

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ENDÜSTRİYEL BİR TAV FIRININDA ISI GERİ KAZANIMI VE
HAVA-YAKIT ORANININ OPTİMİZASYONU**

MUHARREM EYİDOĞAN

KOCAELİ 2015

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ


**ENDÜSTRİYEL BİR TAV FIRININDA ISI GERİ KAZANIMI VE
HAVA-YAKIT ORANININ OPTİMİZASYONU**

MUHARREM EYİDOĞAN

Prof. Dr. Durmuş KAYA
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç. Dr. Ethem TOKLU
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 06.07.2015

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Enerjinin verimli kullanımı, tüm dünyada üzerinde önemle durulan konulardan biridir. Enerji üretimi ve kullanımının, hava kirliliği, sera gazı etkisi ve ekosisteme etkileri gibi birçok çevresel etkisi vardır. Uluslararası enerji ajansının raporuna göre enerji üretiminden kaynaklanacak CO₂ emisyonunun 2030 yılında, 2005 yılına göre %49 artacağı ve birçok ülkenin orta ve uzun vade de yüksek enerji fiyatı ile karşı karşıya kalacağı ifade edilmiştir. Endüstriyel işletmeler açısından bakıldığında, verimliliği artırıcı çalışmalar yakıttan tasarruf sağlamakta, kaynakların verimli kullanımına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, bir sanayi kuruluşuna ait haddehane tav fırınında enerji verimliliğinin artırılması ve tavlanan yarı mamuldeki tufal kaybının azaltılması üzerine çalışılacaktır. Bu kapsamda tav fırını çıkışı baca gazı atık ısı geri kazanım miktarının artırılması, yakıt-hava oranının optimize edilmesi, reküperatör sonrası baca gazı atık ısısından sıcak su elde edilmesi ve fırın yakıcılarının alev boyu ve alev rengi izleme sistemi üzerine çalışılmıştır. Proje öncesi durum ile proje uygulandıktan sonraki durum karşılaştırılarak elde edilen tasarruf miktarı ve yatırımın geri ödeme süreleri hesaplanmıştır.

Bu tezin ortaya çıkmasındaki eşsiz katkı ve yönlendirmelerinden dolayı danışman hocam Sayın Prof. Dr. Durmuş KAYA'ya sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmama verdikleri desteklerinden dolayı Prof. Dr. İbrahim KILIÇASLAN, Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR, hocalarıma, çalışma arkadaşlarım Sn. Selman ÇAĞMAN, Sn. Volkan ÇOBAN, ayrıca her zaman manevi desteklerini hissettiğim ailem ve eşim Aynur EYİDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2015

Muharrem EYİDOĞAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	8
3. DENEYSEL METARYAL VE METODLAR.....	12
3.1. Teorik Temel ve Hesaplama Yöntemi.....	12
3.1.1. Yanma	12
3.2. Ölçüm Yöntemi ve Ölçüm Cihazları.....	13
4. HADDEHANE TAV FIRINININ ENERJİ TASARRUF POTANSİYELLERİ	17
4.1. Yeni Reküperatör ile Yapılacak Enerji Tasarruf Potansiyeli	20
4.2. Gaz-Su Ekonomizeri ile Yapılacak Enerji Tasarruf Potansiyeli.....	20
4.3. Hava-Yakıt Oranı Online Ölçüm Sistemi ile Yapılacak Enerji Tasarruf Potansiyeli.....	21
4.4. Fırın İçi Yakıcıları Sürekli İzleme Sistemi ile Yapılacak Enerji Tasarruf Potansiyeli.....	22
5. HADDEHANE TAV FIRININDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNE YÖNELİK UYGULANAN PROJELER VE TASARRUF MİKTARLARI.....	24
5.1. Tav Fırınına Reküperatör Uygulaması	24
5.2. Reküperatör Tasarım Parametreleri.....	25
5.3. Reküperatör Boru Malzemeleri	25
5.3.1. Sülfürik asit çiylenme korozyonu dayanımlı S-TEN 1 çeliği boru.....	26
5.3.1.1. S-TEN 1 borusunun çalışabilirliği	27
5.3.1.2. Sülfürik asit çiylenme korozyonuna karşı dayanım	27
5.3.1.3. Hidroklorik asit çiylenme korozyonuna karşı dayanım.....	28
5.3.1.4. ERW borusu kaynak bölgesinin asit dayanımı.....	29
5.3.2. Oksidasyon dayanımlı paslanmaz çelik dikişsiz boru (SIC).....	30
5.3.2.1. SIC serisinin özellikleri	31
5.4. Reküperatör Tasarımı ve Analizi	33
5.5. Reküperatör İmalatı ve Montajı	33
5.6. Gaz-Su Ekonomizeri Tasarımı	36
5.7. Hava-Yakıt Oranı Online Ölçüm Sistemi Tasarımı	37
5.8. Fırın İçi Yakıcıları Sürekli İzleme Sistemi Tasarımı	39
6. ENERJİ VERİMLİLİĞİ PROJELERİ ÖNCESİ VE SONRASI DURUMLARIN KARŞILAŞTIRILMASI.....	44

6.1. Reküperatör Uygulaması.....	44
6.2. Gaz-Su Ekonomizeri Uygulaması.....	45
6.3. Hava-Yakıt Oranı Online Ölçüm Sistemi Uygulaması	47
6.4. Fırın İçi Yakıcıları Sürekli İzleme Sistemi Uygulaması	49
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	56
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	58
ÖZGEÇMİŞ	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	2013 yılı dünya enerji tüketim haritası.....	2
Şekil 1.2.	2010 yılı verilerine göre sera etkisine sebep olan emisyonların sektörlere göre dağılımı.....	4
Şekil 1.3.	1850-2013 yıllarındaki sera gazı konsantrasyonları	5
Şekil 1.4.	Endüstriyel bir tav fırını resmi	6
Şekil 4.1.	Tav fırınındaki mevcut reküperatör resmi.....	17
Şekil 5.1.	S-TEN 1 çeliğinin hidroklorik asit dayanımı	29
Şekil 5.2.	Gaz-sıvı denge durumundaki sülfürik asit-su sistemindeki sülfürik aside daldırma testi sonrası makro yapısı.....	30
Şekil 5.3.	SIC serisi oksidasyon dayanımı	31
Şekil 5.4.	Farklı paslanmaz çeliklerin vanadyuma ($V_2O_5 + \%15 Na_2SO_4$) karşı korozyon kayıpları.....	32
Şekil 5.5.	50 saat 950 °C'de yanma gazına maruz kaldıktan sonra oksidasyon korozyonu kaybı.....	32
Şekil 5.6.	Reküperatörün montaj edileceği alan.....	34
Şekil 5.7.	Reküperatörün montaj öncesi durumu	35
Şekil 5.8.	Tav fırını ve ekonomizer sistemi şematik resmi	37
Şekil 5.9.	Gaz numune probunun yerleşimi	39
Şekil 5.10.	Kamera sistemi şematik gösterimi	41
Şekil 5.11.	Bir nolu kamera montaj bölgesi	42
Şekil 5.12.	İki nolu kamera montaj bölgesi.....	43
Şekil 6.1.	Testleri tamamlanan ve devreye alınan ekonomizerin görünüşü.....	46
Şekil 6.2.	Gaz analizörü resmi.....	48
Şekil 6.3.	Kontrol sisteminde gaz analizörü ekranı.....	48
Şekil 6.4.	Sisteme entegre edilen yüksek sıcaklığa dayanıklı kamera	51
Şekil 6.5.	Yüksek sıcaklığa dayanıklı kamera monitör görüntüleri	52

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Dünyadaki bazı ülkelerin 2013 yılı enerji tüketimleri ve 2000-2013 yılları arasındaki enerji tüketimlerinin yıllık ortalama değişimleri.....	3
Tablo 4.1. Yüksek Fırın gazının elementel analiz sonuçları	19
Tablo 4.2. Kok gazının elementel analiz sonuçları	19
Tablo 4.3. Tav fırınında sızıntı havanın önlenmesi ile yapılacak enerji tasarruf potansiyeli	20
Tablo 4.4. Haddehane tav fırınında ekonomizerden elde edilecek enerji tasarruf potansiyeli	21
Tablo 4.5. Tav fırınında fazla havanın azaltılması ile sağlanacak enerji tasarruf potansiyeli	22
Tablo 5.1. Reküperatör tasarım parametreleri	25
Tablo 5.2. Reküperatör boru malzemeleri ve önceki reküperatör ile karşılaştırılması	26
Tablo 5.3. S-TEN 1 çeliği ve STB340-EG karbon çeliğinin sülfürik asit çiylenme korozyonu miktarları	28
Tablo 5.4. SIC serisi kimyasal kompozisyonları	31
Tablo 5.5. Reküperatör sızdırmazlık testi sonuçları	33
Tablo 5.6. Reküperatör öncesi ve sonrası yakma havası ve egzoz gazı sıcaklıkları	33
Tablo 5.7. Gaz analizörü analiz elementleri ve ölçüm aralıkları.....	38
Tablo 5.8. Gaz analizörünün özellikleri	38
Tablo 5.9. Kamera sisteminin özellikleri.....	41
Tablo 6.1. Ray Profil Haddehanesi tav fırınında sızıntı havanın önlenmesi ile yapılan tasarruf miktarı	44
Tablo 6.2. Ray Profil Haddehanesi tav fırınında ekonomizer tesisi ile sağlanan tasarruf miktarı	45
Tablo 6.3. Ray Profil Haddehanesi tav fırınında fazla havanın azaltılması ile sağlanan tasarruf miktarı	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C	: Karbon
CH ₄	: Metan
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbondioksit
C _p	: Sabit basınçta özgül ısı (kCal/Nm ³ .K)
C ₂ H ₂	: Asetilen
C ₂ H ₄	: Etilen
C ₂ H ₆	: Etan
EJ	: Exajoule (10 ¹⁸ joule)
H ₂	: Hidrojen
H ₂ O	: Su buharı
kcal	: Kilo kalori
m	: Kütle (kg)
mmSS	: Milimetre su sütunu
ṁ	: Debi (kg/s)
M	: Mol kütlesi
MJ	: Megajoule
m ²	: Metrekare
Nm ³	: Normal metre küp
N ₂	: Azot
O ₂	: Oksijen
t	: Ton
T	: Sıcaklık (°C)
φ	: Eşdeğerlik oranı
%FH	: Fazla hava yüzdesi

Kısaltmalar

AID	: Alt Isıl Değer
ERW	: Elektrik Direnç Kaynağı
GHG	: Green House Gas (Sera Gazı)
HY	: Hava-Yakıt Oranı
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
IISI	: International Iron and Steel Institute (Uluslararası Demir ve Çelik Enstitüsü)
LNG	: Liquefied Natural Gas (Sıvılaştırılmış Doğalgaz)
MTEP	: Milyon Ton Eşdeğer Petrol
PHAST	: Process Heating Assessment and Survey Tool (Proses Isıtma Değerlendirme ve Anket Aracı)
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
TL	: Türk Lirası

ÜİD : Üst Isıl Değer
YFG : Yüksek Fırın Gazı

ENDÜSTRİYEL BİR TAV FIRININDA ISI GERİ KAZANIMI VE HAVA-YAKIT ORANININ OPTİMİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada, bir sanayi kuruluşuna ait haddehane tav fırınında enerji verimliliğinin artırılması ve tavlanan yarı mamuldeki tufal kaybının azaltılması üzerine çalışılmıştır. Tav fırınında bulunan eski reküperatörün bazı borularında korozyondan dolayı delinmeler meydana gelmiş ve eski reküperatör ile yakma havası maksimum sıcaklığı 350 °C'ye kadar çıkarılabilmekteydi. Korozyona dayanıklı yeni bir reküperatör imal edilerek yakma havası sıcaklığı 575 °C'ye yükseltilmiştir. Yeni reküperatör ile 691.380 kcal/h enerji tasarrufu sağlanmıştır. Tav fırını baca hattına reküperatörden sonra ekonomizer konularak sıcak su elde edilmiştir. Ekonomizer ile 2.065.064 kcal/h enerji tasarruf sağlanmıştır. Tav fırınında kullanılan Kok gazı ve Yüksek Fırın gazı online analiz edilerek hava-yakıt oranı sürekli optimize edilmektedir. Hava-yakıt oranının optimize edilmesi ile 302.690 kcal/h enerji tasarruf elde edilmiştir. Tav fırınındaki yakıcıların yüksek sıcaklığa dayanıklı kameralar ile izlenerek alev renkleri ve alev boylarının gözlenmesi sağlanmıştır. Yakıcı izleme sistemi ve Yüksek Fırın gazı ve Kok gazı online analiz sistemi ile her bir yakıcıdaki hava-yakıt oranı optimize edilerek, tufal kaybı % 1,8'den 0,75'e düşürülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hava-Yakıt Oranı Optimizasyonu, Isı Geri Kazanımı, Tav Fırını, Tufal Kaybı.

HEAT RECOVERY AND AIR-FUEL RATIO OPTIMIZATION IN AN INDUSTRIAL ANNEALING FURNACE

ABSTRACT

In this study, increasing energy efficiency within a reheating furnace in a rolling plant industrial and reduction of annealed semi product's oxide layer has been studied. Some of the old recuperator pipes in the reheating furnace have been punctured due to corrosion and the maximum temperature of the combustion air with the old recuperator could be increased up to 350 ° C. The combustion air temperature was raised up to 575 ° C by a new recuperator production. 691,380 kcal/h energy can be saved with this new recuperator. Hot water production was also obtained by adding an economizer after recuperator on the reheating furnace chimney line. 2,065,064 kcal/h can be saved with this economizer. The air-fuel ratio was optimized by online analyzing of the coke-oven gas and high-furnace gas. 302,690 kcal/h energy can be saved with the air-fuel ratio optimization. The flame color and the flame length of heating furnace burners were observed with high temperature resistant cameras. As the air-fuel ratio was optimized for each burner, the oxide layer was reduced from 1.8% to 0.75% with the burner observation system, the coke-oven gas and high-furnace gas online analysis systems.

Keywords: Air-Fuel Ratio Optimization, Heat Recovery, Annealing Furnace, Scale Loss.

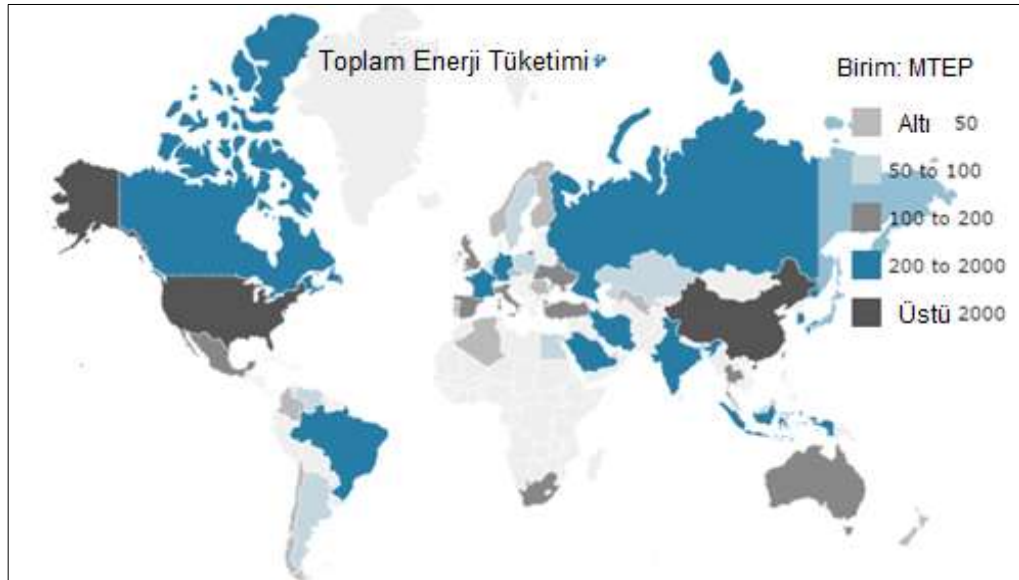
GİRİŞ

Enerji, insanoğlunun temel ihtiyaçlarının karşılanması ve hayat standartlarının yükseltilmesinde birincil derecede bir gereksinim olarak kabul edilmektedir. Enerji, sadece günlük gereksinimlerimizi karşılayan bir araç değil, aynı zamanda; sürekli büyümenin önemli bir altyapısı, sürdürülebilir gelişmenin temel parametresi, sosyal ve ekonomik kalkınmanın temel girdisi olarak bilinmektedir. Enerjiye gün geçtikçe daha çok gereksinim duyulması, bununla birlikte dünyanın enerji kaynaklarının sınırlı olması ve sürekli azalması, ülkelerin enerji politikalarını yeniden gözden geçirmeye ve enerjiyi etkin kullanmaya yöneltmiştir. Bilimsel çevrelerde enerji dönüşüm araçlarını yeniden değerlendirmeye ve var olan sınırlı enerji kaynaklarından daha çok yararlanabilmek için yeni yöntemler geliştirmeye çalışmaktadır [1].

1. GENEL BİLGİLER

Tüm dünyada küresel ısınmadan kaynaklanan iklim değişikliği, enerji ve çevre güvenliği, bunun yanında enerjinin verimli ve yararlı kullanımı başlıkları önemli rol oynamaktadır. Yaşam kalitesinden ve üretimden ödün verilmeden enerji verimliliği ile enerji tasarrufu yapılabilmektedir.

Sürdürülebilir kalkınmayı hedefleyen ülkelerin enerji açısından gelişmişlik düzeyi, kişi başına enerji tüketimi ve enerji yoğunluğu değerleri üzerinden ölçülmektedir. Kişi başına enerji tüketiminin yüksek olması, hem ülkedeki ekonomik faaliyetlerin canlılığını hem de, refah düzeyinin yüksek olduğunu ifade etmektedir. 2013 yılı dünya enerji tüketimi haritası Şekil 1.1’de verilmiştir. Dünyadaki bazı ülkelerin 2013 yılı enerji tüketimleri ve 2000-2013 yılları arasındaki enerji tüketimlerinin yıllık ortalama değişimleri Tablo 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. 2013 yılı dünya enerji tüketim haritası [2]

Tablo 1.1. Dünyadaki bazı ülkelerin 2013 yılı enerji tüketimleri ve 2000-2013 yılları arasındaki enerji tüketimlerinin yıllık ortalama değişimleri [2]

	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2011	2012	2013	2000-2013 (% / yıl)
Dünya	10.066	10.347	11.228	11.830	12.268	12.891	13.101	13.330	13.583	2,33
OECD	5.297	5.314	5.482	5.510	5.478	5.413	5.312	5.255	5.298	0,00
G7	4.026	4.006	4.112	4.093	4.022	3.931	3.827	3.763	3.817	-0,41
Avrupa Birliği	1.698	1.728	1.783	1.786	1.758	1.723	1.662	1.650	1.638	-0,28
Belçika	58	56	59	58	59	61	59	58	60	0,16
Çek Cumhuriyeti	42	42	45	46	45	44	43	42	42	-0,06
Fransa	255	261	269	267	265	261	253	252	253	-0,05
Almanya	337	338	340	340	334	330	312	315	323	-0,33
İtalya	172	173	182	182	176	170	168	161	155	-0,78
Hollanda	74	76	79	77	80	83	77	78	78	0,41
Polonya	90	89	91	97	98	101	102	98	100	0,83
Portekiz	25	26	26	25	24	23	23	22	22	-0,82
Romanya	36	38	39	40	40	35	36	35	31	-1,18
İspanya	122	129	139	142	139	127	125	124	116	-0,36
İsveç	46	52	52	50	49	51	49	51	50	0,63
Birleşik Krallık	223	218	222	219	208	202	188	191	190	-1,23
Norveç	26	25	27	27	30	33	28	29	30	1,09
Türkiye	77	74	81	93	99	105	112	115	112	2,92
BDT	898	912	959	993	1.021	1.028	1.064	1.073	1.063	1,31
Kazakistan	36	40	51	62	70	74	78	81	84	6,81
Rusya	619	623	647	670	688	702	730	735	730	1,28
Ukrayna	130	131	140	137	134	132	126	122	116	-0,87
Özbekistan	51	53	51	49	51	44	48	48	47	-0,57
Amerika	3.120	3.115	3.229	3.273	3.302	3.261	3.253	3.221	3.296	0,42
Asya	2.929	3.089	3.610	3.990	4.262	4.841	5.060	5.258	5.439	4,88
Çin	1.161	1.252	1.638	1.938	2.119	2.516	2.728	2.879	3.013	7,61
Hindistan	455	477	519	568	634	725	751	789	819	4,63
Endonezya	155	165	176	184	186	211	209	207	212	2,46
Japon	519	510	523	520	496	499	462	456	455	-1,01
Malezya	47	52	59	65	74	74	77	79	82	4,27
Güney Kore	190	201	211	217	230	253	265	265	267	2,64
Tayvan	85	93	103	105	106	109	108	107	109	1,93
Tayland	73	83	97	101	108	118	119	124	129	4,54
Afrika	489	521	568	603	648	672	680	701	696	2,76
Ortadoğu	379	426	483	538	595	668	675	709	728	5,15
İran	123	138	155	180	204	210	212	217	223	4,67
Kuveyt	19	21	24	26	30	33	33	35	36	4,82
Suudi Arabistan	102	118	145	159	155	193	188	202	208	5,58
B. Arap Krallıkları	35	41	43	46	59	64	67	68	71	5,74

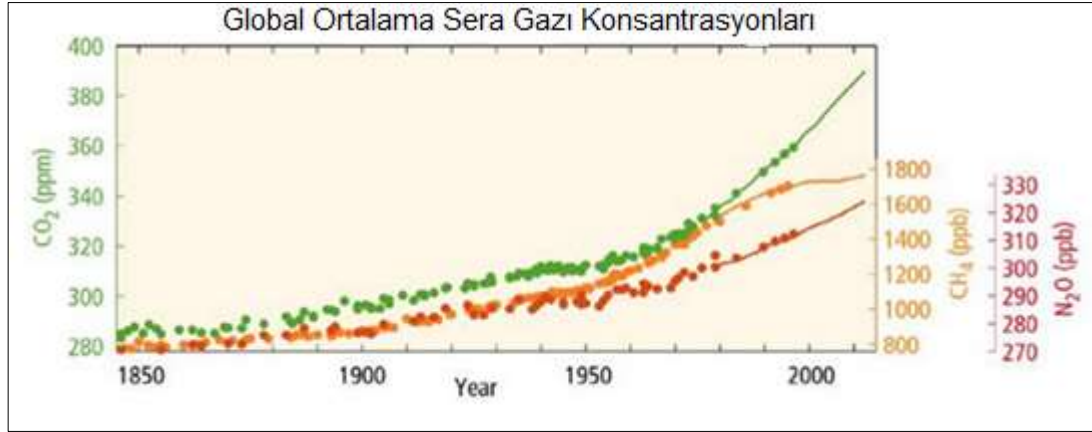
Türkiye’de enerji tüketiminin gelecekte, her alanda sürekli olarak artacağı beklenmektedir. Bugün kullanılan enerjinin büyük bir kısmı, fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Enerji kaynağı olarak bu yakıtların kullanımı artmaya devam ederse, yer kürenin ısınmasına (global ısınmaya) neden olan karbondioksitin konsantrasyonu yükselecektir.

Enerjinin daha verimli kullanımı, bir bakıma etkin yönetimi; karbondioksit emisyonlarının azaltılmasının ve böylece fosil yakıtların sonlu rezervlerinin korunmasına yardımcı olmanın, gider açısından en etkin düşüncelerinden biridir [3]. 2010 yılı verilerine göre sera etkisine sebep olan emisyonların sektörlere göre dağılımı Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. 2010 yılı verilerine göre sera etkisine sebep olan emisyonların sektörlere göre dağılımı [4]

Sektörlere göre sera gazı emisyon üretimi incelendiğinde enerji sektörü %35 ile birinci sırada, tarım ve ormancılık sektörü %24 ile ikinci sırada, endüstri %21 ile üçüncü sırada, ulaşım sektörü %14 ile dördüncü sırada ve binalar %6,4 ile son sırada yer almaktadır.



Şekil 1.3. 1850-2013 yıllarındaki sera gazı konsantrasyonları [4]

Tüm dünyada küresel ısınmadan kaynaklanan iklim değişikliği, enerji ve çevre güvenliği, bunun yanında enerjinin verimli ve yararlı kullanımı başlıkları önemli rol oynamaktadır. Yaşam kalitesinden ve üretimden ödün verilmeden enerji verimliliği çalışmalarlarıyla enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Jollands ve arkadaşları (2009), tasarruf edilen enerjiyi dönüştürülebilen, ucuz, yerli ve temiz bir enerji kaynağı olarak tanımlamışlardır [5].

Ülkemizde, sanayide %15, yerleşim yerlerinde %35 ve taşımacılık maliyetlerinde %15 enerji tasarruf potansiyeli mevcuttur. Bu potansiyeller; yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilecek enerjiden daha yüksektir. Eğer enerji verimliliğine doğru kararlı ve başarılı adımlar atılabilirse ülkemizdeki enerji talebi 2020 yılında %20 oranında (45 MTEP) azalacaktır [6].

Demir-çelik sektörü yıllık yaklaşık 24 EJ ($\times 10^{18}$) enerji tüketimi ile en çok enerji tüketen sektörlerden birisidir ve dünyanın toplam enerji tüketiminin %5'ine karşılık gelmektedir [7]. Demir-çelik sektöründe enerji verimliliğinin artırılması sera gazı salınımlarının azaltılmasında etkili ve kısa vadeli bir yaklaşımdır. Brüksel'de bulunan International Iron and Steel Institute (IISI) Kyoto süreci sonrasında iklim değişikliğine yeni ve küresel bir yaklaşım geliştirmek için devletleri demir-çelik sektörü ile çalışmaya davet etmiştir [7].

Entegre demir-çelik tesislerinde sürekli döküm ünitesinden çıkan kütükler haddehanede plastik şekil verme işlemine tabi tutulmaktadır. Sıcak şekil verme ve

soğuk şekil verme olmak üzere iki ana yöntemle plastik şekil verme işlemi gerçekleştirilmektedir. Haddehaneler entegre demir-çelik fabrikalarının nihai üniteleridir. Sürekli döküm ünitesinden çıkan kütüklere haddehanelerde tavlama ve haddeleme işlemi yapılmaktadır. İçerisine yerleştirilen ya da sürekli olarak şarj edilen malzemeleri ısıtmak suretiyle işlem sıcaklığına yükselten ve gerektiğinde bu sıcaklıkta istenilen süre tutan teknik ünitelere tav fırını adı verilmektedir. Tav fırınları; çeliklerin haddelenmesinde, hadde bandı üzerine yerleştirilen ve çeliklerin 1050-1300 °C sıcaklık aralığında ısıtılmasında kullanılan ve sürekli çalışan fırınlardır. Sanayide kullanılan örnek endüstriyel bir tav fırını Şekil 1.4'de gösterilmiştir. Fırından tavlansak çıkan yarı mamul merdaneler arasından geçirilerek şekil verilmektedir.



Şekil 1.4. Endüstriyel bir tav fırını resmi

Tezin yapıldığı sanayi kuruluşunda 400.000 ton/yıl kapasiteli, kalın yuvarlak ve kaliteli imalat çelikleri üretebilen haddehane bulunmaktadır. Çalışma yapılan haddehanede yarı mamuller öncelikle tav fırınına alınmaktadır. Fırından tavlansak çıkan yarı mamuller üzerlerinde oluşan tufal tabakasının temizlenmesi için tufal

temizleme ünitesinden geçirilmektedir. Yarı mamul daha sonra birinci ve ikinci kaba hadde tezgâhlarında haddelenmektedir.

Bu çalışmada, endüstriyel bir tav fırınında detaylı enerji etüdü yapılarak enerji tasarruf potansiyelleri belirlenmiştir. Detaylı enerji etüdü sonuçlarından faydalanılarak projeler uygulanmıştır. Bu kapsamda; mevcut reküperatör değiştirilmiş, reküperatör sonrasına gaz-su ekonomizeri yerleştirilmiş, hava-yakıt oranı optimizasyonu sağlayacak online yakıt analiz sistemi ve yakıcıların izlenmesini sağlayan kameralar yerleştirilmiştir. Uygulama öncesi durum ile uygulama sonrası durumlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Proje uygulama sonrası elde edilen enerji tasarruf miktarları hesaplanarak tablolar halinde verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Demir-çelik sektörü yıllık yaklaşık 24 EJ (24x10¹⁸ J) enerji tüketimi ile en çok enerji tüketen sektörlerden birisidir ve bu tüketim dünyanın toplam enerji tüketiminin %5'ine karşılık gelmektedir [7]. Sektörün üretim maliyetleri içerisinde %27-33'lük pay ile en büyük dilimi alan enerji maliyetleri, ürün maliyetlerinin düşürülmesinde hedef alınan birincil kaynak olmaktadır. Fırınlara, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan tavlama fırınları, endüstriyel işletmelerde gerek yakıt tüketimi açısından gerekse bacadan atılan yanma gazlarının oluşturduğu kirlilik açısından mümkün olduğunca verimli çalıştırılması gereken sistemlerdir. Fırınlarda enerji verimliliğine yönelik birçok çalışma yapılmıştır.

Kılınç ve ark. bir entegre demir-çelik işletmesi tav fırınında enerji verimliliğine yönelik çalışmalar yürütmüşlerdir. Tav fırınında yapılan enerji etüdü ölçümleri ve işletme parametreleri kullanılarak, enerji ve kütle dengeleri kurulmuş ve enerji tasarruf potansiyelleri ortaya konulmuştur. Tav fırınında bulunan enerji tasarruf potansiyelleri; fazla havanın azaltılması, reküperatörde sızıntı kaybının önlenmesi ve baca gazı atık ısısının geri kazanılması olarak belirtilmiştir. Tav fırınında hava fazlalığı %51,95'den %13,9'a düşürülerek 787.313 kcal/h enerji tasarrufu sağlandığı ve fazla havanın azaltılması için yapılan yatırımın basit geri ödeme süresinin 1,5 yıl olduğunu hesap etmişlerdir. Mevcut reküperatörde sızıntı kaybının önlenmesi için yeni bir reküperatörün tasarlanıp imal edildiğini ifade etmişlerdir. Yeni reküperatörde yakma havası sıcaklığının 318 °C'den 433 °C'ye yükseltildiği ve 659.423 kcal/h enerji tasarrufunun sağlandığı vurgulanmıştır. Yeni reküperatör için yapılan yatırımın amortisman süresi 2,4 yıl ve CO₂ emisyonunda sağlanan azalmanın 883 ton/yıl olduğu ifade edilmiştir. Tav fırınında mevcut reküperatör sonrasına ekonomizer konularak 90 °C'de sıcak su elde edildiği, ekonomizer sayesinde baca gazı sıcaklığının 383 °C'den 215 °C'ye düşürüldüğü belirtilmiştir. Yapılan tüm

uygulamalar sonucunda fırın veriminin %61,83'den %69,43'e yükseldiği ifade edilmiştir [8].

Eyidoğan ve ark. bir sanayi kuruluşunun LNG (sıvılaştırılmış doğalgaz) yakıtlı haddehane tav fırınında enerji verimliliği çalışması yapmışlardır. Bu kapsamda fırın işletme koşullarında çalışırken sıcaklık, basınç, hız ve yanma gazı ölçümleri yapmış, ölçüm verilerini kullanarak kütle ve enerji dengesi kurulmuşlardır. Yaptıkları hesaplamalarda; fırının genel verimini %52,76 olarak bulmuşlardır. Başlıca verim kayıpları; fırının yüksek hava fazlalık katsayısıyla çalıştırılması, reküperatör ısı transfer yüzey alanının yetersiz kalması ve fırın yüzeyi ısı kayıpları olarak belirlemişlerdir [9].

Fırının optimum hava-yakıt oranıyla çalıştırılması için fırına brülörler dışında giren havanın önlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Buna yönelik fırın baca hattına damper konularak, fırının atmosfer basıncından daha yüksek bir basınçta (0,5 mmSS) tutulması gerektiğini belirtmişlerdir. Fazla havanın azaltılması için gerekli yatırım miktarı 10.000 \$ ve amortisman süresi 1,3 ay olarak hesaplamışlardır.

Fırın çıkışında baca gazı sıcaklığının düşürülmesi için ısı transfer yüzey alanı daha fazla olan yeni bir reküperatöre ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Böylelikle baca gazı sıcaklığı 458 °C'den 120 °C'ye düşürülerek yıllık 150.910 \$ tasarruf elde edilebileceği ifade edilmiştir. Yüksek ısı transfer alanına sahip reküperatör yatırımının amortisman süresi ise yaklaşık 4,6 ay olarak hesaplanmıştır. Fırına giren fazla hava miktarı azaltıldığında mevcut durumda %2,5 olan tufal kaybı %1,8~2 mertebelerine indirilebileceği ve enerji tasarrufuna yönelik fırına uygulanacak önlemlerle yılda 678.500 kg CO₂ emisyon salımı önleneceği ifade edilmiştir.

Ertem ve ark. yaptıkları çalışmada Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları'nın 3 nolu yassı kütük fırınında kullanılan özgül enerjinin iyileştirilmesi potansiyelini incelemişlerdir. Prosesteki kayıp enerjinin hesaplanması için bir enerji giriş ve çıkış modeli oluşturmuşlar ve yassı kütük fırınının enerji verimliliğini %64,26 olarak hesaplamışlardır. Yapılan çalışmada enerji tasarrufu potansiyeli olarak fırına şarj edilen kütüklerin sıcak şarj edilmesi ve reküperatörden sonra atılan baca gazı ısısının

geri kazanılmasını belirlemişlerdir. Baca gazının enerji potansiyelini 81.590 kcal/TEP olarak hesaplamışlardır [10].

Ertem ve ark. yaptıkları çalışmada endüstriyel tav fırınlarında enerji kaybının görüldüğü başlıca kısımları incelemiş, enerji verimlilik analizi yapmış, ısı verimi bulmuş ve kayıpları tespit etmişlerdir. Giren enerji ile ürüne aktarılan enerji arasındaki farkın hangi tür kayıplar olduğu ve miktarları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda ısı verim %38,3 olarak bulunmuştur. Kayıplar ise %31,6 ile baca gazı kayıpları, %10,4 ile yüzey kayıpları, %13 ile açıklık kayıpları ve %6,7 ile diğer kayıplar olarak belirlenmiştir [11].

Si ve ark. yaptıkları çalışmada Kanada, Manitoba'da bulunan bir çelik fabrikasının enerji verimliliğini değerlendirmiş ve atık ısı geri kazanımının olabirliğini analiz etmişlerdir. Proses ısıtma değerlendirmesi ve gözden geçirme aracı (PHAST) ile yapılan çalışmada tav fırını verimi %60 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada baca gazı kayıpları toplam enerji kayıplarının %29,5'i ile tav fırınındaki en büyük enerji kaybını oluşturmuştur. Çalışma sonucunda enerji verimliliğinin artırılması için kütüklerin 315 °C'ye ön ısıtılması gerektiği belirtilmiştir [12].

Chen ve ark. yaptıkları çalışmada bir sıcak haddehanenin tav fırınlarının performansını ve enerji tüketimini hem sayısal tahminler hem de pratik ölçümler ile analiz etmişlerdir. Sayısal tahminlerde fırınların artan üretim hızının yakıtı daha verimli olarak kullandığını göstermiştir. Pratik çalışma ise fırın içerisindeki ısının %80'inin yakıtın yanması, %15,7'sinin ise sıcak baca gazı ile sağlandığını göstermiştir. Ayrıca pratik ölçümler ısı geri kazanımı bölgesindeki ısı değişimi ve ısı geri kazanımı verimlerinin sırasıyla %86,66 ve %47,76 olduğunu göstermiştir [13].

Manatura ve Tangtrakul yaptıkları çalışmada reküperatör ile birleştirilmiş rejeneratif burner'lerin (yakıcıların) kullanıldığı bir tav fırınında enerji kullanımını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada tav fırınının özgül enerji tüketimi 1.042 MJ/t olarak bulunmuş ve fırın verimi %80,1 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada enerji tasarruf oranı sadece reküperatör kullanılan tav fırınları ile karşılaştırıldığında %43,4

olarak bulunmuş ve rejeneratif burner ile önemli bir verim değeri elde etmişlerdir [14].

3. DENEYSEL METARYAL VE METODLAR

3.1. Teorik Temel ve Hesaplama Yöntemi

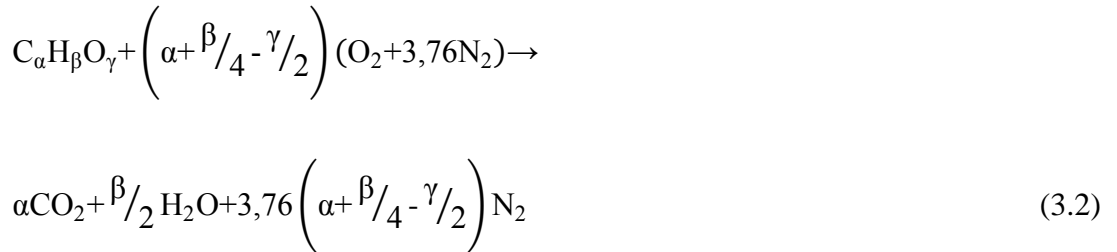
3.1.1. Yanma

Bir yakıtın büyük miktarda enerji vererek oksitlenme tepkimesine yanma denir. Yanma işleminde en sık kullanılan oksitleyici havadır. Yanma işlemi sırasında tepkimeden önce bulunan bileşenlere girdiler ve tepkimeden sonra bulunan bileşenlere ürünler denir. Örneğin 1 kmol karbonun 1 kmol saf oksijen ile karbon dioksit oluşturarak yanmasında



Kimyasal tepkimeler kütle korunumu ilkesine dayanarak denkleştirilmektedir. Kütle korunumu ilkesi kimyasal tepkime sırasında her bir elementin toplam kütlesi sabit kalır şeklinde ifade edilebilir. Bununla beraber girdilerin toplam mol sayısı ürünlerin toplam mol sayısına eşit olmayabilir. Yani bir kimyasal tepkimede toplam mol sayısı sabit kalmayabilir [15].

Genel hidrokarbon yakıtlar $C_\alpha H_\beta O_\gamma$ için hava ile yanma stokiyometresi şu şekilde ifade edilebilir (McAllister et al., 2011):



Burada α , β ve sırasıyla C, H ve O elementlerinin atom sayılarıdır. Bir yakıtın tam yanması için gereken minimum hava miktarına stokiyometrik hava denir.

Gerçek yanma işlemlerinde tam yanmayı sağlamak ve yanma odasının sıcaklığını kontrol etmek için stokiyometrik miktardan daha fazla hava kullanmak genel bir uygulamadır. Stokiyometrik miktardan fazla kullanılan hava miktarına fazla hava denir ve fazla hava miktarı stokiyometrik havaya dayanarak fazla hava yüzdesi olarak ifade edilir ve şu şekilde tanımlanır [16].

$$\%FH=100 \times \frac{m_h - m_{hs}}{m_{hs}} \quad (3.3)$$

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

$$HY= m_h / m_y \quad (3.4)$$

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

$$\varphi = \frac{HY}{HY_s} \quad (3.5)$$

Burada $\varphi < 1$ olursa eksik yanma, $\varphi = 1$ olursa stokiyometrik yanma, $\varphi > 1$ olursa zengin yanma olur [16].

Yakıtların yanması ile bağlantılı olarak kullanılan diğer bir terim yakıtın ısı değeridir ve bir yakıtın tamamen yandığında ve girdiler ürünler haline döndüğünde ortaya çıkan ısı miktarı olarak tanımlanır. Isı değeri ürünlerde bulunan suyun fazına bağlıdır. Ürünlerdeki su sıvı halde olduğunda ısı değerine üst ısı değer (ÜİD), ürünlerdeki su buhar fazında ise alt ısı değer (AİD) denir [15].

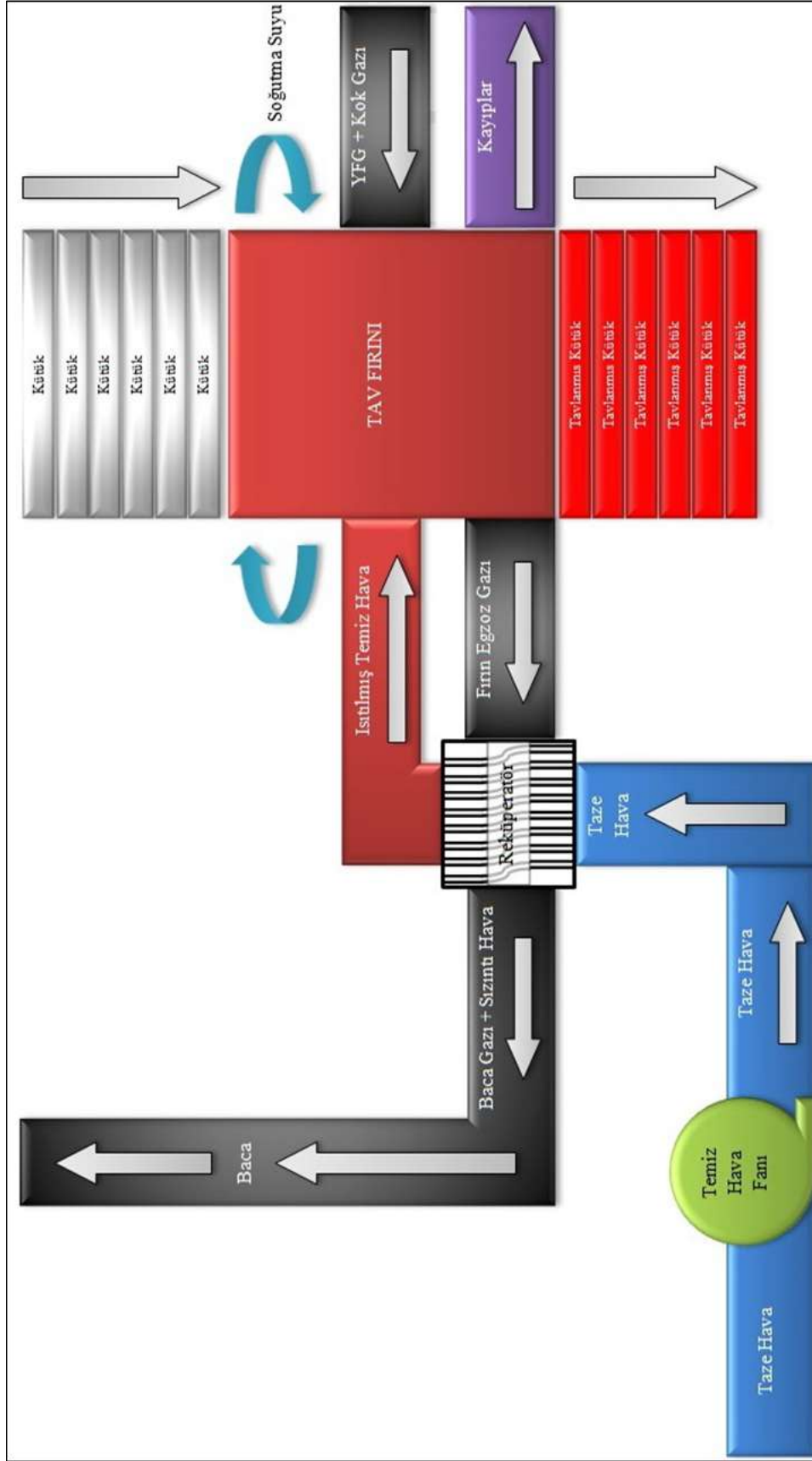
3.2. Ölçüm Yöntemi ve Ölçüm Cihazları

Bir sanayi kuruluşunun haddehane tav fırınında enerji tasarrufu potansiyelini belirleme ve verimlilik artırıcı yöntemlere yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarda fırın giriş ve çıkışı ile reküperatör giriş ve çıkışı arasında enerji dengesinin kurulabilmesi için akışlara ait hız, basınç, sıcaklık ve yanma gazı ölçümleri yapılmış, ayrıca sistem üzerinde mevcut sayaçlardaki değerler okunmuştur.

Ölçülen değerler ile mevcut sayaçlardan alınan değerler kullanılarak enerji dengesi kurulmuştur. Kurulan enerji dengesi ile her bir fırında verim, potansiyel tasarruf alanları ve tasarrufların boyutları hesaplanmıştır. Tav fırınlarının çalışma sistemi Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir.

Fırında yakıt olarak kullanılan kok gazı ve Yüksek Fırın gazı debileri mevcut sayaçlardan okunmuştur. Yüksek Fırın gazı ve Kok gazının içerikleri kullanılarak yanma ürünlerinin bileşenleri ve debileri hesap edilmiştir. Hesap edilen teorik değerler, fırın çıkışı ve baca çıkışında yapılan gaz analizi, basınç, hız ve sıcaklık ölçümleriyle de karşılaştırılmış ve doğrulukları kontrol edilmiştir.

Baca gazı, fırın çıkışı egzoz gazı ve reküperatör çıkışı egzoz gazı analizleri için elektrokimyasal detektör yöntemi ile çalışan TESTO 350 marka gaz analiz cihazları kullanılmıştır.



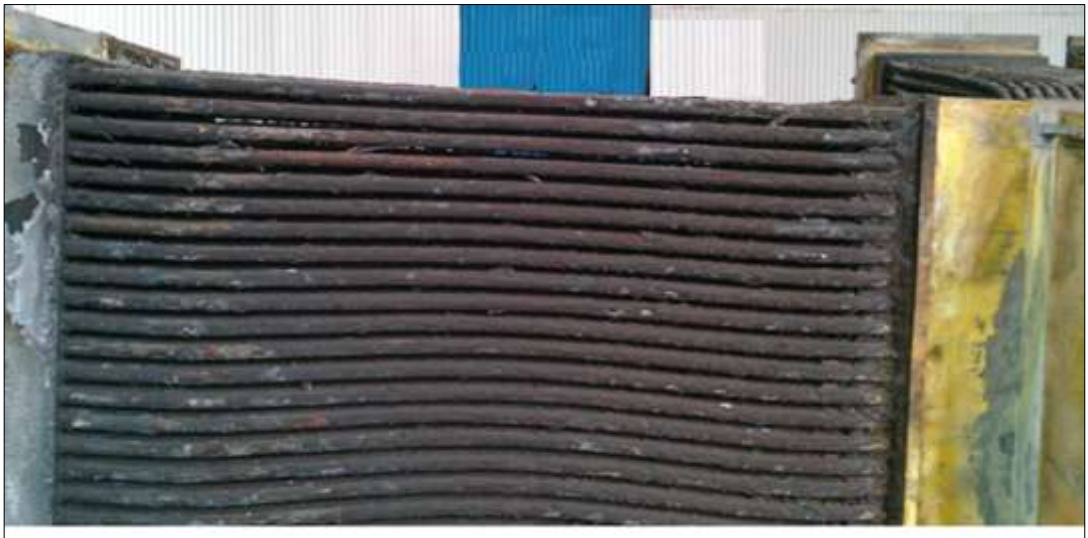
Şekil 3.1. Tav fırını çalışma ve ölçüm sisteminin şematik gösterimi

TESTO 445 marka cihaz ile baca gazı hız ve basınç değerleri ölçölmüş ve baca gazı debileri hesaplanmıştır. Baca gazı debilerinin ölçümünden sonra, baca çıkışı O₂ yüzdesi ve fırın çıkışı O₂ yüzdelerinden faydalanılarak fırın yanma gazı debisi hesaplanmıştır. Baca gazı debisinden, fırın yanma gazı debisi çıkarılarak sızıntı hava miktarı hesaplanmıştır. Sisteme beslenen kütük ve oluşan tufal miktarı bilgileri ise işletmeden alınmıştır. Ayrıca bunlara ait giriş ve çıkış sıcaklık değerleri sıcaklık ölçüm cihazlarıyla ölçölmüştür.

4. HADDEHANE TAV FIRINININ ENERJİ TASARRUF POTANSİYELLERİ

Tez çalışmasının yapıldığı sanayi kuruluşu ray ve yapı çeliklerinin üretimini yapan 400.000 ton/yıl kapasiteli haddehaneye sahiptir. Bu üretim hattının ilk aşamasını oluşturan tav fırınında, 350 °C yakma hava sıcaklığı sağlayabilen eski reküperatör ve sabit hava-yakıt karışımı ile çalışan yakma sistemi bulunmaktaydı. Yapılan detaylı enerji etüdünde aşağıdaki enerji tasarrufu imkânlarının bulunduğu anlaşılmıştır;

Tav fırınında bulunan eski reküperatör ile ortalama 350 °C sıcaklıkta yakma havası elde edilmektedir. Eski reküperatörde, düşük korozyon dayanımı nedeniyle borularda oluşan delinmeler sonucu sızıntı ve kaçaklar tespit edilmiştir. Normal şartlarda (sızıntı olmaksızın) daha yüksek sıcaklıklarda yakma havası elde etmek mümkündür. Reküperatörde sızıntının anlamı, havanın atmosferden ortam şartlarında (15-25 °C) alınıp, 350 °C'ye kadar ısıtılarak tekrar atmosfere atılması demektir. Yakma havası sıcaklığının düşük olması yakma verimini doğrudan etkilemekte, tavlama zamanını ve yakıt sarfiyatını (Yüksek Fırın ve Kok gazı) artırmaktadır. Yakıt sarfiyatının artması aynı zamanda emisyonların artması anlamına da gelmektedir.



Şekil 4.1. Tav fırınındaki mevcut reküperatör resmi

Rekuperatörün düşük verimle çalışması ve üç yıl gibi kısa bir sürede egzoz gazlarının korozyon etkisi nedeniyle rekuperatör tüplerinde delikler meydana gelmiştir. Bu olumsuzluğu önlemek üzere yüksek verimli, egzoz gazının korozyon etkisine ve yüksek sıcaklığa daha dayanıklı yeni bir rekuperatörün tasarlanarak imalatına ve sisteme entegre edilmesine gerek duyulmuştur. Diğer yandan, ofis ve atölyelerin ısıtılmasında, banyolarda sıcak su ihtiyacının karşılanmasında kömür yakıtlı kazanlar kullanılmaktaydı, yıllık 400 ton kömür bu kazanlarda yakılmaktayken, rekuperatör çıkışında 350~375 °C sıcaklıktaki egzoz gazları atmosfere atılmakta, bu ise enerji israfına neden olmaktaydı. Bu noktada, atık ısının geri kazanılarak ihtiyaç duyulan sıcak suyun kömür yerine atık ısı kaynağından karşılanması, bu sayede hem maliyet hem de emisyon azaltımının sağlanması için rekuperatör çıkışına monte edilmek üzere bir ekonomizer imal edilmiştir.

Kok ve Yüksek Fırın üretim proseslerine bağlı olarak, Yüksek Fırın gazı ve Kok gazının debisi ve içeriği dolayısıyla kalorifik değeri sık sık değişmektedir. Tav fırını kontrol sisteminde yakıtların içeriği-kalorifik değeri online olarak okunamadığından, hava-yakıt oranı 3,7:1 olarak sabit alınmaktaydı. Yüksek Fırın gazı ve Kok gazı debisi ve içeriği değiştiğinde hava miktarının da tam yanmayı sağlayacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. Yakma havası miktarı gereğinden fazla olduğunda, fırın sıcaklığı düşmekte ve hava fazlalığından dolayı tavlancak malzemede daha fazla tufal oluşup malzeme kaybı artmaktadır. Havanın optimum hava fazlalık katsayısının altında olması durumunda ise eksik yanma (CO oluşumu) meydana gelmekte, yanma fırın çıkışında da devam ettiği için fırın refrakter malzemesi de zarar görmektedir. Rekuperatör sıcaklığı çok yükseldiğinden rekuperatör tüplerinde zamanla delikler meydana gelmekte ve yakıt tüketimi artmaktadır. Bu olumsuzlukların önlenmesi amacıyla Yüksek Fırın ve Kok gazının içeriğini analiz edecek bir gaz analizörüne ihtiyaç duyulmaktaydı.

Tablo 4.1. Yüksek Fırın gazının elementel analiz sonuçları

Yüksek Fırın Gazı Analiz Değerleri (kütlece %, orijinal temel)			
CO ₂	18,64	CO	23,17
H ₂	2,08	N ₂	56,11
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	753	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	763

Tablo 4.2. Kok gazının elementel analiz sonuçları

Kok Gazı Analiz Değerleri (kütlece %, orijinal temel)			
CO ₂	3,01	C ₂ H ₄	1,62
O ₂	0,37	CO	6,68
H ₂	57,75	CH ₄	22,28
C ₂ H ₆	0,62	C ₂ H ₂	0,11
N ₂	6,87	Inert	0,69
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	4.000	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	4.521

Fırında blum/kütük boyunca homojen, tavlama koşullarının oluştuğunu yakıcı alev boyları ve alev renginden anlamak mümkündür. Fakat eski sistemde yakıcı alev boyları ve alev rengini görme imkânı bulunmamaktaydı. Fırının her iki bölgesinde (tavlama zonları) bulunan toplam 44 adet yakıcının her birinin aynı tavlama özelliklerini sağlamadığı malzemenin haddelenmesi sırasında zaman zaman gözlenmektedir. Normal çalışma koşullarında yakıcı performansı düşebilmekte, düşük debi/şiddette yanan yakıcılara karşılık aynı bölgedeki diğer yakıcıların daha şiddetli yanma sağlaması homojen olmayan bir tavlama sebebiyet vermektedir. Homojen olmayan tavlama, haddeleme sırasında merdanelerin kısa sürede aşınmasına, mekanik sisteme aşırı darbe gelmesine daha dar toleranslarda üretim gerektiren ray ve ince kesitli profillerde malzeme boyunca istenilen tolerans aralığında üretilmemesine (profillerde tolerans $\pm 0,8\sim 4$ mm iken raylarda bazı ölçülerde tolerans $\pm 0,5$ mm kadar inmekte) neden olmaktadır. Bu durum ise üretim, enerji, kalite ve verim kaybına sebebiyet vermektedir. Firma proses mühendislerinin edindikleri tecrübeler neticesinde, tav fırınında homojen bir tavlama yapıldığında merdanelerinin ömrünün yaklaşık %5 artırılabilceği görülmüştür. Ray ve profil üretiminde hammadde ve enerjiden sonra en büyük gider olan merdane alım

maliyetlerinin homojen bir tavlama ile %5 azaltılabileceği öngörülmüştür. Tav fırınında tüm yakıcıları görecektek şekilde toplam 4 adet yüksek sıcaklığa dayanıklı kameralar yerleştirilerek yakıcılardaki alev boyunun ve alev renginin sürekli izlenmesine karar verilmiştir.

4.1. Yeni Reküperatör ile Yapılacak Enerji Tasarruf Potansiyeli

Tav fırını eski reküperatörünün, soğuk yakma havasının reküperatör borularıyla ilk karşılaştığı giriş bölgesinde kükürt korozyonu sebebiyle reküperatör borularında delinmeler olduğu görülmüştür. Reküperatör borularındaki delinmeler neticesinde yüksek basınçlı ortamdan düşük basınçlı ortama doğru (yakma havası tarafından egzoz gazı tarafına) hava sızıntısı meydana gelmiştir. Bu kayıp yüksek sıcaklık ve korozyon direncine sahip yeni reküperatör imalatıyla önlenmektedir. Reküperatördeki sızıntı havanın önlenmesi ile elde edilecek enerji tasarruf potansiyeli Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Tav fırınında sızıntı havanın önlenmesi ile yapılacak enerji tasarruf potansiyeli

Sızıntı Havanın Önlenmesi ile Yapılacak Tasarruf Miktarı	
Reküperatördeki sızıntı hava debisi (Nm ³ /h)	6.126
Baca gazı sıcaklığı (°C)	350
Ortam sıcaklığı (°C)	20
Cp (kcal/Nm ³ K)	0,342
Enerji tasarrufu (kcal/h)	691.380
Fırın yıllık çalışma süresi (h)	8.500
Yıllık enerji tasarrufu (kcal)	5.876.733.060
Tasarrufun mali değeri (TL/yıl)	542.745

4.2. Gaz-Su Ekonomizeri ile Yapılacak Enerji Tasarruf Potansiyeli

Yeni konulacak reküperatör çıkışındaki egzoz gazı atık ısısından yararlanarak sıcak su elde edilmesi için reküperatör çıkışına ekonomizer yerleştirilmelidir. Reküperatör sonrasında konulacak ekonomizer ile baca gazı sıcaklığı 350 °C’den 150 °C

seviyesine düşürülerek yaklaşık 90 °C sıcaklıkta çevrim suyu elde edilebilir. Bu sıcak su ile haddehanede kullanılan banyolar ve binalarda ısınma ihtiyacı giderilebilir. Ayrıca elde edilen sıcak su ile yapımı devam eden yeni hizmet binaları da ısıtılabilir. Ekonomizlerden elde edilecek enerji tasarruf potansiyeli Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. Haddehane tav fırınında ekonomizlerden elde edilecek enerji tasarruf potansiyeli

Ekonomizer Tesisi ile Sağlanacak Tasarruf Miktarı	
Proje sonrası egzoz gazı debisi (Nm ³ /h)	30.191
Ekonomizer giriş sıcaklığı (°C)	350
Ekonomizer çıkış sıcaklığı (°C)	150
Cp (kcal/Nm ³ K)	0,342
Enerji tasarrufu (kcal/h)	2.065.064
Fırın yıllık çalışma süresi (h/yıl)	4.000
Yıllık enerji tasarrufu (kcal/yıl)	8.260.256.000
Tasarrufun mali değeri (TL/yıl)	762.876

4.3. Hava-Yakıt Oranı Online Ölçüm Sistemi ile Yapılacak Enerji Tasarruf Potansiyeli

Fırına giren fazla hava miktarının azaltılması ve optimum yanmanın sağlanabilmesi için Yüksek Fırın ve Kok gazının içeriğini online analiz edecek ve buna göre hava-yakıt oranını ayarlayacak gaz analizörüne ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek Fırın ve Kok gazı içeriği online analiz edilerek, fırında optimum yanma için gerekli hava miktarı ayarlanabilecektir. Analiz bileşenlerinin yanma hesabı yapılarak, bileşen oranına göre hava-yakıt oranı hesabına gidilebilir. Yapılan bu hesap gaz analizörünün yazılımında kullanılacak ve mevcut kontrol sistemine entegre edilerek hava-yakıt oranının anlık olarak değişmesi sağlanacaktır. Gaz analizörünün devreye alınması ile fazla havadan yapılacak enerji tasarruf potansiyeli Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5. Tav fırınında fazla havanın azaltılması ile sağlanacak enerji tasarruf potansiyeli

Fazla Havanın Azaltılması	
Fazla hava debisi (Nm ³ /h)	9.987
Fazla hava oranı (%)	51,95
Tasarruf Miktarı	
Havadaki azalma (Nm ³ /h)	2.682
Cp (kcal/Nm ³ K)	0,342
Hava giriş sıcaklığı (°C)	20
Baca gazı sıcaklığı (°C)	350
Enerji tasarrufu (kcal/h)	302.690
Fırın yıllık çalışma süresi (h/yıl)	8.500
Yıllık enerji tasarrufu (kcal/yıl)	2.572.869.420
Tasarrufun mali değeri (TL/yıl)	237.617

4.4. Fırın İçi Yakıcıları Sürekli İzleme Sistemi ile Yapılacak Enerji Tasarruf Potansiyeli

Tav fırınında yanma rejiminin ve yakıcı performans düşüşlerinin belirlenebilmesi, tavlanan malzemelerin her birinin aynı tavlama özelliklerini sağlayıp sağlamadığının bilinmesi, yakıcı alev boyları ve alev renklerinin sürekli gözlemlenmesi için fırına 4 adet yüksek sıcaklığa dayanıklı kamera yerleştirilebilir. Bu bağlamda sisteme entegre edilen izleme sistemi ile fırın yakıcıları farklı noktalardan izlenmekte, kontrollü yanma sağlanırken, alev boylarının kontrol altında tutulması homojen tavlama sağlanması açısından fayda sağlamaktadır.

Hava miktarının optimum yanmayı sağlayacak şekilde ayarlanması ile yakma havası miktarı gereğinden fazla olduğunda fırın sıcaklığının düşmesi engellenmiş olacaktır. Ayrıca, her bir yakıcıda yakma havası miktarı optimuma yakın ayarlanacağı için tavlanan malzemedeki tufal kaybı minimize edilmiş olacaktır. Yapılan detaylı enerji etüdünde tav fırını ortalama tufal kaybı %1,8 olarak hesap edilmiştir.

Yakıcı izleme sistemi ile her bir yakıcıdaki hava-yakıt oranı optimize edilerek, tufal kaybı ortalama %1,5'in altına çekilebilir.

5. HADDEHANE TAV FIRININDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNE YÖNELİK UYGULANAN PROJELER VE TASARRUF MİKTARLARI

5.1. Tav Fırınına Reküperatör Uygulaması

Reküperatörler, baca gazındaki atık ısının yakma havasına aktarıldığı ısı değiştiricilerdir. Reküperatörlerde yakma havası borular içinden geçerken, baca gazı bu borular arasından aynı doğrultuda, karşı doğrultuda veya çapraz doğrultuda geçebilirler. Reküperatörlerdeki borular ısıya dayanıklı elik malzemeden imal edilmektedirler. Ancak zamanla, baca gazının aşındırıcı etkisinden dolayı bu borular zarar gormekte ve yüksek basınçlı ortamdaki düşük basınçlı ortama doğru sızıntı meydana gelmektedir.

Yapılan detaylı enerji etüdünde tav fırını reküperatöründe düşük korozyon dayanımı nedeniyle borularda oluşan delinmeler sonucu sızıntı ve kaçaklar tespit edilmiştir. Reküperatörde sızıntının anlamı, havanın atmosferden ortam şartlarında (0-35°C) alınıp, 350 °C'ye kadar ısıtılarak tekrar atmosfere atılması demektir. Normal şartlarda (sızıntı olmaksızın) daha yüksek sıcaklıklarda yakma havası elde etmek mümkündür.

Yakma havası sıcaklığının düşük olması yakma verimini doğrudan etkilemekte, tavlama zamanını ve yakıt sarfiyatını (Yüksek Fırın gazı ve Kok gazı) artırmaktadır. Yakıt sarfiyatının artması aynı zamanda emisyonların artması anlamına da gelmektedir. Reküperatörün düşük verimle çalışması, üç yıl gibi kısa bir sürede egzoz gazlarının korozif etkisi ve tav fırını çıkışı egzoz gazı sıcaklığının çok yüksek olmasından (fırında hava-yakıt oranının tam olarak ayarlanamaması nedeniyle) dolayı reküperatör tüplerinde delikler meydana gelmiştir. Bu olumsuzluğu önlemek üzere daha yüksek verimli, egzoz gazının korozif etkisine ve yüksek sıcaklığa daha dayanıklı yeni bir reküperatörün tasarlanarak imalatına ve sisteme entegre edilmesine gerek duyulmuştur.

5.2. Reküperatör Tasarım Parametreleri

Mevcut reküperatör yerine maksimum 47.600 Nm³/h egzoz gazı ve maksimum 39.000 Nm³/h yakma havası kapasitesinde, çıkış yakma havası sıcaklığını maksimum 575 °C'ye yükselten yeni bir reküperatörün tasarlanması, imalatının yaptırılması ve montajı ile yakıt tüketiminin %12 azalması, egzoz emisyonlarının %12 düşürülmesi ve reküperatör ekonomik çalışma ömrünün 10 yıla kadar uzaması hedeflenmiştir. Reküperatörün tasarımı, imalatı ve montajı tamamlanmış ve tasarım parametreleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Reküperatör tasarım parametreleri

Tasarım Parametreleri			
	Normal	Maksimum	Birim
Egzoz gazı debisi	40.500	47.600	Nm ³ /h
Egzoz gazı giriş sıcaklığı	800	820	°C
Egzoz gazı çıkış sıcaklığı	385	400	°C
Egzoz gazı basınç düşüşü	11	16	mmSS
Ön ısıtılacak yakma havası debisi	33.400	39.200	Nm ³ /h
Yakma havası giriş sıcaklığı	20	20	°C
Yakma havası çıkış sıcaklığı	575	580	°C
Yakma havası basınç düşüşü	280	380	mmSS
Isı transfer yüzeyi	881		m ²

5.3. Reküperatör Boru Malzemeleri

Reküperatör girişinde egzoz gazı sıcaklığı daha yüksek, çıkışında daha düşük olacağı için maliyet açısından borular farklı boru malzemelerinden dizilmiştir. Reküperatörde kullanılacak boru malzemelerinin kalitesi, kimyasal kompozisyonları ve boru adetleri tasarlanmış ve önceki reküperatör ile karşılaştırılarak Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Reküperatör boru malzemeleri ve önceki reküperatör ile karşılaştırılması

		Mevcut Reküperatör Boru Özellikleri							Yeni Reküperatör Boru Özellikleri							
Boru Adedi									X10CrAlSi25	2 × (32 × 7) = 448 adet						
	DIN 1.4742								X10CrAlSi18 (SIC10)	2 × (32 × 11) = 704 adet						
	DIN 1.4724	2 × (24 × 2) = 96 adet							X10CrAlSi13 (SUS410L)	2 × (32 × 7) = 448 adet						
	DIN 1.4720	2 × (24 × 12) = 576 adet														
	ST 37	2 × (24 × 15) = 720 adet							STB340							
									S-TEN	2 × (32 × 11) = 704 adet						
Toplam Boru Adedi	Ø 44,5 / 1392 adet							Ø 42,7 / 2304 adet								
Boruların kimyasal kompoz.		C	Si	Mn	P	S	Cr	Diğer		C	Si	Mn	P	S	Cr	Diğer
									X10CrAlSi25	≤0,12	1,2 - 1,5	≤1,0	≤0,045	≤0,03	2 - 3,5	1,2 - 1,7 (Al) + Ti
									X10CrAlSi18	≤0,12	0,7 - 1,2	≤1,0	≤0,045	≤0,03	1 - 1,9	0,7 - 1,2 (Al) + Ti
	DIN 1.4724	≤0,12	0,7 - 1,4	≤1,0	≤0,04	≤0,03	1 - 1,4	0,7 - 1,2 (Al)	X10CrAlSi13	≤0,03	≤1,0	≤1,0	≤0,04	≤0,03	1 - 1,3	
	DIN 1.4720															
	ST 37	≤0,17			≤0,04	≤0,04		≤0,009(N)	STB340							
									S-TEN	≤0,14	≤0,55	≤0,7	≤0,025	≤0,025		
Boru et kalınlığı	2,6 mm							3 mm								
Toplam Ağırlık	8.650 kg × 2 Ünite = 17.300 kg							16.000 kg × 2 Ünite = 32.000 kg								

5.3.1. Sülfürik asit çiylenme korozyonu dayanımlı S-TEN 1 çeliği boru

Sülfürik asit çiylenmesine karşı korozyon dayanımlı bir çelik olan S-TEN 1, hava ön ısıtıcıları, bacalar ve borular gibi baca gazı değerlendirme ekipmanlarında kükürt oksitler nedeni ile oluşan düşük sıcaklık korozyonuna karşı yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda düşük sıcaklıktaki egzoz gazından kaynaklanan hidroklorik asit çiylenme korozyonunun beklendiği tesislerde korozyon problemine karşı mükemmel korozyon dayanımı göstermektedir [17].

Fueloil, LNG ve kömür gibi kükürt (S) içeren yakıtlar yakıldığında kükürt oksitler (SO_x) üretilir ve bunların bir kısmı SO_3 'e dönüşür. Egzoz gazı sıcaklığı çiylenme noktasının altına düştüğünde veya egzoz gazı düşük sıcaklıktaki bir duvar ile temas ettiğinde, egzoz gazının içerisinde bulunan SO_3 ve H_2O birleşerek çeliği korozyona uğratan yüksek yoğunlukta bir sülfürik asit oluştururlar. Bu olaya sülfürik asit çiylenme korozyonu denir ve sadece karbon çeliğini değil paslanmaz çeliği de ağır bir korozyona uğratır [17].

S-TEN 1 borusu daha çok bacalarda büyük çaplı borularda kullanılmaktadır. Bununla birlikte küçük çaplı elektrik direnç kaynağı (ERW) boruları, enerji santralleri, atık yakma tesisleri ve çeşitli ısıtma fırınları için kazanların hava ön ısıtıcılarına yaygın olarak uygulanırlar. Bu ERW borusu, sıkı kalite kontrol altında üretilen yüksek kaliteli bir çeliktir. Ek olarak, bu çeliğin sadece basınçsız bölgelere değil, ayrıca yakıt ekonomizerleri gibi basınçlı bölgelere uygulanması amacıyla Nippon Steel tarafından "KA-STB380J1" malzemesi olarak standartlaştırılmıştır.

5.3.1.1. S-TEN 1 borusunun çalışabilirliği

S-TEN 1 çeliği, krom gibi herhangi bir alaşım elementi içermediğinden ve düşük karbonlu bir çelik olduğundan normal çelikle aynı mukavemette ve aynı şartlarda kaynak edilebilir. Boruların birbirlerine kaynak ile bağlandığı çekme deneyi sonuçları borunun kaynak kopma noktasının, beklenmedik bir şekilde iyi kaynak mukavemeti göstererek boru malzeme ile aynı kopma noktasında olduğunu ortaya koymuştur [17].

5.3.1.2. Sülfürik asit çiylenme korozyonuna karşı dayanım

Boru tipi hava ön ısıtıcıları sülfürik asit çiylenme korozyonundan etkilenen tipik ekipmanlardır. Genel olarak bu korozyon düşük sıcaklık bölgesinde daha şiddetlidir. S-TEN 1 çeliği ve STB340-EG karbon çeliği boruların boru tipi bir hava ön ısıtıcısının ön sırasına yerleştirilmesi ile yapılan 1 yıllık bir araştırmanın sonucunda aşınma miktarları Tablo 5.3'de gösterilmiştir [17].

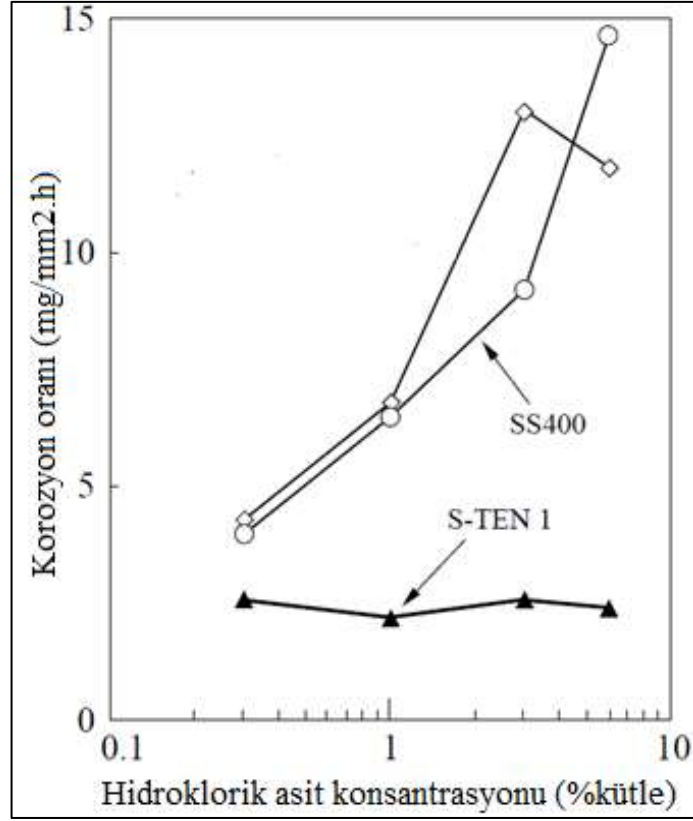
Tablo 5.3. S-TEN 1 çeliği ve STB340-EG karbon çeliğinin sülfürik asit çiylenme korozyonu miktarları

Çeliğin Cinsi	Ölçülen Korozyon Kalınlığı (mm/4,8h)		Yıllık Yaklaşık Korozyon Miktarı (mm/y)
	Maksimum	Ortalama	
S-TEN 1	0,12	0,02	0,04-0,22
STB340	0,62	0,25	0,46-1,13

Borular iç kısımdan yanmış egzoz gazı, dış kısımdan ön ısıtılmış hava ile temas edecek şekilde yapılandırılmıştır. Bir yıl sonra S-TEN 1 borusunun yaklaşık korozyon miktarı 0,04 mm ile 0,22 mm arasında, normal çelik borunun korozyon miktarı ise 0,46 mm ile 1,13 mm arasında çıkmıştır. Yukarıdaki sonuçlar S-TEN 1 borusunun sülfürik asit çiylenme korozyonu dayanımının iyi olduğunu göstermektedir [17].

5.3.1.3. Hidroklorik asit çiylenme korozyonuna karşı dayanım

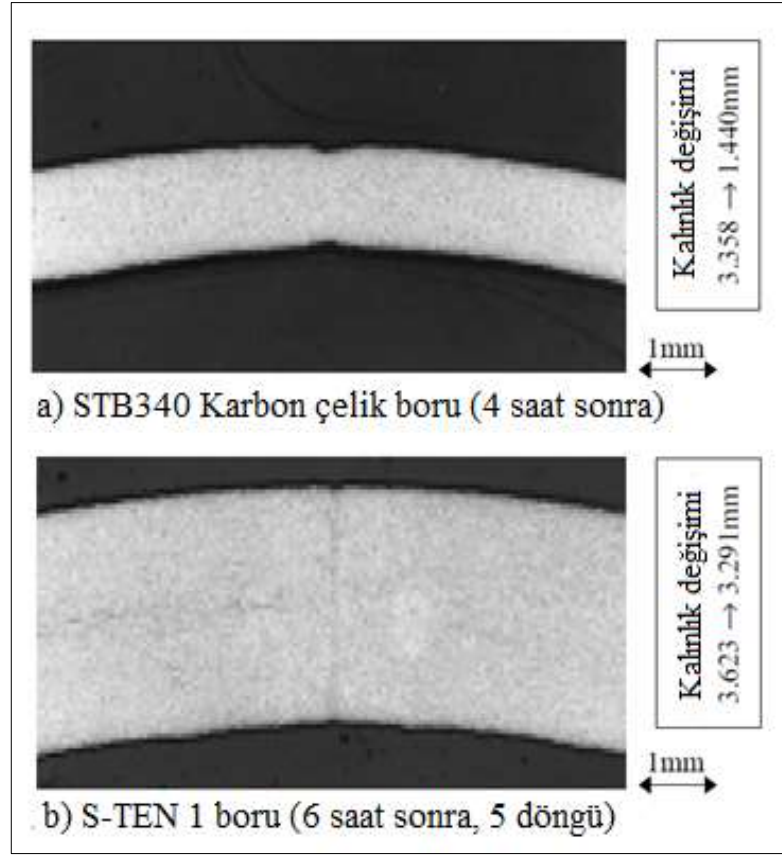
Hidroklorik asidin çiylenme noktası, sülfürik asidin çiylenme noktasından daha düşüktür ve 72 °C'nin altında olduğu kabul edilmektedir. Bir atık yakma tesisinin egzoz gazı sıcaklığının anti-diyoksin ölçümlerinin iyileştirilmesi çalışmasından sonra düşmesi ile hidroklorik asit çiylenme korozyonu oluşur. Şekil 5.1 çeşitli çelik malzemelerin hidroklorik asit çiylenme korozyonu dayanımlarını göstermektedir. S-TEN 1 (Cu, Sb alaşımlı) borusunun hidroklorik asit dayanımında diğer sülfürik asit dayanımlı çelik (Cu alaşımlı, yüksek kromlu) borulardan daha iyi sonuç vermektedir [17].



Şekil 5.1.S-TEN 1 çeliğinin hidroklorik asit dayanımı

5.3.1.4. ERW borusu kaynak bölgesinin asit dayanımı

Karbon çeliği (STB340) borudan ve S-TEN 1 borudan test numuneleri hazırlanmış ve 60 °C'de %40'lık bir H₂SO₄ çözeltisine daldırılmıştır. Şekil 5.2 bunların daldırılmadan sonra nasıl aşındığını göstermektedir. Karbon çeliği boru STB340 yaklaşık %40 oranında incelmıştır. Bununla birlikte S-TEN 1 ERW borusu hemen hemen hiçbir incelme izi göstermemiş ve kaynak bölgesinde herhangi bir korozyon gözlenmemiştir [17].



Şekil 5.2. Gaz-sıvı denge durumundaki sülfürik asit-su sistemindeki sülfürik aside daldırma testi sonrası makro yapı

5.3.2. Oksidasyon dayanımlı paslanmaz çelik dikişsiz boru (SIC)

SIC serisi, SIC 9, SIC 10 ve SIC 12, yüksek oranda silikon, alüminyum ve krom içerdiğinden oksidasyona ve vanadyum veya kükürde karşı mükemmel bir dayanım göstermektedir. Maksimum çalışma sıcaklıkları SIC 9 için 900°C, SIC 10 için 1000°C ve SIC 12 için 1200°C'dir [18].

- SIC, yüksek oksidasyon dayanımından dolayı reküperatörler için 18Cr-8Ni östenitik paslanmaz çeliklerinden daha uygundur.
- Isı değiştirme verimi ferritik matrisin bağlı yüksek ısı iletkenliğinden dolayı artırılmıştır.
- Düşük Ni içeriğinden dolayı maliyeti rekabet edebilir düzeydedir.

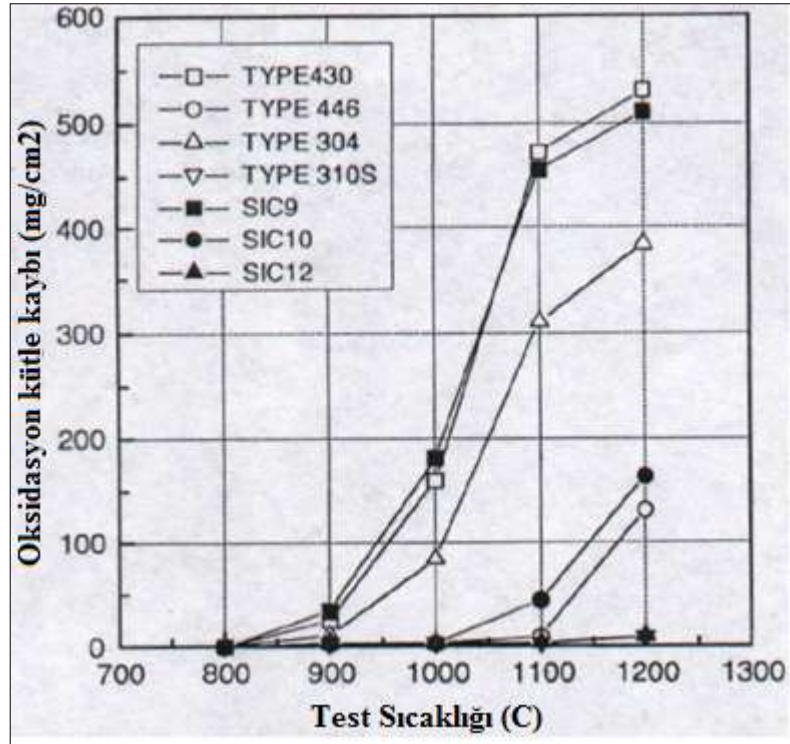
SIC serisinin kimyasal kompozisyonları Tablo 5.4'de verilmiştir [18].

Tablo 5.4. SIC serisi kimyasal kompozisyonları

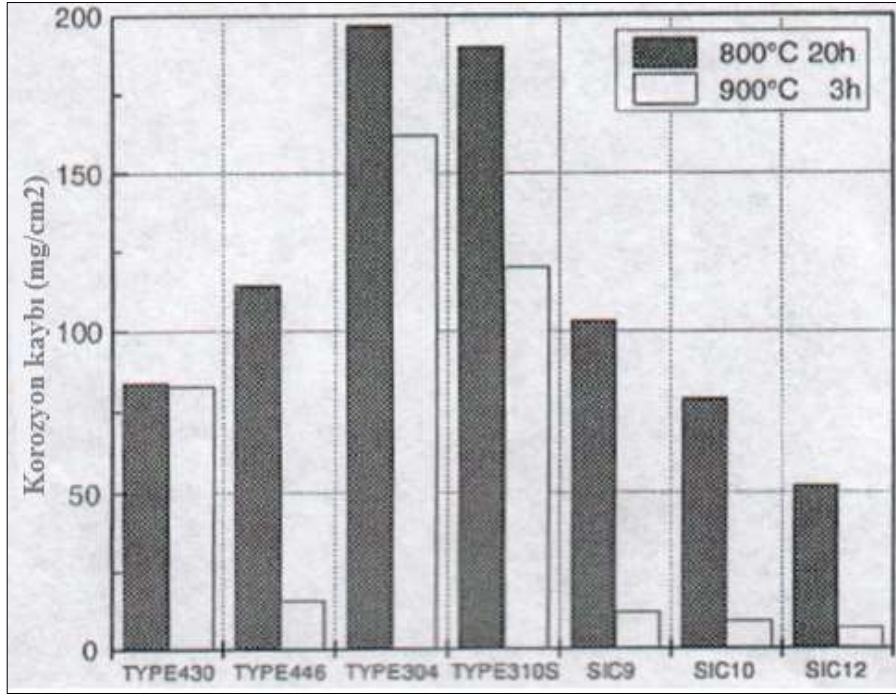
Kimyasal Kompozisyon Aralığı (Kütlece %)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
SIC 9	≤0,12	0,9-1,4	≤1,00	≤0,045	≤0,030	12,0-14,0	0,7-1,2
SIC 10	≤0,12	0,7-1,2	≤1,00	≤0,045	≤0,030	17,0-19,0	0,7-1,2
SIC 12	≤0,12	1,2-1,5	≤1,00	≤0,045	≤0,030	23,0-25,0	1,2-1,7

5.3.2.1. SIC Serisinin Özellikleri

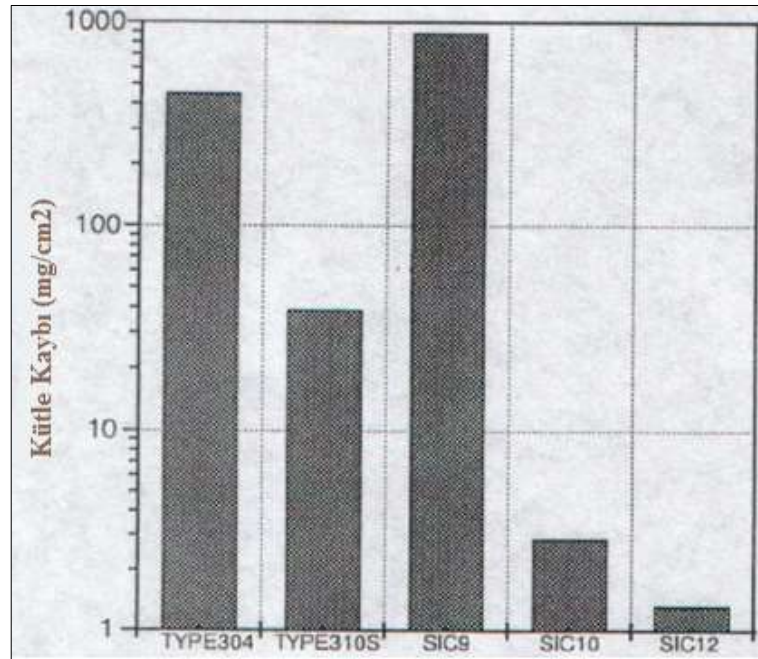
SIC serisinin oksidasyon dayanımı, vanadyum (V_2O_5) dayanımı ve yanma gazına karşı korozyon dayanımı sırasıyla Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. SIC serisi oksidasyon dayanımı



Şekil 5.4. Farklı paslanmaz çeliklerin vanadyuma (V_2O_5 + %15 Na_2SO_4) karşı korozyon kayıpları



Şekil 5.5. 50 saat 950 °C'de yanma gazına maruz kaldıktan sonra oksidasyon korozyonu kaybı

5.4. Reküperatör Tasarımı ve Analizi

Tasarım parametrelerinin göz önüne alınması ve tasarımda kullanılacak boru malzemelerinin tespit edilmesi ile reküperatör tasarımı yapılmış, 2D imalat ve montaj resimleri ile 3D katı modeli çizilmiştir.

5.5. Reküperatör İmalatı ve Montajı

Tasarımı, analizi ve tasarım doğrulaması yapılan reküperatör yetkin bir firmaya imal ettirilmiştir. Reküperatör imalatı yapıldıktan sonra sızdırmazlık testine tabi tutulmuştur. Reküperatörün sızdırmazlık test sonuçları Tablo 5.5’de verilmiştir.

Tablo 5.5. Reküperatör sızdırmazlık testi sonuçları

Sızdırma Usulü	Sızdırma Zamanı	Test Metodu	Test Sonucu
Sprey	5 dakika	Çözücü ile çıkarılabilen	Herhangi bir sızdırma gözlenmemiştir

İmalatı ve testleri yapılan reküperatör, fırın çıkışına monte edilmiş, reküperatör öncesi ve sonrası egzoz gazı ve yakma havası sıcaklıkları ölçülmüştür. Tav fırını normal çalışma koşullarında reküperatör giriş ve çıkışındaki sıcaklık değerleri Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6. Reküperatör öncesi ve sonrası yakma havası ve egzoz gazı sıcaklıkları

Reküperatör Öncesi Egzoz Gazı Sıcaklığı	Reküperatör Sonrası Egzoz Gazı Sıcaklığı	Reküperatör Öncesi Yakma Havası Sıcaklığı	Reküperatör Sonrası Yakma Havası Sıcaklığı
652 °C	383 °C	Ortam Sıcaklığı	533 °C

Yetkin bir firma tarafından imalatı yapılan reküperatör sanayi kuruluşuna getirilmiş ve firma personeli tarafından montajı yapılmıştır. Yeni reküperatörün montaj yeri ve montaj fotoğrafları sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.6. Reküperatörün montaj edileceği alan



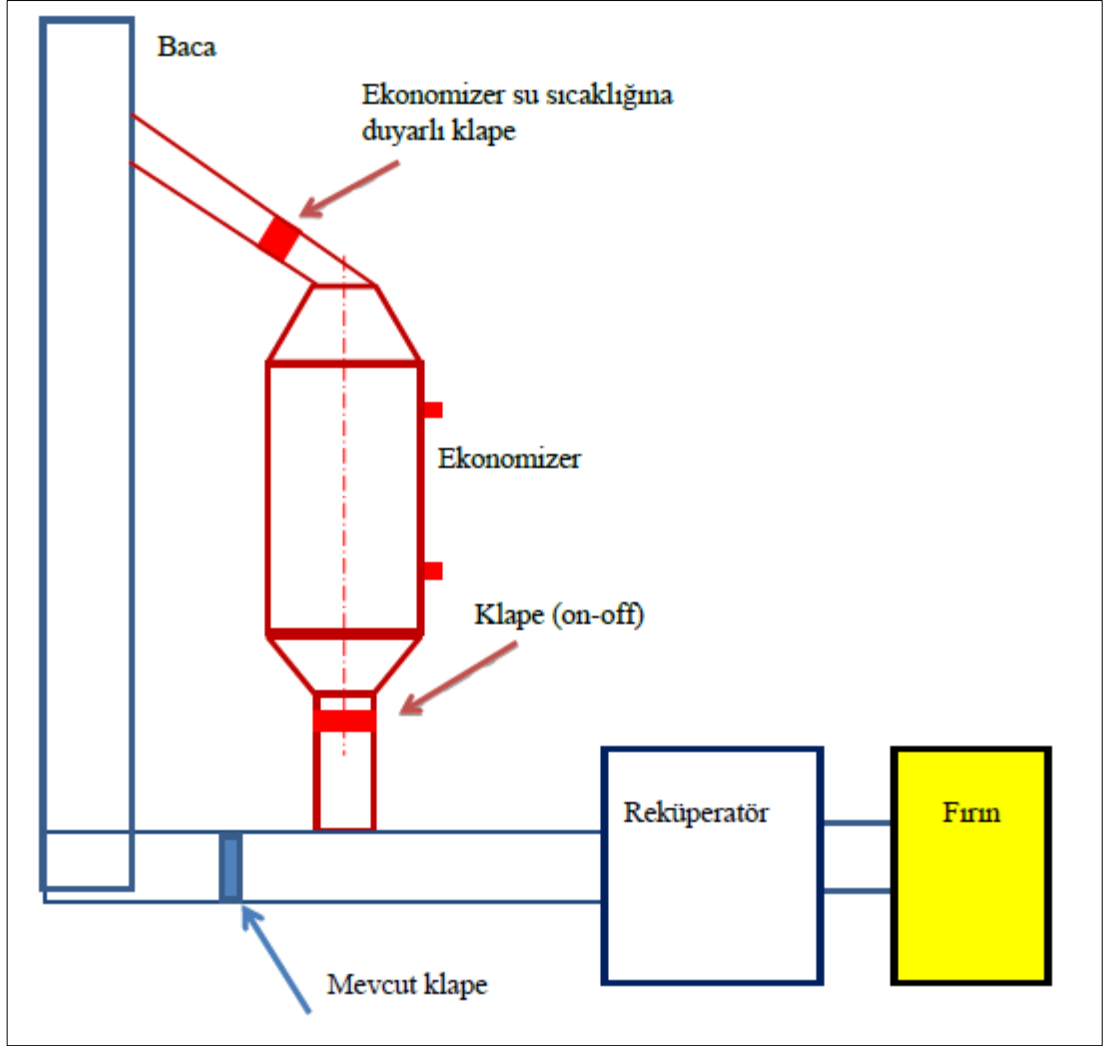
Şekil 5.7. Reküperatörün montaj öncesi durumu

5.6. Gaz-Su Ekonomizeri Tasarımı

Ekonomizerler ile baca gazından alınan atık ısı, ofis ve atölyelerin ısıtılmasında veya banyolardaki sıcak su ihtiyacının karşılanmasında kullanılabilir. Diğer yandan ofis ve atölyelerimizin ısıtılmasında ve banyolarda sıcak su ihtiyacının karşılanmasında kömür yakıtlı kazanlar kullanılmakta, yıllık 400 ton kömür bu kazanlarda yakılmaktadır. Bunun yanında tav fırınında reküperatör çıkışında 350-375°C sıcaklıktaki egzoz gazı atmosfere atılmakta, bu ise enerji sarfiyatına sebep olmaktadır. Bu noktada, atık ısının geri kazanılarak ihtiyaç duyulan sıcak suyun kömür yerine bu kaynaktan karşılanması, bu sayede hem maliyet hem de emisyon azaltımının sağlanması için reküperatör çıkışına monte edilmek üzere bir ekonomizer tasarlanıp, imalatının ve montajının yapılması öngörülmüştür. Egzoz gazı sıcaklığını 350-375 °C'den 150 °C'ye düşüren Gaz-Su ekonomizeri Şekil 5.8'de gösterilmiştir.

Ekonomizer tasarım parametreleri;

- Baca gazı debisi : 40.500 Nm³/h
- Baca gazı giriş sıcaklığı : 350 °C
- Baca gazı çıkış sıcaklığı : 150 °C
- Kazana su giriş sıcaklığı : 70 °C
- Kazandan su çıkış sıcaklığı : 90 °C



Şekil 5.8.Tav fırını ve ekonomizer sistemi şematik resmi

5.7. Hava-Yakıt Oranı Online Ölçüm Sistemi Tasarımı

Kok bataryaları ve Yüksek Fırımlar üretim proseslerine bağlı olarak Yüksek Fırın gazı ve Kok gazının debisi ve içeriği, dolayısıyla kalorifik değeri sık sık değişmektedir. Tav fırını mevcut kontrol sisteminde yakıtların içeriği/kalorifik değeri online okunmadığından hava-yakıt oranı 3,7:1 olarak sabit alınmaktadır. Yüksek fırın gazı ve kok gazı debisi ve içeriği değiştiğinde hava miktarının da tam yanmayı sağlayacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. Yakma havası miktarı gereğinden fazla olduğunda fırın sıcaklığı düşmekte ve hava fazlalığından dolayı tavlancak malzeme daha fazla tufal oluşup malzeme kaybı artmaktadır. Havanın optimum hava fazlalık katsayısının altında olması durumunda ise eksik yanma (CO oluşumu) meydana gelmekte, yanma fırın çıkışında da devam ettiğinden fırın refrakter

malzemesi zarar görmekte, reküperatör sıcaklığı çok yükseldiğinden reküperatör tüplerinde zamanla delinmeler meydana gelmekte ve yakıt tüketimi artmaktadır. Bu olumsuzlukların önlenmesi amacıyla bir gaz analizörünün sisteme entegre edilmesi öngörülmüştür. Böylece optimum hava-yakıt oranı sağlanarak malzemedeki tufal kaybının %1,8 oranından %1,5 oranına düşürülmesi planlanmıştır. Yüksek Fırın gazı ve Kok gazı içeriğinin tespiti için seçilen gaz analizörünün analiz edeceği elementler ve ölçüm aralıkları Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7. Gaz analizörü analiz elementleri ve ölçüm aralıkları

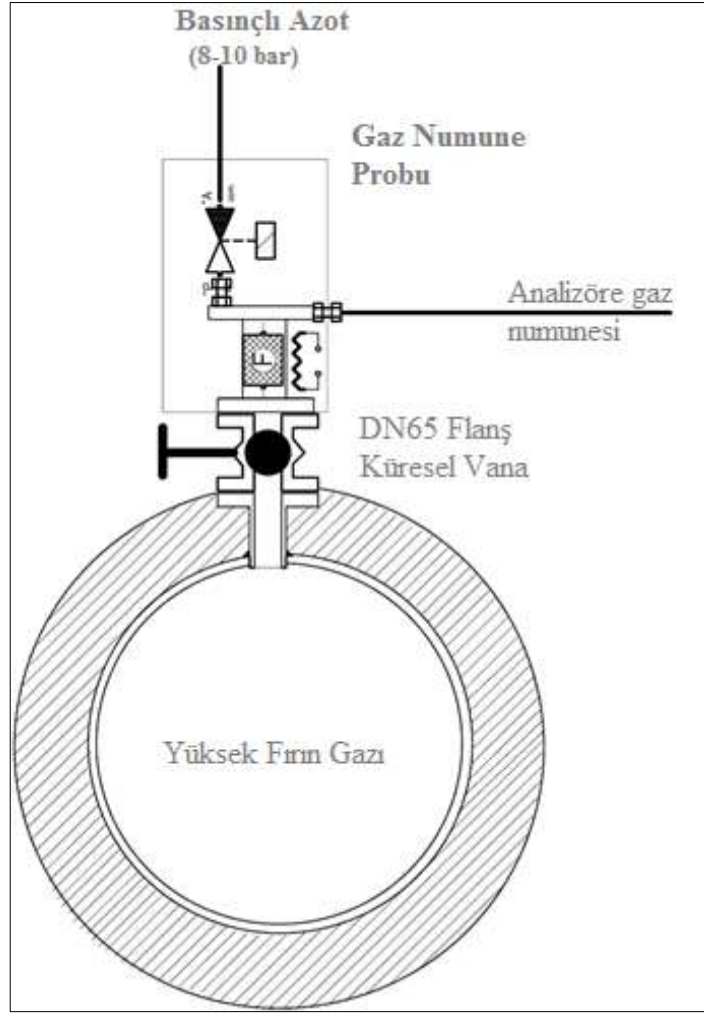
Element	Ölçüm Aralığı	Element	Ölçüm Aralığı
O ₂	%0-25	CH ₄	%0-100
CO	%0-50	H ₂	%0-100
CO ₂	%0-10 / %100		

Gaz analizörünün diğer özellikleri Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8. Gaz analizörünün özellikleri

Özellik	Değerler
Yinelenebilirlik	En küçük ölçüm aralığının %1’i
Tepki süresi	Analizör numune gaz girişi ile yaklaşık 30 s
Algılama sınırı	Ölçüm aralığının %1’i
Numune gaz koşullandırma	+5°C çiylenme noktasına sahip entegre gaz soğutucu
Numune gaz filtreleme	Filtrelenen partikül büyüklüğü < 2 µ
Ekran	Arkadan aydınlatmalı tam grafik LCD ekran
Veri transferi	8 kanal analog çıkış 4-20 mA, RS 485 dijital (modbus RTU)
Koruma sınıfı	IP 52 (dış montajlar için IP 65)

Gaz numune probunun yerleşimi Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Gaz numune probunun yerleşimi

5.8. Fırın İçi Yakıcıları Sürekli İzleme Sistemi Tasarımı

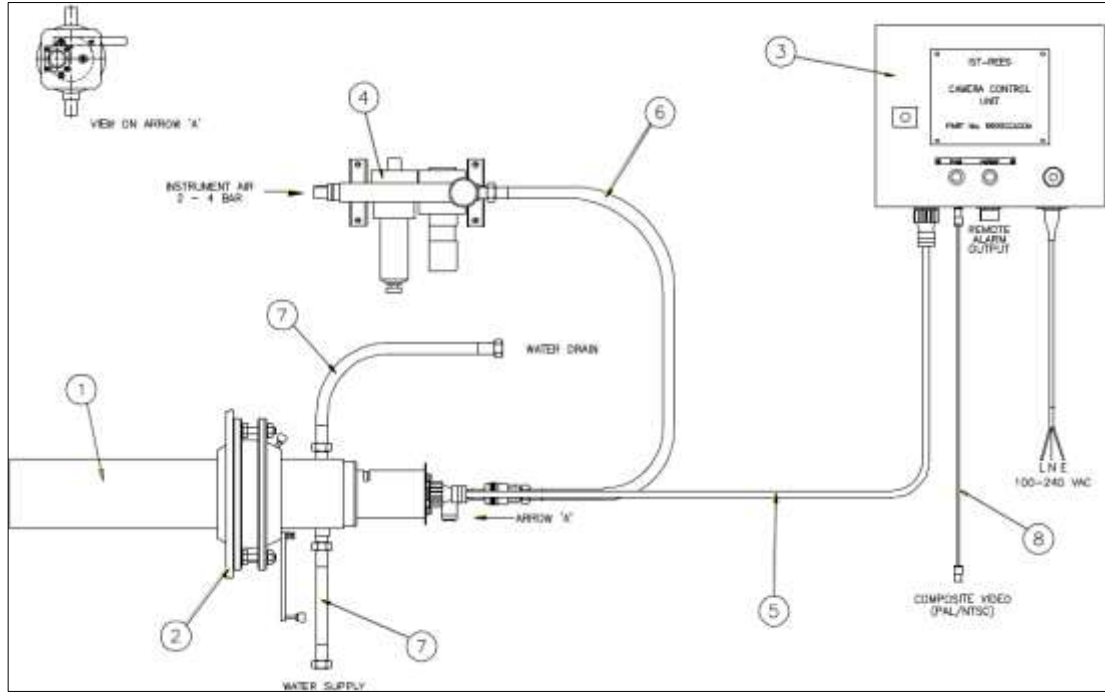
Tav fırınlarında blum/kütük boyunca homojen tavlama koşullarının oluşup oluşmadığı yakıcı alev boyları ve alev renginden anlaşılabilir. Fakat mevcut sistemde yakıcı alev boylarını ve alev rengini görme imkanı bulunmamaktaydı. Fırının her iki bölgesinde (tavlama zonları) bulunan toplam 44 adet yakıcıların her birinin aynı tavlama özelliklerini sağlamadığı malzemenin haddelenmesi sırasında zaman zaman gözlenmekteydi. Normal çalışma koşullarında yakıcı performansı düşebilmekte, düşük debi/şiddette yanan yakıcılara karşılık aynı bölgedeki diğer yakıcıların daha şiddetli yanma sağlaması homojen olmayan bir tavlamaya sebebiyet vermekteydi. Homojen olmayan tavlama haddelenme sırasında merdanelerin kısa sürede aşınmasına, mekanik sisteme aşırı darbe gelmesine ve daha dar toleranslarda üretim

gerektiren ray ve ince kesitli profillerde malzeme boyunca istenilen tolerans aralığında üretilmemesine (profillerde tolerans $\pm 0,8-4$ mm iken raylarda bazı ölçülerde tolerans $\pm 0,5$ mm'ye kadar inmektedir) neden olmaktadır. Bu durum ise üretim, enerji, kalite ve verim kaybına sebebiyet vermektedir. Edinilen tecrübeler neticesinde, tav fırınında homojen bir tavlama yapıldığında merdanelerinin ömrünün yaklaşık %5 artırılabilceği görülmüştür. Ray ve profil üretiminde hammadde ve enerjiden sonra en büyük gider olan merdane alım giderlerinin homojen bir tavlama ile %5 azaltılabileceğini öngörmüştür. Tav fırınında tüm yakıcıları görece şekilde 4 adet, yüksek sıcaklığa dayanıklı kamera yerleştirilerek yakıcılardaki alev boyu ve alev rengi sürekli izlenmeye başlanmıştır.

Tav fırınına yerleştirilen kamera sistemi aşağıdaki ekipmanlardan oluşmaktadır;

- 2 adet 90° FOV lensli yüksek sıcaklık kamerası
- 2 adet kamera kontrol ünitesi
- 2 adet tekli hava filtresi/regülatörü
- 2 adet 5 m soğutma hortumu (azot)
- 4 adet 5 m soğutma hortumu (su)
- 2 adet BNC-BNC video başlığı (1,2 m)
- 2 adet video kablosu (100 m)
- 2 adet 20" LCD monitör

Fırın içi sıcaklığı 1250 °C civarında olduğu için kameraları korumak amacıyla kameraların etrafında su ile soğutma yapılmaktadır. Kamera sisteminde, alarm çıkışına sahip aşırı sıcaklık görüntülemesi bulunmaktadır. Kamera veya prob ayarlanan normal çalışma ve aşırı sıcaklık sınırlarının dışına çıktığında operatör soğutucu debilerini hassas olarak ayarlayabilecektir (böylece soğutucu kullanımı ekonomik hale getirilmiş olacaktır). Aşırı sıcaklık için alarm hem görsel hem de sesli uyarı vermektedir. Sistem herhangi bir alarm durumunda operatörün kameranın zarar görmesini engelleyecek önlemleri alabilmesi için gerekli tüm bilgileri sağlamaktadır. Kamera, lensin temiz tutulması için azot temizlemelidir. Kamerada ana soğutucu olarak ise su kullanılmaktadır. Kamera sisteminin şematik gösterimi Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Kamera sistemi şematik gösterimi

Kamera sisteminin diğer özellikleri Tablo 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.9. Kamera sisteminin özellikleri

Özellik	Değer
Video çıkışı	Kompozit 1 volt P.P. 75 ohm
İris	Elektronik CCD iris
Sinyal sistemi	PAL veya NTSC
Görüş açısı	Köşegen : 90° Yatay : 77° Dikey : 62°
Sıcaklık sensörü	K tipi mineral yalıtımlı ısı çift
Soğutma sistemi tipi	Su soğutmalı hava temizlemeli
Soğutma suyu kalitesi	Temiz / tortusuz
Soğutma suyu basıncı	4 bar
Soğutma suyu debisi	15 l/dak
Basınçlı hava	20 °C’de 2-4 bar
Filtreleme sistemi	Kesme kapama valfi ile birleşik 40 µm filtre, basınç düşürücü regülatör ve manuel boşaltma

Fırın içerisinde her bir bölgede bulunan yakıcıların kameralarla izlenebilmesi için kameraların yerleştirileceği uygun bölgeler açılmış ve Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de bu bölgeler gösterilmiştir. Açılan bölgelere geçici olarak birer plaka montaj edilmiştir.



Şekil 5.11. Bir nolu kamera montaj bölgesi



Şekil 5.12. İki nolu kamera montaj bölgesi

6. ENERJİ VERİMLİLİĞİ PROJELERİ ÖNCESİ VE SONRASI DURUMLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

6.1. Reküperatör Uygulaması

Proje kapsamında tasarlanan ve testleri tamamlanarak devreye alınan reküperatör ile reküperatördeki hava sızıntısının önlenmesi ve fırına giren yakma havası sıcaklığının yükseltilmesi hedeflenmiştir.

Tablo 6.1. Ray Profil Haddehanesi tav fırınında sızıntı havanın önlenmesi ile yapılan tasarruf miktarı

Sızıntı Havanın Önlenmesi ile Yapılacak Tasarruf Miktarı	
Sızıntı hava debisi (Nm ³ /h)	6.126
Baca gazı sıcaklığı (°C)	350
Ortam sıcaklığı (°C)	20
Cp (kCal/Nm ³ K)	0,342
Enerji tasarrufu (Kcal/h)	691.380
Fırın yıllık çalışma süresi (h)	8.500
Yıllık enerji tasarrufu (kcal)	5.876.733.060
Tasarrufun mali değeri (TL/yıl)	542.745
Yatırım maliyeti (TL)	699.999,50
Amortisman süresi (yıl)	1,29

Proje öncesinde reküperatörün soğuk yakma havasının reküperatör borularıyla ilk karşılaştığı giriş bölgesinde kükürt korozyonu sebebiyle reküperatör borularında delinmeler ve bunun sonucunda da yüksek basınçlı ortamdan düşük basınçlı ortama doğru hava sızıntısı meydana gelmiştir. Bu kayıp yüksek sıcaklık ve korozyon direncine sahip yeni reküperatör tasarımı ve devreye alınması ile giderilmiştir. Proje sonucunda sızıntı havanın önlenmesi ile elde edilen tasarruf miktarı Tablo 6.1'de verilmiştir.

6.2. Gaz-Su Ekonomizeri Uygulaması

Atık egzoz gazı ısısından yararlanarak sıcak su elde edilmesi için tasarlanan ve montajı yapılan ekonomizerin testleri yapılarak devreye alınmıştır. Yapılan testlerde ekonomizer baca gazı sıcaklığı 350 °C'den 150 °C seviyesine düşürülerek yaklaşık 90 °C sıcaklığında çevrim suyu elde edilmiştir. Bu sıcak su ile tesiste Ray Profil Haddehanesinde kullanılan banyolar ve binalarda ısınma ihtiyacı giderilmiştir. Ayrıca elde edilen sıcak su ile yapımı devam eden yeni hizmet binalarının da ısıtılması planlanmaktadır. Ekonomizerden elde edilen tasarruf miktarı Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Ray Profil Haddehanesi tav fırınında ekonomizer tesisi ile sağlanan tasarruf miktarı

Ekonomizer Tesisi ile Sağlanan Tasarruf Miktarı	
Proje sonrası egzoz gazı debisi (Nm ³ /h)	30.191
Ekonomizer giriş sıcaklığı (°C)	350
Ekonomizer çıkış sıcaklığı (°C)	150
Cp (kCal/Nm ³ K)	0,342
Enerji tasarrufu (kcal/h)	2.065.064
Fırın yıllık çalışma süresi (h)	4.000
Yıllık enerji tasarrufu (kcal)	8.260.256.000
Tasarrufun mali değeri (TL/yıl)	762.876
Yatırım maliyeti (TL)	300.000
Amortisman süresi (yıl)	0,39

Testleri tamamlanan ve devreye alınan ekonomizerin resmi Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Testleri tamamlanan ve devreye alınan ekonomizerin görünüşü

6.3. Hava-Yakıt Oranı Online Ölçüm Sistemi Uygulaması

Fırına giren fazla hava miktarının azaltılması ve optimum yanmanın sağlanabilmesi için Yüksek Fırın ve kok gazının içeriğini online analiz edecek ve buna göre hava-yakıt oranını ayarlayacak gaz analizörü devreye alınmıştır. Analiz bileşenlerinin yanma hesabı yapılarak bileşen oranına göre hava-yakıt oranı hesabına gidilmiştir. Yapılan bu hesap gaz analizörünün yazılımında kullanılmış ve mevcut kontrol sistemine entegre edilerek hava-yakıt oranının anlık olarak değişmesi sağlanmıştır. Devreye alınan gaz analizörünün testleri yapılmıştır. Gaz analizörünün devreye alınması ile fazla havadan yapılan tasarruf miktarı Tablo 6.3’de verilmiştir.

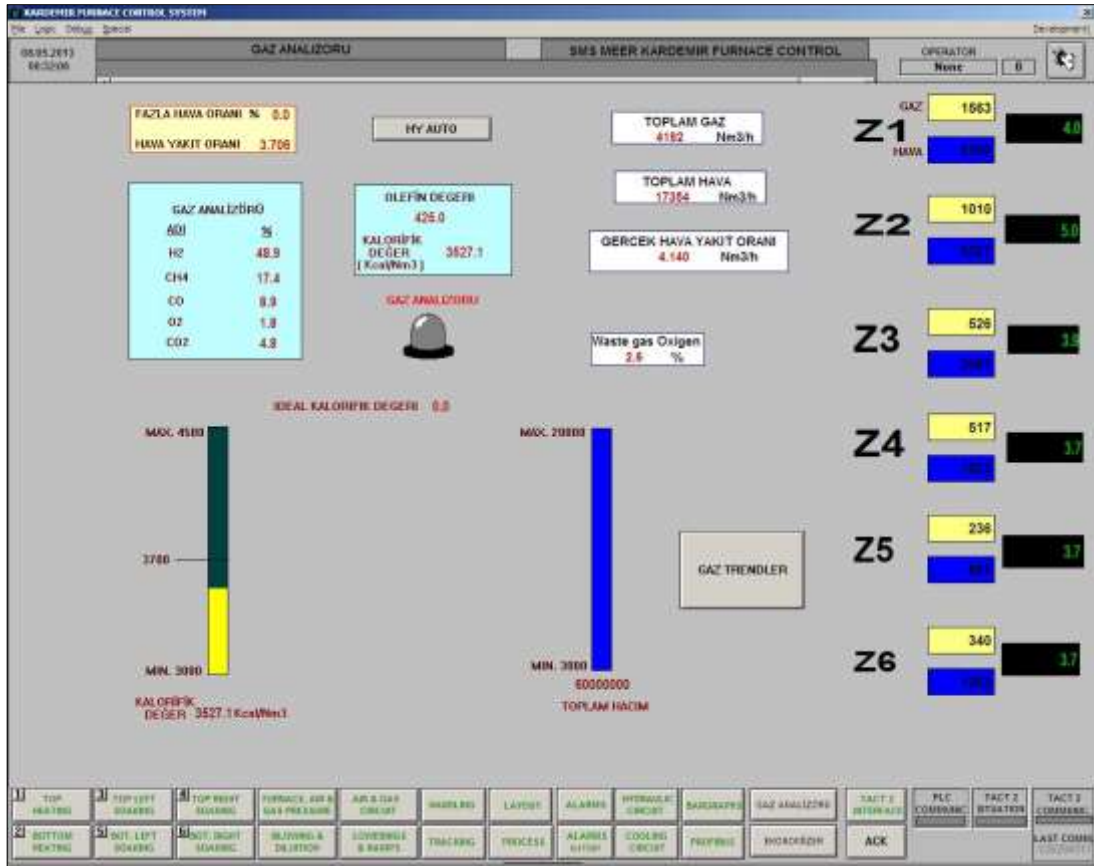
Tablo 6.3. Ray Profil Haddehanesi tav fırınında fazla havanın azaltılması ile sağlanan tasarruf miktarı

Fazla Havanın Azaltılması		
	Proje Öncesi	Proje Sonrası
Fazla hava debisi (Nm ³ /h)	9.987	7.305
Fazla hava oranı (%)	51,95	38
Tasarruf Miktarı		
Havadaki azalma (Nm ³ /h)	2.682	
C _p (kcal/Nm ³ K)	0,342	
Hava giriş sıcaklığı (°C)	20	
Baca gazı sıcaklığı (°C)	350	
Enerji tasarrufu (kcal/h)	302.690	
Fırın yıllık çalışma süresi (h)	8.500	
Yıllık enerji tasarrufu (kcal)	2.572.869.420	
Tasarrufun mali değeri (TL/yıl)	237.617	

Devreye alınan gaz analizörünün ve kontrol sistemindeki ekran görüntülerinin fotoğrafları Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Gaz analizörü resmi



Şekil 6.3. Kontrol sisteminde gaz analizörü ekranı

6.4. Fırın İçi Yakıcıları Sürekli İzleme Sistemi Uygulaması

Ray Profil Haddehanesi tav fırınında yanma rejiminin ve yakıcı performans düşüşlerinin belirlenebilmesi, tavlanan malzemelerin her birinin aynı tavlama özelliklerini sağlayıp sağlamadığının bilinmesi ve yakıcı alev boyları ve alev renklerinin sürekli gözlemlenmesi için fırına 4 adet yüksek sıcaklığa dayanıklı kamera yerleştirilmiştir.

Bu bağlamda sisteme entegre edilen termal izleme sistemi ile fırın yakıcıları farklı noktalardan izlenmekte, kontrollü yanma sağlanırken, alev boylarının kontrol altında tutulması homojen tavlama sağlanması açısından fayda sağlamaktadır.

Ayrıca, homojen tavlamanın sağlanması amacıyla malzeme sıcaklığını ölçecek 4 adet pirometre temin edilmiş ve pirometrelerin altından geçen kütük sıcaklığı online olarak ölçülebilmektedir.

Hava miktarının optimum yanmayı sağlayacak şekilde ayarlanması ile yakma havası miktarı gereğinden fazla olduğunda fırın sıcaklığının düşmesi engellenmiş ve dolayısıyla da tavlanan malzemedeki tufal oluşumu minimize edilmiştir. Proje öncesinde tav fırını ortalama tufal kaybı %1,8 iken yapılan çalışma ile bu değer ortalama %1,5'e çekilmesi hedeflenmişti.

Proje sonrası yapılan çalışmalarda gaz analizörü ile hava-yakıt oranının anlık belirlenerek fazla hava nedeniyle tufal oluşumuna engel olunması ve yüksek sıcaklığa dayanıklı kameralar ile yakıcı alev boyları ve alev rengi izlenerek homojen tavlama sağlanmış ve tufal kaybı azalmıştır. Proje uygulama sonrasında tufal kaybı hedeflenen miktarın altında gerçekleşmiştir. Tavlanan yarı mamuldeki tufal kaybı %0,746 oranındadır.

İyileştirme sonucunda tufal kaybı oranı, tavlanan kütük ağırlıkları ve bu kütüklerin tavlama sonucu oluşan tufal miktarları ölçülerek şu şekilde hesaplanmıştır;

1. Kütük: Kütük ağırlığı 4616 kg, oluşan tufal miktarı 23 kg
2. Kütük: Kütük ağırlığı 4633 kg, oluşan tufal miktarı 46 kg

Ortalama tufal miktarı = $(23 + 46) / 2 = 34,5$ kg

Tufal kaybı oranı = $(34,5 \times 100) / 4624,5 = \%0,746$

Ray ve profiller 12 m, 24 m, 36 m ve 72 m gibi standart boylarda satıldığından yanma kontrolünün iyi yapılamamasından ve fazla tufal kaybindan dolayı haddeleme sonucu elde edilen taslak malzeme boyu 72 metrenin altında geldiğinde % 15 ile % 100 arasında malzeme, boy kaybindan dolayı hurda ve/veya 2. sınıf malzeme olmaktadır.

Ray Profil Haddehanesi tav fırınında tufal kaybının azaltılmasıyla elde edilen tasarruf miktarı şu şekilde hesaplanmıştır;

Haddehane çıkışı ürün ortalama birim fiyatı = 1.250 TL/ton

Yüksek Fırına cevher giriş maliyeti = 580 TL/ton (hurda maliyeti)

Ray Profil Haddehanesi üretim hedefi = 280.000 ton/yıl

Tasarruf miktarı = (haddehane çıkışı ürün ortalama birim fiyatı – Yüksek Fırına cevher giriş maliyeti) \times (0,0075 \times yıllık üretim hedefi)
= $(1.250 - 580) \times (0,0075 \times 280.000)$
= 1.407.000 TL/yıl

Sisteme entegre edilen yüksek sıcaklığa dayalı kameraların fotoğrafları Şekil 6.4'de, elde edilen monitör görüntüleri ise Şekil 6.5'de verilmiştir.

Fırın içi yakıcıları sürekli izleme sistemi ve hava-yakıt oranının ayarlanmasıyla ile gerçekleşen enerji ve mali tasarruf;

Tav fırında fazla havanın azaltılmasıyla sağlanan enerji tasarrufunun mali değeri 237.616,20 TL/yıl,

- Tufal kaybının azaltılmasıyla sağlanan mali tasarruf 1.406.999,80 TL/yıl,
- Yapılan yatırım miktarı 499.998,60 TL ve yatırımın basit geri ödeme süresi 0,3 yıl'dır.



Şekil 6.4. Sisteme entegre edilen yüksek sıcaklığa dayanıklı kamera



Şekil 6.5. Yüksek sıcaklığa dayanıklı kamera monitör görüntüleri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bir sanayi kuruluşuna ait 400.000 ton/yıl kapasiteli haddehane tav fırınında enerji verimliliğinin artırılması ve tavlanan yarı mamuldeki tufal kaybının azaltılması üzerine yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda sunulmuştur.

1. Tav fırınında bulunan eski reküperatör ile ortalama 350 °C sıcaklıkta yakma havası elde edilmektedir. Eski reküperatörde, düşük korozyon dayanımı nedeniyle borularda oluşan delinmeler sonucu sızıntı ve kaçaklar tespit edilmiştir. Reküperatörde sızıntı olmaksızın normal şartlarda daha yüksek sıcaklıklarda yakma havası elde etmek mümkündür.
2. Tav fırını çıkışı ve reküperatör girişinde egzoz gazlarının sıcaklıkları yüksek, baca gazlarının reküperatörü terk ettiği noktalarda baca gazı sıcaklıkları kısmen daha düşüktür. Özellikle soğuk havalarda yakma havasının reküperatöre ilk girdiği noktalarda yakıt içindeki kükürt nedeniyle borularda delinmeler meydana gelmektedir. Bu nedenle yakma havasının reküperatöre ilk girdiği noktada boru malzemesi olarak S-ten kullanılmıştır. Baca gazının reküperatöre ilk girdiği noktada ise sıcaklığa daha fazla dayanıklı boru malzemesi kullanılmıştır.
3. Yeni imal ettirilen reküperatör ile yakma havası sıcaklığı ~350 °C'den 533 °C'ye yükseltilecek şekilde 691.380 kcal/h enerji tasarrufu yapılmıştır. Yapılan enerji tasarrufunun mali değeri 542.745 TL/yıl, yatırım maliyeti 699.999,50 TL ve yatırımın basit geri ödeme süresi 1,29 yıl'dır. Ayrıca, reküperatör borularında korozyon kaynaklı sızıntı olmayacağı için fırına yakma havası gönderen fanın debisi azalacağı için fanda elektrik enerji tasarrufu da meydana gelmektedir.

4. Fabrikada enerji verimliliği çalışması başlatılmadan, fabrikanın sıcak su ve mekân ısıtılması için kömür yakıtlı kazan kullanılmaktaydı. Reküperatör sonrası atmosfere atılan baca gazının ısını kullanılarak bir ekonomizer tasarlanarak imal ettirilmiştir. Atık ısıdan yararlanarak sıcak su elde edilmesi için tasarlanan ve montajı yapılan ekonomizerin testleri yapılarak devreye alınmıştır. Yapılan testlerde ekonomizer baca gazı sıcaklığı 350 °C'den 150 °C seviyesine düşürülerek yaklaşık 90 °C sıcaklığında çevrim suyu elde edilmiştir. Bu sıcak su ile Haddehanede kullanılan banyolar ve binalarda ısınma ihtiyacı giderilmiştir.
5. Ekonomizer ile baca gazı sıcaklığı 350 °C'den 150 °C'ye düşürülerek 2.065.064 kcal/h enerji tasarrufu gerçekleştirilmiştir. Ekonomizer ile yapılan tasarrufun mali değeri 762.876 TL/yıl, yatırım maliyeti 300.000 TL ve yatırımın basit geri ödeme süresi 0,39 yıldır.
6. Fırına giren fazla hava miktarının azaltılması ve optimum yanmanın sağlanabilmesi için Yüksek Fırın ve Kok gazının içeriğini online analiz edecek ve buna göre hava-yakıt oranını ayarlayacak gaz analizörü devreye alınmıştır. Analiz bileşenlerinin yanma hesabı yapılarak bileşen oranına göre hava-yakıt oranı hesabına gidilmiştir. Yapılan bu hesap gaz analizörünün yazılımında kullanılmış ve mevcut kontrol sistemine entegre edilerek hava-yakıt oranının anlık olarak değişmesi sağlanmıştır.
7. Proje uygulama öncesi %52'ye kadar yükselen fazla hava oranı, proje uygulama sonrası fazla hava oranı %35'lerde sabit tutulmuştur. Tav fırınında fazla havanın azaltılmasıyla 302.690 kcal/h enerji tasarrufu sağlanmıştır. Tav fırınında fazla havanın azaltılmasıyla aynı zamanda tufal kaybı da %1,8'den %0,75'e düşürülmüştür. Tav fırında fazla havanın azaltılmasıyla sağlanan enerji tasarrufunun mali değeri 237.616,2 TL/yıl, tufal kaybının azaltılmasıyla sağlanan mali tasarruf 1.406.999,8 TL/yıl, yapılan yatırım miktarı 499.998,60 TL ve yatırımın basit geri ödeme süresi 0,3 yıl'dır.
8. Tav fırınlarında blum/kütük boyunca homojen tavlama koşullarının oluşup oluşmadığı yakıcı alev boyları ve alev renginden anlaşılabilir. Fakat mevcut

sistemde yakıcı alev boylarını ve alev rengini görme imkanı bulunmamaktaydı. Fırının her iki bölgesinde (tavlama zonları) bulunan toplam 44 adet yakıcıların her birinin aynı tavlama özelliklerini sağlamadığı malzemenin haddelenmesi sırasında zaman zaman gözlenmekteydi. Bu durum ise üretim, enerji, kalite ve verim kaybına sebebiyet vermekteydi. Edinilen tecrübeler neticesinde, tav fırınında homojen bir tavlama yapıldığında merdanelerinin ömrünün yaklaşık %5 artırılabilceği görülmüştür. Tav fırınında tüm yakıcıları görecektek şekilde 4 adet, yüksek sıcaklığa dayanıklı kamera yerleştirilerek yakıcılardaki alev boyu ve alev rengi sürekli izlenmeye başlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Hepbaşlı A., *Enerji Verimliliği ve Yönetim Sistemi Yaklaşımlar ve Uygulamalar, Schneider Electric Enerji Verimliliği Serisi-1*, Birinci Baskı, Esen Ofset Matbaacılık, İstanbul, 26-27, 2010.
- [2] Global Energy Statistical Yearbook 2014, Enerdata, <https://yearbook.enerdata.net/>, (Ziyaret tarihi: 07 Mayıs 2015).
- [3] Hepbaşlı A., *Enerji Verimliliği ve Yönetim Sistemi Yaklaşımlar ve Uygulamalar, Schneider Electric Enerji Verimliliği Serisi-1*, Birinci Baskı, Esen Ofset Matbaacılık, İstanbul, 44-45, 2010.
- [4] IPCC Fifth Assessment Synthesis Report, Climate Change 2014 Synthesis Report, <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (Ziyaret tarihi: 04 Ocak 2014).
- [5] Jollands N., Gasc E., Pasquier S. B., Innovations in Multi-Level Governance for Energy Efficiency, *International Energy Agency*, December, 9-10, 2009.
- [6] Terzi U. K., Baykal R., Efficient and Effective Use of Energy: a Case Study of TOFAS, *Environmental Research, Engineering and Management*, 2011, **1**(55), 29-33.
- [7] Xu C., Cang D., A Brief Overview of Low CO₂ Emission Technologies for Iron and Steel Making, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2010, **17**(3), 1-7.
- [8] Kilinc E., Kaya D., CankaKilic F., Eyidogan M., Ozkaymak M., Taylan O., Pedrycz W., An Energy Efficiency Analysis of an Industrial Reheating Furnace and an Implementation of Efficiency Enhancements Methods, *Energy Exploration & Exploitation*, 2014, **32**(6), 989-1003.
- [9] Eyidoğan M., Kaya D., Dursun Ş., Taylan O., Endüstriyel Tav Fırınlarında Enerji Tasarrufu ve Emisyon Azaltım Fırsatları, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2014, **29**(4) 735-743.
- [10] Ertem M. E., Sen S., Akar G., Pamukçu C., Gorgen S., Energy Balance Analysis and Energy Saving Opportunities for Erdemir Slab Furnace #3, *Energy Sources, Part A*, 2010, **32**(11), 979-994.

- [11] Ertem G., Çelik B., Yeşilyurt S., Endüstriyel Tav Fırınlarında Isı Denkliği Hesaplamaları ve Enerji Verimliliğinin Belirlenmesi, *IV. Ege Enerji Sempozyumu*, İzmir, 21-23 Mayıs 2008.
- [12] Si M., Thompson S., Calder K., Energy Efficiency Assessment by Process Heating Assessment and Survey Tool (PHAST) and Feasibility Analysis of Waste Heat Recovery in the Reheat Furnace at a Steel Company, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**(6), 2904-2908.
- [13] Chen W. H., Chung Y. C., Liu J. L., Analysis on Energy Consumption and Performance of Reheating Furnaces in a Hot Strip Mill, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2005, **32**(5), 695-706.
- [14] Manatura K., Tangtrakul M., A Study of Specific Energy Consumption in Reheating Furnace Using Regenerative Burners Combined with Recuperator, *Silpakorn University Science and Technology Journal*, 2010, **4**(2), 7-13.
- [15] Çengel Y. A., Boles M. A., *Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla*, 5. Baskı, Güven Bilimsel, İzmir, 753-757, 764, 2011.
- [16] McAllister S., Chen J., Fernandez-Pello A. C., *Fundamentals of Combustion Processes*, 1st Edition, Springer, USA, 18-20, 2011.
- [17] Okamoto J., Usami A., Mimura H., *Sulfuric Acid Dew Resistant Steel S-TEN 1 Tube*, *Nippon Steel Technical Report*, 78, 2003.
- [18] SIC Oxidation Resistant Stainless Steel Seamless Tube, Sanyo Special Steel Co. Ltd., <http://www.shyeku.com.tw/SIC.pdf>, (Ziyaret tarihi: 06 Ağustos 2015).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Sapmaz S., Kilic F. C., **Eyidoğan M.**, Taylan O., Coban V., Cagman S., Kilicaslan I., Kaya, D. Selection of Compressors for Petrochemical Industry in Terms of Reliability, Energy Consumption and Maintenance Costs Examining Different Scenarios, *Energy Exploration & Exploitation-Multi-Science Publishing*, 2015, **33**(1), 43-62.
- [2] Kilic E., Kaya D., CankaKilic F., **Eyidoğan M.**, Ozkaymak M., Taylan O., Pedrycz W., An Energy Efficiency Analysis of an Industrial Reheating Furnace and an Implementation of Efficiency Enhancements Methods, *Energy Exploration & Exploitation-Multi-Science Publishing*, 2014, **32**(6), 989-1003.
- [3] **Eyidoğan M.**, Kaya D., Dursun Ş., Taylan O., Energy Saving and Emission Reduction Opportunities in an Industrial Annealing Furnaces, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2014, **29**(4), 735-743.
- [4] Kaya D., **Eyidoğan M.**, CankaKilic F., Çay Y., Çağman S., Çoban V., Energy saving and emission reduction opportunities in mixed-fueled industrial boilers, *Environ. Prog. Sustainable Energy*, 2014, Doi: 10.1002/ep.11925.
- [5] Kaya D., **Eyidoğan M.**, Ozkaymak M., Turhan F., Kilinc E., Kayabasi E., Sahin Z., Sonverdi E., Selimli S., Energy exergy efficiencies and environmental effects of mixed fuelled (solid+gas) industrial facility steam boiler, *Journal of the Energy Institute*, 2013, **86**(4) 194-201.
- [6] Canakci M., Ozsezen A.N., Alptekin E., **Eyidoğan M.**, Impact of alcohol-gasoline fuel blends on the exhaust emission of an SI engine, *Renewable Energy*, 2013, **52**, 111-117.
- [7] **Eyidoğan M.**, Çanakçı M., Özsezen A.N., Alptekin E., Türkcan A., Kılıçaslan İ., Investigation of the Effects of Ethanol-Gasoline and Methanol-Gasoline Blends on the Combustion Parameters and Exhaust Emissions of a Spark Ignition Engine, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2011, **26** (3), 499-507.
- [8] **Eyidoğan M.**, Ozsezen A.N., Canakci M., Turkcan A., Impact of Alcohol-Gasoline Fuel Blends on the Performance and Combustion Characteristics of an SI Engine, *Fuel*, 2010, **89**, 2713-2720.
- [9] Kaya D., **Eyidoğan M.**, Energy Conservation Opportunities in an Industrial Boiler System, *J. Energy Engineering*, 2010, **136**(1), 18-25.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Sivas'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Sivas'ta tamamladı. 2002 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesinden 2006 yılında mezun oldu. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisansa başladı. 2007-2010 yılları arasında “Bitkisel ve Hayvansal Atıklardan Biyogaz Üretimi ve Entegre Enerji Üretim Sisteminde Kullanımı (Biyogaz)” adlı TÜBİTAK TARAL (KAMAG) projesinde araştırmacı olarak görev yapmıştır. 2010-2014 yıllarında Karabük Üniversitesi Enerji ve Çevre Biriminde Öğretim Görevlisi olarak çalışmıştır.