak kütle akışıyla enerji sisteme girer ve ayrılır. Ayrıca sistemde depolanan enerji miktarı sıcaklıktaki değişimler ve sisteme giren kütle miktarındaki artış veya azalışa bağlı olarak değişebilir. Sonuç olarak yine de toplam enerji korunur. Bu çalışmada incelenen kısımlar sürekli akışlı açık sistemlerdir.

Bu bağlamda, bir sürekli akışlı kontrol hacmi için kütle dengesi (kütlenin korunumu) Eşitlik 5.1'deki gibi oluşturulur.

$$\frac{d}{dt} m_{sis} = \sum_i \dot{m}_{g,i} - \sum_j \dot{m}_{ç,j} \quad (5.1)$$

Sürekli akışlı sistemlerde kütle artması gerçekleşmemektedir. Dolayısıyla Eşitlik 5.1 düzenlendiğinde Eşitlik 5.2 elde edilmiştir.

$$\sum_i \dot{m}_{g,i} = \sum_j \dot{m}_{ç,j} \quad (5.2)$$

Sürekli akışlı açık sistemler için enerji dengesi,

$$\frac{d}{dt} E_{sis} = \sum_i \dot{E}_{g,i} - \sum_j \dot{E}_{\zeta,j} \quad (5.3)$$

$\frac{d}{dt} E_{sis}$, ifadesi sistemdeki iç, kinetik, potansiyel vb. enerji değişimlerini, $\sum_i \dot{E}_{g,i} - \sum_j \dot{E}_{\zeta,j}$, ifadesi ise birim zamanda ısı, iş ve kütle ile gerçekleşen enerji geçişlerini belirtmektedir. Eşitlik 5.3 daha açık bir şekilde ifade edildiğinde,

$$\frac{d}{dt} E_{sis} = \sum \dot{Q}_g - \sum \dot{Q}_{\zeta} + \sum \dot{W}_{sis,g} - \sum \dot{W}_{sis,\zeta} + \sum_i m_{g,i} \left(h + \frac{v_i^2}{2} + gz \right) - \sum_j m_{\zeta,j} \left(h + \frac{v_j^2}{2} + gz \right) \quad (5.4)$$

Sadeleştirildiğinde,

$$\dot{Q}_g - \dot{W}_{\zeta} + \dot{m} \left(\Delta h + \frac{\Delta v^2}{2} + g \Delta z \right) = 0 \quad (5.5)$$

Sistemden iş çıkışının olmadığı biliniyorsa ve ayrıca kinetik ve potansiyel enerji ihmal edilirse Eşitlik 5.5 aşağıdaki gibi düzenlenecektir. Bu ifadelerde “h” birim kütle başına entalpiyi, “v” hızı(m/s), “z” ise belirli bir referansa göre yüksekliği(m) ifade etmektedir. Isı ve iş dışındaki diğer enerji türleri (yüzey gerilim, elektriksel vb.) ihmal edilmiştir.

$$\dot{Q} = \dot{m} (\Delta h) \quad (5.6)$$

Sabit basınçtaki özgül ısının (C_p) sıcaklıktan bağımsız olduğu koşullarda, entalpi değeri Eşitlik 5.7 kullanılarak hesaplanabilir.

$$h = c_p (T - T_0) \quad (5.7)$$

5.1.2. Ekserji tanımlamaları

Bir önceki “Kütle ve enerji tanımlamaları” başlığında termodinamiğin birinci kanunu konu edilmiştir. Termodinamiğin ikinci kanunu ise genel olarak herhangi bir sistem için entropinin her zaman artacağına işaret etmektedir. Termodinamiğin ikinci yasasına birçok tanımlama getirilmiştir.

Termodinamiğin ikinci kanununun kullanımı, yalnızca hal değişimlerinin yönünü belirlemekle sınırlı değildir. İkinci kanun, enerjinin niceliği ile birlikte niteliğinin de olduğunu belirtir. Birinci yasa, niteliğiyle ilgilenmeksizin, enerjinin niceliğiyle ve birbirleri arasındaki dönüşümüyle ilgilidir. Enerjinin korunması mühendislerin başlıca ilgi alanlarındandır.

Süreçlerin hal değişimleri belirli bir yönde gerçekleşmektedir. Bu değişimler bir kez gerçekleştiğinde, sistemle çevre arasındaki etkileşimler zıt yönde gerçekleştirilerek sistemi farklılaştırır, yeniden ilk haline dönmesi imkansızlaşır. Bu nedenle, bu tür hal değişimlerine tersinmez hal değişimleri denir. Tersinir hal değişimi ise, bir yönde gerçekleştikten sonra çevrede iz bırakmadan tersi yönde gerçekleştirilebilir. Başka bir deyişle, ters yöndeki hal değişimi gerçekleştikten sonra hem sistem hem de çevre ilk hallerine geri döner. Bu ancak, her iki yöndeki hal değişimlerinin sonunda, sistem ve çevresi arasındaki net ısı ve iş etkileşiminin sıfır olması durumunda olanaklıdır. Tersinir olmayan hal değişimlerine tersinmez hal değişimleri denir. Enerjinin niteliğinin ve bir hal değişimi sırasında bu niteliğin nasıl azaldığının belirlenmesinde gerekli araçları ikinci kanun sağlar. Bunun yanında, termodinamiğin ikinci kanunu, yaygın olarak kullanılan ısı cihazları ve soğutma cihazları gibi tasarımların verimlerinin kuramsal sınırlarının ve kimyasal reaksiyonların tamamlanma oranlarının belirlenmesinde de kullanılır (Yazıcı, 2018).

İş üretebilme ihtimalinin kalmadığı temel sıkıştırılabilir saf maddeden oluşan sistemin termodinamik durumu ölü durum olarak adlandırılır. Ölü haldeki bir sistem, çevresinin sıcaklığı ve basıncı nicelik olarak aynıdır, çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjisi yoktur ve çevresiyle kimyasal tepkimeye girmez. Aynı zamanda sistem ve çevresi arasında dengelenmemiş manyetik, elektrik ve yüzeysel gerilme etkileri yoktur. Ölü haldeki bir sistemin özellikleri sıfır indis (P₀, T₀, h₀, u₀ ve s₀ vb.) ile gösterilir (Çengel ve Boles, 2012; Rosen ve Dinçer, 2004). Ölü hal sıcaklığı ve basıncı aşağıdaki gibi kabul edilir.

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$P_0 = 101,325 \text{ kPa}$$

Isıl sistemlerde tüketilen enerji değil, enerjinin iş yapabilme yeteneği (kabiliyeti, potansiyeli) olarak tanımlanan kalitesidir. Enerjinin iş yapabilme yeteneğinin ölçüsü de “ekserji” olarak adlandırılır (Yüncü,2010). Örneğin, güç santrallerinde üretilen 1 kJ elektriğin (işin) iş yapabilme yeteneği, enerjisi 1 kJ olan su buharının iş yapabilme yeteneğinden daha fazladır. Elektriğin ekserjisi su buharının ekserjisinden daha fazladır, elektrik ekonomik olarak da daha değerlidir.

Açık sistemler; genellikle kütle, ısı ve iş transferinin gerçekleştiği sistemler olarak tanımlanır. Belirli bir haldeki sistemde var olan enerjinin iş potansiyeli, sistemden elde edilebilecek en fazla yararlı iştir. Enerjinin en üst seviyede yararlı işe dönüştürülebilir kısmına ekserji denilebilir. Bilindiği gibi bir hal değişimi sırasında yapılan iş, ilk hale, son hale ve hal değişimi yoluna bağlıdır. Ekserji analizinde, ilk hal belirlidir ve bu nedenle değişken değildir.

Belirli iki hal arasında gerçekleşen hal değişimindeki en fazla iş eldesi, tersinir halde gerçekleşir. Bu nedenle iş potansiyeli belirlenirken tersinmezlikler göz önüne alınmaz. Son olarak, en çok iş elde edebilmek için, hal değişimi sonunda sistemin ölü halde olması gerekir (Yazıcı, 2018; Moran, 2006).

Açık sistemler için ekserji dengesi enerji, entropi ve kütle dengesinden türetilmektedir.

$$\frac{d}{dt} E\dot{x}_{kh} = \sum_g \dot{m}_g ex_g - \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} ex_{\zeta} + \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{kh} - P_0 \frac{dV_{kh}}{dt}\right) - E\dot{x}_y \quad (5.8)$$

Sürekli akış halinde $\frac{d}{dt} E\dot{x}_{kh} = 0$ ve $\frac{dV_{kh}}{dt} = 0$ olduğundan dolayı Eşitlik 5.8 tekrardan düzenlenirse,

$$\sum_g \dot{m}_g ex_g - \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} ex_{\zeta} + \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{kh} - E\dot{x}_y = 0 \quad (5.9)$$

Bir kütleli debisi olan akışkanın ekserjisi,

$$E\dot{x}_{kh} = (U - U_0)_{kh} + P_0(V - V_0)_{kh} - T_0(S - S_0)_{kh} + E\dot{x}_{kh}^{KN} + E\dot{x}_{kh}^{PT} + E\dot{x}_{kh}^{CH} \quad (5.10)$$

Özgül ekserjisi,

$$e\dot{x}_{kh} = (u - u_0)_{kh} + P_0(v - v_0)_{kh} - T_0(s - s_0)_{kh} + e\dot{x}_{kh}^{KN} + e\dot{x}_{kh}^{PT} + e\dot{x}_{kh}^{CH} \quad (5.11)$$

Sistemin yükseltisinde ve hızında bir değişim olmadığı için potansiyel ve kinetik ekserjileri hesaba katılmaz. Sistem sınırlarına giren ve çıkan özgül ekserji değeri hesabında Eşitlik 5.12 kullanılır.

$$e\dot{x}_{kh} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + e\dot{x}_{kh}^{CH} \quad (5.12)$$

Ekserji de enerjinin transfer şekillerinde olduğu gibi iş, ısı veya kütle ile transfer edilmektedir.

İş diğer enerji şekillerine kolaylıkla dönüştürülebilmektedir. İş sıcaklık ve basınçtan bağımsız olarak tamamı ekserjisine eşittir. İş ile transfer edilen ekserji miktarı Eşitlik 5.13'de verildiği gibi ifade edilir.

$$E\dot{x}_{i\dot{s}} = \dot{W} \quad (5.13)$$

Isı transferi ile ortaya çıkan ekserji kavramı, kontrol yüzeyinden ölü halde bulunan çevreye doğru yapılan ısı transferinden elde edilecek maksimum iş olarak tanımlanır. Sisteme transfer ısı pozitif olarak alınmaktadır. Bu sebep ile kontrol bölgesine oluşan ısı transferi ekserji kazancı olarak kabul edilir (Afşar, 2011). Isı transferi ile gerçekleşen ekserji miktarı Eşitlik 5.14'deki gibi gösterilir (İbrahim vd., 2017).

$$\sum E\dot{x}_{isi} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k \quad (5.14)$$

Kütle akışının başlangıç koşullarından referans çevre koşullarına gelmesiyle elde edilen maksimum iş miktarı kararlı bir maddenin kütle ile ekserji transferidir.

Ekserji nükleer, elektriksel, manyetik ve yüzey gerilmelerinin olmadığı termodinamik bir çevrimde fiziksel, kinetik, potansiyel ve kimyasal ekserji bileşenleri hesaba katılır (Güngör, 2013). Dolayısıyla özgül ekserji Eşitlik 5.15'deki gibi yazılabilir (Topal, 2017; Xiong, 2011).

$$e\dot{x} = e\dot{x}^{PH} + e\dot{x}^{CH} + e\dot{x}^{KN} + e\dot{x}^{PT} \quad (5.15)$$

Ekserji analizinde sistemin hızında ve yüksekliğinde bir değişim yaşanmadığı için kinetik ve potansiyel ekserji ihmal edilmiştir. Sistemin akış ekserjisi Eşitlik 5.16'daki gibi ifade edilir.

$$E\dot{x} = \dot{m}(e\dot{x}^{PH} + e\dot{x}^{CH}) \quad (5.16)$$

Belirli bir sıcaklık ve basınçtaki bir sistemin ölü hal olarak tanımlanan T_0 ve P_0 koşullarına geldiğinde sistemden elde edilebilir maksimum iş fiziksel ekserji olarak tanımlanır (Sahin, 2012). Ele alınan sistemin veya incelenen noktanın özgül fiziksel ekserjisi Eşitlik 5.17'deki gibi tanımlanır (Ahmadi, 2016),

$$e\dot{x}^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5.17)$$

Akışkanın ideal gaz olarak ele alınması durumunda fiziksel ekserji Eşitlik 5.18 gibi kullanılır (Han, 2016).

$$e\dot{x}^{PH} = \bar{c}_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + R_s T_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (5.18)$$

Kimyasal ekserji bir termodinamik çevrime göre çalışan bir sistemin giriş ve çıkış ekserji değerlerinde katkısı önemlidir. Özellikle yakıt ve baca gazı bu sistemin ekserji bileşenlerini oluşturmaktadır (Çallak, 2015). Kimyasal ekserji hesabında çevrenin ölü hal koşulları başlangıç

olarak ele alınmaktadır (Afşar, 2011; Dinçol, 2016). Böylece çevreyle etkileşimde bulunarak madde ve ısı transferi gerçekleştiren operasyonlarda maddenin çevreyle etkileşimde bulunduğu koşullardan denge hali olan ölü durum koşullarına getirildiğinde ulaşılabilecek maksimum iş miktarı kimyasal ekserjiyi tanımlar (Afşar, 2011). İdeal gazlar için molar kimyasal ekserji değeri Eşitlik 5.19 kullanılarak hesaplanır,

$$\bar{e}x^{CH} = \sum_j y_j ex_j^{CH} + \bar{R}T_0 \sum_j y_j \ln y_j \quad (5.19)$$

5.2. Malzemelerin Karakteristikleri

5.2.1. Yakıt

Sır fırınında kullanılan yakıt doğalgazdır. Kullanılan doğalgazın kimyasal analizi hacimsel olarak %90 Metan CH₄ (g), %7,5 Etan C₂H₆(g), %1,5 Propan C₃H₈(g), %0,4 Butan C₄H₁₀(g), % 0,6 Nitrojen N₂(g) olarak sıralanmaktadır. Fırında yakıt olarak kullanılan doğalgazın özellikleri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Doğalgazın özellikleri (BOTAŞ, 2020).

Özellikleri	Birimi	Sembolü	Değeri
Yoğunluk (25 °C de)	kg/Nm ³	P _g	0,726
Molekül Ağırlığı	kg/kmol	M _g	17,76
Üst Isıl Değeri	kJ/Nm ³	h _{gü}	39.387
Alt Isıl Değeri	kJ/Nm ³	h _{ga}	35.597
Özgül Isısı	kJ/kgK	c _{pg}	2,152

5.2.2. Ana egzoz baca gazı ve soğutma egzoz baca gazı karakteristikleri

Fırın ana egzoz baca gaz analizi ve soğutma egzoz baca gazı analizi 5.3.1 de belirtilen cihaz ile ölçüm yapılmış, sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 5.2. Ana egzoz bacası ve soğutma bacası gazları kimyasal analizi.

Parametreler		Ana Egzoz Gazları %	Soğutma Egzoz Gazları %
Kimyasal	CO ₂	3,1	---
	H ₂ O	5,3	---
Kompozisyon	O ₂	15,2	21
	N ₂	76,4	79
Sıcaklık (K)		373	573

5.2.3. Ham mamul ve pişmiş ürün kompozisyonu

Porselen ürünlerin kimyasal kompozisyon analizi Çizelge 5.10'da teknik özellikleri verilen XRF cihazı ile yapılmıştır. Ham mamulün kimyasal kompozisyonu Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Ham mamül kimyasal kompozisyonu.

Oksitler	Ham mamul kompozisyonu (% Ağırlıkça)
SiO_2	68,34
Al_2O_3	26,09
Fe_2O_3	0,61
CaO	1,58
K_2O	2,97
Na_2O	0,11
MgO	0,30
Toplam	100

Faz analizi için Çizelge 5.9'da teknik özellikleri verilen XRD cihazı kullanılmıştır. Mineralojik fazların ham ve pişmiş ürünlerde ağırlıkça yüzdeleri Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Ham ve pişmiş ürün faz analizi.

Mineralojik Fazlar	Ham Mamül (% Ağırlıkça)	Pişmiş Ürün (%Ağırlıkça)
Kaolinit	51,69	<SS
Potasyum Feldspat	22,26	<SS
Quartz	26,05	13,5
Mullit	<SS	60,3
Amorf Faz	<SS	26,2
Toplam	100	100

Ekserji hesaplamaları için entalpi, entropi değişimlerinin ve pişirim sırasında meydana gelen fiziksel, kimyasal dönüşümlerinin gibbs enerjisinin bilinmesi gerekmektedir. Ham ve pişmiş ürünlerin mineralojik fazlarını hesaba katarak ve analitik metot uygulayarak yapılmış ilgili termodinamik tablolardan entalpi, entropi ve gibbs enerjileri Çizelge 5.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.5. Kimyasal reaksiyonlar.

Komponentler	Reaksiyonlar	Δh_j (kJ/kg)	Δs_j (kJ/kgK)	Δg_j (kJ/kg)
Serbest Su	$H_2O(s) \rightarrow H_2O(g)$	2500	6,60	476
Kil Mineral Dehidrasyonu				
Kaolinit	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O(k) \rightarrow$ $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2(k) + 2H_2O(g)$	1158	1,34	846
İllit/Muskavit Mika	$(1/2)K_2O \cdot (3/2)Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O(k)$ $\rightarrow (1/2)K_2O \cdot (1/2)Al_2O_3 \cdot 3SiO_2(k)$ $+ Al_2O_3(k) + H_2O(g)$	374	0,33	673
Kuvars Dönüşümü				
Kuvars Dönüşümü	$\alpha - SiO_2(k) \rightarrow \beta - SiO_2(k)$	11,7	0,01	7,18
Müllit Faz Oluşumu				
Müllit	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2(k) \rightarrow (1/3)3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2(k)$ $+ (4/3)SiO_2(k)$	-280	0,02	-642
Camsı Faz Formasyonları				
Potasyum Feldispat	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2(k) \rightarrow K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2(s)$	207	0,17	139

5.3. Ölçüm Cihazları

5.3.1. Portatif baca gazı ölçüm cihazı

Fırınlarda baca gazları ölçümleri portatif analiz cihazı MRU marka VARIO PLUS model ile ölçülmüştür. Cihazın teknik bilgileri Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Baca gazı ölçüm cihazı teknik bilgileri.

Cihaz Adı	Baca Gazı Emisyon Ölçüm Cihazı					
Marka	MRU					
Model	Vario Plus					
Seri No	060975					
Ölçülen Parametre	Ölçüm Aralığı		Çözünürlük		Hassasiyet	
CO ₂	%	5.00/40.00	ppm	0.1	%	±0.3
CO	ppm	10,000/20,000	ppm	1	ppm	±10
O ₂	%	0/25.00	%	0.01	%	0,2
NO	ppm	1,000/5,000	ppm	1	ppm	±5

5.3.2. Kızılötesi termometre ve termal kamera

Kızılötesi ışınım her sıcaklıktaki cisim tarafından yayınlandığından, siyah cisim ışınımı sayesinde hiç ışık olmaksızın bütün ortamı görmek mümkündür. Bir cismin yaydığı kızılötesi ışınım miktarı sıcaklıkla birlikte arttığından, termografi sıcaklık farklarını da görmeyi sağlar. Kızılötesi sıcaklık ölçüm cihazı ve termal kamera bu sisteme göre çalışır.

Fırının duvar ısı kayıplarının ölçülmesi için kızıl ötesi sıcaklık ölçüm cihazı ve termal kamera kullanılmıştır. Bu cihazların teknik özellikleri Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Kızıl ötesi termometre teknik bilgileri.

Marka / Model	Raytek/RSCMTFSU	
Noktaya olan mesafe oranı	4:1	
Çözünürlük	°C	0,5
En iyi doğruluk	%±1,5	
Mutlak maksimum sıcaklık ölçümü	°C	+200
Yanıt süresi	ms	500
Ağırlık	gram	227
Boyutlar	mm	152 x 101 x 38
Mutlak minimum sıcaklık ölçümü	°C	-30

Bu cihaz ile sıvı fırının yüzey sıcaklıkları ölçülerek ışınım ve taşınım ile ısı kaybı hesaplamaları yapılmıştır. Fırın boyunca birçok noktadan ölçümler yapılmıştır. Fırın içi duvar sıcaklıkları ısı çiftleri vasıtasıyla ölçülmektedir. Fırın dışından yapılan kızılötesi ölçüm cihazları ile tespit edilen yüksek sıcaklık farklılıkları izolasyon eksikliklerini göstermektedir.



(a)



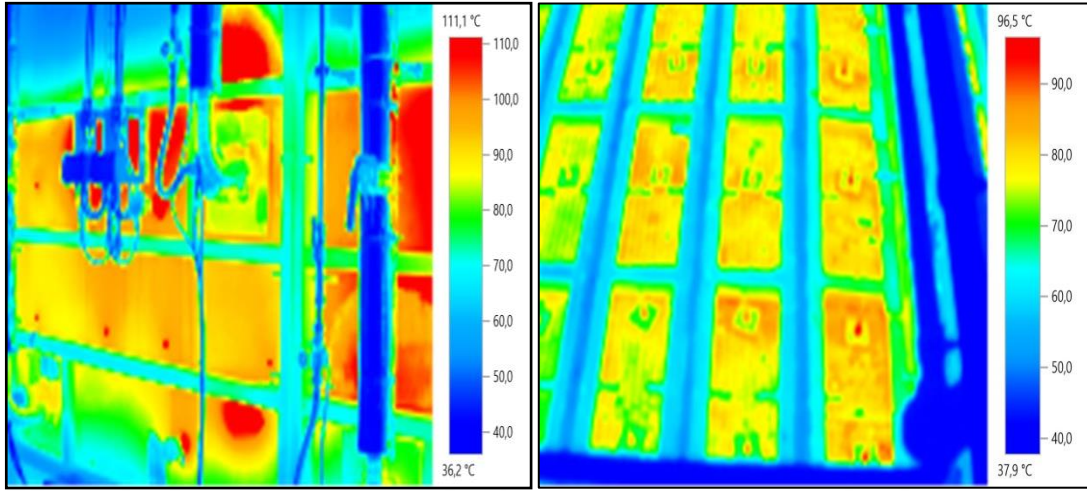
(b)

Şekil 5.1. Kızılötesi termometre cihazı. a) Cihaz genel görüntüsü b) Cihaz ölçüm esnasında.

Çizelge 5.8. Kızıl ötesi termal kamera teknik bilgileri.

Marka /Model	Testo 880	
Termal Hassaslık	°C	<0.1
Detektör tipi	pixels	FPA 160x120
Tayf Aralığı	µm	8 – 14
Sıcaklık Aralığı	°C	0 - 350
Doğruluk	°C	±2 veya ±2 % okunan değer
Radyo Sondasının Doğruluğu	°C	±2% Bağıl Nem /±0.5
Malzeme Işınım Seçimi		8 malzeme + 1
Çalışma Sıcaklığı	°C	-15 ile 40
Ağırlığı	gr	900
Ölçüleri	mm	152 x106 x 262

Termal kamera ile yapılan görüntülemeler sonucu ısı kayıplarının yüksek olduğu yerlerin tespiti kolaylaşmıştır. Örnek görüntülemeler Şekil 5.2’de görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 5.2. Termal kamera görüntüleri. a) Sır fırını örnek duvar görüntüsü b) Sır fırını tavan görüntüsü.

5.3.3. Isıl çift sıcaklık ölçer

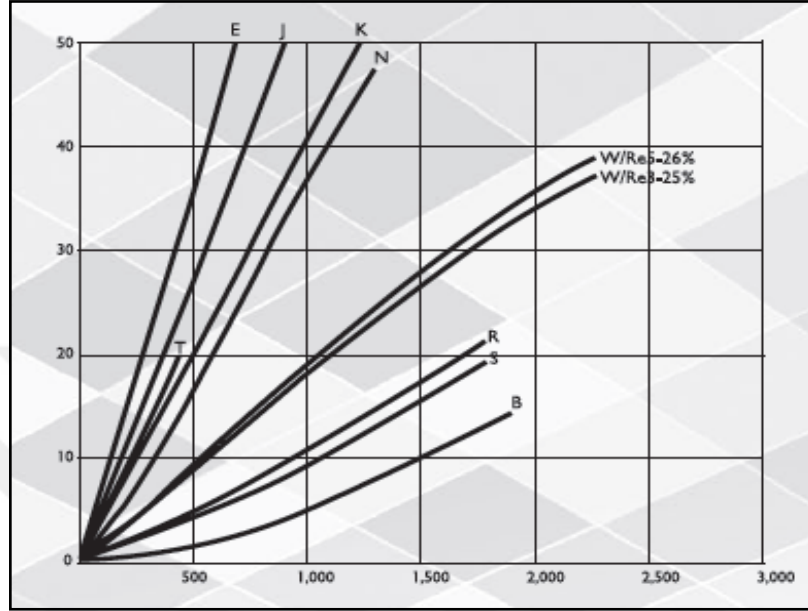
Sıcaklık ölçümü için çok çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler içinde sektörde en çok kullanılan sensörlerden birisi ısıl çifttir. Sır Fırınında sıcaklık ölçümü ve kontrolü ısıl çiftler (termokupllar) yardımıyla yapılmaktadır. Isıl çiftlerle -200°C 'den $+2320^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ölçüm yapılabilir.

Isıl çift iki farklı alaşımın ucunun kaynaklanması ile oluşturulan basit bir sıcaklık ölçü elemanıdır. Kaynak noktası sıcak nokta, diğer açık iki uç soğuk nokta (veya referans noktası) olarak anılır. Isıl çift olayı sıcak nokta ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkından doğar. Bu sıcaklık farkına orantılı, soğuk nokta uçlarında mV mertebesinde gerilim üretilir. Isıl çiftin sıcak noktası ve soğuk noktası arasındaki sıcaklık dağılımı nasıl olursa olsun üretilen gerilim, sıcak ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkına oranlıdır. Dolayısı ile soğuk noktanın sıcaklığı önemlidir. Sıcak nokta aynı kalmak kaydı ile soğuk nokta sıcaklığı değiştiği takdirde farklı sıcaklıklar okunacaktır.

Isıl çiftler endüstride sıcaklık ölçümlerinde çok geniş uygulamalarda kullanılmaktadır. Isıl çift aslında iki farklı metal veya alaşım tel olmasına rağmen genelde prosese çıplak olarak daldırılmaz. Çeşitli mekanik darbeler, fiziksel ve kimyasal aşındırıcı özellikler göz önüne alınarak belli özel koruyucu kılıflar içinde kullanılırlar.

Mevcut sır fırınında 2 tip ısıl çift kullanılmıştır. Bunlardan K tipi nikel-krom-nikel ısıl çift 1200°C 'ye kadar kullanılır; diğer ısıl çift S tipi olarak isimlendirilir. Isıl çiftleri %90 Platin,

%10 Radyum – saf platinden oluşur. Bu tip ısı çiftlerinde 1200°C ile 1600°C'ye kadar ölçüm yapmaktadır (Elimko Isıl çiftleri, 2019).



Şekil 5.3. Isıl çift sıcaklık – mV eğrileri (Elimko Isıl Çiftleri, 2019).

5.3.4. XRD Cihazı

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X ışınları karakteristik bir düzen içerisinde kırılması esasına dayanarak çalışmaktadır. Farklı olan her kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlamaktadır. Çalışmada, ham ve pişmiş porselen ürünün faz analizini yapmak için bu cihaz kullanılmıştır. Cihazın teknik bilgileri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. XRD cihazı teknik bilgileri.

Cihaz Adı	XRD Cihazı	
Marka /Model	Malvern Panalytical / Empyrean	
Güç	kW	4
Voltaj	kV	60
Açısal Ölçüm Aralığı	Derece	111 < 2theta < 168
Açısal Çözünürlük	Derece	0,026
Açısal Hassaslık	Derece	±0,01
Tarama Hızı	Derece/Dakika	0,0001

5.3.4. XRF Cihazı

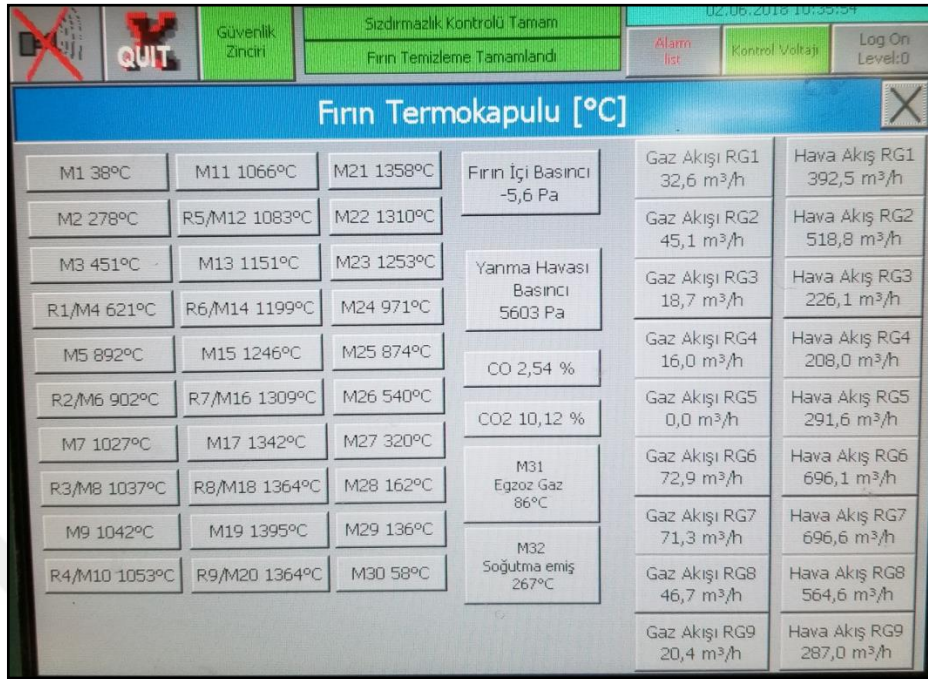
X-ışınları Floresans (XRF) spektroskopisi element kompozisyonu belirlemede kullanılan önemli yöntemlerden biridir yani nicel analiz yapmaktadır. Çalışma prensibi, atom üzerine yüksek enerjili X-ışını fotonu düşürülerek atomdan elektronlar kopartılmaktadır. Bu koşulda, atomların yörüngelerinde elektron boşlukları oluşturmakta, kararsız olan atom dış yörüngelerde boşlukları doldurarak kararlı duruma gelmektedir. Bu sırada, element karakteristiğine bağlı olarak foton enerjisi yaymaktadır. Bu prensibe dayanarak, cihazda element analizi yapılmaktadır. Çalışmada ham mamulün element analizi bu cihaz kullanılarak yapılmıştır. Cihazın teknik bilgileri Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. XRF Cihazı teknik bilgileri.

Cihaz Adı	XRF Cihazı	
Marka /Model	Malvern Panalytical / Zetium	
Güç	kW	4
Element Aralığı	Be - U	
Çözünürlük	eV	35
Algılama Sınırı	ppm	0,1

5.4. Sır Fırını

Fırınlr istenilen sıcaklığa gelinceye kadar önemli ölçüde enerji harcamaktadırlar. Porselen sofr a eşyası üretiminde maksimum sıcaklık reçeteye göre değışse de ortalama olarak 1360 °C çıkmaktadır. Sır fırını içinde sıcaklık ölçümü ve kontrolü için toplamda 32 adet ısıl çift vardır. Maksimum sıcaklığa gelinceye kadar her grupta aşamayla set sıcaklıkları verilerek fırın rejimi oluşturulur.



Şekil 5.4. Sır fırını ısııl çift ölçümleri.

Ayrıca sır fırınında toplamda 9 adet grup vardır. Her grup için hava ve gaz akışının ölçümü için kullanılan orifis plakaları vardır. Bu plakalar yardımıyla fark basınçları ölçülmektedir. Daha sonra bunlar basınç transmitterleri yardımıyla PLC ünitesine gönderilerek hava ve gaz debileri hesaplanmaktadır. Sıcaklık kontrolünü ise her grup için belirlenmiş set sıcaklıkları doğrultusunda, ısııl çiftten gelen sıcaklık ölçümüne bağlı olarak gaz vanasının PLC kontrolünde otomatik olarak açıp kapatılarak yapılmaktadır.

Fırın üretimi yapılırken giren ürünlerin belli bir sıcaklığı ve nem değeri vardır. Bu nem değeri buharlaştırma ısıısı olarak enerji kaybı yaşatmaktadır. Diğer taraftan ürünler refrakter malzeme yardımıyla fırında pişmektedir. Refrakter malzemede fırının içine girip çıktığı için üzerinde ısı taşıyarak enerji kaybı olmaktadır.



Şekil 5.5. Sır fırını görünümü.

Ayrıca fırın çıkışında ürünler belli oranda ısı depolayarak ısı kaybına sebep olmaktadır.

Çizelge 5.11. Sır fırını teknik bilgileri.

SIR FIRINI TEKNİK BİLGİLER		
Fırın uzunluğu	m	80
Faydalı genişlik	m	2,10
Faydalı yükseklik	mm	600
Fırın arabası uzunluğu	mm	1500
Faydalı fırın arabası uzunluğu	mm	1450
Fırın içindeki araba sayısı	Adet	53
Çevrimdeki araba sayısı	Adet	72
Maksimum sıcaklık	°C	1420
Brülör grup sayısı	Adet	9
Brülör sayısı	Adet	66
Yakıt türü	Doğalgaz	
Yakıt alt ısıl değeri	35597 kJ/Nm ³	
Gaz basıncı	Min. 1 bar	
Kurulu gaz yükü	Nm ³ /h	344
Kurulu elektrik yükü	kVA	225
Spesifik enerji tüketimi **	kcal/kg ürün	3250 +/- 10 %
Fırın sıcaklığı*	°C	1360
Fırın Üretimi	kg/h	1290

Çizelge 5.9’da verilen spesifik enerji tüketimi, kullanılan bünye ve sır reçetesine göre değişiklik gösterebilir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Teorik Yaklaşım ve Kabuller

Bu bölümde, endüstriyel tünel tipi hızlı pişirim sır fırınının kütle, enerji ve ekserji dengesi üzerine hesaplamalar yapılmıştır. Sır fırınının termodinamik olarak kontrol hacim (açık sistem) olduğu kabul edilmiştir. Aşağıdaki varsayımlar sahada fırından alınan ölçümler sırasında yapılmıştır.

a) Sistem kararlı halde (steady state) olarak çalıştığı varsayılmıştır.

b) Kinetik ve potansiyel enerjideki değişiklikler ihmal edilmiştir. Ayrıca elektrik enerjisi tüketimi dikkate alınmamıştır. Çünkü termodinamik olarak termal enerji tüketimine kıyasla önemsizdir.

c) Hava, doğal gaz ve egzoz gazları ideal gaz olarak ele alınmıştır.

Ekserji hesaplamaları için gerekli referans çevre değerleri aşağıdaki gibi alınmıştır.

Sıcaklık, $T_0 = 298$ K, basınç $P_0 = 101,325$ kPa

6.2. Fırın Ölçümleri ve Belirsizlik Analizi

Sır fırını için 15 gün boyunca yapılan ölçümler Çizelge 6.2’de gösterilmiştir. Sır fırınında yapılan grupların duvar sıcaklık ölçümleri kızıl ötesi sıcaklık ölçüm cihazı ile, baca sıcaklıkları ise K-tipi ısı çiftleri ile yapılmıştır. Bu ölçümler sırasında kullanılan cihazların teknik bilgileri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Ölçüm cihazlarının teknik özellikleri.

Cihaz	Tip	Ölçüm Aralığı	Hassaslık
Isıl Çift	Elimko K tipi	-200 – +1200 °C	± 0,8 °C
Fark basınç ölçüm cihazı	Testo 510 set	0 – 100 mbar	± 0,1 + 1,5% ölç.değ
Kızıl ötesi termometre	Raytek/RSCMTFSU	-30 – +200 °C	± %1,5

Yapılan bu çalışmanın ölçüm belirsizliği analizi aşağıdaki eşitliklere göre yapılmıştır. Ölçüm ortalaması Eşitlik 6.1’de verilmiştir.

$$\bar{X} = \frac{\sum X_m}{n} \quad (6.1)$$

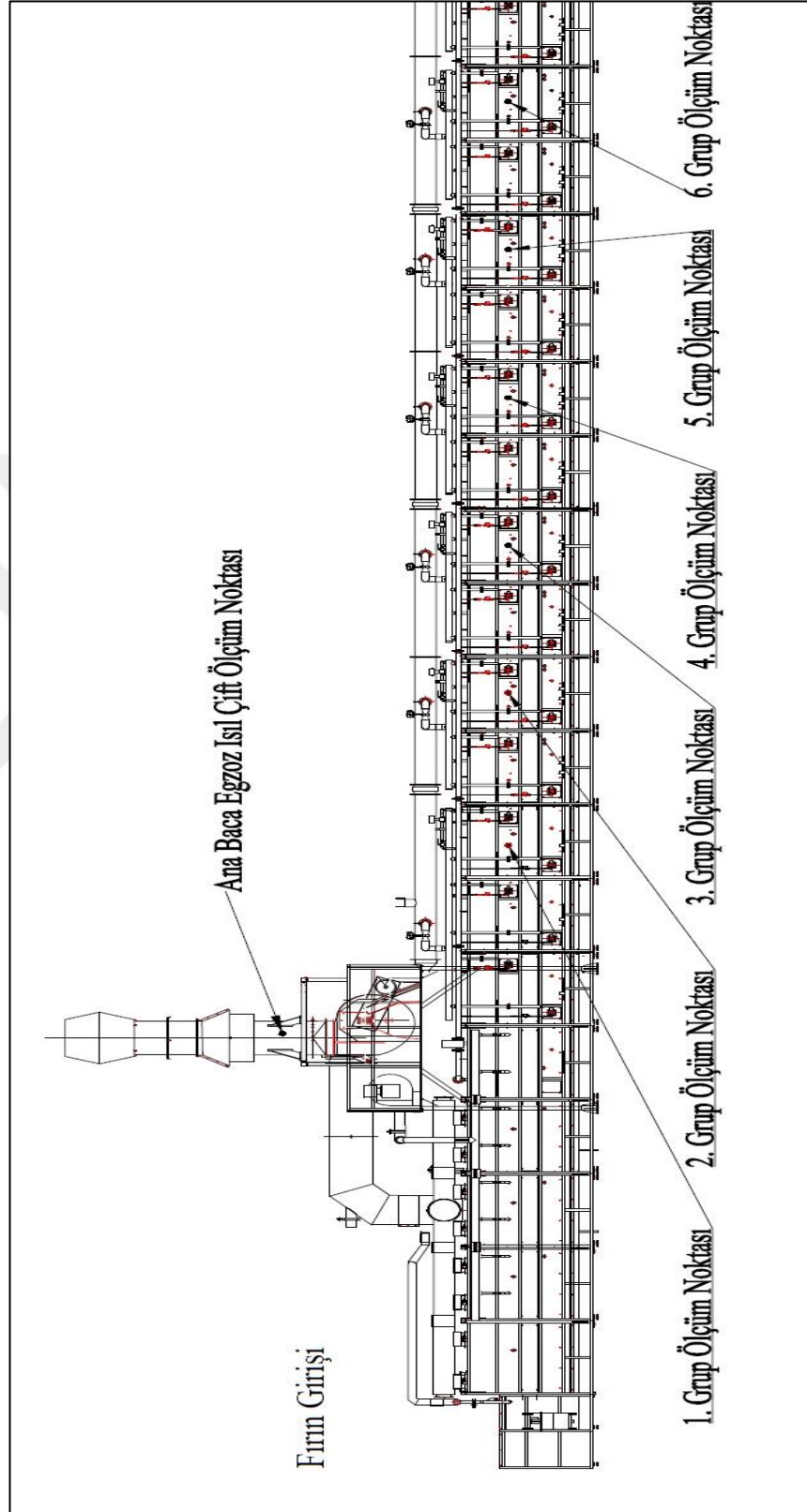
Burada n yapılan ölçüm sayısını X_m ise ölçümü göstermektedir. Standart sapma (SP) ise Eşitlik 6.2 'de gösterilmiştir.

$$SP = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (X_m - \bar{X})^2}{(n-1)}} \quad (6.2)$$

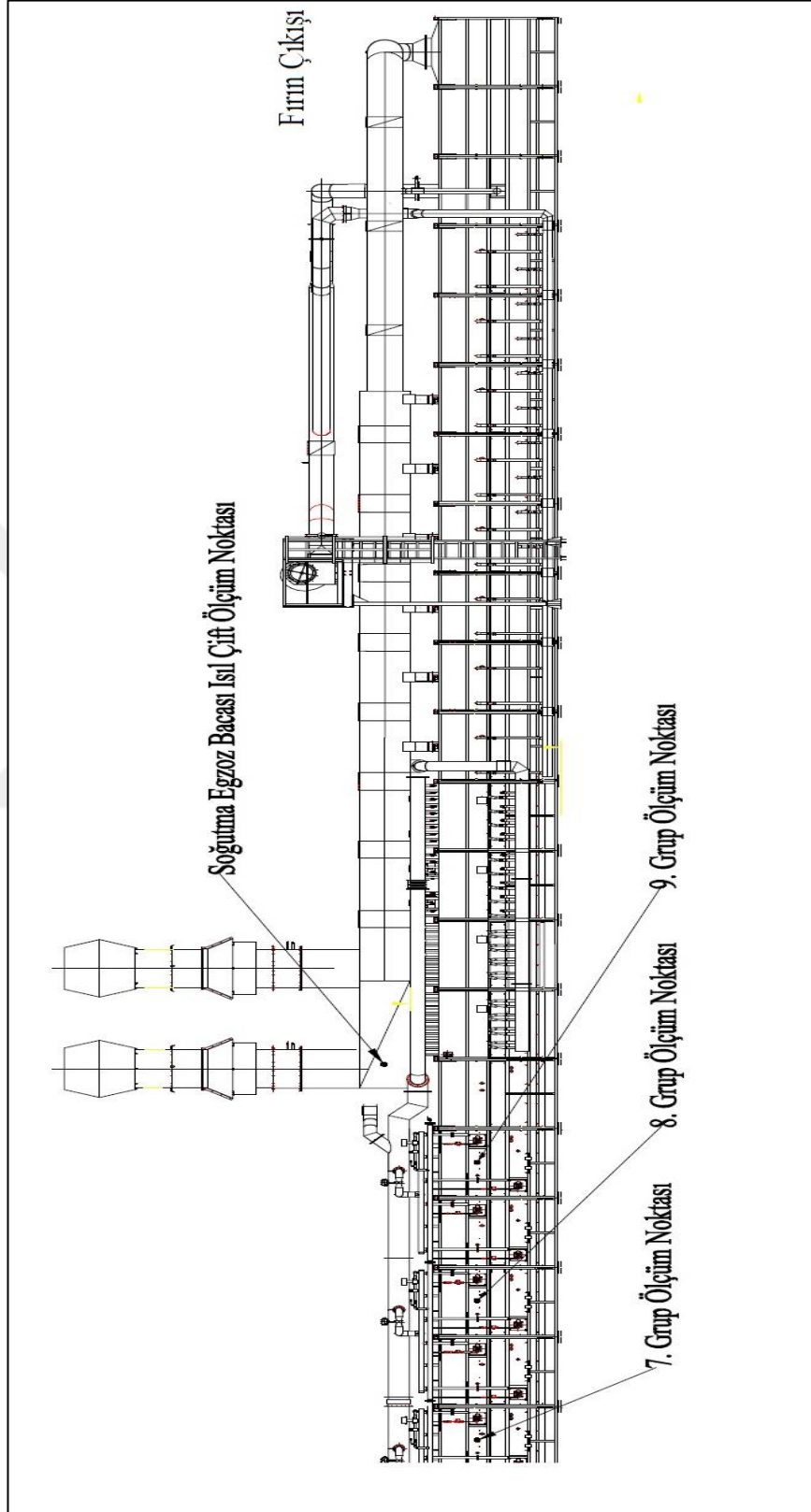
Belirsizlik (U) Eşitlik 6.3'de verilmiştir (Bell,1999).

$$U = \frac{SP}{\sqrt{n}} \quad (6.3)$$

Fırın üzerinde yapılan sıcaklık ölçüm noktaları ve egzoz bacalarının sıcaklık ölçümünü yapan ısı çiftlerinin konumu Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Sır fırını sıcaklık ölçüm noktaları.



Şekil 6.1. (devam) Sır fırını sıcaklık ölçüm noktaları.

Çizelge 6.2. Sır fırını ölçümleri.

Ölçümler	Birimi	1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün	8. Gün
1. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	60	62	59	61	60	64	62	61
2. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	73	75	72	72	73	76	75	72
3. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	76	77	74	75	76	78	77	75
4. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	65	68	66	67	69	67	65	63
5. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	70	73	70	71	71	74	72	69
6. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	82	83	81	82	81	85	83	80
7. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	92	92	89	90	90	91	91	89
8. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	87	90	88	87	88	90	87	86
9. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	83	85	84	85	84	86	85	82
Yanma Hava Sıcaklığı	°C	62	64	60	61	60	64	62	59
Yanma Hava Debisi	m ³	4125	4050	3800	4031	4050	4240	4120	3969
Ana Baca Sıcaklığı	°C	93	94	88	93	92	97	93	92
Ana Baca Fark Basıncı	mbar	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,5	3,1	3
Soğutma Egzoz Sıcaklığı	°C	271	268	261	263	264	274	267	262
Soğutma Egzoz Fark	mbar	4	4,1	4	4	4	4	4	4
Doğalgaz Tüketim	Nm ³	9710	9780	9613	9623	9720	9598	9813	9783
Günlük Üretilen Ürün	kg	31434	31381	30530	30530	31827	30077	31590	31754
Günlük Ortalama Araba	kg	127	127	124	124	129	122	128	129
Günlük Toplam Araba	kg	521	521	518	518	523	516	522	523

Ölçümler	Birimi	9. Gün	10. Gün	11. Gün	12. Gün	13. Gün	14. Gün	15. Gün	Ortalama
1. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	59	57	61	61	60	60	58	60
2. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	70	71	73	72	73	72	69	73
3. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	73	73	76	76	75	74	72	75
4. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	62	63	63	61	63	64	63	65
5. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	68	70	71	71	71	68	67	70
6. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	79	80	81	81	82	80	78	81
7. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	88	89	90	89	89	88	88	90
8. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	85	86	87	87	86	85	84	87
9. Grup Duvar Sıcaklığı	°C	81	81	83	82	83	82	81	83
Yanma Hava Sıcaklığı	°C	58	58	60	60	60	58	55	60
Yanma Hava Debisi	m ³	4162	4022	3914	4046	4054	4045	3988	4041
Ana Baca Sıcaklığı	°C	89	89	94	92	93	89	87	92
Ana Baca Fark Basıncı	mbar	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3
Soğutma Egzoz Sıcaklığı	°C	265	259	258	268	268	265	255	265
Soğutma Egzoz Fark Basıncı	mbar	4	4	4	4	4	4	4	4
Doğalgaz Tüketim	Nm ³	9780	9640	9488	9966	9509	9352	9509	9659
Günlük Üretilen Ürün Ağırlığı	kg	31092	30461	30040	33436	30766	29214	30018	30943
Günlük Ortalama Araba Ürün Ağırlığı	kg	126	123	122	135	125	118	122	125
Günlük Toplam Araba Ağırlığı	kg	520	517	516	529	519	512	516	519

15 gün boyunca yapılan ölçümlerin belirsizlik analizi Eşitlik 6,1, 6,2 ve 6,3'e göre yapılmıştır. Fırın arabalarına yapılan ham ürün yüklemeleri daha önceden belirlenmiş ürün ağırlıklarına göre hesaplanmıştır.

Çizelge 6.3. Ölçüm cihazlarının belirsizliği.

Ölçüm Cihazları	Belirsizlik (U)
Kızıl ötesi termometre (1. Grup Duvar Sıcaklığı)	±0,443 °C
Kızıl ötesi termometre (2. Grup Duvar Sıcaklığı)	±0,476 °C
Kızıl ötesi termometre (3. Grup Duvar Sıcaklığı)	±0,434 °C
Kızıl ötesi termometre (4. Grup Duvar Sıcaklığı)	±0,607 °C
Kızıl ötesi termometre (5. Grup Duvar Sıcaklığı)	±0,485 °C
Kızıl ötesi termometre (6. Grup Duvar Sıcaklığı)	±0,449 °C
Kızıl ötesi termometre (7. Grup Duvar Sıcaklığı)	±0,347 °C
Kızıl ötesi termometre (8. Grup Duvar Sıcaklığı)	±0,434 °C
Kızıl ötesi termometre (9. Grup Duvar Sıcaklığı)	±0,423 °C
K tipi Isıl Çifti (Yanma Hava Sıcaklığı)	±0,613 °C
K tipi Isıl Çifti (Ana Baca Sıcaklığı)	±0,701 °C
K tipi Isıl Çifti (Soğutma Egzoz Sıcaklığı)	±1,308 °C
Fark basınç ölçüm cihazı (Ana Baca Fark Basıncı)	±0,025 mbar
Fark basınç ölçüm cihazı (Soğutma Egzoz Fark Basıncı)	±0,006 mbar

6.3. Kütle Dengesi

Kararlı durum (steady state) koşulları altında çalışan açık sistem için temel kütle denge eşitliği şöyledir:

$$\sum_i \dot{m}_{in,i} = \sum_i \dot{m}_{out,i} \quad (6.4)$$

Eşitlik 6.4'te $\dot{m}_{in,i}$ ve $\dot{m}_{out,i}$ sisteme giren ve çıkan kütle akışıdır. Sır fırını kütle dengesi Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Kütle akışları sırasıyla doğalgaz için \dot{m}_g , yanma havası için \dot{m}_{yh} , soğutma havası için \dot{m}_{sh} , ön ısıtma havası için $\dot{m}_{öh}$, ham ürün kütle girişi için $\dot{m}_{hü}$, pişmiş ürün kütle çıkışı için $\dot{m}_{pü}$, soğutma egzoz gazları \dot{m}_{seg} , ana egzoz gazları \dot{m}_{aeg} olarak Eşitlik 6.5 yazılmıştır.

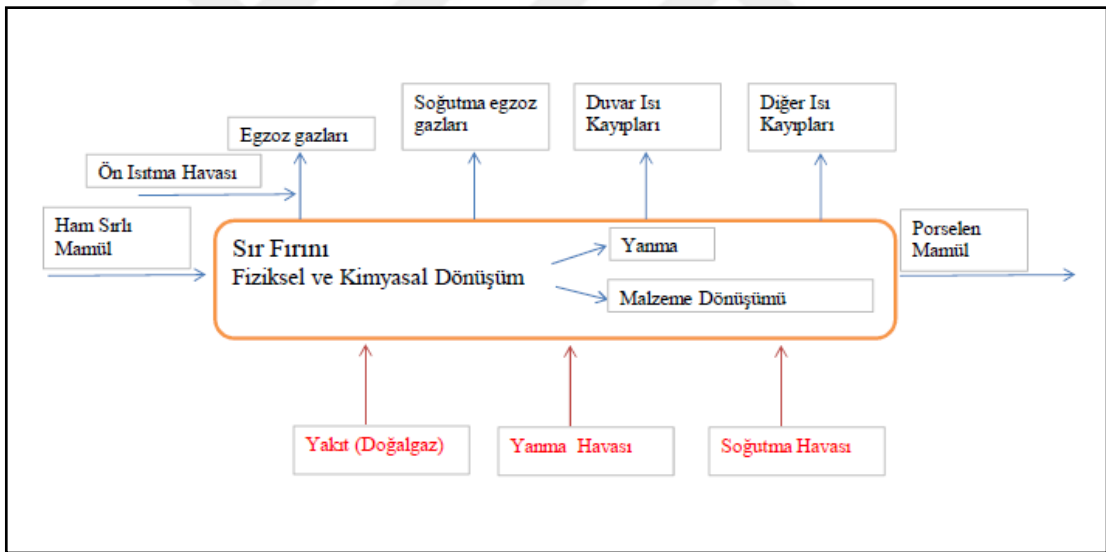
$$\dot{m}_g + \dot{m}_{yh} + \dot{m}_{sh} + \dot{m}_{\acute{o}h} + \dot{m}_{h\ddot{u}} = \dot{m}_{p\ddot{u}} + \dot{m}_{seg} + \dot{m}_{aeg} \quad (6.5)$$

6.4. Enerji Dengesi

Yapılan kabullere göre temel enerji dengesi Eşitlik 6.6 gibi gösterilirse:

$$\sum_i \dot{E}_{giren,i} - \sum_i \dot{E}_{\acute{c}ıkan,i} + \dot{Q} = \sum \Delta \dot{E}_y + \sum \Delta \dot{E}_r \quad (6.6)$$

Eşitlikte gösterilen $\dot{E}_{giren,i}$ fırına giren kütle akışının enerjisini gösterir ve $\dot{E}_{\acute{c}ıkan,i}$ fırından çıkan kütle akışının enerjisini göstermektedir. Doğalgaz yanma sonucu ortaya çıkan enerji $\Delta \dot{E}_y$ terimi olarak da yer almıştır. Sır fırınında sırlı mamulün fiziksel ve kimyasal dönüşümü için gerekli enerji $\Delta \dot{E}_r$ olarak gösterilmiştir. Enerji balansının gösterimi aşağıdaki şekildeki gibidir.



Şekil 6.2. Sır fırını proses şeması.

Kütle ve enerji akışını şekilde gösterildiği gibi ele alırsak eşitlik 8'teki sisteme giren enerji akışlarını gösteren $\sum \dot{E}_{giren,i}$ terimini açarsak; doğalgaz akışı \dot{E}_g , yanma havaşı \dot{E}_{yh} , soğutma havaşı \dot{E}_{sh} , ön ısıtma havaşı $\dot{E}_{\acute{o}h}$ ve ham ürün için $\dot{E}_{h\ddot{u}}$ olarak gösterilmiştir. Çıkan enerji akışlarını gösteren $\sum \dot{E}_{\acute{c}ıkan,i}$ terimini açarsak ana egzoz gazları \dot{E}_{aeg} , pişmiş ürünler $\dot{E}_{p\ddot{u}}$ soğutma egzoz gazları \dot{E}_{seg} , fırın duvarları boyunca ısı kayıpları \dot{Q}_d ve diğer ısı kayıpları \dot{Q}_{dk}

olarak gösterilmiştir. Pişirimi işlemi sırasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan enerji değişimleri şöyle sıralanabilir; Birincisi, doğalgaz yanmasında meydana gelen ekzotermik reaksiyonların enerji, değişimlerini gösteren $\Delta\dot{E}_y$, ikincisi, porselen ürünlerin fırında yaşadığı fiziksel ve kimyasal dönüşümlerin entalpi değişimini ifade eden $\Delta\dot{E}_r$ olarak yazılabilir. Fırın enerji dengesi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\dot{E}_g + \dot{E}_{yh} + \dot{E}_{sh} + \dot{E}_{öh} + \dot{E}_{hü} - \Delta\dot{E}_y = \dot{E}_{aeg} + \dot{E}_{pü} + \dot{E}_{seg} - \dot{Q}_d - \dot{Q}_{dk} + \Delta\dot{E}_r \quad (6.7)$$

Gaz akışlarının enerjileri (\dot{E}_{yh} , \dot{E}_{sh} , $\dot{E}_{öh}$, \dot{E}_{aeg} ve \dot{E}_{seg}) termodinamik tablolarından sıcaklıklarına bağlı olarak belirlenebilir. Doğalgaz akışının enerjisi (\dot{E}_g) ve katı haldekilerin enerjilerini ($\dot{E}_{hü}$ ve $\dot{E}_{pü}$) referans çevre sıcaklığındaki \dot{H}_i^0 değerinden hesaplanabilir. T_0 ve tablolardaki özgül ısılarından (c_{pi}) eşitliği yazarsak:

$$\dot{E}_i = \dot{H}_i^0 + \dot{m}_i \cdot c_{pi} \cdot (T - T_0) \quad (6.8)$$

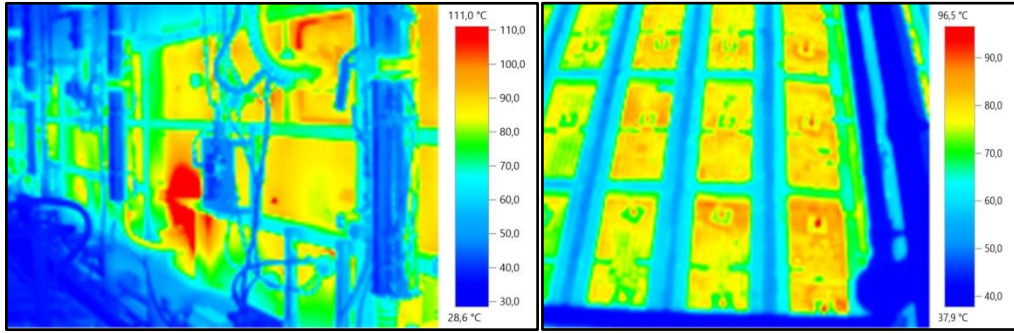
Fırın yüzeylerinden taşınım ve ışıınım meydana gelen ısı kayıpları aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\dot{Q}_d = h_t \cdot (T_d - T_0) \cdot A_t + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_t \cdot [(T_d)^4 - (T_0)^4] \quad (6.9)$$

Burada h_t taşınım katsayısı, ε yüzey ışıınım katsayısı ve σ Stefan-Boltzman katsayısıdır. A_{kt} ve A_t taşınım ve ışıınım ısı transferinin yapıldığı yüzey alanlarıdır. T_d is fırın duvarı yüzey sıcaklığıdır.

Fırın duvarlarından ve tavanından kayıp edilen enerji miktarını (\dot{Q}_d) hesaplarken yüzey sıcaklıkları kızıl ötesi sıcaklık ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Yüzey ışıınım katsayısı paslı çelik için 0,4 ile 0,7 arası, boyalı çelik için 0,8 ile 0,9 arası, refrakter malzeme için 0,4 ile 0,8 arası değerler alınmıştır. Cihazın teknik bilgileri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Fırın duvarlarında ve tavanında meydana gelen ısı kayıplarını görüntülemek için Testo 880 Termal kamera kullanılmıştır. Cihaz ile ilgili teknik bilgiler Çizelge 5.8’de verilmiştir. Cihaz ile yapılan duvar ve tavan ısı kayıplarının görüntüleri Şekil 6.3’de görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 6.3. Fırın duvar ve tavan ısı kayıpları. a) Fırın Duvarı Görüntüsü, b) Fırın Tavan Görüntüsü.

Fırında meydana gelen diğer ısı kayıplarına (\dot{Q}_{dk}) örnek olarak; fırın giriş ve çıkışı, gözetleme delikleri, fanlar, borular, brülörler v.b sayabiliriz. Eşitlik 9'da yazılan bütün entalpiler hesaplandıktan sonra diğer ısı kayıplarının değeri de ortaya çıkacaktır.

Doğalgazın yanması sonucu oluşacak enerjiyi ($\Delta\dot{E}_y$) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\Delta\dot{E}_y = \dot{m}_g \cdot h_{ge} \quad (6.10)$$

h_{ge} burada, doğalgazın yanma entalpisidir. Fırın enerji performansı, ham ürünlerin fırın içinde kimyasal ve fiziksel dönüşümü için gerekli enerjinin sisteme verilen total enerjiye oranı olarak hesaplanacaktır. Enerji performansı hesaplaması:

$$\eta(\%) = \frac{\Delta\dot{E}_r}{\sum_i \dot{E}_{giren,i} + \Delta\dot{E}_y} \cdot 100 \quad (6.11)$$

Burada faydalı enerjinin ham ürünün porselene dönüşmesi için gerekli enerji olduğu varsayılmıştır.

6.5. Ekserji Dengesi

Termal sistemin ekserji dengesini 6.1 bölümündeki kabullere göre yazarsak:

$$\sum_i \dot{E}x_{giren,i} = \sum_i \dot{E}x_{çikan,i} + \dot{E}x_D - \dot{E}x_I + \dot{E}x_K \quad (6.12)$$

Burada $E\dot{x}_{giren,i}$ fırına giren kütleden sağlanan ekserji, $E\dot{x}_{çikan,i}$ fırından çıkan kütleye kaybedilen ekserji kaybı, $E\dot{x}_D$ ham ürünlerin proses sırasında fiziksel ve kimyasal dönüşümleri sonucu ekserji değişimi, $E\dot{x}_I$ fırına beslenen ısı enerjisi sonucu oluşan ekserji transferi ve $E\dot{x}_K$ ise pişirim prosesi sırasındaki ekserji kaybıdır.

Çizelge 6.4. Ekserji formülleri tablosu.

Ekserji Terimleri	Sembol	Eşitlik
	$E\dot{x}_{giren,i}, E\dot{x}_{çikan,i}$	$E\dot{x}_i = E\dot{x}_i^{PH} + E\dot{x}_i^{CH}$ (6.13)
		Fiziksel Ekserji
		$E\dot{x}_i^{PH} = (\dot{H} - \dot{H}_0) - T_0(\dot{S} - \dot{S}_0)$ (6.14)
	$E\dot{x}_i^{PH}$	$(\dot{H} - \dot{H}_0) = \frac{\dot{m}_i}{M_i} \cdot [\bar{c}_{pi} \cdot (T - T_0)]$ (6.15)
		$(\dot{S} - \dot{S}_0) = \frac{\dot{m}_i}{M_i} \cdot \left[\bar{c}_{pi} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - \bar{R} \cdot \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \right]$ (6.16)
		Kimyasal Ekserji
	$E\dot{x}_i^{CH}$	$E\dot{x}_i^{CH} = \frac{\dot{m}_i}{M_i} \cdot \bar{e}x_i^{CH}$ (6.17)
		$\bar{e}x_i^{CH} = \sum_j y_j \cdot (\bar{e}x_j^{CH} + \bar{R}T_0 \ln y_j)$ (6.18)
Fiziksel kimyasal dönüşümün Birim zamanda Ekserji değişim $M+N \rightarrow P$	$E\dot{x}_D$	$E\dot{x}_D = E\dot{x}_M^{CH} + E\dot{x}_N^{CH} - E\dot{x}_P^{CH} = \Delta\dot{G}^0$ (6.19)
Isı kaybı sırasında ekserji transferi	$E\dot{x}_I$	$E\dot{x}_I = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_I}\right) \cdot \dot{Q}_I$ (6.20)
		$E\dot{x}_I = E\dot{x}_d + E\dot{x}_{dk}$ (6.21)
		$E\dot{x}_I = \left(1 - \frac{T_0}{T_d}\right) \cdot \dot{Q}_d + \left(1 - \frac{T_0}{T_{dk}}\right) \cdot \dot{Q}_{dk}$ (6.22)
Birim zamanda Ekserji kaybı	$E\dot{x}_K$	$E\dot{x}_K = T_0 \cdot \dot{\sigma}$ (6.23)
Ekserji verimi	η_A	$\eta_A (\%) = \frac{E\dot{x}_D}{\sum_i E\dot{x}_{giren,i}} \cdot 100$ (6.24)

Çizelge 6.4'de gösterildiği gibi kütle akışının ekserjisi 2 parçaya bölünebilir. Bunlar fiziksel ekserji ($E\dot{x}^{PH}$) ve kimyasal ekserjidir ($E\dot{x}^{CH}$). Kütle akışının fiziksel ekserjisi Eşitlik

6.14'de gösterilmiştir. Burada, $(\dot{H} - \dot{H}_0)$ birim zamanda entalpi değişimini ifade ederken, $(\dot{S} - \dot{S}_0)$ ise birim zamanda entropi değişimini ifade etmektedir. Bu değerler o noktadaki sıcaklık, basınç ve referans çevre şartlarını hesaba katarak termodinamik tablolarından elde edilebilir (Yüncü,2010). Özgül ısının sabit kaldığı varsayılarak Eşitlik 6.15 ve Eşitlik 6.16 ile entalpi ve entropi değişimleri elde edilebilir. Fırın içindeki basıncın atmosfer basıncında ($P=P_0$) olduğu varsayılmıştır (Szargut ve Morris,1986:733-755; Szargut 2005).

Kimyasal ekserji akışı Eşitlik 6.17'de verilmiştir. Burada \dot{m}_i (kg/s) birim zamanda kütle akışı ve ex_i^{CH} molar kimyasal ekserjisidir. İdeal gaz karışımı için, molar kimyasal ekserji (\bar{ex}_i^{CH}) Eşitlik 6.18'de verilmiştir. Burada y_j bileşenlerin (j) mol oranları ve \bar{ex}_j^{CH} ise her bileşenin standart molar kimyasal ekserjisidir. Doğalgazın kimyasal ekserjisi bu eşitlik kullanılarak hesaplanabilir. Kimyasal ekserjinin değişimi reaksiyon oluşturan maddelerin $M+N \rightarrow P$ gibi Gibbs enerjisi (ΔG^0) Eşitlik 6.19 ile bulunur.

Fırın yüzeyleri boyunca kayıp edilen ısı sonucu oluşan ekserji akışı $E\dot{x}_I$ olarak tanımlanmıştır. Bunu hesaplamak için Eşitlik 6.20 kullanılmıştır. Eşitlikte ısı akışına \dot{Q}_I , hesap yapılan noktanın sıcaklığına T_Q , referans çevre sıcaklığına T_0 alınacaktır (Moran, 2006).

Sistem içindeki entropi üretimi kaynaklı ekserji kayıpları $E\dot{x}_K$ olarak tanımlanmıştır. Gouy-Stodola kanununa göre ekserji kaybı referans sıcaklığı (T_0) ve entropi üretimine orantılı olarak sistem içinde gerçekleştiği Eşitlik 6.23'de ifade edilmiştir. Fırına giren ve çıkan akışlar Eşitlik 6.12 açılarak genişletilirse Eşitlik 6.25 elde edilir.

$$E\dot{x}_K = (E\dot{x}_g + E\dot{x}_{yh} + E\dot{x}_{sh} + E\dot{x}_{oh} + E\dot{x}_{hit}) - (E\dot{x}_{aeg} + E\dot{x}_D + E\dot{x}_{pii} + E\dot{x}_{seg}) + E\dot{x}_d + E\dot{x}_{dk} \quad (6.25)$$

Fırın içindeki ekserji balansı girenler tarafında doğalgazın ekserji akışı, yanma havası, soğutma havası, ön ısıtma havası, ham mamul ekserjileri iken, çıkanlar tarafında ekserji akışı ana egzoz gazları, fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar, pişmiş porselen mamul, soğutma egzoz gazları, fırın duvar kayıpları ve kontrol edilemeyen ısı kayıplarıdır.

Ekserji verimi, pişirim prosesindeki faydalı ekserjinin prosese giren toplam ekserjiye ($\sum_i E\dot{x}_{giren,i}$) oranı olarak tanımlanmıştır. Burada faydalı ekserji ham mamulün pişirim

sırasındaki fiziksel ve kimyasal dönüşümü için gerekli ekserjidir. Fırının ekserji verimi Eşitlik 6.24'de verilmiştir.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu bölümde çalışılan fırına giren ve çıkan kütlelerin eşitliği gösterilmiştir. Enerji dengesi bölümünde kimyasal ve fiziksel enerji akışları hesaplanmıştır. Daha sonra ekserji hesaplamaları yapıp sonuçları tartışılmıştır.

7.1.1. Kütle dengesi

Sisteme giren ve çıkan kütle akışlarının dengesi Çizelge 7.1’de gösterilmiştir. Doğalgaz tüketimi gaz istasyonunda bulunan sayaç vasıtasıyla günlük olarak ölçülmüştür. Ana baca egzoz gazı, soğutma egzoz gazı, yanma havası, soğutma havası ve ön ısıtma debileri orifis plakası vasıtasıyla fark basıncı oluşturmakta, bu fark basıncı transmitter yardımıyla PLC’de debi olarak ölçülmektedir. Daha sonra bu debiler mevcut şartlarda kütle akışına dönüştürülmüştür. Doğalgaz yoğunluğu $0,7 \text{ kg/m}^3$ alınmıştır.

Çizelge 7.1. Fırın kütle dengesi tablosu.

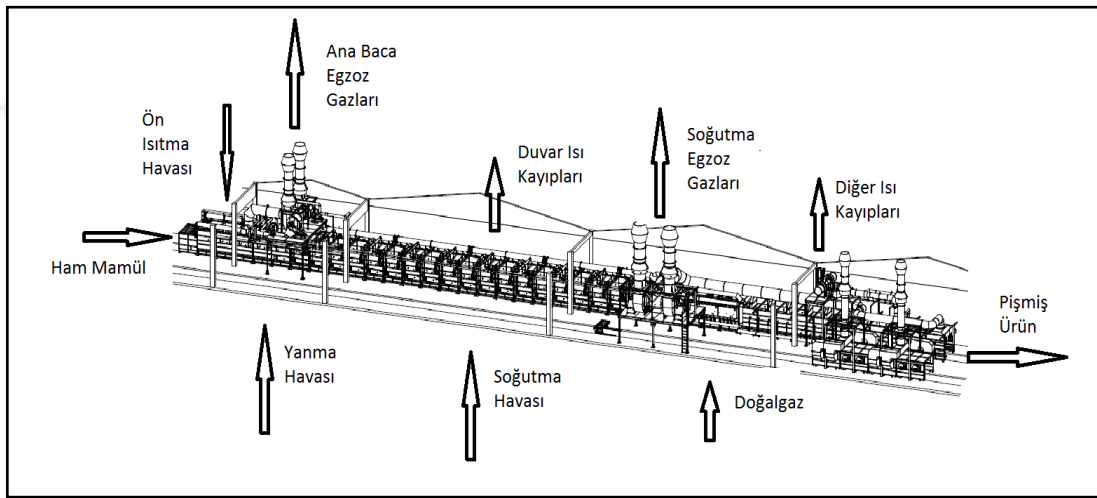
Akışlar		Semboller	Sıcaklık (K)	c_{pi} (kJ/kg K)	\dot{m}_i (kg/s)	Oranı (%)	
Girenler	Doğalgaz	\dot{m}_g	303	2,34	0,078	0,9	
	Yanma Havası	\dot{m}_{yh}	303	1,005	2,264	26	
	Soğutma Havası	\dot{m}_{sh}	303	1,005	4,538	50,3	
	Ön ısıtma Havası	$\dot{m}_{öh}$	303	1,005	0,492	5,4	
	Ham Mamül	Kuru Madde	$\dot{m}_{hü}$	303	0,751	1,610	17,8
		H_2O	\dot{m}_{H_2O}	303	4,182	0,047	0,5
TOPLAM					9,028	100	
Çıkanlar	Ana Egzoz Bacası Gazları	\dot{m}_{aeg}	473	0,98	3,308	36,6	
	Soğutma Egzoz Gazları	\dot{m}_{seg}	538	1,005	4,150	46,0	
	Pişmiş Ürünler	$\dot{m}_{pü}$	514	0,762	1,570	17,4	
	TOPLAM					9,028	100

Fırına giren ham mamulün nemi nem tayin cihazı ile ölçülmüştür. Dolayısıyla giren ürünün ve çıkan ürünün ağırlık farkı hesaplanmıştır. Bu fark buharlaşan suyun miktarını ortaya koymaktadır. Yukarıdaki tabloda görüldüğü gibi, fırına giren kütle oranlarına göre ham mamul

içindeki nem ihmal edilebilecek seviyededir. Fırından çıkan ürünlerin kütle akışı Çizelge 6.2’de görüldüğü gibi 15 gün boyunca ölçülmüştür. Bu değerlerin ortalaması alınarak kütle akışı hesaplanmıştır. Fabrika ortam sıcaklığı ortalamada 30°C olarak ölçülmüştür.

7.1.2. Enerji dengesi

Fırında meydana gelen enerji akışları Şekil 7.1’de gösterilmiştir. Her enerji akışının entalpileri ve enerji balansına göre oranları Çizelge 7.2’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Sır fırını enerji akışları şeması.

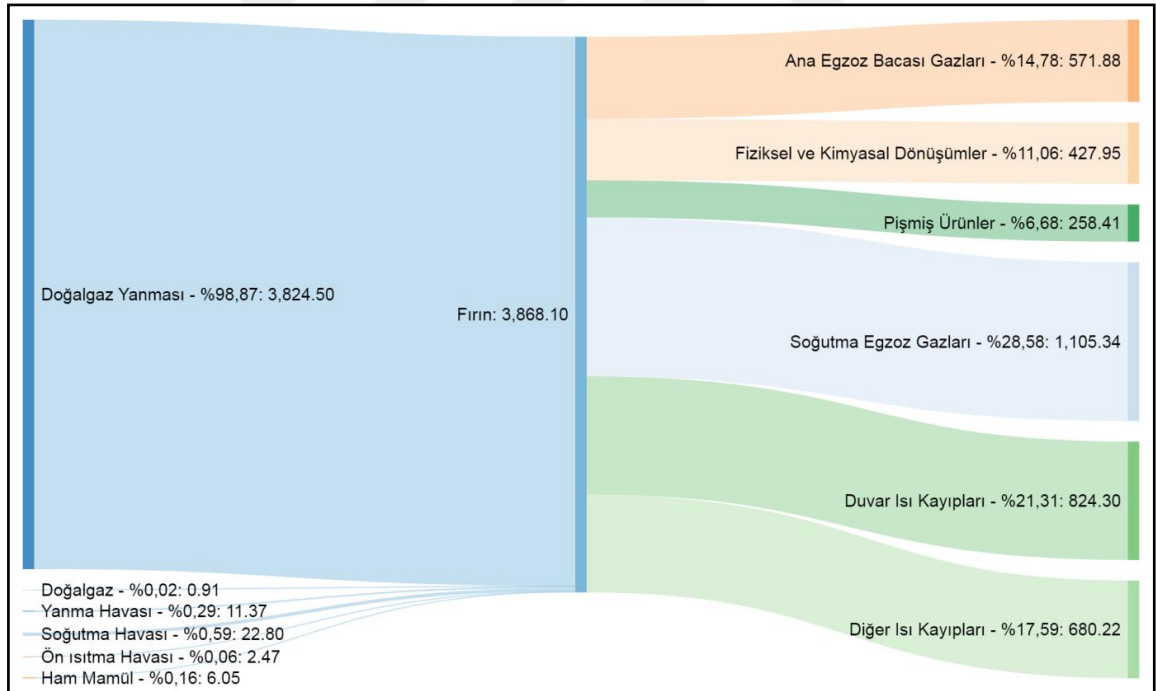
Çizelge 7.2. Fırın enerji dengesi tablosu.

Akışlar	Sembol	Enerji Akışı (kJ/s)	Oranı (%)	
Girenler	Doğalgaz	\dot{E}_g	0,91	0,02
	Doğalgaz Yanması	$\Delta\dot{E}_y$	3824,50	98,87
	Yanma Havası	\dot{E}_{yh}	11,37	0,29
	Soğutma Havası	\dot{E}_{sh}	22,80	0,59
	Ön Isıtma Havası	$\dot{E}_{öh}$	2,47	0,06
	Ham Mamül	$\dot{E}_{hü}$	6,05	0,16
	TOPLAM		3868,10	100

Çizelge 7.2. (devam) Fırın enerji dengesi tablosu.

Akışlar	Sembol	Enerji Akışı (kJ/s)	Oranı (%)	
Çıkanlar	Ana Egzoz Bacası Gazları	\dot{E}_{aeg}	571,88	14,78
	Fiziksel Kimyasal Dönüşümler	$\Delta\dot{E}_r$	427,95	11,06
	Pişmiş Ürünler	\dot{E}_{pii}	258,41	6,68
	Soğutma Egzoz Gazları	\dot{E}_{seg}	1105,34	28,58
	Duvar Isı Kayıpları	\dot{Q}_d	824,30	21,31
	Diğer Isı Kayıpları	\dot{Q}_{dk}	680,22	17,59
	TOPLAM		3868,10	100

Şekil 7.2’de fırının enerji balansı Sankey Diyagramı şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 7.2. Enerji sankey diyagramı.

Yapılan çalışmada fırının enerji tüketimi 3868 kJ/s olarak hesaplanmıştır. Ana enerji kaynağı doğalgazın yanması sonucu ortaya çıkan enerjidir. Giren enerjinin %98’ini oluşturmaktadır. Bu şirket için ana maliyet kalemidir.

Diğer enerji girdileri fırına düşük sıcaklıkta giren ham mamul %0,16, soğutma havası %0,59, yanma havası %0,29, ön ısıtma havası %0,06'dır. Fırına giren enerjinin %11,06'sı fiziksel ve kimyasal dönüşüm için kullanılmıştır. Maksimum fırın sıcaklığının 1360°C olduğu düşünüldüğünde, bu oranın toplam enerji girişine göre görece küçük olduğu görülmektedir.

Ölçümler sonucunda, ana baca egzoz gazlarından ve soğutma egzoz gazlarından dolayı kaybedilen toplam enerji kaybının 1677 kJ/s'yi bulduğu görülmektedir. Giren enerjinin %14,78'i ana egzoz bacası gazı ile, %28,58'i soğutma egzoz gazı ile kaybedilmektedir. Dolayısıyla toplamda enerji tüketiminin %43,36'sına tekabül etmektedir. Fırının enerji performansını arttırmak için bu iki enerji kaybı minimize edilebilir ya da tekrar geri kazanılabilir. Soğutma egzoz ve ana egzoz bacası gazlarının enerjisi reküperatör aracılığıyla yanma havası ısıtılarak enerji geri kazanımı sağlanabilir.

Fırın duvar ve tavan yüzeylerinden %21,31 ve diğer ısı kayıplarından %17,59 enerji kayıpları dikkate değer yüksek rakamlar olarak öne çıkmaktadır. Bu kayıplar toplamda %38,9'u bulmaktadır. Fırın termal izolasyonunun kalitesi artırılarak bu kayıplar minimize edilebilir.

Faydalı enerji, ham ürünlerin porselene dönüşmesi için gerekli enerji (fiziksel ve kimyasal dönüşümler) olarak kabul edilmiştir. Eşitlik 6.11'e göre fırın performansı %11 olarak hesaplanmıştır. Fırın üretimine göre, fırının spesifik enerji tüketimi 2965 kWh/t porselen ürün olarak hesaplanmıştır.

7.1.3. Ekserji dengesi

Fırın prosesinde olan akışların ekserjisi ve oranları Çizelge 7.3'te verilmiştir.

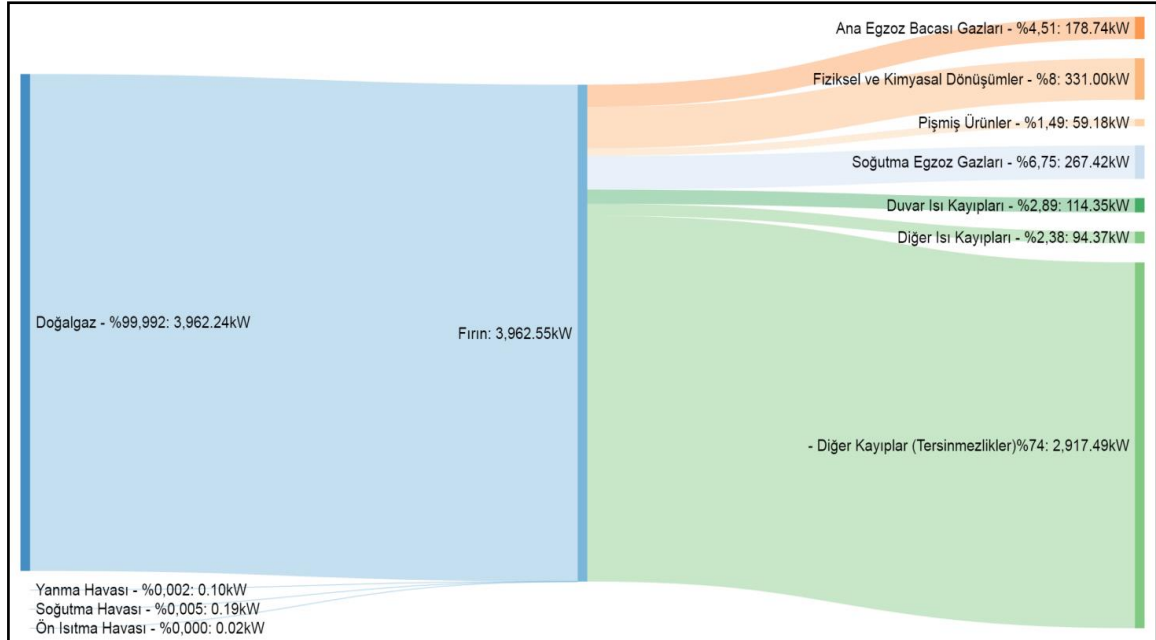
Çizelge 7.3. Fırın ekserji dengesi tablosu.

Akış	Sembol	Fiziksel Ekserji (kJ/s)	Kimyasal Ekserji (kJ/s)	Total Ekserji (kJ/s)	Oranı (%)
Girenler	Doğalgaz	$E\dot{x}_g$	-	3962,24	99,992
	Yanma Havası	$E\dot{x}_{yh}$	0,10	-	0,002
	Soğutma Havası	$E\dot{x}_{sh}$	0,19	-	0,005
	Ön ısıtma Havası	$E\dot{x}_{öh}$	0,02	-	0,000
	Ham mamül	$E\dot{x}_{hü}$	0,00	-	0,000
	TOPLAM		0,3	3962,24	3962,24

Çizelge 7.3. (devam) Fırın ekserji dengesi tablosu.

Akış		Sembol	Fiziksel Ekserji (kJ/s)	Kimyasal Ekserji (kJ/s)	Total Ekserji (kJ/s)	Oranı (%)
Çıkanlar	Ana Baca Egzoz Gazları	$E\dot{x}_{aeg}$	132,24	46,50	178,74	4,51
	Pişmiş ürün	$E\dot{x}_{pü}$	59,18	-	59,18	1,49
	Soğutma Egzoz Gazları	$E\dot{x}_{seg}$	267,42	-	267,42	6,75
	Fırın Duvar Isı Kayıpları	$E\dot{x}_d$	114,35	-	114,35	2,89
	Belirsiz Diğer Isı Kayıpları	$E\dot{x}_{dk}$	94,37	-	94,37	2,38
	TOPLAM		-	-	714,05	18
Fırın İçinde Kaybolan Ekserji	Fiziksel Kimyasal Dönüşümler	$E\dot{x}_D$	-	331	331	8
	Diğer Kayıplar (Tersinmezlikler)		-	-	2917,49	74
	TOPLAM	$E\dot{x}_K$	-	-	3248,48	82

Şekil 7.3'te ekserji denge tablosu Sankey diyagramı şeklinde gösterilmiştir.

**Şekil 7.3.** Ekserji sankey diyagramı.

Enerji dengesi bölümünde Termodinamiğin birinci kanunu uygulanarak fırının enerji verimi hesaplanmıştır. Fakat bu bölümde fırın verimliliğiyle alakalı faydalı ve faydasız enerji girişleri ve çıkışları ele alınmamıştır. Ekserji analizi farklı yönlere odaklanır ve alt sistemlerde bulunan tersinmezliklerin veya bunlarla ilişkili ekserji kayıplarının göreceli öneminin tahmin edilmesini sağlar. Bu bağlamda, Çizelge 7.3 ve Şekil 7.3’deki verilerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

Ana ekserji girdisi doğalgazın (3962 kJ/s) yanması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu ekserji ham sırlı mamullerin fiziksel ve kimyasal dönüşümler sonucu porselene dönüşmesi için kullanılmıştır. Çalışılan fırında %8’lik faydalı ekserji porselen ürün fiziksel ve kimyasal dönüşüm için kullanılmıştır.

Toplam ekserjinin büyük kısmı fırın içindeki tersinmezlikler yüzünden kaybolmaktadır.

Kaybolan toplam ekserji 3248 kJ/s (%82)’dir. Fırın içinde kaybolan toplam ekserji kaybı $E\dot{x}_K$ Eşitlik 6.23’deki gibi referans sıcaklığına bölünürse birim zamanda toplam ekserji kaybı bulunur. Kaybolan ekserji kayıpları alt sistemler halinde Gouy-Stodola teoremi uygulanarak hesaplanmıştır. Çizelge 7.4’te bu toplam ekserji kayıpları gösterilmiştir.

Çizelge 7.4. Tersinmezlik sonucu fırında oluşan ekserji kayıpları tablosu.

Tersinmezlik kaynakları	Kaybolan Ekserji Bölgeleri	Ekserji Kaybı (kJ/s)	Oran (%)	
Kimyasal Reaksiyonlar	Doğalgaz Yanması	1040	32	42
	Fiziksel Kimyasal Dönüşümler	331	10	
Isı Transferleri	Ürün Soğutulması Sırasında Isı Transferi	588	18	58
	Fırın Dış Yüzeyleri ve Kontrol Edilemeyen Isı Kayıpları	1289	40	
TOPLAM		3248	100	

Yukarıdaki tabloda en büyük ekserji kaybı (%40) fırın yüzeylerinden ve kontrol edilemeyen ısı kaynağı sonucu kaybolan ekserjidir. Sonuç olarak fırın izolasyonu ile ilgili iyileştirmeler yapılması gerektiğini ortaya çıkarmaktadır. Böylelikle ekserji kayıpları azalacaktır.

İkinci büyük ekserji kaybı %32 ile doğalgaz yanması sonucu oluşan tersinemezliklerdir. Fırına giren toplam doğalgaz kaynaklı ekserjinin %26'sı yanma sırasında kaybolmaktadır. Bu ekserji kayıplarının bazıları ürün kalitesini korumak amaçlı kaçınılmazdır.

Üçüncü büyük ekserji kaybı %18 ile ürünlerin dışarıdan beslenen soğuk ortam havası ile soğutulması sırasında kaybolan ekserjidir. Bu ekserji kaybı azaltılarak fırın verimi artırılabilir. Kaybedilen bu ekserji, yanma havasının ısıtılmasında kullanılabilir. Fincan torna kurutmalarında ve dökümhane kurutmalarında kullanılarak ekserji kaybı minimize edilebilir.

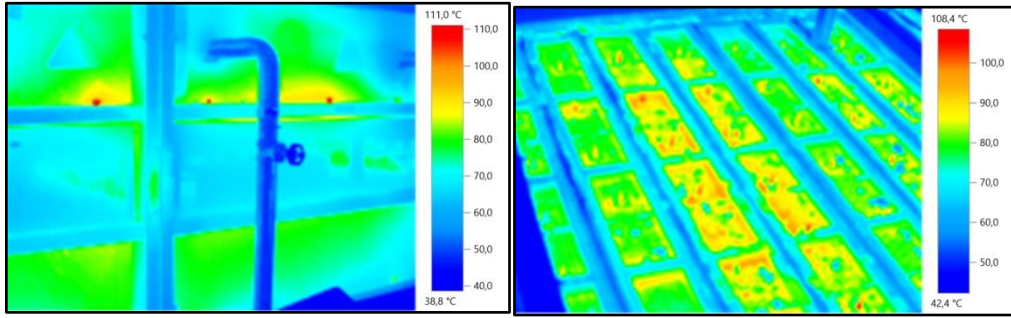
Faydalı ekserji olarak tanımladığımız ham ürünlerin porselene çevrilmesi için gerekli olan ekserji de tersinemezdir. Dolayısıyla toplam ekserji kaybı içinde bu ekserji % 10 civarındadır.

Sonuç olarak, fırın ekserji verimi %8 çıkmıştır. Tersinemezlikler yüzünden kaybolan ekserji kayıpları dışında kalan atık ısı formundaki %18'lik ekserji, potansiyel olarak kazanılabilir. Bu ekserji fırın içinde veya diğer proseslerde ısı kaynağı olarak kullanılabilir.

7.2. Öneriler

7.2.1. Fırın duvarlarından ve diğer bölgelerden kaynaklı ısı kayıpları için öneriler

Yapılan hesaplamalara göre tersinemezlik özellikle, fırın duvarları ve diğer kontrol edilemeyen ısı kaçaklarından kaynaklanmaktadır. Fırın 7/24 sürekli faal olduğu için üretimin dar boğazı durumundadır. Her soğutma ve ısıtma süreci yüksek enerji kaybı yaşattığı için, bu şekilde çalışması gerekmektedir. Sürekli çalıştığı için fırın içindeki izolasyon malzemeleri zamanla Şekil 7.5'de görüldüğü gibi yıpranmakta, çatlak açılma v.b. durumlarından kaynaklı ısı kayıpları oluşmaktadır. Sır fırınında iki tip izolasyon malzemesi vardır. Bunlardan birincisi elyaf (fiber) diye adlandırılan malzemedir. Elyaf malzemenin içindeki alümina oranına göre sıcaklığa dayanıklılığı değişmektedir. 1200°C, 1400°C, 1600°C olmak üzere 3 tip elyaf fırın içinde kullanılmaktadır. Fırın içindeki sıcaklıklara göre uygun elyaf kullanımı izolasyon ve fiber ömrü açısından önemlidir. Elyafın kolay montajı ve bakımı olduğu için fırın tavanlarında kullanılmaktadır. Ayrıca tuğla izolasyon malzemelerine göre hızlı soğutmaya ve ısıtmaya karşı dayanıklıdır. Fakat tuğlalara göre ömürleri daha kısadır. Aynı şekilde fırın tuğlaları sıcaklık bölgelerine göre kullanılmalıdır. Fırın bakımları yıllık düzeyde kapsamlı bir şekilde yapılmalıdır. Bunların dışında fırın brülör yuvaları ve gözetleme deliklerinden, ısıl çift deliklerinden ısı kayıpları olmaktadır.



(a)

(b)

Şekil 7.4. Fırın soğutma bölgesi ve tavanı ısı kayıpları. a) Cıvata Bağlantısı Kaynaklı Isı Kayıpları b) Tavana göre değişen ısı kayıpları.

Yukarıdaki Şekil 7.4'te fırın duvarında bulunan cıvata bağlantılarından ve fırın konstrüksiyon kaynak noktalarından ısı kayıpları olduğu görülmektedir. Ayrıca fırın tavan modüllerinin ısı dağılımının homojen olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi Şekil 7.5'te görünen izolasyon kayıplarıdır.

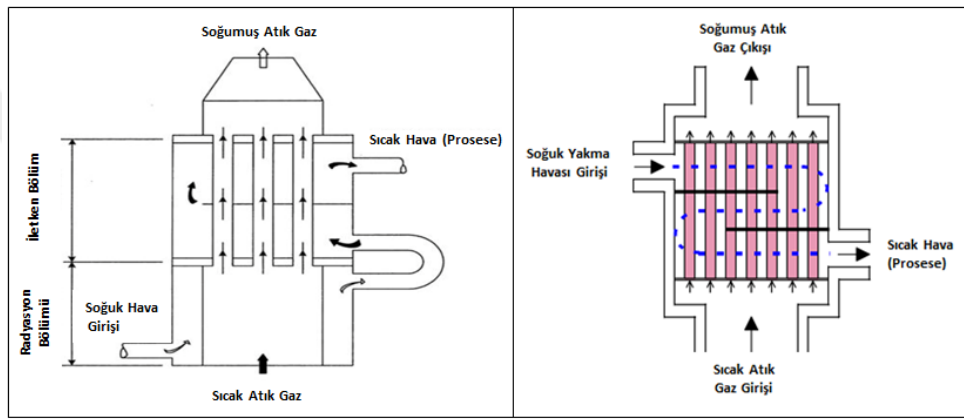
Bunların dışında, fırın arabaları fırın içinde birbirlerine temas halinde olduklarında ısı kayıplarına engel olan izolasyon fitillerinin düzenli aralıklarla kontrol edilmesi, yıprananların değiştirilmesi gereklidir.



Şekil 7.5. Fırın içi yıpranmış izolasyon görüntüsü.

7.2.2. Soğutma egzoz bacası gazı ile yanma havasının ısıtılması

Soğutma havası ile yapılan hesaplamada 1105 kJ/s enerji dışarı atılmaktadır. Bu ısının kaynağı, soğutma havasının yaklaşık 1360 °C tepe sıcaklığındaki ürünleri 240°C'ye indirmesi sırasında ısı transferi ile olur. Soğutma havasının, ürünlere şok yapmayacak şekilde kademeli olarak verilmesi gerekmektedir. Ayrıca uygun soğutma rejimi ürünlerin kalitesini de etkilemektedir. Bu ısıyı kullanmak için fırın bacasına reküperatör konulabilir. Soğutma egzoz bacası gazının sıcaklığı 265°C'dir.



Şekil 7.6. Örnek reküperatör görüntüsü.

Soğutma egzoz bacası gazının yanma havası ısı enerjisi kullanarak ısıtılabilir. Bununla ilgili hesaplama Eşitlik 28 'e göre yapılırsa;

$$Q_{\text{ısı transfer}} = \dot{m}_{\text{yh}} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (7.1)$$

$$\eta \text{ (Reküperatör Sıcaklık oranı)} = \frac{T_{\text{yhç}} - T_{\text{yhg}}}{T_{\text{eg}} - T_{\text{yhg}}} \quad (7.2)$$

$T_{\text{yhç}}$ = Yanma Havası Çıkış Sıcaklığı

T_{yhg} = Yanma Havası Giriş Sıcaklığı

T_{eg} = Egzoz Havası Giriş

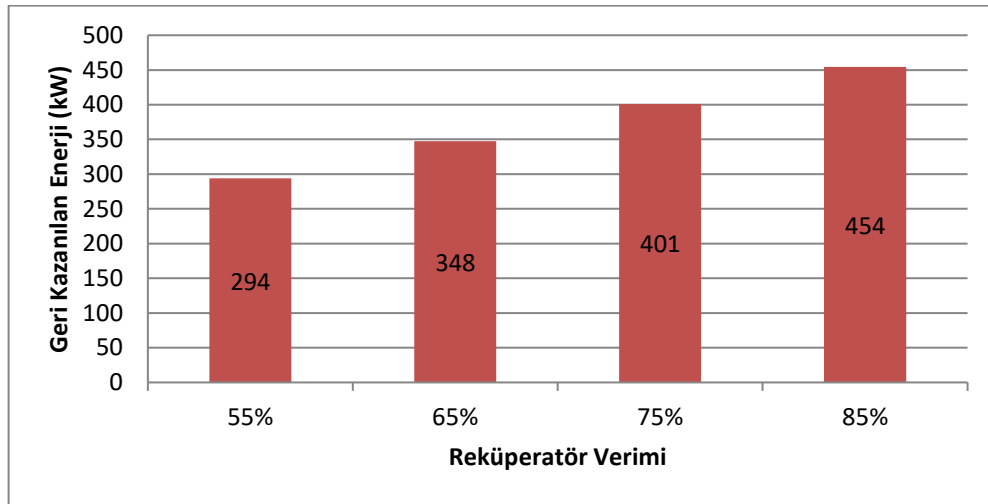
Reküperatör verimi 4 farklı değerde alınarak geri kazanılacak enerji miktarları hesaplanmıştır. Eşitlik 7.1 ve 7.2 ile yapılan hesaplamalar Çizelge 7.5'te gösterilmiştir.

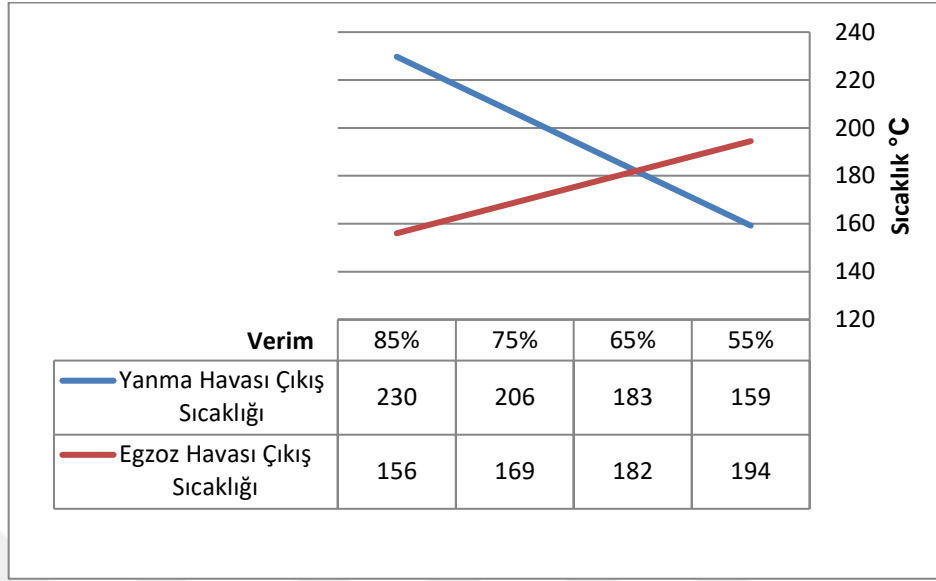
Çizelge 7.5. Soğutma egzoz gazı bacası reküperatör geri kazanım tablosu.

Rekuperatör Tipi	Zıt Akışlı Plaka Tipi				
Rekuperatör Verimi	%	55	65	75	85
Egzoz Giriş Hava Sıcaklığı	°C	265			
Egzoz Çıkış Hava Sıcaklığı	°C	194	182	169	156
Egzoz Gazı kütle akışı	kg/s	4,150			
Geri Kazanılacak Enerji	kJ/s	294	348	401	454
Yanma Havası Giriş Sıcaklığı	°C	30			
Yanma Havası kütle Akışı	kg/s	2,264			
Yanma Havası Çıkış Sıcaklığı	°C	159	183	206	230

Soğutma egzoz bacasından 1105 kJ/s enerji atılmaktadır. Reküperatör uygulaması yaparak reküperatör verimine göre enerji geri kazanım miktarları değişmektedir. Reküperatör verimi %55, %65, %75 ve %85 olarak 4 farklı değerde alınmıştır. Geri atılan egzoz gazı ve yanma havası çıkış sıcaklıkları Çizelge 7.5'te görülmektedir. Bu sıcaklıklar yoğunlaşma sıcaklığının üzerinde olduğu için korozyon yapmayacaktır.

Ayrıca geri kazanılacak enerji miktarları Şekil 7.7'de görüldüğü gibi sırasıyla 294, 348, 401 ve 454 kJ/s olarak çıkmıştır.

**Şekil 7.7.** Reküperatör enerji geri kazanım grafiği.



Şekil 7.8. Reküperatör çıkış sıcaklıkları grafiği.

Yukarıda yapılan enerji geri kazanım hesaplarına göre reküperatör yanma havası çıkış sıcaklığı alınan verimlere göre 159 ° C'den 230°C kadar değişmektedir. Aynı şekilde soğutma egzoz havası çıkış sıcaklığı 194°C'den 156°C'ye kadar değişmektedir. Geriye kalan bu sıcaklık üretimde ihtiyaç duyulan kurutma prosesinde kullanılabilir.

Çizelge 7.6. Reküperatör amortisman süresi tablosu.

Geri Kazanılan Enerji	kW	294	348	401	454
Doğalgaz Alt Isıl Değeri	kWh/Nm ³	9,88			
Doğalgaz Geri Kazanım Miktarı	Nm ³ /saat	29,77	35,18	40,59	46,00
Yıllık Çalışma Saati	Saat	8040			
Yıllık Kazanım	Nm ³ /yıl	239316	282828	326340	369852
Doğal Gaz Nm ³ fiyatı *	TL/Nm ³	1,54			
Yıllık Tasarruf Miktarı	TL/yıl	368547	435556	502564	569573
Reküperatör Kurulum Fiyatı *	TL	150000			
Amortisman Süresi	Ay	4,88	4,13	3,58	3,16

Geri kazanılacak enerjileri Çizelge 5.1'de verilen doğalgaz değerlerine göre Çizelge 7.6'daki gibi hesaplanırsa, reküperatör amortisman hesabı %85 verime göre 3,16 ay çıkarken % 55'lik verime göre 4,88 ay çıkmaktadır.

7.2.3. Hava yakıt optimizasyonu

Fırında bulunan 9 adet grupta yakıt ve hava oranı, fırın operatörünün verdiği yanma oranına göre servo motor kontrollü vanalar aracılığıyla hassas bir şekilde kontrol edilmektedir. Sert porselen pişirimi üründe bulunan Fe_2O_3 bileşiğinin CO ile bağlanması ile indirgeme reaksiyonları için özellikle 1100 °C sonra indirgenmiş atmosfer olması gerekmektedir. Böylelikle tabak demirin sarı renginden kurtularak beyaz rengini almaktadır. Ayrıca bu sıcaklıktan önce, özellikle 650 °C'ye kadar, oksidatif (yüksek oksijen) ile pişirim yapılması ürünlerin yüzey kalitesi için gereklidir. Dolayısıyla sert porselen pişirimi sırasında oksidatif, redüktif ve nötr atmosfer uygulanmaktadır. İndirgenmiş atmosfer için eksik yanma olması gerekmektedir. Doğalgazın en verimli yanması 1'e 10 oranında yani 1 birim doğalgaz 10 birim hava şeklindedir. Bu orandan aşağısında eksik yanma meydana gelir. Dolayısıyla indirgenmiş atmosfer oluşur. Eksik yanma aynı zamanda verimsiz yanmadır. Burada fırın operatörü ürün için gerekli CO miktarını optimize ederek, gereksiz CO'den kaçınarak verimsiz yanmayı bir seviyede tutmalıdır. Diğer taraftan fazla hava ile yanması gereken atmosferde hava oranını yine ürün kalitesini bozmadan optimize etmelidir. Bu oranlar ürünün bünyesinde bulunan organikler ile doğrudan ilişkilidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Afşar, H. (2011). Seramik fabrikası enerji ekserji analizi. Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat, 52s.

Ahmadi, G. R., Toghraie, D. (2016). Energy and exergy analysis of Montazeri Steam Power Plant in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56 454-463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.074>

Akdağ, M., (2009). *Temel Kavramlar ile Mühendislik Termodinamiği*, Qafqaz Üniversitesi Yayınları, 97s.

Apak, E. (2007). Bir seramik fabrikasında enerji ekserji analizi. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 110s.

Ayna, O. M. (2012). Hidrojenle zenginleştirilmiş yakma sistemleri ve seramik sektörü uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 140s.

Bell, S. (1999). A beginner's guide to uncertainty of measurement, Measurement Good Practice Guide 11, S.2, Centre for Basic, Thermal and Length Metrology National Physical Laboratory, UK.

Costa, V. A. F., Tarelho, L. A. C. ve Sobrinho, A. (2019). Mass, energy and exergy analysis of a biomass boiler: A portuguese representative case of the pulp and paper industry. *Applied Thermal Engineering*, 152, 350-361.

Çağlayan H. (2015) Seramik sektöründe ısı geri kazanımlı bir püskürtmeli kurutucunun enerji ve ekserji analizi. Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 93s.

Çağlayan, H. ve Çalışkan, H. (2019). Thermo-ecological analysis of industrial kilns. *Journal of environmental management*, 241, 149-155.

Çağlayan, H., Şöhret, Y. ve Çalışkan, H. (2018). Thermo-Ecologic Evaluation of a Spray Dryer for Ceramic Industry. *Energy Procedia*, 144, 164-169.

Çallak, M., Balkan, F., Hepbaşlı, A. (2015). Avoidable and unavoidable exergy destructions of a fluidized bed coal combustor and a heat recovery steam generator. *Energy Conversion and Management*, 98:54-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.039>

Çengel, Y. A., Boles, M. A., (1996), *Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik*, McGraw-Hill

Çengel, Y. A., Ghajar, A. J., (2014). *Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill Education, 970s.

Dinçol, Ş. (2016). Soma termik santralinin enerji ve ekserji analizi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 67s.

Feng, L. J. (2010), Rhi refrakterleri için tünel fırında atık ısı geri kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, Dalian Teknoloji Üniversitesi, 152s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Ferrer, S., Mezquita, A., Aguilera, V. M. ve Monfort, E. (2019). Beyond the energy balance: Exergy analysis of an industrial roller kiln firing porcelain tiles. *Applied Thermal Engineering*, 150, 1002-1015.

Filkoski, R. V., Petrovski, I. J. ve Gjurchinovski, Z. (2018). Energy optimisation of vertical shaft kiln operation in the process of dolomite calcination. *Thermal Science*, 22(5), 2123-2135.

Güngör, A. (2006). Sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcıların modellenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 145s.

Han, X., Liu, M., Wu, K., Chen, W., Xiao, F., Yan, J. (2016). Exergy analysis of the flue gas re-dried lignite-fired power system based on the boiler with open pulverizing system. *Energy*, 106:285-300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.047>

<http://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2019.pdf>. Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş. (2019). Enerji Sektörü Raporu. (Erişim 02/05/2020 16:25).

<http://www.turkseramik.com/index.php?topic=49.0>. Seramik Bilimi (2019). Seramik Sanatları ve Teknolojileri Forumu (Erişim 12.02.2020 10:35).

http://zucder.org.tr/upload/yayinlar/pdf/yayinlar_pdf_5911b1e7090a4.pdf. Züccacıyeciler Derneği (2018). Dış Ticaret Raporu. (Erişim 15/07/2020 18:20).

<https://www.botas.gov.tr/>. Boru Hatları ile Petrol Taşıma A.Ş (2020) Doğalgazın Özellikleri (Erişim 17.04.2020 10:15).

<https://www.britannica.com/topic/Comptons-by-Britannica>. Compton's Encyclopedia by Britannica Online, (2019). (Erişim 05/04/2020 10:50).

<https://www.elimko.com.tr/files/TermokupllarGenelBilgiler.pdf>. Elimko Ltd Şti. (2019). Termokupllar ile ilgili Genel Bilgiler. (Erişim 16.05.2020 11:10).

<https://www.enerji.gov.tr>. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2019). Faaliyet Raporu. (Erişim 18.04.2020 14:50).

<https://www.epdk.gov.tr/Detay/DownloadDocument?id=1AyLO71b1fI=> Enerji Piyasası Denetleme Kurumu (EPDK). (2019) Doğal Gaz Piyasası Sektör Raporu. (Erişim 15.03.2020 18:45).

<https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/2-3603/2017-yili-sektor-raporlari-yayinlanmistir>. Enerji Piyasası Denetleme Kurumu (EPDK). (2019) Elektrik Piyasası Sektör Raporu. (Erişim 15.03.2020 18:35).

<https://www.millisaraylar.gov.tr/>. Milli Saraylar İdaresi Başkanlığı (2019). Yıldız Porselen Tarihi (Erişim 20/06/2020 10:10).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Ibrahim, T. K., Basrawi, F., Awad, O. I., Abdullah, A. N., Najafi, G., Mamat, R., Hagos, F. Y. (2017). Thermal performance of gas turbine power plant based on exergy analysis. *Applied Thermal Engineering*, 115: 977-985. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.032>

Johnson, P. W. ve Langrish, T. A. G. (2018). Exergy analysis of a spray dryer: Methods and interpretations. *Drying Technology*, 36(5), 578-596.

Kakaç S., Arınç F. (2004). *Örneklerle Mühendislik Isı Transferinin Esasları*, Pelikan Yayıncılık, 391s.

Kanoğlu M., (2007). *Sanayide Enerji Tasarrufu Yöntemleri*, Gaziantep Üniversitesi, 26s.

Kılıçaslan, Y. (2004). Seramik fabrikalarında ekserji analizi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 134s.

Literatür Ortak Yayını, (Çev. T. Derbentli), 796 s.

Mohammadi, A., Ashjari, M. A. ve Sadreddini, A. (2018). Exergy analysis and optimisation of waste heat recovery systems for cement plants. *International Journal of Sustainable Energy*, 37(2), 115-133.

Moran, M. J. ve Howard N. Shapiro, (2006). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons.

Rosen, M. A. ve Dincer, İ. (2004). A study of industrial steam process heating through exergy analysis. *International Journal of Energy Research*, 28:917-930

Sümer, G. (2000). *Seramik fırınları*, Ak Ofset (2002), 90s.

Szargut, J. (2005). *Exergy Method. Technical and Ecological Applications*, WIT. Pess, Southampton, UK. 155s.

Szargut, J., Morris, D. R. (1986). *Standard chemical exergy of some elements and compounds on the planet earth*. *Energy*, 11(8), s.733-755.

Şahin, H. E. (2012). Kritik-üstü tip bir buharlı güç santralinin enerji ve ekserji analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü. İstanbul.

Topal, H., Taner, T., Naqvi, S. A. H., Altınsoy, Y., Amirabedin, E., Ozkaymak, M. (2017). Exergy analysis of a circulating fluidized bed power plant co-firing with olive pits: A case study of power plant in Turkey. *Energy*, 140:40-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.042>

Turan, M. (2009). Bir endüstriyel kurutucunun performansının enerji ve ekserji yöntemleri kullanarak belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 133s.

Utlu, Z., Sogut, Z., Hepbasli, A. ve Oktay, Z. (2006). Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production. *Applied Thermal Engineering*, 26(17-18), 2479-2489.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Winnick J., 1997, *Chemical engineering thermodynamics*, John Wiley & Sons. Inc, 590s.

Xiong, J., Zhao, H., Zheng, C. (2011). Exergy analysis of a 600 MWe oxy-combustion pulverized coal fired power plant. *Energy and Fuels*, 25:3854-3864. <http://dx.doi.org/10.1021/ef200702k>.

Yazıcı, M. (2018). Dolaşımli bir akışkan yataklı kazanın enerji ve ekserji analizi. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 134s.

Yılmabasar, J. (1980). *Seramikleri, Yöntemleri*, Türk Tarih Kurumu Basımevi, 65s.

Yüncü, H., (2010), *Ekserji Analizi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 215s.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : Gürbüz, Musa Hilal
Doğum tarihi ve yeri : 07/04/1985 Kütahya
e-mail : musahilal@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Gaziantep Üniversitesi	27/06/2008
Lise	Kütahya Anadolu Öğretmen Lisesi	Haziran 2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008 Eylül-Kasım	Doosan Škoda Power	Araştırmacı
2010 - 2013	Güral Porselen	Makine Bakım Şefi
2013 – Devam Ediyor	Güral Porselen	İşletme Müdürü
2017-..Devam Ediyor	Güral Porselen	Ar-Ge Merkezi Yöneticisi

Yabancı Dil

İngilizce İleri seviyede
Almanca Temel seviyede
Çekce Temel seviyede

Yayınlar

Yüksek Mukavemet ve Aşınma Direncine Sahip Alümina Tabanlı Seramik Malzemelerin Üretimi ve Geleneksel Seramik Üretim Süreçlerinde Kullanımı - 10.Seramik Kongresi Afyonkarahisar 2019. Mustafa GÜĞÜL, Musa H. Gürbüz, Ramazan DUTAR, Ahmet KAHYA, Şerife KÜPÇÜ, Hasan GÖÇMEZ.

Porselen Üretim Fırınlarında Kullanılan Refrakter Bileşenlerinin Alternatif Hammaddelelerden Üretilmesi ve Karakterizasyonu – 10.Seramik Kongresi Afyonkarahisar 2019, Ramazan YILMAZ, Musa H. GÜRBÜZ, Yavuz ÇİÇEK, Selçuk ÖZKAN, Hasan GÖÇMEZ.