

**DOĞAL GAZLI SÜREKLİ ISIL İŞLEM FIRINLARINDA BRÜLÖR  
TASARIMI, İMALATI VE BACA GAZI ANALİZLERİYLE DOĞAL GAZ  
TÜKETİMİNİN OPTİMİZASYONU**

**Serdar İSKENDER**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2012  
ANKARA**

Serdar İSKENDER tarafından hazırlanan DOĞAL GAZLI SÜREKLİ ISIL İŞLEM FIRINLARINDA BRÜLÖR TASARIMI, İMALATI VE BACA GAZI ANALİZLERİYLE DOĞAL GAZ TÜKETİMİNİN OPTİMİZASYONU adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN .....  
Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Veli ÇELİK .....  
Makine Müh. ABD, Kırıkkale Ü.

Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN .....  
Enerji Sistemleri Müh. ABD, Gazi Ü.

Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ .....  
Enerji Sistemleri Müh. ABD, Gazi Ü.

Doç. Dr. Atilla BIYIKOĞLU .....  
Makine Müh. ABD, Gazi Ü.

Doç. Dr. Adem ACIR .....  
Enerji Sistemleri Müh. ABD, Gazi Ü.

Tarih : 28/06/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU .....  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Serdar İSKENDER

**DOĞAL GAZLI SÜREKLİ ISIL İŞLEM FIRINLARINDA BRÜLÖR  
TASARIMI, İMALATI VE BACA GAZI ANALİZLERİYLE DOĞAL GAZ  
TÜKETİMİNİN OPTİMİZASYONU**

**(Doktora Tezi)**

**Serdar İSKENDER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Haziran 2012**

**ÖZET**

Doğal gazlı sürekli yüklemeli, tel bant konveyörlü, azot-metanol atmosfer kontrollü, ısıtma fırınlarında kullanılmak üzere brülör tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Tasarımı yapılan brülörde ki doğal gaz yanması, teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Değişken girdi olarak alınan brülör girişi doğal gaz ve hava basıncı değerlerine göre, hava fazlalık katsayısı, yanma (baca) gazı sıcaklığı, baca gazı emisyonları (oksijen, karbondioksit, karbonmonoksit, azotoksit, azotdioksit) ve doğal gaz tüketimi ölçülmüştür. Brülör girişi doğal gaz ve hava basıncı değerlerine göre hava fazlalık katsayıları tespit edilmiştir. Farklı hava fazlalık katsayıları için teorik olarak hesaplanan karbondioksit, oksijen ve azot emisyonları deneysel olarak ölçülmüştür. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde belirtilen emisyon değerleri dikkate alınarak, yanma deneyleri sonunda elde edilen hava fazlalık katsayıları, karbondioksit, karbonmonoksit, azotoksit, azot ve oksijen miktarları incelendiğinde, en uygun emisyon değerlerinin hava fazlalık katsayısının 1,10 olduğunda ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Hava fazlalık katsayısı tolerans değeri 1,10 +0,05 olarak alınmıştır. Hava fazlalık katsayısı 1,10 olduğunda kuru baca gazındaki hacimsel oksijen % 2,20–3,05, karbondioksit miktarı % 10,52–10,75, karbonmonoksit miktarı 0–10 ppm, azotoksitler ise 125–150 ppm aralığında ölçülmüştür. Yeni brülör tasarımıyla, doğal gazın yakılması sonucu ortaya

**ıkan baca gazı içerisindeki karbonmonoksit ve azotoksit emisyon değerleri yasal gerekliliklerin oldukça altında ölçülmüştür. Yeni brülör tasarımı için hava-yakıt oranı, çiğlenme noktası sıcaklığı, adyabatik alev sıcaklığı değerleri hesaplanmıştır. Yeni brülör tasarımı ve brülörlerde yanma için belirlenen hava fazlalık katsayısı 1,10 değeri için doğal gaz tüketim değerlerinde % 13,68 oranında bir iyileşme görülmüştür.**

**Bilim Kodu : 708.3.015**  
**Anahtar Kelimeler : Isıl işlem, brülör tasarımı, baca gazı analizleri, doğal gaz yanması**  
**Sayfa Adedi : 131**  
**Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Hacı Mehmet şAHİN**

**BURNER DESIGNING AND MANUFACTURING IN NATURAL GAS,  
CONTINUOUS HEAT TREATMENT FURNACES AND OPTIMIZATION  
OF NATURAL GAS CONSUMPTION BY FLUE GAS ANALYSIS**

**(Ph. D. Thesis)**

**Serdar İSKENDER**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**June 2012**

**ABSTRACT**

Burner design and manufacturing were completed, for being used at natural gas, continuous feeding, mesh-belt, nitrogen-methanol atmosphere controlled heat treatment furnaces. The natural gas combustion at the two designed burners have been examined as theoretically and experimentally. Excess air value, flue gas temperature, flue gas emission (oxygen, carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen monoxide and dioxide) and natural gas consumptions were examined according to air pressure and natural gas values in the entry of the burner which taken as variable input. Excess air value was determined according to air pressure and natural gas values in the entry of the burner. Theoretically calculated carbon dioxide, oxygen and nitrogen emissions for different excess air values were determined experimentally. By taking into account the emissions stated in “Regulations For Control Of The Industrial Sourced Air Pollution” when the achieved excess air values, carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen oxide, nitrogen and oxygen amounts were examined as a result of combustion experiments, the determined optimal excess air value to be 1,10. Tolerance value of excess air value was taken as  $1,10 + 0,05$ . When excess air value was 1,10, the oxygen volume of flue gas was 2,20–3,05 %, amount of carbon dioxide was 10,52–10,75 %, amount of carbon monoxide is 0–10 ppm, nitrogen monoxide is 125–150 ppm. With the design of

burner, the carbon monoxide and nitrogen monoxide emissions in the flue gas appearing due to combustion of natural gas, were measured considerably below the legal requirements. The air-flue ratio, dew point temperature, adiabatic flame temperature were calculated for the design of the new burner. A 13,68 % improvement in natural gas was obtained with the value of 1,10 for excess air value for combustion of the new burner and its design.

**Science Code** : 708.3.015  
**Key Words** : Heat treatment, burner design, flue gas analysis, natural gas combustion  
**Page Number** : 131  
**Adviser** : Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında, değerli zamanını ayırarak bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren, çalışmalarımın sonuçlanmasına yardımcı olan, danışmanım, sayın hocam, Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN'e, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Tez İzleme Komitesi üyesi hocalarım Prof. Dr. Veli ÇELİK ve Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a teşekkür eder, saygılar sunarım. Ayrıca, bu tez çalışmasının hazırlanmasına, hayata geçirilmesine Sanayi Tezleri Programı (SAN-TEZ) kapsamında destek veren Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na da teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emeği olan anne ve babama, değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma, birlikte geçireceğimiz zamanlardan feragat ederek bana destek olan, yükümü hafifleten eşime, oğullarım Ali ve Efe'ye en kalbi teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	4
3. BAĞLANTI ELEMANLARININ ISIL İŞLEMİ.....	11
3.1. Sertleştirme İşlemi .....	11
3.2. Menevişleme (Temperleme) İşlemi .....	12
3.3. Cıvataların Isıl İşlem Aşamaları.....	14
3.4. Cıvataların Isıl İşleminde Kullanılan Doğal Gazlı Sürekli Yüklemeli Isıl İşlem Fırını .....	16
4. YANMA VE TEORİK YANMA HESAPLAMALARI.....	26
4.1. Yanma ve Yakıtlar .....	26
4.2. Kuramsal Ve Gerçek Yanma İşlemleri .....	29
4.3. Doğal Gazla Çalışan Brülörler İçin Teorik Yanma Hesaplamaları .....	32
4.4. Doğal Gazla Çalışan Brülör İçin Eksik Yanma Durumunda Teorik Yanma Hesaplamaları .....	44

**Sayfa**

5. DOĞAL GAZ BRÜLÖRLERİ VE BRÜLÖR TASARIMI.....	48
5.1. Doğal Gaz Brülörleri.....	48
5.2. Gaz Hattındaki Elemanlar .....	49
5.2.1. Küresel vana.....	51
5.2.2. Esnek bağlantı .....	51
5.2.3. Gaz filtresi.....	51
5.2.4. Gaz regülatörü.....	51
5.2.5. Emniyet kapama ventili.....	52
5.2.6. Emniyet tahliye ventili .....	52
5.2.7. Manometre .....	52
5.2.8. Gaz prosestatı.....	52
5.2.9. Manyetik ventil (çalıştırma selenoid vanası) .....	53
5.3. Doğal Gaz İle Çalışan Brülörlerin Ana Elemanları .....	53
5.4. Doğal Gazlı Isıl İşlem Fırını Brülör Tasarımı.....	53
5.4.1. Brülör tüpü .....	57
5.4.2. Hava ve yakıt boruları.....	60
5.4.3. Hava-yakıt karıştırıcı.....	61
5.4.4. Ateşleme sistemi .....	63
5.4.5. Yanma borusu (kanalı).....	64
5.4.6. Besleme havası ısıtıcısı (reküperatör) .....	66
6. DENEY YERİ VE ÖLÇÜM CİHAZLARI .....	68
6.1. Deney Yeri .....	68

**Sayfa**

6.2. Ölçüm Cihazları .....	68
6.2.1. Emisyon ölçüm cihazı .....	68
6.2.2. Dijital manometre .....	70
6.2.3. Sıcaklık ölçüm cihazı .....	71
6.2.4. Doğal gaz debi ölçüm cihazı .....	73
6.2.5. Basınç ölçüm cihazları .....	74
7. DENEY PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE YANMA DENEYLERİ .....	76
7.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi .....	76
7.2. Yanma Deneyleri .....	79
7.3. Hava Fazlalık Katsayısı ve Doğal Gaz Tüketiminin Tespiti.....	85
7.4. Brülör Verim Hesaplamaları .....	87
7.5. Baca Gazı Duyulur Isı Kaybı Hesaplamaları İçin Hata Analizi .....	89
7.6. Hava-Yakıt Oranı ve Çiğlenme Noktası Sıcaklığının Hesaplanması .....	92
7.7. Adyabatik Alev Sıcaklığının Hesaplanması.....	93
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	100
KAYNAKLAR .....	106
EKLER.....	112
EK-1 Isıl işlem fırını iş akışı .....	113
EK-2 Aç-kapa kumanda edilen kontrolsüz yanmaya maruz kalmış brülör tüpleri.....	119
EK-3 Baca gazı analiz değerleri.....	120
EK-4 Baca gazı ölçümleri .....	123
EK-5 ISO 898/1 Standardı .....	128
ÖZGEÇMİŞ .....	130

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. Doğal gazın özellikleri, oksijen ihtiyacı ve baca gazı bileşenleri .....	34
Çizelge 4.2. Farklı hava fazlalık katsayıları için oksijen ihtiyacı, yanmış gazlar, azot miktarları .....	40
Çizelge 4.3. Farklı hava fazlalık katsayıları için baca gazı, kuru duman gazı ve yaş duman gazı miktarları .....	41
Çizelge 4.4. Hava fazlalık katsayısı 0,8 için baca gazı miktarları .....	46
Çizelge 4.5. Hava fazlalık katsayısı 0,8–0,85–0,90 ve 0,95 için baca gazı miktarları .....	47
Çizelge 5.1. Brülör elemanlarının üretiminde kullanılabilir yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin kimyasal kompozisyon ve mukavemet değerleri .....	56
Çizelge 6.1. Testo 350 baca gazı ve yanma verimliliği analiz cihazı teknik özellikleri.....	69
Çizelge 6.2. Lead Shine dijital sıcaklık ölçüm cihazı teknik özellikleri .....	71
Çizelge 6.3. Elimko E-MI07-1K10-100 ısı çift (thermocouple) teknik özellikleri.....	72
Çizelge 7.1. Sabit girdiler ve değerleri.....	77
Çizelge 7.2. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği yakma ısı gücü 100 MW'ın altındaki tesisler için baca gazı emisyonlarının sınır değerleri .....	78
Çizelge 7.3. Brülör girişi doğal gaz-hava basıncı değerlerine göre hava fazlalık katsayısı ( $\lambda$ ) değerleri .....	79
Çizelge 7.4. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek karbondioksit emisyonlarının karşılaştırılması .....	81
Çizelge 7.5. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek azot emisyonlarının karşılaştırılması.....	82

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 7.6. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek oksijen emisyonlarının karşılaştırılması .....	83
Çizelge 7.7. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki karbonmonoksit ve azotoksit emisyonlarının miktarları.....	84
Çizelge 7.8. 2009-2012 yıllarına ait ortalama doğal gaz tüketimleri.....	86
Çizelge 7.9. Brülör verim değerleri.....	88
Çizelge 7.10.Girdi - ürünlerin 298 K'de $h_{01} = 0$ ve $h$ değerleri .....	97

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Demir–karbon denge diyagramı .....	12
Şekil 3.2. Martensit mikroyapısının oluşumu sıcaklık–zaman grafiği.....	13
Şekil 3.3. Sertleştirme ve menevişleme ısıl işlemi sıcaklık–zaman grafiği .....	15
Şekil 3.4. Sertleştirme fırınının genel kurulum şeması .....	18
Şekil 3.5. Sertleştirme fırını brülör yerleşim planı.....	19
Şekil 3.6. Menevişleme fırınının genel kurulum şeması.....	21
Şekil 3.7. Menevişleme fırını brülör yerleşim planı .....	22
Şekil 3.8. Isıl işlem fırını iş akışı .....	24
Şekil 4.1. Kuru baca gazları .....	42
Şekil 4.2. Yaş baca gazları .....	43
Şekil 5.1. Doğal gaz hattındaki elemanlar .....	50
Şekil 5.2. Brülörün çalışma prensibi .....	54
Şekil 5.3. Brülörün montajlı teknik resmi.....	55
Şekil 5.4. Brülör tüpü .....	58
Şekil 5.5. Brülör tüpü kesiti .....	59
Şekil 5.6. Hava ve yakıt boruları.....	60
Şekil 5.7. Hava–yakıt akışı .....	61
Şekil 5.8. Hava yakıt karıştırıcı.....	62
Şekil 5.9. Ateşleme sistemi .....	63
Şekil 5.10. Ateşleme sistemi detayı .....	64
Şekil 5.11. Yanma borusu ve kesiti.....	65

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.12. Besleme havası ön ısıtıcısı önden görünüşü .....	66
Şekil 5.13. Besleme havası ön ısıtıcısı kesiti .....	67
Şekil 7.1. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek karbondioksit emisyonlarının karşılaştırılması .....	81
Şekil 7.2. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek azot emisyonlarının karşılaştırılması.....	82
Şekil 7.3. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek oksijen emisyonlarının karşılaştırılması .....	83
Şekil 7.4. Hava fazlalık katsayıları için karbonmonoksit ve azotoksit emisyonlarının miktarları .....	84

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 6.1. Testo 350 baca gazı ve yanma verimliliği analiz cihazı .....	70
Resim 6.2. Rothenberger Ro-Press tipi dijital manometre .....	71
Resim 6.3. Lead Shine dijital sıcaklık ölçüm cihazı .....	72
Resim 6.4. Elimko E-MI07-1K10-100 ısıl çift (termocouple).....	73
Resim 6.5. Krom Schroder DM 65Z 50-40 model debi ölçer .....	73
Resim 6.6. Krom Schroder RFM 6 RB 100 model manometre .....	74
Resim 6.7. Krom Schroder KFM 160 RB 100 model manometre.....	75

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Baca gazı içerisindeki karbondioksit, %
<b>f</b>	Siebert katsayısı
<b>h<sub>T</sub></b>	Tepkime entalpisi, kJ/kmol
<b>h<sub>Y</sub></b>	Yakıt entalpisi, kJ/kmol
<b>h<sub>ol</sub></b>	Oluşum entalpisi, kJ/kmol
<b>H<sub>U</sub></b>	Alt ısı değer, kcal/m <sup>3</sup>
<b>H<sub>ürün</sub></b>	Ürünlerin entalpisi, kJ/kmol
<b>H<sub>girdi</sub></b>	Girdilerin entalpisi, kJ/kmol
<b>K<sub>p</sub></b>	Yanma denge sabiti
<b>L<sub>min</sub></b>	Yakma havası, m <sup>3</sup>
<b>m</b>	Kütle, kg
<b>m<sub>hava</sub></b>	Hava kütlesi, kg
<b>m<sub>yakıt</sub></b>	Yakıt kütlesi, kg
<b>M</b>	Mol kütlesi, kg/kmol
<b>n</b>	Mol sayısı, kmol
<b>N<sub>ü</sub></b>	Ürünlerin mol sayısı, kmol
<b>N<sub>g</sub></b>	Girdilerin mol sayısı, kmol
<b>P<sub>su</sub></b>	Suyun kısmi basıncı, kPa
<b>q<sub>A</sub></b>	Baca gazı duyulur ısı kaybı, %
<b>Q</b>	Isı transferi, kJ
<b>T<sub>ürün</sub></b>	Ürünlerin sıcaklığı, K
<b>T<sub>A</sub></b>	Baca gazı çıkış sıcaklığı, °C
<b>T<sub>B</sub></b>	Ortam hava sıcaklığı, °C

**Simgeler** $V_{ATR}$  $V_{AF}$  $w_R$  $W$  $\lambda$ **Açıklama**Kuru baca gazı, m<sup>3</sup>Yaş baca gazı, m<sup>3</sup>

Hata oranı

İş, kj

Hava fazlalık katsayısı

**Kısaltmalar****AISI****DIN****EHT****HAD****HFK****HRC****HY****ISO****PID****PIC****ppm****SAE****Açıklama**

Amerika Demir Çelik Enstitüsü

Alman Standartlar Enstitüsü

Yüksek Gerilim Trafosu

Hesaplama Akışkanlar Mekaniği

Hava Fazlalık Katsayısı

Rockwell C Skalası Sertlik Değeri

Hava-Yakıt Oranı

Uluslararası Standartlar Teşkilâtı

Oransal-İntegral-Türevsel kontrol

Çevre Arabirimlerini Kontrol edici

Milyonda parça sayısı

Amerika Çelik Enstitüsü

## 1. GİRİŞ

Enerji, dünya siyasetine yön veren, sınırların çizilmesini sağlayan, ülkelerin ekonomik gelişmişlik göstergesi olan en temel unsurdur. Günümüzde bağımsızlık, ülkelerin ihtiyaç duydukları enerjiyi karşılayabilme potansiyelleriyle belirlenmektedir. İhtiyacı olan enerjiyi, ucuz kaynakları kullanarak üretebilen ülkeler, ekonomik açıdan gelişmişler ve uyguladıkları enerji politikalarıyla, dünya siyasetine yön vermeye başlamışlardır. Ekonomik olarak gelişme, enerji üretimindeki bağımsızlığa bağlıdır [1].

Enerji verimliliği; enerjinin üretiminden iletime, tüketiminden atık oluşumuna kadar enerjinin etkin olarak kullanımı çalışmalarının tamamını kapsamaktadır. Enerji verimliliği konusunda, daha az maliyet ve fosil yakıt kullanımıyla daha çok enerji üretimi yönünde çalışmalar yapılırken, diğer taraftan aynı miktar enerjiyle daha çok iş yapılması ya da aynı miktar işin daha az enerji tüketilerek yapılması konusunda çeşitli çalışmalar yürütülmekte, yeni politika ve stratejiler üretilmektedir [2].

Ülkemizde, enerji talebinin % 76'sı ithalat yoluyla karşılanmaktadır. Enerji tüketimimizin, % 80'i ise fosil yakıtlara bağlıdır. Kullandığımız petrolün, % 93'ü, doğal gazın ise % 98'i ithal edilmektedir. İthal edilen doğal gazın % 50'si de elektrik üretiminde ve sanayide kullanılmaktadır. Kısa vade de, enerjide dışa bağımlılığımızın azaltılabilmesi mümkün gözükmemektedir. Ancak, başta sanayi alanında olmak üzere üretilen enerjinin verimli kullanılarak, minimum enerji girdisi ile maksimum üretim yapılabilmesi mümkündür [3, 4].

Malzemelerin mukavemetlerinin artırılması için kullanılan ısıtma fırınları, sanayide yoğun olarak kullanılan endüstriyel fırın çeşitlerindedir. Isıtma fırınlarında, üretim maliyetlerini etkileyen en önemli girdi enerji maliyetleridir. Bu nedenle, ısıtma fırınlarında, enerjinin verimli kullanılması büyük önem arz etmektedir. Isıtma fırınlarında, enerji kayıp-kazançları arasındaki fark, kar veya zararın bir göstergesi olabilmektedir.

Ülkemizde kullanılan birçok ısıtım işlem hattında, doğal gaz ya da LPG ile çalışan brülörler kullanılmaktadır. Aç/kapa olarak kumanda edilen brülörler, fırın içerisine giren malzeme miktarına göre devreye girip çıkmaktadırlar. Brülörlerin devreye giriş çıkışlarında kontrolsüz yanma oluşmakta, brülör tüpü ve yanma odası zarar görmektedir. Ayrıca, brülör tüpü ve yanma odasında patlamalar oluşabilmektedir. Oluşan patlamalar ısıtım işlem hattının izolasyon malzemelerinin zarar görmesine neden olmaktadır.

Aç/kapa yanma ve yakıcı sistemiyle çalışan ısıtım işlem hatlarında, fırın içerisine giren malzemelerin miktarı ve büyüklüğü arttığında fırın sıcaklığında sapmalar ortaya çıkmaktadır. Özellikle, ısıtım işlem hattındaki sertleştirme fırını sıcaklığının 860-900 °C değerinin altına düşmemesi gerekmektedir. Ancak, Aç/kapa yanma ve yakıcı sistemiyle çalışan ısıtım işlem hatlarında, üretim prosesinde yoğun yükleme durumlarında fırın sıcaklığının 840 °C kadar düştüğü durumlarla karşılaşmaktadır. Fırın sıcaklık değerinin, östenitleştirme sıcaklığının altına düşmesi durumunda, malzemelerin sertliğinde problem yaşanmaktadır. Sertlik değerlerinin dağılımında 6-8 HRC'lik değişimler görülebilmektedir. Sertlik dağılımlarında problem görülen ürünler, tekrar ısıtım işleme tabi tutulmaktadır. Bu durumda, üretim maliyetlerinin artışına neden olmaktadır.

Kontrolsüz yanma, brülörlere zarar vermekte ve brülörlerin kullanım ömürlerini kısaltmaktadır. Yanma sistemi ve brülörlerdeki problemler ise ısıtım işlem hattının durmasına, bakım-onarım ve üretim maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Brülörlerin aç/kapa olarak devreye girmesi, yakıt sarfiyatını artırmakta ve yakıtın kontrolsüz olarak yakılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle çevreye zararlı, karbondioksit, karbonmonoksit ve azotoksitler verilmektedir.

Baca gazı emisyonlarına uygun olarak ayarlanmayan hava-yakıt karışımıyla çalışan brülörlerde ve yanma borularında, termal gerilmeler nedeniyle delikler, yırtılmalar oluştuğunda tüm ısıtım işlem hattı durdurularak, bakım-onarım yapılmaktadır. Isıtım işlem

hattında, 860-900 °C sıcaklık aralığında çalışıldığından brülörlerin değiştirilmesi ve bakımı için ısıtım fırını kademeli olarak soğutulmaktadır. Arızalı olan brülörlerin değişimi ve bakımları yapıldıktan sonra, ısıtım hattı kademeli olarak ısıtılmaktadır. Isıtım fırınının soğutulması, brülörlerin bakım-onarımı ve yeniden ısıtılması yaklaşık iki hafta sürmektedir. Fırının ısıtılması ve soğutulmasında enerji kayıpları yaşanmaktadır.

İkinci bir alternatif olarak, brülörlerin ısıtım hattına yapılan yüklemenden bağımsız olarak sürekli yakılması durumunda ise yakıt tüketimi oldukça artmaktadır. Bu durumda üretim maliyetlerini artırdığı gibi brülörlerin ömürlerinin de hızla azalmasına neden olmaktadır.

Isıtım fırınlarında enerjinin etkin kullanımı için uygun olan oransal hava-yakıt kontrolü, otomatik ateşleme sistemi ve kontrol duyarlılığı sayesinde, enerji tüketiminde tasarruf sağlanabilecektir. Uygun bir yanma sistemi ve kontrol stratejisi, hem kontrol doğruluğunu arttırmakta, hem de yakıt tüketimini düşürmektedir. Isıtım fırınlarında, yakıt tüketimlerinin düşürülebilmesi, yanma işleminin kontrolüne bağlıdır. Brülörlerin kontrolüne yönelik ileri kontrol sistemleri, ilk yatırım maliyetlerinin kısa sürede geri dönüşümünü sağlayabilmektedir. Yakıt tüketimini düşürebilmek ve ısıtım prosesinin gerektirdiği kontrol doğruluğunu sağlayabilmek için ileri kontrol yöntemlerinin kullanılmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır [5].

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Isıl işlem fırınlarında ısıl güç kaynağı olarak fosil yakıtlar (doğal gaz ya da fuel oil) veya elektrikli bir ısıl kaynaktan ısıl gücün ısıtıcı tellerle fırına aktarıldığı elektrikli ısıtıcılar kullanılmaktadır. Isıl işlem fırınlarında, enerjinin verimli kullanılabilmesi yanma-yakıcı sistemine bağlıdır. Fosil yakıtlı ısıl işlem fırınlarında, yakıtın yakılması için brülörler (yakıcı) kullanılmaktadır.

Özen, iki boyutlu bir brülörde yanma olayının daha iyi anlaşılabilmesi için yanmanın olduğu (reaksiyonel) ve yanmanın olmadığı (izotermal) durum problemlerini sayısal olarak incelemiştir. Bu çalışmada, iki ayrı problem, çözüm ağları GAMBİT 2.2.30 programında tasarlandıktan sonra sonlu hacimler metodunu kullanan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programlarından FLUENT 6.2.16 kullanılarak çözülmüştür. HAD analizlerinin temelleri üzerinde durulmuş ve kullanılan sayısal çözüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlara göre hız ve sıcaklık incelemeleri yapılmıştır. Değişik alev parametreleri için hız büyüklüklerinin, türbülans kinetik enerjisinin, boyutsuz parametreler ile değişimleri incelenmiştir [6].

Bakrozis ve arkadaşları, girdap akımlı bölgeye iki boyutlu silindirik nozülde yakıt enjektörle edilerek elde edilen türbülanslı reaktif akışı deneysel olarak incelemiştir. Farklı hava-yakıt oranlarına sahip üç alev için yapılan incelemede alev uzunluğunun hava-yakıt oranı düşüğe azaldığı gözlenmiştir. Sıcaklık genel olarak nozülün tam orta noktasında maksimum değere ulaşırken duvarlara yaklaştıkça düşmektedir. Hızların, nozül simetri ekseninde sıcaklığın tam tersine minimum değerine ulaştığı, duvara yakın bölgelerde ise en yüksek değerlerde olduğu bulunmuştur [7].

Son dönemde HAD, aerodinamik ekipmanların dizayn ve işletmesinde kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. HAD endüstriyel brülörler gibi yakma ekipmanlarının analizinde kendine büyük bir yer edinmiştir. Bu geniş kullanılabilirlik, kimyasal reaksiyonlarla, türbülanslı akışkanlar mekaniği arasındaki lineer olmayan ilişkiye göre sınırlandırılmıştır. Jamaluddin ve Smith, endüstriyel problemlerde HAD'nin

kullanımını sınırlayan nedenleri belirlemişlerdir [8]. Smith ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma, HAD odaklı ürünlerin ekonomik brülör dizaynında önemli bir yeri olduğunu ortaya koymuştur [9, 10].

Çetin tarafından, BOSCH ısıtma teknolojileri patentli düşük  $\text{NO}_x$  (azotoksit) emisyonlu bir lamella brülörün başlıca parçalarından biri olan kanat demetinin farklı tasarımlarının deneysel analizi ve optimizasyonu yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları nümerik analizle doğrulanmıştır [11]. Naha ve arkadaşları, emisyon oranlarının, yanmanın olduğu yüzey tasarımından doğrudan etkilenen bir özellik olduğunu belirtmişlerdir [12]. Parmantier ve arkadaşları, lamella brülör kanat demeti tasarımının analizi ve optimizasyonu ile ilgili bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, CO ve  $\text{NO}_x$  ölçümlerine göre, emisyon oluşumunun düşürülmesi esasına dayanmaktadır [13].

Tali ve arkadaşları tarafından, düşük kalorifik gazın yanması, düzenli olarak kademeli hava akışı ile helisel döngü sağlama prensibine göre çalışan COSTAIR Brülör (Continued Staged Air with Internal Recirculation) ve alevsiz yanma esasına göre çalışan FLOX (Flameless Oxidation) Brülör kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada, mevcut brülörlerde FLUENT bilgisayar programı kullanılarak düşük kalorifik ve azot içeren gazın yanması esnasında oluşan CO ve  $\text{NO}_x$  emisyonları hesaplanmıştır. Daha sonra,  $\text{NO}_x$  emisyonlarının düşürülebilmesi için brülörler yanma odasıyla birlikte optimize edilmiştir. İki kademeli yanma prensibi dikkate alınarak yapılan optimizasyonla,  $\text{NO}_x$  emisyonlarında % 40'tan fazla düşüş sağlanmıştır [14].

Yanma odaları hakkında geçmişten günümüze kadar hem kuramsal, hem de deneysel olarak bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, yanma veriminin artırılmasının yanında, yanma süresinin kısaltılmasını, yanma sonucu ortaya çıkan istenmeyen gazların oluşmasını engellemek ve yanma odasının küçük hacimde seçilmesini sağlamak için yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda karşılaşılan sorunlar nedeniyle, yanma odaları hakkında yapılan çalışmalar kuramsal olarak gerçekleştirilmektedir. İşyarlar, yanma odası içinde gerçekleşen termodinamik hal büyüklüklerini

incelemiştir. Bu çalışmada çeşitli parametreler ele alınarak, bu parametrelerin değişimlerinin sonucu olarak, yanma odası içerisindeki sıcaklık, entalpi, entropi değerleri incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar daha önceden yapılmış çalışmalarla karşılaştırılmış ve yanma olayını etkileyebilecek bu parametrelerin analizi yapılmıştır [15].

Başaraner yaptığı çalışmada, iki boyutlu, sürekli rejimde, reaktif ve türbülanslı akış içeren bir yanma odası geliştirmiştir. Çalışmasındaki parametreleri değiştirerek, farklı sonuçlar elde etmiştir. Modelin sonuçlarını daha önce yapılmış olan çalışmalarla karşılaştırmış, ardından yanma olayını etkileyebilecek çeşitli parametrelerin çözümlemesini yapmıştır [16].

Karel yaptığı çalışmada, yanma olayını etkileyen çeşitli parametrelerin etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmada, çeşitli yanma parametreleri ele alınarak, bu parametrelerin değişimlerinin yanma odası çıkış sıcaklığını nasıl etkilediği incelenmiştir [17].

Kılıç, altı-akılı model kullanarak, yarım silindirik veya dikdörtgenler prizması şeklindeki kazanların yanma odalarında ışıma ile olan ısı aktarımının matematiksel modellenmesini yapmıştır [18].

Sürmen, alev stabilizörünün bulunduğu sürekli yanma odalarındaki dönel hareketli akıslarda, türbülanslı alevin yanma odası içerisindeki konumu ve alev cephesinin kuramsal olarak tespitini araştırmıştır [19].

Topal, alışılmış ızgaralı kalorifer kazanlarının yanma odası ve ızgara sistemlerinde yapılan bazı değişikliklerin kazan ısı verim ve emisyon davranışına etkisini deneysel olarak incelemiştir [20].

Günümüzde metan yanmasıyla ilgili çalışmalar, deneysel çalışmalar ile gelişmiş bilgisayar programları yardımıyla yapılmaktadır. Böylece, oluşturulacak yanma sistemi model ve tasarımlarının daha az sayıda deney yapılarak incelenmesi mümkün

olmaktadır. Alev sıcaklığının artmasının, azotoksit emisyonları üzerinde arttırıcı etkisi olduğu teorik, deneysel ve modelleme çalışmalarıyla bilinmektedir. Benzer şekilde, hava fazlalık katsayısının da emisyonlar üzerindeki etkileri literatür bilgisi olarak mevcuttur. Çankaya tarafından yapılan çalışmada, daha önce yapılmış deneysel ve modelleme çalışmaları ile karşılaştırmak üzere alev sıcaklığı ve hava fazlalık katsayısı parametrelerinin emisyonlar üzerindeki etkileri analitik olarak hesaplanmıştır [21].

Mishra, ocağa giren gazın giriş sıcaklığının alev yapısına etkisi ve metan yanmasını nümerik olarak çözmüştür. Yanma hızları, yanmamış gazların giriş sıcaklığının fonksiyonu olarak stokiometrik karışım için hesaplanmıştır [22].

Ballester, değişken miktarlardaki yanma olaylarından sonra azotoksit emisyon değerlerini tespit edip incelemiştir [23]. Hepbaşlı, doğalgaz yanmasının gerçekleştiği kazanın sonundan duman gazı geri beslemesinin baca gazı emisyonları üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir [24].

Zeynalov ve arkadaşları, tam yanmanın gerçekleşebilmesi için ideal şartları sağlayabilecek yakıcı ortam oluşturmuşlardır. Beslemede kullanılacak hava vantilatörle emdirilmiş, hava borusu ile yüzeye dik verilmiştir. Böylece, havanın düzgün dağılması sağlanmıştır. Teorik ve deneysel çalışmaların sonucunda homojen bir karışım elde etmişlerdir [25].

Nishimura ve arkadaşları, yakıcı bir ortamda yakıt-hava karışımını sağlayan bir yakıcı kullanarak azotoksit emisyonları incelemiştir. Yanma için gerekli olan hava ısıtılarak ortama verilmiştir [26].

Isıl işlem fırınlarında enerjinin verimli kullanılabilmesi ve yanma sonucunda çevreye atılan zararlı gaz emisyonlarının düşürülebilmesi için brülörlerdeki yanmanın otomatik olarak kontrol edilmesi gereklidir.

Isıl işlem uygulamalarında, sistemler doğrusal olmayan bir davranış gösterirler. PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrolü ile sıcaklığın kontrol edilmeye çalışıldığı endüstriyel bir tavlama fırınında, geniş çalışma aralıklarında kontrolcüye ait parametrelerin sürekli değiştirilmesi gerekmektedir. Fakat, uygulamadaki zorluk ve getireceği maliyetlerden dolayı, kontrol parametreleri daha geniş bir çalışma aralığını kapsamaktadır. Bu durum, idealin altında bir kontrol işleminin uygulanmasına yol açmakta ve enerji kayıplarını arttırabilmektedir [27, 28].

Isıl işlem fırınlarının bir türü olan sürekli sinterleme fırınları, geleneksel endüstriyel ısı işlem fırınlarından farklı bölümlerden oluşmakta ve her bölüm arasında ısı alışverişi meydana gelmektedir. Bu nedenle, kontrol doğruluğu azalmakta ve sistemin matematik modelinin doğru olarak kurulması zorlaşmaktadır [29, 30]. Shu-kun ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada sürekli tip sinterleme fırınlarının sıcaklık kontrol sistemleri üzerinde çalışmışlar ve çalışmalarında uzman kontrol sistemi kullanmışlardır. İncelenen sinterleme fırını, yağ giderme, soğutma, ön ısıtma olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Sistemin otomatik kontrolü yapılırken, yağ giderme bölümü üç, ön ısıtma bölümü iki, sinterleme bölümü ise üç bölgeye ayrılmıştır. Geri besleme her bir ana bölümün ortasında yer alan termoelektrik çiftlerle sağlanmıştır. Bölgelerin sıcaklığını ölçmek için 11 adet termoelektrik çift kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan uzman kontrol sistemleriyle, büyük sıcaklık değişimleri kontrol edilebilmekte ve fırındaki sıcaklık dalgalanmaları kontrol altında tutulmaktadır [31].

Eroğlu, akaryakıtla çalışan ve sürekli yükleme yapılan tav fırınlarında yanma, sıcaklık ve iç basıncın optimum kontrolü üzerine çalışmıştır. Çalışmada, öncelikle üç bölgeye bir fırında, yakıt, sıcaklık ve iç basıncın optimum kontrolü için bir sistem modeli geliştirilmiştir. Sistem modeline uygun, sistem denklemleri elde edilmiştir. Modeldeki parametreler 15 ton/saat kapasiteli bir tav fırını için belirlenmiştir. Sistem için seçilen performans kriterini minimum yapacak optimum kontrol geri besleme katsayıları, Riccati denkleminin nümerik çözümleri kullanılarak bulunmuştur. Seçilen performans kriteri; fırının çıkış bölgesindeki sıcaklık, fırının iç basıncı ve baca gazındaki oksijen yüzde oranı gibi sıcaklık, iç basınç ve hava/yakıt

oranını ilgilendiren temel sistem değişkenleriyle, yakıt miktarı, yakma havası miktarı ve baca klepesi açıklığı gibi kontrol değişkenlerini içerisine almaktadır [32].

Matematik modelin tam anlamıyla gerçekte birebir örtüşmemesinden ve uygulanan kontrol yönteminin yetersiz kalmasından dolayı sürekli beslemeli tav fırınlarında, temel sıcaklık kontrol metotları genelde iyi sonuçlar vermemektedir. Bu şekilde tasarlanan bir kontrol sistemi, elde edilen ürünlerde kalite sorununun yanı sıra enerji kayıpları ve kullanılan ekipmanın ömrünün kısalması gibi sorunlara da sebep olmaktadır. Ming ve Datai, sürekli tip tavlama fırınlarının ısı kaynakla sisteme güç sağlanan kısmı için yeni bir sıcaklık kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Uygulanan yeni yöntemle 1 550 °C'ye ayarlanmış bir fırında,  $\pm 2$  °C kontrol doğruluğu sağlanabilmiştir. Sistemde akıllı kestirimciden yararlanan ve geri besleme düzeltmeleri yapan bir optimum kontrol sistemi kullanılmıştır [33].

Son dönemlerde, bulanık mantıkla kontrol yöntemlerinin fırınlara uygulandığı çalışmalar yapılmıştır [34, 35]. Abilov ve arkadaşları ileri-geri beslemeli kademeli sistemlerle tümleşik bulanık mantık kontrol yönteminin endüstriyel rafineri fırınlarına uygulaması üzerinde çalışmışlardır. Sistemin modellenmesi için eş değer sistem yöntemi kullanılmıştır. Sisteme ait denklemler elde edildikten sonra geliştirilen algoritmalarla sistemin bulanık mantıkla kontrolü gerçekleştirilmiştir [36].

Arıkan, elektrikli ısı işlem fırınlarında farklı kontrol stratejilerinin uygulamalarını hedef alan bir kontrol sistemi üzerinde çalışmıştır. Çalışmada, elektrikli bir ısı işlem fırınının ısı davranışını tanımlayan bir dinamik model geliştirilmiş ve fırının durum denklemleri elde edilmiştir. Daha sonra, sayısal hesaplamalarda kullanılan sistem parametreleri belirlenmiştir. Aç-kapa, PID, optimum ve düşük mertebeden durum gözlemleyicileriyle optimum kontrol yöntemlerinin uygulanması için algoritmalar geliştirilmiştir. Fırında işlem gören malzemeyi ortam sıcaklığından belli bir referans sıcaklığına getirmek için farklı kontrol yöntemleri uygulanarak sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlar, kontrol doğruluğunu ve geçici cevap özelliklerini gösteren performans kartlarıyla sunulmuştur. Simülasyonlardan elde edilen performans

kartları ve grafikler, düşük mertebeden durum gözlemleyicisi kullanılarak yapılan optimum kontrolün, tüm durum değişkenlerinin geri beslendiği optimum kontrol kadar iyi olduğunu göstermiştir [5].

Bu çalışmada literatürde yapılan çalışmalara ek olarak, doğal gazlı sürekli yüklemeli, tel bant konveyörlü, azot-metanol atmosfer kontrollü, ısıtım işlem fırınlarında kullanılmak üzere brülör tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Tasarımı yapılan brülörde ki doğal gaz yanması, teorik ve deneysel olarak incelenmiştir.

Yakıcı sistem ve kontrollerine yönelik yapılan literatür araştırmasından sonra, brülör tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan brülörün iki boyutlu teknik resimleri, katı modelleri oluşturulmuştur. Tasarıma uygun olarak, brülör imalatları yapılmıştır. Tasarımı ve imalatı tamamlanan brülörler, ısıtım işlem hattı, sertleştirme fırınına monte edilerek, test edilmiştir.

Brülör girişi doğal gaz ve hava basıncı değerlerine göre hava fazlalık katsayıları tespit edilmiştir. Farklı hava fazlalık katsayıları için teorik olarak hesaplanan karbondioksit, oksijen ve azot emisyonları deneysel olarak da ölçülmüştür. Yanma deneyleri sonunda elde edilen hava fazlalık katsayıları, karbondioksit, karbonmonoksit, azotoksit, azot ve oksijen miktarları incelenmiştir. Yeni brülör tasarımı için hava-yakıt oranı, çığlenme noktası sıcaklığı, adyabatik alev sıcaklığı değerleri hesaplanmıştır. Yeni brülör tasarımı ve brülörlerde yanma için belirlenen hava fazlalık katsayısı değeri için doğal gaz tüketim değerleri ölçülmüştür. Böylece, yapılan brülör tasarımının, ısıtım işlem maliyetlerinin düşürülmesine etkisi belirlenmiştir.

### 3. BAĞLANTI ELEMANLARININ ISIL İŞLEMİ

Cıvata, somun, rondela, ankraj, saplama gibi bağlantı elemanlarının akma mukavemeti, çekme mukavemeti, sertlik, süneklik, tokluk, darbe soğurma enerjisi gibi mekanik özelliklerinin iyileştirilebilmesi için ısıl işlem uygulanır. Bağlantı elemanlarına, sertleştirme ve menevişleme (temperleme) ısıl işlemleri uygulanmaktadır [37].

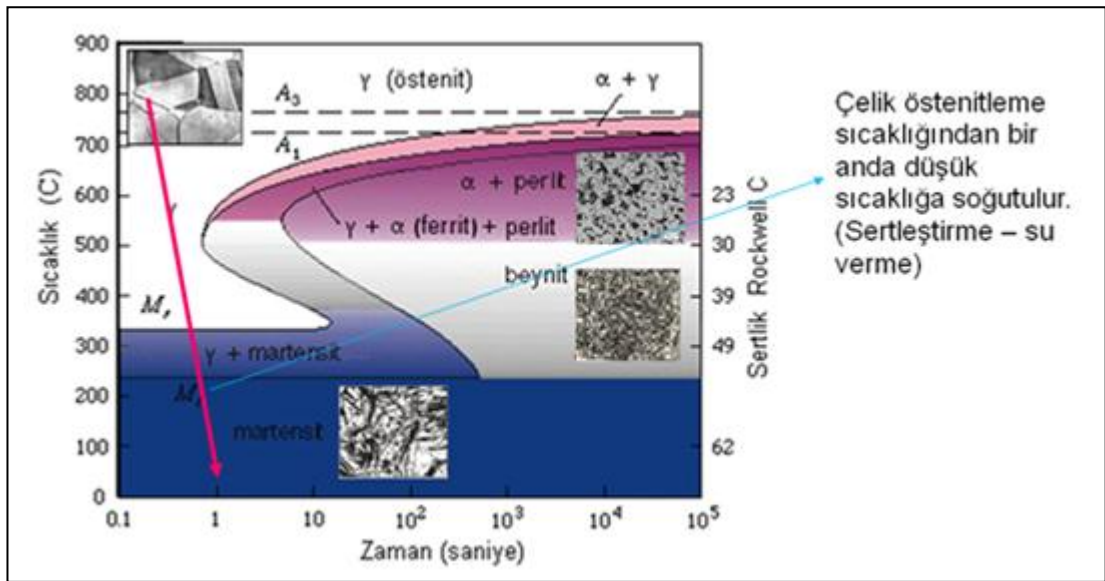
#### 3.1. Sertleştirme İşlemi

Sertleştirme işlemi, bir çeliğin gerekli sıcaklığa kadar ısıtılması ve sertleştirme sıcaklığı ya da östenitleştirme sıcaklığı adı verilen bu sıcaklıkta, istenilen yapı değişikliğine erişinceye kadar bekletilmesi ve ardından belirli bir hızla aniden soğutulması olarak tanımlanır. Sertleştirme işlemi, ısıtma ve soğutma olmak üzere iki işlemden oluşur [38].

Isıtma işlemi, malzemeyi karbürize ya da okside etmeyecek şekilde ayarlanmış bir hidrokarbon atmosferde ya da tuz banyosu içerisinde gerçekleştirilir. Isıtma sıcaklığının, yeterli homojenlikte bir östenitik yapı elde etmeyi ve mevcut özel karbürlerin gerekli miktarının çözülmesini sağlayacak ancak tane büyümesine de imkan vermeyecek düzeyde olması gerekmektedir. Sertleştirme için ısıtma işlemi, genellikle ya ısıtmanın radyasyon yoluyla meydana geldiği elektrik, gaz veya sıvı yakıt fırınlarında ya da ısıtmanın konveksiyon yoluyla meydana geldiği tuz veya metal banyolarında yapılır. İstenilen sertlik değerine ulaşabilmek için ani soğutma öncesinde uygulanacak ısıtma işleminde, homojen bir östenitik yapıya ulaşılmalıdır. Cıvataların ısıl işleminde, Demir-Karbon Denge Diyagramı'na uygun olarak östenitik yapının elde edilebilmesi için malzemeler, 860–900°C sıcaklığa kadar ısıtılmaktadırlar. Demir- Karbon Denge Diyagramı, Şekil 3.1'de verilmiştir [38, 39].



Östenitik yapıya ulaşmış çıvatalar, 40-70 °C sıcaklığındaki yağ banyosunun içerisine daldırılarak soğutulmaya başlanır. Hızlı soğuyan çelikteki karbon atomları kararlı olduğu yapıya ayrışma imkanı bulamaz ve demir kafes yapı içerisinde sıkışıp kalır. Karbonca aşırı doymuş bu yarı kararlı faza martensit denir. Martensit tek fazlı bir katı eriyik olup ince uzun tabakalar halindedir. Sertleştirme sonrası martensit yapı oluşumu için yapılan soğutma; suda, yağda ya da havada yapılabilir. Sertleştirme sonrası soğutma işlemine su verme işlemi de denir [40, 41].



Şekil 3.2. Martensit mikroyapısının oluşumu sıcaklık-zaman grafiği [41]

Martensit yapı kübik olmadığı ve artık gerilmeler içerdiğinden, karbon atomları nedeniyle kayma direnci çok büyüktür. Dolayısıyla, çok sert ve yüksek mukavemettedir. Martensit yapının akma ve çekme mukavemetinin yüksek olması nedeniyle, malzemenin sünekliği çok düşüktür. Malzeme kırılğan bir yapıya sahiptir.

### 3.2. Menevişleme (Temperleme) İşlemi

Sürekli soğutma ile sertleştirilmiş çıvatalarda, martensit teşekkülünden dolayı büyük gerilmeler ortaya çıkar. Sertleştirilmiş çıvatalar, içerisindeki karbon atomlarının oranına göre 400 – 650°C sıcaklık aralığına kadar ısıtılıp, daha sonra soğutulur. Menevişleme işlemiyle, martensitik yapı içerisinde oluşan gerilmeler giderilir ya da

tehlikeli olmayacak seviyeye indirilir. Menevişleme işlemi sonrasında martensit yapının sertliğinde, akma-çekme mukavemetlerinde önemli miktarda düşme olurken, sünekliğinde artış görülür [40, 42].

Sertleştirme sırasında olduğu gibi menevişleme sırasında da mikroyapıda önemli değişimler olur. Östenitte çözülmüş karbon, ani soğutma sonucunda demir kafesi terk edemez ve martensitik yapı içerisinde sıkışmış olarak kalır. Menevişleme sırasında, ısıtma suretiyle martensit içerisindeki karbona hareketlilik kazandırılır ve karbon atomları martensitin aşırı doymuş yapısından karbür olarak ayrışır. Ayrıca, sertleştirme işlemi sırasında oluşan artık östenit de, martensit yapıda çözülmüş alaşım elementleriyle birlikte karbür ayrışmasına katkıda bulunur ve martensit parçalanır [38].

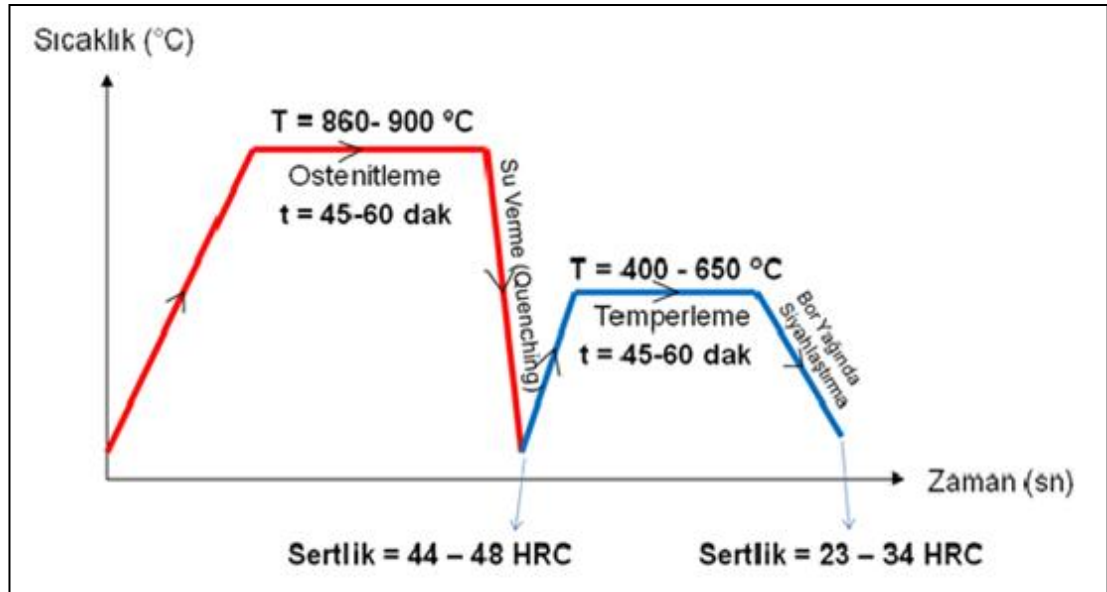
### 3.3. Cıvataların Isıl İşlem Aşamaları

Cıvataların ısıtma işlemi sırasında, sertleştirme ve menevişleme işlemleri birbiri ardınca yapılır. Bu işleme, ıslah işlemi de denilir. ISO 898/1 (Rev. 2009) standardına göre, 16 mm çapından daha büyük (8.8) kalite sınıfındaki bir cıvatanın sertlik değeri 23-34 HRC aralığında olmalıdır. Cıvataların ısıtma işlem aşamaları aşağıda verilmiştir.

- 1) Cıvatalar sertleştirme fırını içerisinde 860-900 °C östenitleştirme sıcaklığına kadar ısıtılır.
- 2) Östenitleştirme sıcaklığına kadar ısıtılan cıvata, ortalama 15 dakika civarında fırın içerisinde bekletilir.
- 3) Cıvatalar soğutma için 40-70 °C sıcaklığında tutulan yağ banyosu içerisine daldırılır. Bu işleme, su verme de denilir. Su verme sonrasında, martensit yapı elde edilir.
- 4) Su verme sonrasında, (8.8) kalite cıvatanın sertliği 44-48 HRC değerine kadar yükselir.
- 5) Sertleştirme fırını içerisinde yüksek sıcaklıkta bulunan cıvataların, düşük sıcaklıkta bulunan yağ banyosuna daldırılması sonucu ani soğutmayla birlikte ortaya çıkan martensit yapı içerisinde gerilmeler oluşur. Bu nedenle,

martensit yapıda bulunan cıvataların sertlik, akma, çekme mukavemetleri standart değerlerin üzerine çıkarken, sünekliği düşük kalır. Martensit yapının içerisindeki gerilmelerin alınması, sünekliğin artırılması ve kırılabilirliğin düşürülmesi için cıvatalara menevişleme işlemi uygulanır.

- 6) Cıvatalar, çap ve kimyasal kompozisyondaki karbon oranına göre 400-600°C sıcaklıkta 45-60 dakika arasında menevişleme fırınında ısıtılır.
- 7) Menevişleme işleminden sonra cıvatalar bor yağında soğutulur. Menevişleme işleminden sonra cıvatalar suda veya havada da soğutulabilir.
- 8) Menevişleme sonrasında, cıvataların sertlik değeri 23-34 HRC aralığına düşürülür. Cıvataların minimum akma mukavemeti 660 MPa, çekme mukavemeti ise 830 MPa değerini karşılar. Cıvataların süneklik değeri olarak kullanılabilir uzama değeri ortalama %12 değerine ulaşır.



Şekil 3.3. Sertleştirme ve menevişleme ısıl işlemi sıcaklık–zaman grafiği

### **3.4. Cıvataların Isıl İşleminde Kullanılan Doğal Gazlı Sürekli Yüklemeli Isıl İşlem Fırını**

Bağlantı elemanları sektöründe faaliyet gösteren Mitaş Cıvata'da 1500 kg / saat kapasiteli doğal gazlı sürekli yüklemeli, atmosfer kontrollü ısıtım fırını kullanılmaktadır. Isıtım fırınındaki işlemler aşağıda açıklamalarıyla birlikte verilmiştir.

#### **1) Ön Yükleme**

Cıvatalar toplu halde buldukları kasalardan, fırın ön yükleme sepetine boşaltılır. Fırın uygun hızda ve miktarda cıvata ile beslenir.

#### **2) Alkali Deterjanla Yıkama**

Cıvatalar, soğuk dövme yöntemiyle üretilmekte olup, uygulanan operasyon gereği yağla temas ederek son şekillerini alırlar. Soğuk dövme üretim sonrasında cıvataların yüzeyinde, içerisinde hidrokarbon bulunduran yağın yüksek sıcaklıkta, mikroyapıda karbon nüfuzuna sebep olabileceği için yüzeyden temizlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, cıvatalar sertleştirme fırını içerisine girmeden önce alkali deterjanla yıkanılır.

#### **3) Kurutma**

Kontrollü fırın atmosferine su buharı girişini engellemek için cıvatalar sertleştirme fırınına girmeden önce yıkama sonrası kurutulur.

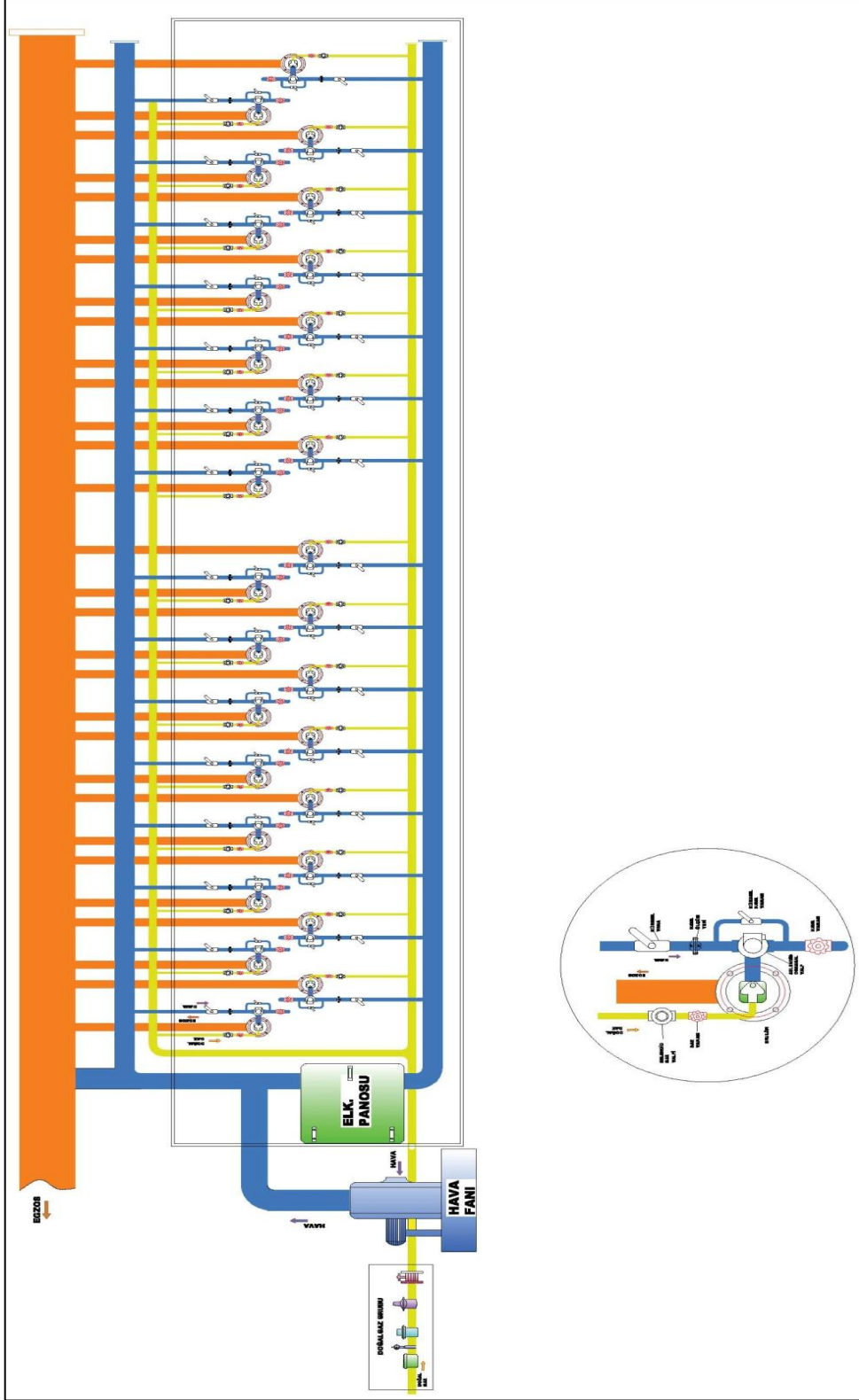
#### **4) Sertleştirme Fırını**

Sertleştirme fırınında 30 adet brülör bulunur. Cıvatalar 860-900 °C'ye ısıtılır. Homojen bir östenitik yapının elde edilebilmesi için cıvatalar, fırın içerisinde malzeme cinsi ve çaplarına uygun olarak 45-60 dakika bekletilir. Fırın içerisinde cıvata yüzeyine yabancı bir elementin, örneğin karbon ya da oksijen, nüfuzunu engellemek için koruyucu ve reaksiyona girmeyen bir gaz atmosferi oluşturulur. Bunun için azot ağırlıklı bir gaz karışımı kullanılmaktadır. Oda sıcaklığında hacim merkezli kübik kristal yapıya sahip

olan cıvata malzemesi, sertleştime sıcaklığında kararlı olan yzey merkezli kübik kristal yapıya, östenite dönüşür.

Sertleştirme fırınının genel kurulum şeması şekil 3.4'te, sertleştirme fırını brülör yerleşim planı ise şekil 3.5'te verilmiştir.





Şekil 3.5. Sertleştirme fırını brülör yerleşim planı

5) Soğutma (Su Verme)

Östenitik yapıyı martensit yapıya dönüştürmek için cıvatalar, ısı iletim katsayısı yüksek olan özel bir yağa daldırılır. Bu sayede, daha kararsız olan hacim merkezli tetragonal yapı oluşur.

6) Alkali Deterjanla Yıkama

Cıvatalar, soğutma yağından çıktığında, yüzeydeki yağın temizlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, cıvatalar alkali deterjanla menevişleme fırınına girmeden önce yıkanır.

7) Kurutma

Fırın atmosferine su buharı girişini engellemek için cıvatalar, yıkama sonrası menevişleme fırınına girmeden önce kurutulur.

8) Menevişleme Fırını

Menevişleme fırınında 12 adet brülör bulunur. Cıvatalar içerdikleri karbon oranına göre 400-650°C'ye ısıtılır ve martensit yapıya gerekli sünekliğin kazandırılması için 45-60 dakika bekletilir. Menevişleme fırınında kontrollü bir atmosfere ihtiyaç yoktur.

Menevişleme fırınının genel kurulum şeması Şekil 3.6'te, menevişleme fırını brülör yerleşim planı ise Şekil 3.7'te verilmiştir.





**9) Soğutma (Bor Yağında)**

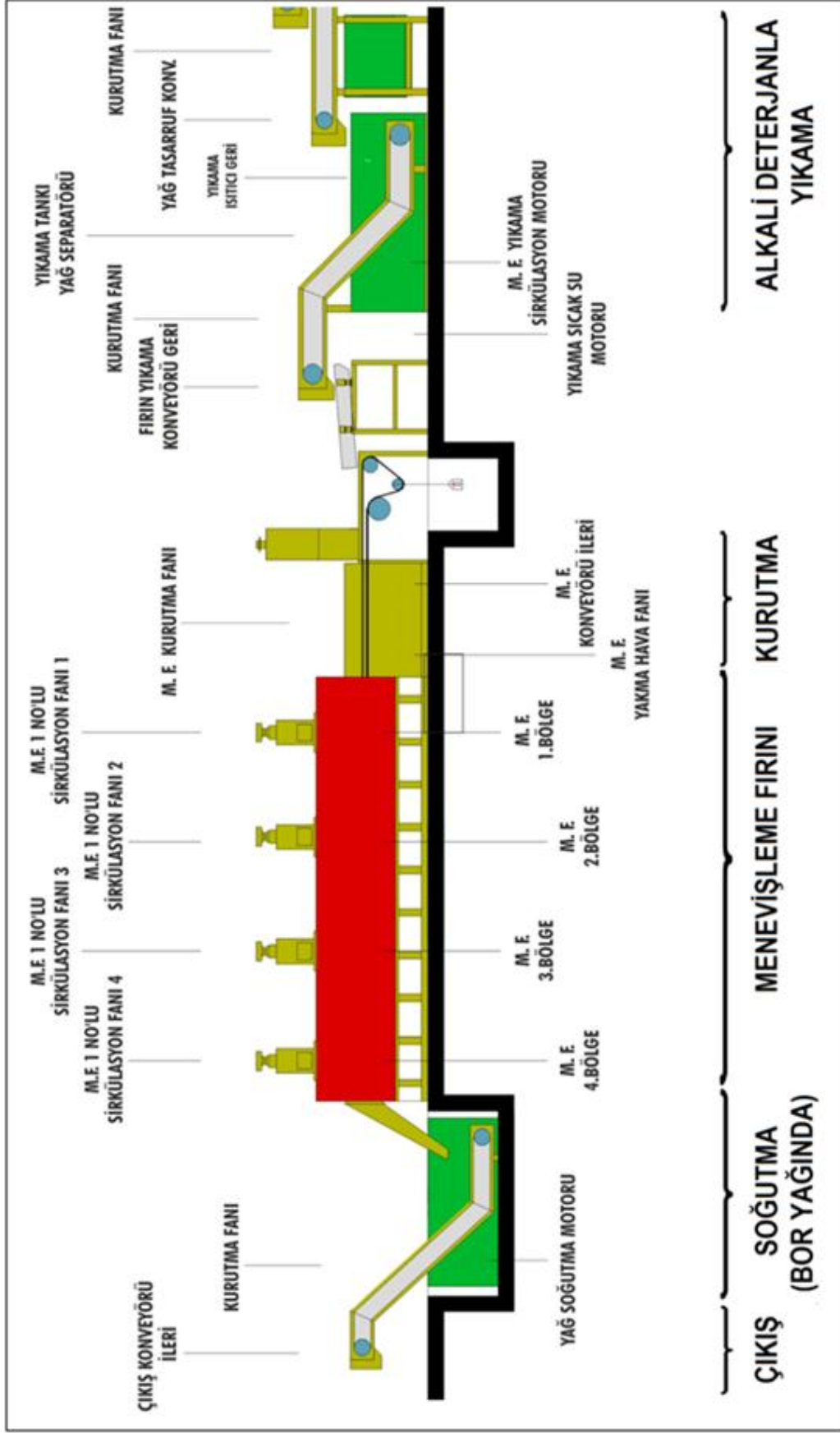
Meneviş sıcaklığındaki malzemeyi oda sıcaklığına uygun şekilde soğutmak ve yüzeyde koruyucu siyah bir katman oluşturmak için menevişleme fırınından çıkan cıvatalar, % 5 bor yağı ve % 95 sudan oluşan banyoya daldırılır.

**10) Çıkış**

Malzemeler konveyör yardımıyla bor yağı banyosundan çıkarılır ve kaplama ya da paketleme için kasalara konulur.

Fırına ait işlem akışı Şekil 3.8'de gösterilmiştir.





Şekil 3.8. Isıl işlem fırını iş akışı

## 4. YANMA VE TEORİK YANMA HESAPLAMALARI

### 4.1. Yanma ve Yakıtlar

Isı enerjisi verecek şekilde yanabilen herhangi bir maddeye yakıt denir. En iyi bilinen yakıtlar esas olarak hidrojen ve karbondan meydana gelir. Bu yakıtlara, hidrokarbon yakıtlar denir ve  $C_nH_m$  genel formülü ile gösterilirler. Her fazda hidrokarbon yakıt bulunur. Örnek olarak kömür, gaz yağı ve doğal gaz verilebilir [43, 44].

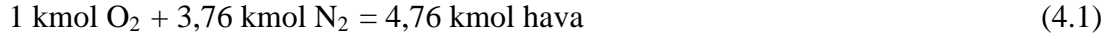
Kömürün ana bileşeni karbondur. Kömür değişen miktarlarda oksijen, hidrojen, azot, kükürt, nem ve kül içerir. Sıvı hidrokarbon yakıtlar çok farklı hidrokarbonların bir karışımı olmasına rağmen, genellikle kolay olsun diye tek bir hidrokarbon olarak düşünülür. Örneğin, benzin oktan  $C_8H_{18}$  olarak ve mazot  $C_{12}H_{26}$  dodekan olarak işlem görür. Gaz hidrokarbon yakıtlardan olan doğal gaz metan ve az miktarda diğer gazların bir karışımıdır ve sık sık metan ( $CH_4$ ) olarak işlem görür [43].

Doğal gaz ya gaz kuyularından veya doğal gaz bakımından zengin petrol kuyularından üretilir. Doğal gaz esas olarak metandan oluşmaktadır. Ancak, az miktarda etan, propan, hidrojen, helyum, karbondioksit, azot, hidrojen sülfür ve su buharı da içerir [43].

Bir yakıtın büyük miktarda enerji vererek oksitlenme tepkimesine yanma denir. ISO tarafından yapılan tanımlamaya göre yanma, “genellikle alevlenme ve/veya ışıma ve/veya duman eşliğinde bir maddenin ısı vererek oksijenle reaksiyonu” olarak ifade edilmektedir [43, 44].

Yanma işlemi, serbest ve kolay elde edilme gibi nedenlerle, en sık kullanılan oksitleyici havadır. Bu yüzden, havanın bileşimi yanma reaksiyonu açısından önemlidir. Mol veya hacimce kuru hava % 20,9 oksijen, % 0,9 argon ve az miktarda karbondioksit, helyum, neon ve hidrojen den meydana gelir. Yanma işlemi

incelenirken, havadaki argon azot olarak işlem görür ve eser miktarda bulunan diğer gazlar göz ardı edilir. O zaman, kuru hava, yaklaşık molce % 21 oksijen ve % 79 azotdan ibarettir. Bu nedenle, yanma odasına giren her mol oksijen  $0,79/0,21=3,76$  mol azot bulunur [43, 45]. Diğer bir ifadeyle,



Yanma sırasında, azot inert gaz olarak davranır ve çok az miktarda azot oksit oluşturulmasının dışında, diğer elementler ile tepkimeye girmez. Bununla beraber, azotun varlığı bile yanma sonucunu önemli ölçüde etkiler. Çünkü, genellikle büyük miktarlarda azot yanma odasına düşük sıcaklıkla girer hatırı sayılır büyük bir sıcaklıkta çıkar. Yanma odasına giren hava normal olarak üzerinde düşünölmeye değer miktarda su buharı içerir. Yanma işlemlerinin çoğunda, nem ve yanma sırasında oluşan H<sub>2</sub>O 'da, azot gibi inert gaz olarak varsayılabılır. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda, su buharının ibrazı H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> ile birlikte H<sub>2</sub>O ve OH'e ayrışmaktadır. Yanma gazları su buharının çığlenme noktasının altına soğuduğunda, bir miktar nem yoğunlaşır. Su damlaları yanma gazları içinde bulunan kükürtdioksit ile birleşerek korozyona neden olan sülfürik asit oluşturduğu için çığlenme noktasının önceden bilinmesi çok önemlidir [43].

Yanma işlemi sırasında, tepkimeden önce bulunan bileşenlere girdiler ve tepkimeden sonra bulunan bileşenlere ürünler denir. Örneğın, Eşitlik 4.2'de verilen 1 kmol karbonun, 1 kmol saf oksijen ile karbon dioksit oluşturarak yanması dikkate alındığında, C ve O<sub>2</sub> yanmadan önce var olduğu için girdiler ve CO<sub>2</sub> yanmadan sonra ortamda olduğu için üründür [43, 44].



Bir girdi, yanma odasında kimyasal olarak tepkimeye girmemektedir. Eğer, karbon saf oksijen yerine hava ile yanarsa, yanma eşitliğinin her iki tarafında da N<sub>2</sub> olacaktır. Yani, N<sub>2</sub> hem ürün, hem de girdi olarak görünecektir [43, 45].

Yakıtın oksijen ile temas etmesi yanma işleminin başlaması için yeterli değildir. Yanmanın başlaması için yakıt, tutuşma sıcaklığının üzerine getirilmelidir. Bazı maddelerin atmosferde bulunan havadaki minimum tutuşma sıcaklıkları yaklaşık olarak benzin 260 °C, karbon 400 °C, hidrojen 580 °C, karbonmonoksit 610 °C ve metanın 630 °C şeklindedir. Yakıtın oksijen ile temas etmesi ve tutuşma sıcaklığının üzerinde olması dışında, yanmanın başlaması için yakıt ve hava oranları yanma için uygun aralıkta olmalıdır. Örneğin, doğal gaz % 5' den küçük yaklaşık % 15'den büyük derişimlerde yanmayacaktır [43].

Kimyasal tepkimeler kütle korunumu ilkesine dayanarak denkleştirilmektedir. Kütle korunumu ilkesi, kimyasal tepkimeler sırasında her bir elementin toplam kütlesi sabit kalır şeklinde ifade edilebilir. Diğer bir ifadeyle, kimyasal tepkimenin sağ tarafındaki (ürünler) her bir elementin toplam kütlesi, element girdi ve ürünlerde farklı bileşikler içinde bulunsun bile, sol tarafındaki (girdiler) o elementin toplam kütlesine eşit olmalıdır. Bir elementin toplam atom sayısı onun toplam kütlesinin atom kütlesine bölümü olduğu için elementin toplam atom sayısı da kimyasal tepkime sırasında sabit kalır [43, 44].

Yanma işlemlerinin analizinde, yakıt ve havanın sayısal olarak ifadesi için kullanılan büyüklük hava-yakıt oranı (HY)'dır. Genellikle kütleye göre ifade edilir ve yanma işlemlerinde havanın kütlesinin yakıtın kütlesine oranı olarak tanımlanır.

$$HY = m_{\text{hava}} / m_{\text{yakıt}} \quad (4.3)$$

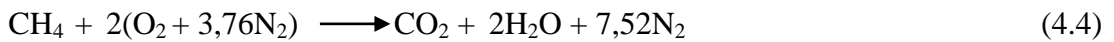
Maddenin kütlesi  $m$ ,  $m=NM$ , bağıntısı ile  $N$  mol sayısına bağlıdır. Burada,  $M$ , mol kütlesidir. Hava-yakıt oranı havanın mol sayısının yakıtın mol sayısına oranı şeklinde, mol sayısına göre de ifade edilebilir. Hava-yakıt oranının tersi yakıt-hava oranıdır [43, 45].

## 4.2. Kuramsal Ve Gerçek Yanma İşlemleri

Yanmanın tam olduğunu varsayarak bir yakıtın yanmasını incelemek çoğu zaman daha uygundur. Eğer, tüm karbon yanarak CO<sub>2</sub>'e, tüm hidrojen yanarak H<sub>2</sub>O'ya ve tüm kükürt (eğer varsa) yanarak SO<sub>2</sub>'ye dönüşürse bileşenleri tamamen yanar. Tersi bir durumda, ürünler içinde yanmamış yakıt veya C, H<sub>2</sub>, CO ve OH gibi bileşenler varsa yanma işlemi tamamlanmamıştır [43, 44].

Yetersiz oksijen tam yanmanın açık bir nedenidir ama tek nedeni değildir. Tam olmayan yanma, yanma odasının tam yanma için gerekenden daha az oksijen olduğu zaman bile olabilir. Bu yakıt ve oksijenin temas ettiği sınırlı bir süre içinde yanma odasında yeterli karışma olmamasından kaynaklanmış da olabilir. Yarım yanmanın diğer bir nedeni de yüksek sıcaklıklarda önemli olan ayrışmadır. Oksijen karbon ile birleşmeden daha çok hidrojen ile birleşme eğilimindedir. Bu yüzden, normalde yakıtta bulunan hidrojen, tam yanma için gerekenden daha az oksijen olduğu zaman bile, H<sub>2</sub>O vererek tamamen yanar. Bununla beraber, karbonun bir kısmı ürünler içinde CO olarak veya düz karbon tanecikleri (is) olarak bulunur [43].

Bir yakıtın tam yanması için gereken minimum hava miktarına stokiyometrik veya kuramsal hava denir. Buna göre, bir yakıt kuramsal hava ile tamamen yandığı zaman, ürün gazlarının içinde hiç elementel oksijen bulunmayacaktır. Kuramsal hava kimyasal olarak doğru hava veya % 100 kuramsal hava olarak da anılır. Kuramsal havadan daha az hava ile meydana gelen ideal yanma işlemine yakıtın stokiyometrik veya kuramsal yanması denir. Örneğin, metanın stokiyometrik yanması



şeklinde olur. Kuramsal yanma ürünlerinde yanmamış metan ve C, H<sub>2</sub>, CO veya serbest oksijen bulunmaz [43, 44, 45].

Gerçek yanma işlemlerinde, tam yanmayı sağlamak ve yanma odasının sıcaklığının kontrol etmek için stokiyometrik miktardan fazla hava miktarına fazla hava denir.

Genellikle, fazla hava miktarı stokiyometrik havaya dayanarak fazla hava yüzdesi veya kuramsal hava yüzdesi olarak ifade edilir. Örneğin, % 50 fazla hava % 150 kuramsal havaya ve % 200 fazla hava % 300 kuramsal havaya eşdeğerdir. Stokiyometrik hava % 100 daha fazla hava olarak veya yüzde 100 kuramsal hava olarak ifade edilebilir. Stokiyometrik miktardan daha az havaya eksik hava denir ve sık sık yüzde eksik hava olarak ifade edilir. Örneğin, % 90 kuramsal hava, % 10 eksik havaya eşdeğerdir. Yanma işleminde kullanılan hava miktarı gerçek yakıt-hava oranının kuramsal yakıt hava oranına oranı demek olan eşdeğerlik oranı ile ifade edilir [43, 44, 45].

Yanma işleminin tam olduğu varsayıldığında, kullanılan yakıt ve havanın miktarları tam olarak bilindiğinde ürün bileşimi önceden tespit edilebilir. Bu durumda, yapılması gereken işlem, hiçbir ölçüme gerek kalmadan, yanma eşitliğinde yer alan her bir elemente kütle denkliliğini uygulamaktır. Bununla beraber, gerçek yanma işlemlerinde yapılacak iş o kadar basit değildir. Gerçek yanma işlemleri fazla hava olsa bile çok zor tamamlanır. Bu yüzden, yalnız kütle denkliliğine dayanarak ürün bileşimini belirlemek imkansızdır. O zaman, sahip olunan tek seçenek, üründe bulunan her bir bileşenin miktarını doğrudan ölçmektir [43].

Yanma olayının dengesi ve sürekliliği üç temel üzerine kurulmuştur. Doğal gaz yanması için bu için temeller aşağıda verilmiştir [15, 46].

Çalkantı (Türbülans) : Yakıt ve hava kütlelerinin birbiri ile temasını sağlayan en önemli yanma ögesidir. Yakıt ve hava birbiriyle temas etmediği sürece yanma olayı gerçekleşmez. Gazlar yapıları gereği her oranda birbiri ile kolayca karışmaya yatkındırlar. Doğal gaz molekülleri havadan % 60 daha hafif ve % 130 hızlıdırlar. Bu nedenle, hava içine kolayca sızarak dağılırlar.

Doğal gaz ve hava moleküllerinin bir araya getirilmesi yanma için gereklidir. Ancak, belirli oranlar dışında kalan zengin ve fakir karışımlar yanma olayının başlaması için yeterli olmamaktadır. Bu iki cins molekülden birinin yetersizliği

halinde seyreltik hal şartları geçerli olmakta ve yanma başlayamamaktadır [15, 46].

Deneyle göre doğal gazın hava içindeki alt yanma karışımı % 4,5, üst yanma karışımı ise % 13,5'dur. Bu sınırlar dışında doğal gaz-hava karışımı yanıcı değildir. Yanma şiddetinin en yüksek olduğu tam yanma karışımı % 9,5 doğal gaz ve % 90,5 hava içeren karışımdır. Tam yanma karışımı, 1 m<sup>3</sup> doğal gaz ve 9,5 m<sup>3</sup> hava karışımından oluşmaktadır. Yanıcı karışımın akış hızının artması ve CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> gibi atıl gazların bulunması yanma aralığını daraltıcıdır. Az miktardaki su buharı karışımı yanmaya teşvik edici olurken, yüksek nem oranları caydırıcı etki göstermektedir [15, 46].

**Sıcaklık** : Yanmanın diğer bir önemli ögesidir. Yakıt ve hava molekülleri bir araya geldikten sonra bu karışımı tahrik edecek bir dış etki gereklidir. Diğer bir ifadeyle hava molekülleri ile yakıt molekülleri arasında ilginin şiddetlenmesi gerekir. Bu olaya tutuşma denir. Tutuşma genellikle bir dış kaynak tarafından gerçekleşir. Bu kaynak sürtünme, sıkışma ve çarpmalarda oluşan ısı veya kıvılcım ile bir başka alev olabilir [15, 46].

Standart sıcaklık ve basınçta bulunan hava-yakıt karışımının yüzdesi, belirli sınırlar içinde olduğunda, yakıt kendi kendine tutuşarak yanma tepkimesi gerçekleşir. Bu sınırlar alt ve üst tutuşma sınırlarıdır. Sıcaklık ve basınç, her ikisi de bu sınırlara etki eder. Karışımın sıcaklığı artıkça, üst tutuşma sınırı büyürken, alt tutuşma sıcaklığı küçülür [15, 46].

Karışım basıncının, atmosfer basıncının altına inmesi durumunda üst tutuşma sınırı azalır ve alt tutuşma sınırı artar. Bununla beraber, karışım basıncının atmosfer basıncının üzerine çıkması durumunda üst tutuşma sınırı artarak alt tutuşma sınır göreceli olarak sabit kalır [15, 46].

Doğal gazın tutuşma sıcaklığı; bileşimine, doğal gaz-hava karışım oranına ve fiziksel şartlara bağlı olarak değişmektedir. Bu değer tam yanma karışımı için yaklaşık olarak 650 °C'dir. Zengin gaz karışımlarının tutuşma sıcaklığı daha yüksektir [46].

**Zaman** : Yanma işleminin oluşabilmesi için gerekli olan üçüncü öge zamandır. Çekirdek moleküllerinin çevresinde, tutuşma ile birlikte aniden enerji açığa çıkar ve çekirdek görevini üstlenerek, yanmayı zincirleme tepkimeler halinde komşu moleküllere aktarırlar. Dış uyarı, zincirdeki ilk baklanın oluşması için gereklidir. Ancak, daha sonraki baklalar moleküller arası etkileşimin ürünleri olarak kendiliğinden gelişeceği için dış uyarıya sürekli olarak ihtiyaç duyulmayacaktır. Yanma zaman ihtiyacı, yakıt cinsine, karışımın oranına, karışımın akış hızına ve ortamın sıcaklığına göre değişir [46].

### **4.3. Doğal Gazla Çalışan Brülörler İçin Teorik Yanma Hesaplamaları**

Isıl işlem fırınımızda doğal gazla çalışan brülörlerde kullanılan doğal gazın özellikleri, alt ısıl değerleri, oksijen ihtiyacı, baca gazı bileşenleri Çizelge 4.1'de verilmiştir [47, 48, 49].

Yanma sonucu oluşan gaz halindeki ürünlere baca gazı denir. Baca gazı içerisinde karbondioksit, karbonmonoksit, su buharı, oksijen, azot ve kükürt gazları bulunur. İçinde su buharı bulunan baca gazına “ıslak baca gazı” su buharının tamamen yoğunlaşması halinde oluşan baca gazına da “kuru baca gazı” denir [50].

Yanmanın en iyi kontrolü baca gazı analizlerine dayanır. Baca gazı analizleri kullanılarak hava/yakıt oranı ve ocağa verilen fazla hava yüzdesi hesaplanabilir. Böylece, yanmanın eksik olup olmadığı, eğer eksik yanma söz konusu ise bunun nedenleri anlaşılabilir. Ocağa stokiometrik orandan daha az hava verilmesi halinde, baca gazı içindeki karbondioksit oranı düşük olur. Hava/yakıt oranı artırıldıkça bu oran da gittikçe artar ve hava/yakıt oranı belli bir değere ulaştığında, baca gazı içindeki karbondioksit yüzdesi maksimum değere ulaşır. Teorik olarak stokiometrik oranda hava kullanılması haline karşı gelen bu maksimum değeri elde etmek için

pratikte stokiometrik hava/yakıt oranından biraz daha fazla hava kullanmak gerekir. Havanın daha fazla kullanılması halinde baca gazı içindeki karbondioksit yüzdesinde yeniden düşme görülür [50, 51].

Baca gazı içinde bulunan oksijen ve karbonmonoksit yüzdelerinin de hava/yakıt oranı ile ilişkisi vardır. Hava/yakıt oranının stokiometrik havadan daha az olması halinde eksik yanma söz konusu olur ve bunun sonucu olarak baca gazı içinde fazla miktarda karbonmonoksit bulunur. Hava/yakıt oranı artırıldıkça baca gazı içindeki karbonmonoksit yüzdesinde azalma görülür. Ocağa tam yanmayı sağlayacak yeterli havanın verilmesi halinde de tamamen kaybolur. Bu hava/yakıt oranında, baca gazındaki karbondioksit değeri de maksimuma ulaşır. Hava/yakıt oranı için bu oran optimum değerdir. Havanın daha fazla artırılması halinde, baca gazı içinde serbest halde kalan oksijen yüzdesinin gittikçe arttığı, buna karşılık karbondioksit yüzdesinin yeniden azalmağa başladığı görülür [50, 52].

Baca gazının bileşimi yalnız yakıtın cinsi ve hava/yakıt oranına değil, aynı zamanda yakma koşullarına da bağlıdır. Bazı hallerde, ocağa fazla hava verilse bile yakıtı tam olarak yakabilmek mümkün olmayabilir. Bu nedenle, baca gazı analizlerinde fazla oksijen yanında karbonmonoksite de rastlanabilir. Bu durum ocak içindeki yanma koşullarının uygun olmadığını gösterir. Bir yakıtın kimyasal bileşimi ve kullanılan hava/yakıt oranı belliyse, tam yanmanın oluştuğu varsayılarak baca gazları hesaplanabilir [51, 52].

Çizelge 4.1. Doğal gazın özellikleri, oksijen ihtiyacı ve baca gazı bileşenleri

Yanıcı Gaz		Alt Isıl Değeri		Oksijen İhtiyacı		Baca Gazı Terkibi					
						Karbondioksit		Su Buharı		Azot	
Tanımı	Miktarı	Oranı İçin	Miktarı İçin	Oranı İçin	Miktarı İçin	Oranı İçin	Miktarı İçin	Oranı İçin	Miktarı İçin	Oranı İçin	Miktarı İçin
	%	kcal/m <sup>3</sup>	kcal/m <sup>3</sup>	-	m <sup>3</sup> O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> yakıt	-	m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> yakıt	-	m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O/m <sup>3</sup> yakıt	-	m <sup>3</sup> N <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> yakıt
	1	2	3=1x2	4	5=1x4	6	7=1x6	8	9=1x8	10	11=1x10
H <sub>2</sub>	0,000	2 570	-	0,5	-	-	-	1,0	-	-	-
CH <sub>4</sub>	0,819	8 550	7 002	2,0	1,638	1,0	0,819	2,0	1,638	-	-
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,035	18 070	632	3,5	0,1225	2,0	0,070	3,0	0,105	-	-
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,003	22 380	67	5,0	0,015	3,0	0,009	4,0	0,012	-	-
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,001	29 330	29	6,5	0,0065	4,0	0,004	5,0	0,005	-	-
CO	0,000	3 020	-	0,5	-	1,0	-	-	-	-	-
CO <sub>2</sub>	0,008	-	-	-	-	1,0	-	-	-	-	-
N <sub>2</sub>	0,134	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	0,134
O <sub>2</sub>	0,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Toplam	1,0	H <sub>u</sub> =	7 731	O <sub>min</sub> =	1,782	V <sub>CO<sub>2</sub></sub> =	0,902	V <sub>H<sub>2</sub>O</sub> =	1,760	V <sub>N<sub>2</sub></sub> =	0,134

Çizelge 4.1’de verilen oksijen ihtiyacı için kullanılan kimyasal denklemler aşağıda verilmiştir.



Tam yanma durumu ( $\lambda = 1$ ) için teorik hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

- 1) Çizelge 4.1’den minimum oksijen miktarı

$$O_{\min} = 1,78 \text{ m}^3\text{O}_2/\text{yakıt} \quad (4.10)$$

- 2) Yakma havası

$$L_{\min} = O_{\min} / 0,21 = 8,48 \text{ m}^3\text{O}_2/\text{hava} \quad (4.11)$$

- 3) Çizelge 4.1’den yanmış gaz miktarları

$$V_{\text{CO}_2} = 0,90 \text{ m}^3\text{CO}_2/\text{yakıt} \quad (4.12)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,13 \text{ m}^3\text{N}_2/\text{yakıt} \quad (4.13)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 1,76 \text{ m}^3\text{H}_2\text{O}/\text{yakıt} \quad (4.14)$$

- 4) Azot miktarları

$$V_{\text{N}_2\text{Y}} = 0,13 \text{ m}^3\text{N}_2/\text{yakıt} \text{ (yakıttan)} \quad (4.15)$$

$$V_{\text{N}_2\text{H}} = 0,79 \times L_{\min} = 0,79 \times 8,48 = 6,70 \text{ m}^3\text{N}_2/\text{hava} \text{ (havadan)} \quad (4.16)$$

$$\Sigma V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2\text{Y}} + V_{\text{N}_2\text{H}} = 0,134 + 6,699 = 6,83 \text{ m}^3\text{N}_2 \quad (4.17)$$

## 5) Baca gazı miktarları

a) Kuru baca gazı:

$$V_{ATR} = V_{CO_2} + \Sigma V_{N_2} = 0,902 + 6,833 = 7,735 \text{ m}^3 \quad (4.18)$$

b) Yaş baca gazı:

$$V_{AF} = V_{ATR} + V_{H_2O} = 7,735 + 1,76 = 9,50 \text{ m}^3 \quad (4.19)$$

## 6) Baca gazı oranları

a) Kuru baca gazı:

$$V_{CO_2_{max}} = \frac{V_{CO_2}}{V_{ATR}} \times 100 = \frac{0,902}{7,735} \times 100 = \% 11,60 \quad (4.20)$$

$$V_{N_2_{max}} = \frac{\Sigma V_{N_2}}{V_{ATR}} = \frac{6,833}{7,735} = \% 88,34 \quad (4.21)$$

b) Yaş baca gazı:

$$V_{CO_2_{max}} = \frac{V_{CO_2}}{V_{AF}} = \frac{0,902}{9,495} \times 100 = \% 9,50 \quad (4.22)$$

$$V_{N_2_{max}} = \frac{\Sigma V_{N_2}}{V_{AF}} = \frac{6,833}{9,495} \times 100 = \% 71,96 \quad (4.23)$$

$$V_{H_2O_{max}} = \frac{V_{H_2O}}{V_{AF}} = \frac{1,76}{9,495} \times 100 = \% 18,53 \quad (4.24)$$

## 7) Çiğ noktası (yoğuşma) sıcaklığı

$$V_{H_2O_{max}} = \frac{V_{H_2O}}{V_{AF}} \times 100 = \frac{1,76}{9,495} \times 1000 = 106,30 \text{ m}^3 \quad (4.25)$$

Doymuş buhar tablosundan çığ noktası (yoğuşma) sıcaklığı 59 °C olarak bulunur [43].

Hava fazlalığı ile yanma durumu ( $\lambda = 1,25$ ) için teorik hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

1) Çizelge 4.1'den minimum oksijen miktarı.

$$O_{\min} = 1,78 \text{ m}^3 \text{O}_2/\text{yakıt} \quad (4.26)$$

2) Yakma havası

$$L_{\min} = O_{\min} / 0,21 = 1,782 / 0,21 = 8,48 \text{ m}^3 \text{O}_2/\text{hava} \quad (4.27)$$

$$L_{\min} = \lambda \times L_{\min} = 1,25 \times 8,48 = 10,60 \text{ m}^3 \text{O}_2/\text{hava} \quad (4.28)$$

3) Yanmış gazlar

$$V_{\text{CO}_2} = 0,90 \text{ m}^3 \text{CO}_2/\text{yakıt} \quad (4.29)$$

$$V_{\text{N}_2\text{Y}} = 0,13 \text{ m}^3 \text{N}_2/\text{yakıt} \text{ (yakıttan)} \quad (4.30)$$

$$V_{\text{N}_2\text{min}} = 0,79 \times L_{\min} = 0,79 \times 8,48 = 6,70 \text{ m}^3 \text{ (havadan)} \quad (4.31)$$

$$\Sigma V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2\text{min}} + V_{\text{N}_2\text{Y}} = 0,134 + 6,699 = 6,83 \text{ m}^3 \quad (4.32)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 1,76 \text{ m}^3 \quad (4.33)$$

4) Baca gazı miktarları

a) Kuru baca gazı:

$$V_{\text{ATR}} = V_{\text{CO}_2} + \Sigma V_{\text{N}_2} = 0,902 + 6,833 = 7,74 \text{ m}^3 \quad (4.34)$$

b) Yaş baca gazı:

$$V_{\text{AF}} = V_{\text{ATR}} + V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,735 + 1,76 = 9,50 \text{ m}^3 \quad (4.35)$$

## 5) Baca gazı miktarları

## a) Kuru duman gazı:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,90 \text{ m}^3 \text{CO}_2/\text{yakıt} \quad (4.36)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,13 \text{ m}^3 \text{N}_2/\text{yakıt} \text{ (yakıttan)} \quad (4.37)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \times L_{\text{min}} \text{ (havadan)} \quad (4.38)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \times 8,48 = 6,70 \text{ m}^3 \text{N}_2/\text{hava} \quad (4.39)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \times (\lambda-1) \times L_{\text{min}} \text{ (hava fazlalığından)} \quad (4.40)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \times (1,25-1) \times 8,48 = 1,67 \text{ m}^3 \text{N}_2 \quad (4.41)$$

$$\Sigma V_{\text{N}_2} = 0,134 + 6,659 + 1,674 = 8,50 \text{ m}^3 \text{N}_2 \quad (4.42)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \times (\lambda-1) \times L_{\text{min}} \quad (4.43)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \times (1,25-1) \times 8,48 = 0,46 \text{ m}^3 \text{O}_2 \quad (4.44)$$

$$V_{\text{ATR}} = V_{\text{CO}_2} + \Sigma V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} = 0,902 + 8,5 + 0,4452 = 9,85 \text{ m}^3 \quad (4.45)$$

## b) Yaş duman gazı:

$$V_{\text{AF}} = V_{\text{ATR}} + V_{\text{H}_2\text{O}} = 9,847 + 1,76 = 11,60 \text{ m}^3 \quad (4.46)$$

## 6) Baca gazı oranları.

## a) Kuru baca gazı:

$$V_{\text{CO}_2\text{max}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{ATR}}} = \frac{0,902}{9,847} = \% 9,16 \quad (4.47)$$

$$V_{\text{N}_2\text{max}} = \frac{\Sigma V_{\text{N}_2}}{V_{\text{ATR}}} = \frac{8,5}{9,847} = \% 86,32 \quad (4.48)$$

$$V_{\text{O}_2\text{max}} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{ATR}}} = \frac{0,4452}{9,847} = \% 4,50 \quad (4.49)$$

b) Yaş baca gazı:

$$V_{\text{CO}_2\text{max}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{AF}}} = \frac{0,902}{11,6} = \% 7,78 \quad (4.50)$$

$$V_{\text{N}_2\text{max}} = \frac{\Sigma V_{\text{N}_2}}{V_{\text{AF}}} = \frac{8,5}{11,6} = \% 73,27 \quad (4.51)$$

$$V_{\text{O}_2\text{max}} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{AF}}} = \frac{0,445}{11,6} = \% 3,84 \quad (4.52)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}\text{max}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{AF}}} = \frac{1,76}{11,6} = \% 15,17 \quad (4.53)$$

7) Çiğ noktası (yoğuşma) sıcaklığı

$$V_{\text{H}_2\text{O}\text{max}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{AF}}} = \frac{1,76}{11,6} \times 1\,000 = 151,72 \text{ m}^3 \quad (4.54)$$

Doymuş buhar tablosundan çiğ noktası (yoğuşma) sıcaklığı 54 °C olarak bulunur[43].

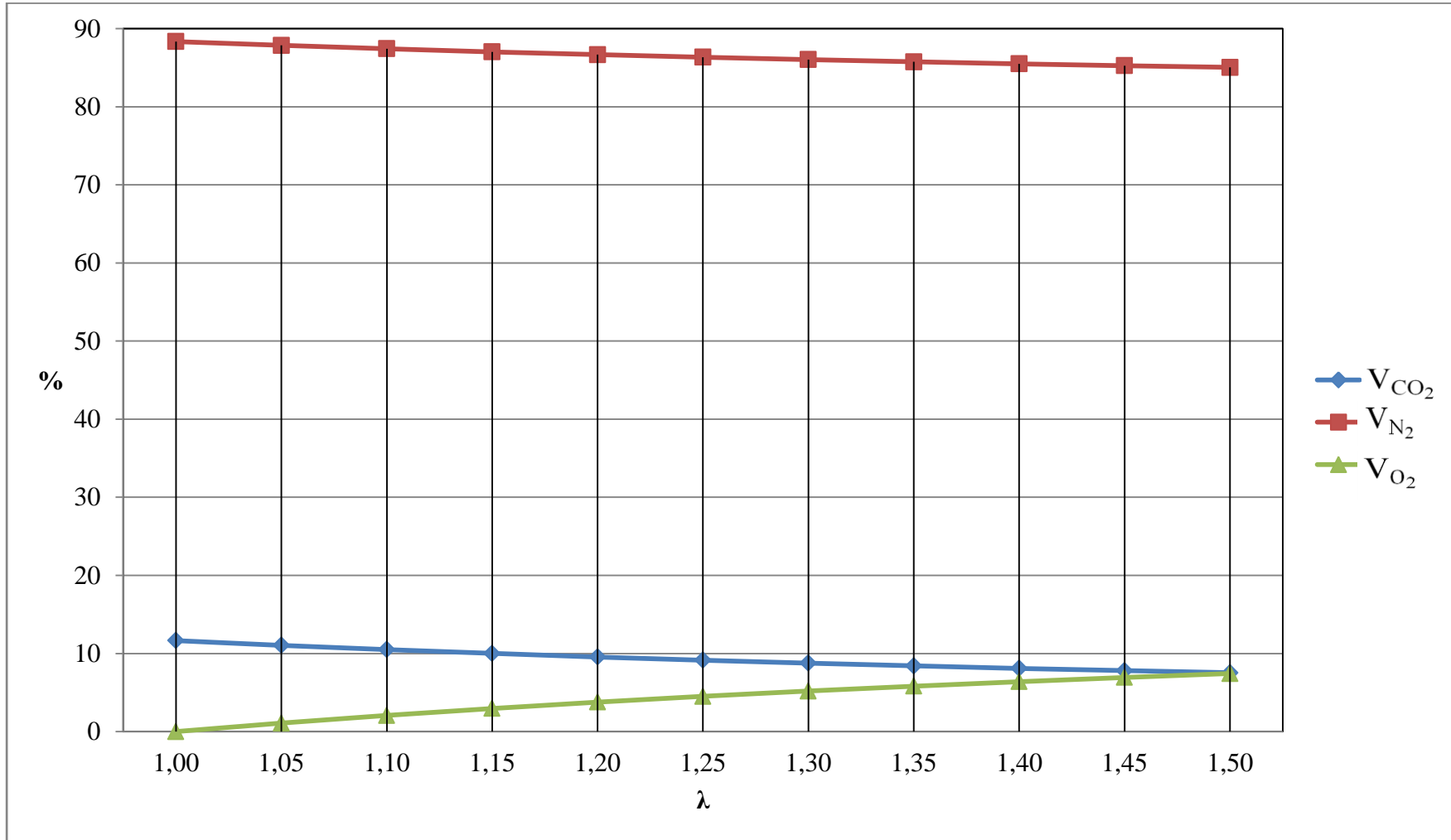
Çizelge 4.2’de hava fazlalık katsayısı 1–1,05–1,10–1,15–1,20–1,25–1,30–1,40–1,45 ve 1,50 değerleri için oksijen ihtiyacı, yanmış gazlar, azot miktarları, Çizelge 4.3’de baca gazı, kuru duman gazı ve yaş duman gazı miktarları verilmiştir. Şekil 4.1’de teorik kuru baca gazları, Şekil 4.2’de teorik yaş baca gazları grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 4.2. Farklı hava fazlalık katsayıları için oksijen ihtiyacı, yanmış gazlar, azot miktarları

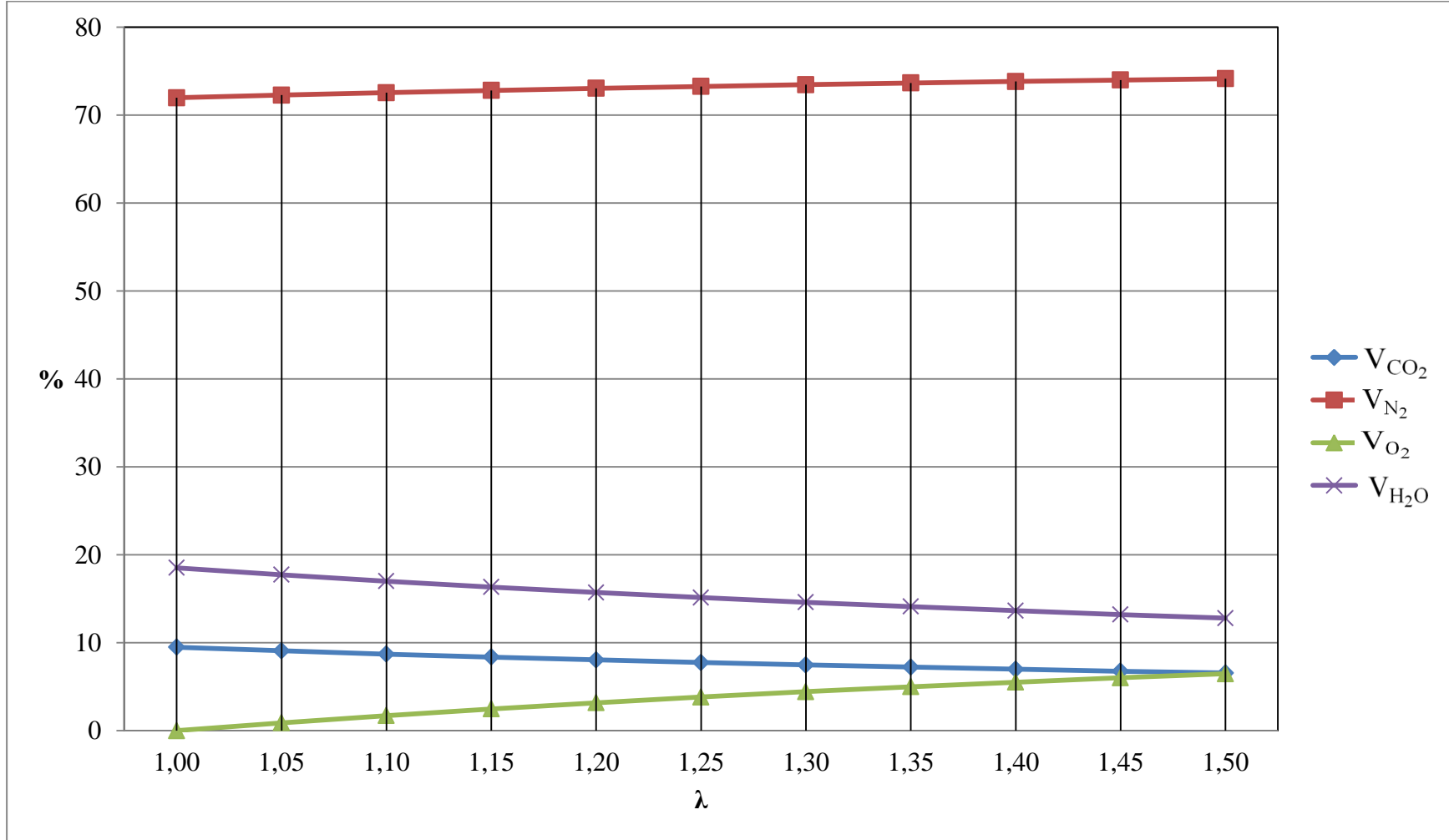
$\lambda$	Min. O <sub>2</sub> Miktarı	Yakma Havası (L <sub>min</sub> )	Yanmış Gazlar			Azot Miktarı	
			V <sub>CO<sub>2</sub></sub>	V <sub>N<sub>2</sub></sub>	V <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Yakıttan	Havadan
	(m <sup>3</sup> O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> yakıt)	(m <sup>3</sup> O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> hava)	(m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> yakıt)	(m <sup>3</sup> N <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> yakıt)	(m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O/m <sup>3</sup> yakıt)	(m <sup>3</sup> N <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> yakıt)	(m <sup>3</sup> N <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> hava)
1,00	1,78	8,47	0,9	0,13	1,76	0,13	6,7
1,05	1,78	8,91	0,9	0,13	1,76	0,13	7,04
1,10	1,78	9,33	0,9	0,13	1,76	0,13	7,37
1,15	1,78	9,76	0,9	0,13	1,76	0,13	7,71
1,20	1,78	10,18	0,9	0,13	1,76	0,13	8,04
1,25	1,78	10,61	0,9	0,13	1,76	0,13	8,38
1,30	1,78	11,03	0,9	0,13	1,76	0,13	8,72
1,35	1,78	11,46	0,9	0,13	1,76	0,13	9,05
1,40	1,78	11,88	0,9	0,13	1,76	0,13	9,39
1,45	1,78	12,3	0,9	0,13	1,76	0,13	9,72
1,50	1,78	12,73	0,9	0,13	1,76	0,13	10,06

Çizelge 4.3. Farklı hava fazlalık katsayıları için baca gazı, kuru duman gazı ve yaş duman gazı miktarları

$\lambda$	Baca Gazı		Kuru Duman Gazı			Yaş Duman Gazı			
	Kuru	Yaş	$V_{CO_2}$	$V_{N_2}$	$V_{O_2}$	$V_{CO_2}$	$V_{N_2}$	$V_{O_2}$	$V_{H_2O}$
	Baca	Baca							
	Gazı	Gazı							
( $m^3$ )	( $m^3$ )	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
1,00	7,74	9,50	11,65	88,35	0,00	9,50	71,98	0,00	18,53
1,05	8,16	9,92	11,05	87,86	1,09	9,09	72,28	0,90	17,73
1,10	8,59	10,35	10,50	87,42	2,07	8,72	72,55	1,72	17,01
1,15	9,01	10,77	10,01	87,03	2,97	8,37	72,81	2,48	16,34
1,20	9,44	11,20	9,56	86,67	3,78	8,06	73,04	3,18	15,72
1,25	9,86	11,62	9,15	86,34	4,52	7,76	73,26	3,83	15,14
1,30	10,29	12,05	8,77	86,03	5,20	7,49	73,46	4,44	14,61
1,35	10,71	12,47	8,42	85,75	5,82	7,23	73,65	5,00	14,11
1,40	11,13	12,89	8,10	85,50	6,40	7,00	73,83	5,53	13,65
1,45	11,56	13,32	7,80	85,26	6,94	6,77	73,99	6,02	13,21
1,50	11,98	13,74	7,53	85,04	7,44	6,56	74,15	6,48	12,81



Şekil 4.1. Kuru baca gazları



Şekil 4.2. Yaş baca gazları

#### 4.4. Doğal Gazla Çalışan Brülörler İçin Eksik Yanma Durumunda Teorik Yanma Hesaplamaları

Oksitlenmenin tam olmayışından dolayı, yakıt ile havanın tam olarak karışmaması ve teorik hava miktarından daha az hava kullanılması nedeniyle tam yanma olmaz. Yanma sonu ürünleri arasında yanmamış yakıt veya C, H<sub>2</sub>, CO ve OH gibi bileşenler bulunur. Bu tip yanmaya eksik yanma adı verilir. Eksik yanma durumunda hava fazlalık katsayısı 1'in altındadır [15, 44].

Stokiometrik miktardan fazla hava verilmesine rağmen, yanma odasındaki karışım, sıcaklık ve kalış süresindeki yetersizlikler sonucu eksik yanma olabilir. Buna kısmi eksik yanma denir. Kısmi eksik yanma, sadece yakıt–hava oranının dengesizliğinin bir sonucu değildir. Yüksek sıcaklıklarda önem kazanan ayrışma nedeniyle de eksik yanma ortaya çıkabilir. Yüksek sıcaklıklarda CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O molekülleri ısıl ayrışma ile CO, H<sub>2</sub> gibi eksik yanma ürünleri doğururlar [15, 44].

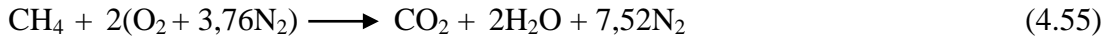
Hidrojen atomlarının oksijen atomlarını çekim kuvveti, karbon atomlarına oranla daha büyüktür. Bu nedenle, yakıt içerisindeki hidrojen, ortamda tam yanma için gerekli oksijenden daha az oksijen bulursa bile, tümüyle H<sub>2</sub>O'ya dönüşür. Buna karşılık karbonun bir bölümü yanma sonu ürünleri arasınca CO veya C parçacıkları olarak görülebilir [44].

Eksik yanma ya da kısmi eksik yanma, enerji kaybına ve hava kirliliğine sebep olacağından, yanma işlemlerinde genellikle stokiometrik miktardan daha fazla hava verilir. Hava fazlalık katsayısının 1'den büyük olduğu gerçek yanma işlemleriyle, eksik ya da kısmi eksik yanmayı karşılaştırabilmek amacıyla, hava fazlalık katsayısının 0,80–0,85–0,90 ve 0,95 olduğu değerler için teorik baca gazı emisyonlarının hesaplaması yapılmıştır. Hesaplamalar için yapılan kabuller:

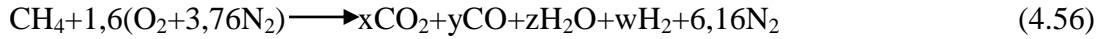
- 1) Yanma işlemi kararlı bir işlem olarak alınmıştır.
- 2) Hiçbir iş etkileşimi yoktur.
- 3) Hava ve yanma gazları ideal gazlardır.

- 4) Kinetik ve potansiyel enerjideki değişimler ihmal edilmiştir.
- 5) Yakıt-havanın sıcaklığı 25 °C olarak alınmıştır.
- 6) Yakıt-havanın basıncı 1 atm olarak alınmıştır.
- 7) Yanma sıcaklığı ortalama 1 200 K olarak alınmıştır.
- 8) Yanma denge sabiti  $K_p=1,0069$  olarak alınmıştır.
- 9) Yanma denge sabitinin belirlenmesinde su gazı dengesi dikkate alınmıştır.

Hava fazlalık katsayısı=1 ( $\lambda=1$ ) için yanma denklemi:



şeklinde olur. Hava fazlalık katsayısı 0,8 olduğunda yanma denklemi:



şeklini alır. Yanma sonunda oluşan ürünlere ait x, y, z ve w katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir. x, y, z ve w katsayılarının belirlenebilmesi için giren ve ürünler için kimyasal denge eşitlikleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$2x + y + z = 3,2 \text{ (Oksijen için)} \quad (4.57)$$

$$x + y = 1 \text{ (Karbon için)} \quad (4.58)$$

$$2z + 2w = 4 \text{ (Hidrojen için)} \quad (4.59)$$

Dört bilinmeyen ve üç denklem olduğu için bir denkleme daha ihtiyaç vardır. Dördüncü denklem için de su gazı dengesi kullanılacaktır. Su gazı dengesi;



olarak verilmektedir. Su gazı dengesi için kimyasal denge denklemi;

$$K_P = \frac{P_{H_2O} \cdot P_{CO}}{P_{H_2} \cdot P_{CO_2}} \quad (4.61)$$

olarak verilir. Kimyasal denge sabitindeki kısmi basınçlar mol cinsinden de yazılabilir. Eş. 4.61, mol cinsinden yazılırsa denge sabiti;

$$K_n = \frac{n_{H_2O} \cdot n_{CO}}{n_{H_2} \cdot n_{CO_2}} \quad (4.62)$$

olarak yazılabilir. Dördüncü denklem;

$$K_n = \frac{n_{H_2O} \cdot n_{CO}}{n_{H_2} \cdot n_{CO_2}} = \frac{z \cdot y}{w \cdot x} = 1,0069 \quad (4.63)$$

olarak yazılır. Dört bilinmeyenli, dört denklem x'e göre çözülürse, x=0,73 olarak bulunur. Eş. 4.57, Eş. 4.58, Eş. 4.59 ve Eş. 4.63 çözülürse, y=0,27- z=1,47-w=0,53 olarak bulunur. Hava fazlalık katsayısı 0,8 olduğunda yanma denklemi;



olarak verilir. Hava fazlalık katsayısı 0,8 için yanma sonucunda ortaya çıkan baca gazlarının mol ve yüzdesel dağılımları Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Hava fazlalık katsayısı 0,8 için baca gazı miktarları

Bileşen	n(mol-ürün/mol-yakıt)	%
CO <sub>2</sub>	0,73	8,12
CO	0,27	2,97
H <sub>2</sub> O	1,47	16,28
H <sub>2</sub>	0,53	5,91
N <sub>2</sub>	6,02	66,73
Toplam	9,02	100

Yanma denklemi hava fazlalık katsayısı 0,85–0,90 ve 0,95 için yazılarak çözülmüştür. Hava fazlalık katsayıları 0,85–0,90 ve 0,95 değerleri için yanma denklemleri aşağıda verilmiştir.

Hava fazlalık katsayısı 0,85 için yanma denklemi:



Hava fazlalık katsayısı 0,90 için yanma denklemi:



Hava fazlalık katsayısı 0,95 için yanma denklemi:



Hava fazlalık katsayısı 0,8 – 0,85 – 0,90 ve 0,95 için yanma sonucunda ortaya çıkan baca gazlarının mol ve yüzdesel dağılımları Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Hava fazlalık katsayısı 0,8–0,85–0,90 ve 0,95 için baca gazı miktarları

Bileşen	Hava Fazlalık Katsayısı							
	0,8		0,85		0,90		0,95	
	n	%	n	%	n	%	n	%
CO <sub>2</sub>	0,73	8,12	0,80	8,51	0,87	8,90	0,93	9,17
CO	0,27	2,97	0,20	2,14	0,13	1,33	0,07	0,69
H <sub>2</sub> O	1,47	16,28	1,60	17,04	1,73	17,70	1,87	18,44
H <sub>2</sub>	0,53	5,91	0,40	4,25	0,27	2,76	0,13	1,28
N <sub>2</sub>	6,02	66,73	6,39	68,05	6,77	69,30	7,14	70,41
Toplam	9,02	100,00	9,39	100,00	9,77	100,00	10,14	100,00

## 5. DOĞAL GAZ BRÜLÖRLERİ VE BRÜLÖR TASARIMI

### 5.1. Doğal Gaz Brülörleri

Gaz yakıt brülörleri daha çok doğalgaz yakan brülörler olarak ortaya çıkmaktadır. Doğal gaz brülörü hava ile yakıtı uygun oranlarda ve kontrollü olarak karıştırarak verimli bir yanmayı sağlayacak karışımı oluşturmaktadır. Gaz yakıt brülörleri dizayn edilirken, yanma veriminin yükseltilmesi ve çevre kirliliğinin azaltılmasının yanı sıra enerji tasarrufu sağlanması da göz önüne alınmaktadır. Gaz brülörleri çalışma prensipleri, kapasite kontrolleri, tutuşma yöntemleri yakıt cinsi ve imal tarzına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Gaz brülör çeşitleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [53, 54, 55].

- 1) Çalışma Şekillerine Göre:
  - a) Atmosferik brülörler
  - b) Üfleli brülörler
- 2) Kapasite Kontrolüne Göre:
  - a) Tek kademeli gaz brülörleri
  - b) İki kademeli gaz brülörleri
  - c) Oransal kontrollü gaz brülörleri
- 3) Alev Kontrolüne Göre:
  - a) Ultraviyole kontrollü gaz brülörleri
  - b) İyonizasyon kontrollü gaz brülörleri
  - c) Termoelektrik sistemli gaz brülörleri
  - d) Fotorezistans kontrol sistemli gaz brülörleri
- 4) Tutuşma Şekillerine Göre:
  - a) Meşale çubuk ile tutuşturulan brülörler

- b) Elle çalışan ateşleme yönetimi ile tutuşturulan brülörler
  - c) Atmosferik brülörler (Elle veya manyeto ile çalışan ateşleme ile pilot alevin tutuşturulduğu brülörler)
  - d) Otomatik olarak çalışan trafo veya büyük kapasitelerde ön pilot alev ile tutuşturulan brülörler
- 5) Yakılan Gaz Cinsine Göre:
- a) Tek yakıtlı brülörler (Gaz yakıt)
  - b) Çift yakıtlı brülörler (Gaz veya sıvı, gaz veya katı)
  - c) Çok yakıtlı brülörler (Gaz veya sıvı veya katı)
- 6) İmal Şekillerine Göre:
- a) Yerli gaz brülörleri
  - b) Sanayi tipi gaz brülörleri
  - c) Endüstriyel tip doğalgaz brülörleri

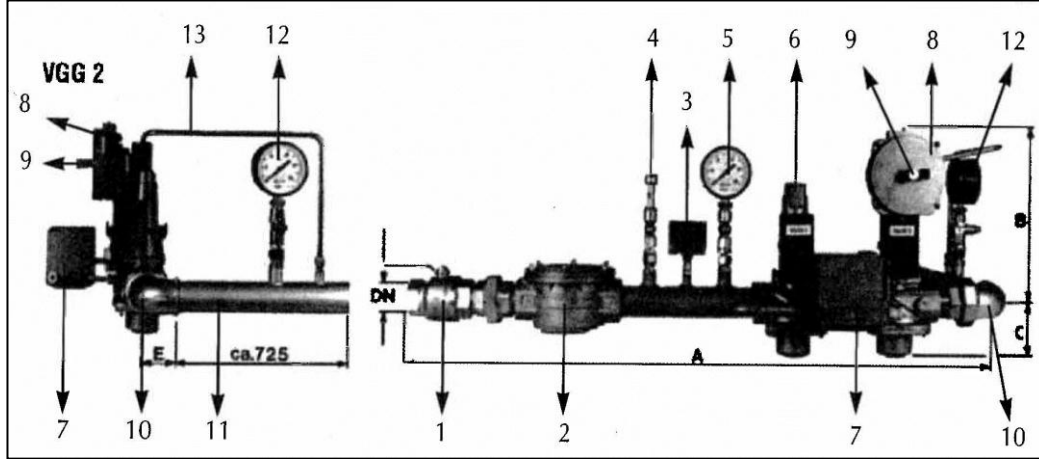
## 5.2. Gaz Hattındaki Elemanlar

Doğal gaz brülörlerine gaz gelişi, bir seri emniyet ve işletme elemanlarından sonra gerçekleşir. Brülör kapasitesine ve gaz basıncına bağlı olarak farklılıklar olabilmekle birlikte, genel olarak gaz hattında aşağıda verilen elemanlar bulunmaktadır. Şekil 5.1'de doğal gaz hattındaki elemanlar verilmiştir [54, 55].

- 1) Küresel vana
- 2) Esnek bağlantı
- 3) Gaz filtresi
- 4) Gaz regülatörleri
- 5) Emniyet kapama ventili
- 6) Emniyet tahliye ventili
- 7) Manometre
- 8) Gaz presostatı

9) Manyetik ventil

10) Manyetik kontrol cihazı



Şekil 5.1. Doğal gaz hattındaki elemanlar

- 1) Küresel vana
- 2) Filtre
- 3) Minimum gaz presostatu
- 4) Butonlu test brülörü
- 5) Butonlu manometre
- 6) Selenoid vana
- 7) Gaz sızdırmazlık kontrol cihazı
- 8) Selenoid vana regülatörü
- 9) Hava impuls hattı
- 10) Dirsek
- 11) Gaz stabilizasyon hattı
- 12) Butonlu manometre
- 13) Gaz impulse hattı

### **5.2.1 Küresel vana**

Gaz hattını ana dağıtım şebekesinden manuel olarak ayıran bir elemandır. Doğalgaz brülör hattında bulunan küresel vana tesisata takılı iken contaların sızdırmazlık özellikleri bozulmamalıdır. Sızdırmazlığın O-ring-lerle yapılması gereklidir. Küresel vanaların vana sızdırma ömrünü ölçmek amacıyla açma kapama deneyleri yapılmaktadır. Ayrıca, burulma ve eğilmeye karşı mukavemet deneyleri de uygulanmaktadır. Küresel vana gövdesi yangın emniyetine karşı demir veya pirinçten imal edilir [53, 54].

### **5.2.2. Esnek bağlantı**

Brülörde oluşan titreşimin tesisata geçişini kompanze etmek amacıyla kullanılır [53, 54].

### **5.2.3. Gaz filtresi**

Tesisata girebilecek toz ya da partiküllerin gaz regülatörüne ve yakma sistemine geçmesini engellemek amacıyla kullanılır. Regülatör öncesine yerleştirilir. Filtreler kolay temizlenebilme özelliğine sahip olmalıdır. Ayrıca, filtrenin doluluk durumunu gözleyebilmek amacıyla diferansiyel basınç göstergesi de filtrenin üzerinde bulunmalıdır. Filtreleme amacıyla kartuş tip filtreler kullanıldığı gibi, cam elyaf veya hassas kağıt filtrelerde kullanılabilir [53, 54].

### **5.2.4. Gaz regülatörü**

Gaz regülatörü yüksek basınçta tesisattan gelen doğal gazın istenilen ve sabit bir basınçla yanma başlığına gönderilmesini sağlar. Gaz hattından gelen basınçta dalgalanma olsa bile regülatör çıkış basıncı sabit olmalıdır. Genel olarak, regülatörler orta basınç ve alçak basınç regülatörleri olarak iki ayrı tipte olmaktadır. Orta basınç regülatörleri, 4 bar'lık ana şebeke borusuna bağlanmaktadır. Alçak basınç

regülatörleri ise 200 mbar'a kadar kullanılmakta olup, regülatör sayaç gaz girişine monte edilir [53, 54].

#### **5.2.5. Emniyet kapama ventili**

Regülatör kutusu içinde de bulunabilen bu ventil, çalışma basıncının üzerinde veya altında regülatöre gaz girmesini önleyen bir cihazdır. Regülatörde herhangi bir şekilde arıza çıkması durumunda gaz girişi otomatik olarak kapatılır [53, 54].

#### **5.2.6. Emniyet tahliye ventili**

Regülatör kutu içerisinde yer alan emniyet tahliye ventili gaz hattında birden oluşan kısa süreli basınç şoklarını tahliye etmek amacıyla kullanılır [53,54].

#### **5.2.7. Manometre**

Gaz hattındaki gaz basıncının gözlenmesi amacıyla kullanılır. Regülatör önüne ve çıkışına konulma zorunluluğu vardır [53, 54].

#### **5.2.8. Gaz presostatı**

Gaz basıncı belli bir değerin altına düştüğünde brülör verimli olarak çalışmaz. Bu amaçla, gaz basıncının öngörölmüş minimum bir değerin altında olması durumunda gaz presostatı tarafından gaz geçişi kesilerek brülör durdurulur ve arıza durumuna geçer. Elektromanyetik alanın çekim kuvvetiyle gazın vana üzerindeki basıncı, çalışma durumunda, yayın gerilme kuvvetini yenerek vanayı açık tutacak bir değerdedir. Gaz basıncı düştüğünde, yay vanayı iterek gaz geçişini keser. Söz konusu basınç 25 ile 50 mbar arasında ayarlanabilmektedir [53, 54].

### **5.2.9. Manyetik ventil (çalıştırma selenoid vanası)**

Brülör durunca otomatik olarak gaz akışını kesen çalışmaya başlayınca açılan elektromanyetik ventillerdir. Gaz debisini ayarlayan bu ventiler yavaş açılıp hızlı kapanma özelliğine sahiptir. Açma süresi brülörün çalışma prensibine göre yavaş, kademeli ve oransal olabilir [54, 55].

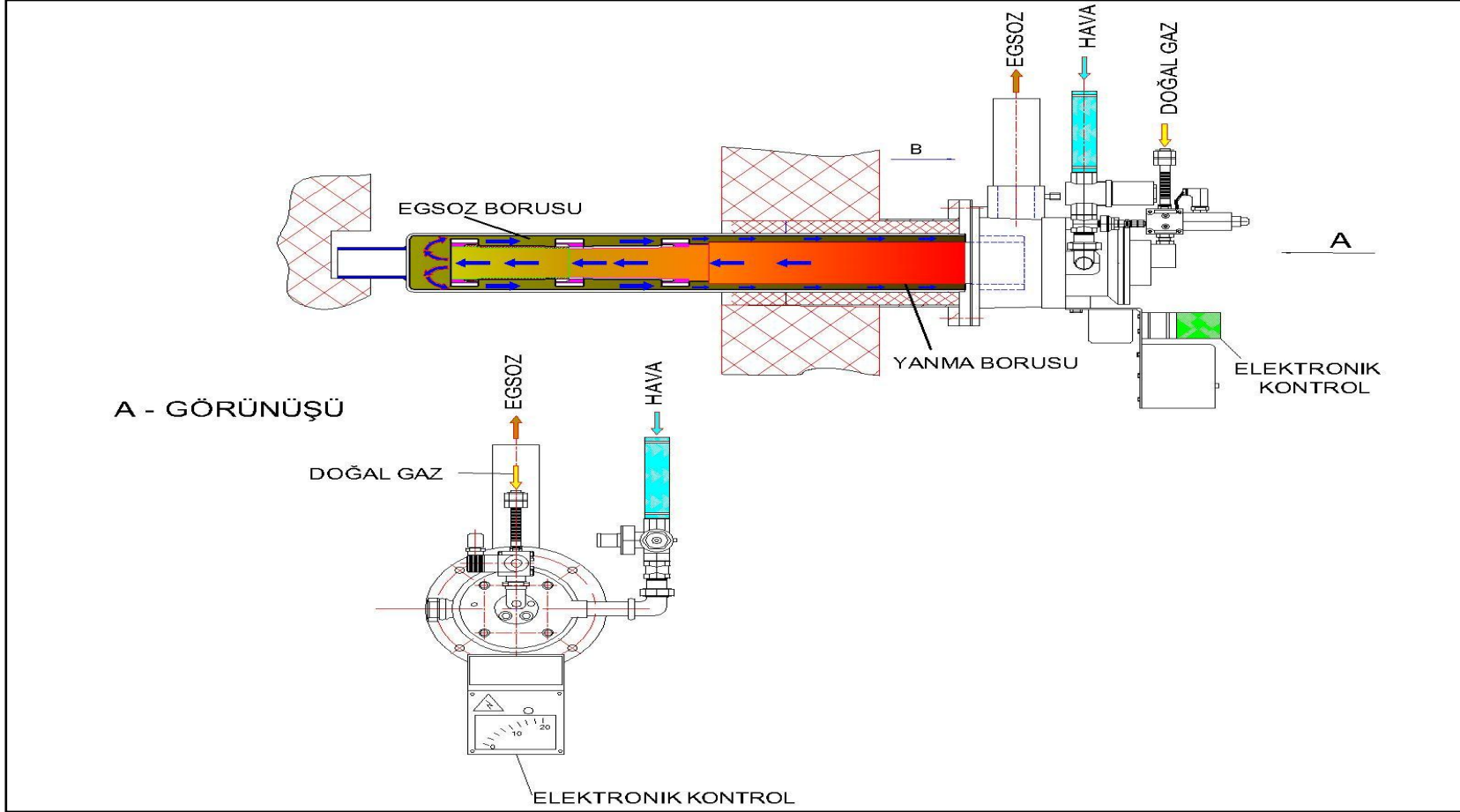
### **5.3. Doğal Gaz İle Çalışan Brülörlerin Ana Elemanları**

Doğal gaz ile çalışan brülörler genel olarak on ana elemandan oluşurlar. Bu elemanlar aşağıda verilmiştir [53, 54, 55]:

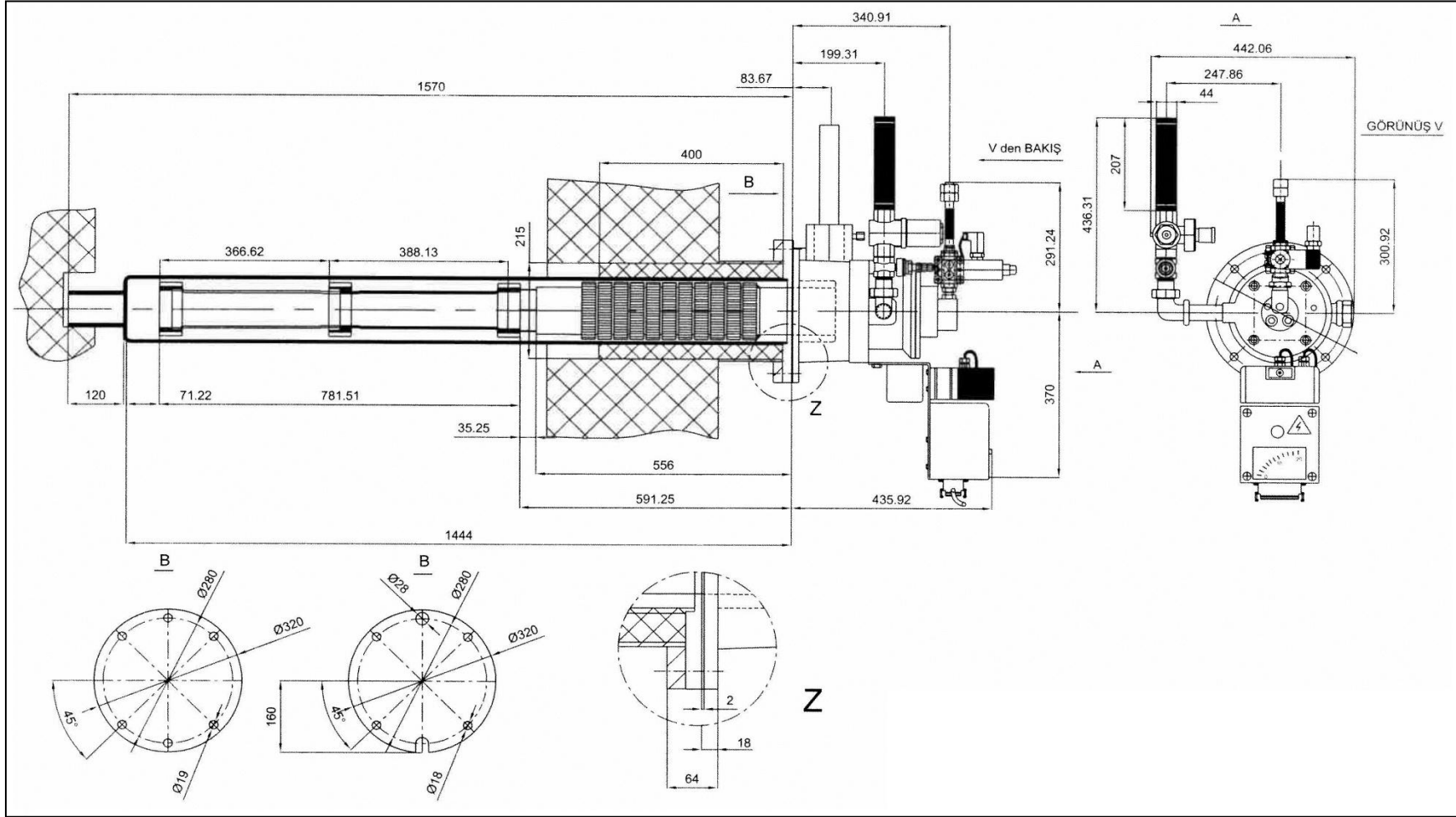
- 1) Kontrol panosu ve beyin.
- 2) Gövde
- 3) Hava ayar klepesi.
- 4) Hava fanı.
- 5) Hava presostatı.
- 6) Yanma başlığı.
- 7) Gaz hava türbülatorü.
- 8) Ateşleme sistemi.
- 9) Alev kontrol ünitesi.

### **5.4. Doğal Gazlı Isıl İşlem Fırını Brülör Tasarımı**

Bağlantı elemanlarının ısıl işleminde kullanılan doğal gazlı ısıl işlem fırınında kullanılacak olan brülörün çalışma prensibi Şekil 5.2’de verilmiştir. Brülörün montajlı teknik resmi Şekil 5.3’de verilmiştir. Çizelge 5.1’de brülör elemanlarının üretiminde kullanılacak yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin kimyasal kompozisyon ve mukavemet değerleri verilmiştir. Brülör elemanlarının üretiminde kullanılacak malzemelerin seçiminde, yüksek sıcaklıklara dayanım, bulunabilirlik, kaynak edilebilirlik ve maliyetleri değerlendirme kriteri olarak dikkate alınmaktadır.



Şekil 5.2. Brülörün çalışma prensibi



Şekil 5.3. Brülörün montajlı teknik resmi

Çizelge 5.1. Brülör elemanlarının üretiminde kullanılabilir yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin kimyasal kompozisyon ve mukavemet değerleri

DIN No.	AISI No.	Kimyasal kompozisyon								Mekanik değerler (MPa)		Kullanım Sıcaklığı (°C)
		% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% W	Akma	Çekme	
1.4857	Thermax 530*	0,30-0,40	1,00-2,50	mak. 1,50	mak. 0,035	mak. 0,030	24,0-26,0	34,0-36,0	-	min. 220	440-640	mak. 1150
2.4879	Thermax 70*	0,35-0,55	1,00-2,00	mak. 1,50	mak. 0,040	mak. 0,030	27,0-30,0	47,0-50,0	4,00-6,00	min. 220	440-640	mak. 1150
1.4841	310	mak. 0,25	mak. 1,50	mak. 2,00	mak. 0,045	mak. 0,030	24,0-26,0	19,0-22,0	-	min. 230	550-750	mak. 1150
1.4845	310S	mak. 0,08	mak. 1,50	mak. 2,00	mak. 0,045	mak. 0,030	24,0-26,0	19,0-22,0	-	min. 210	500-700	mak. 1050
2.4807	Inconel 182*	mak. 0,10	mak. 1,00	5,00 - 10,0	-	mak. 0,015	13,0-17,0	min. 61,0	-	-	-	-

\* SAE/AISI normalarında tanımlı değil, ticari marka olarak tescilli

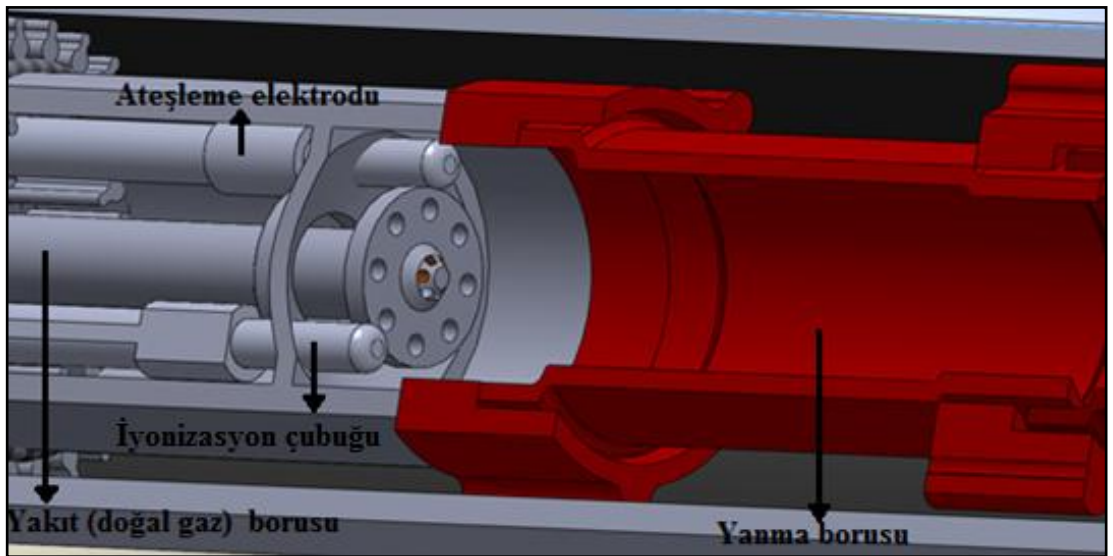
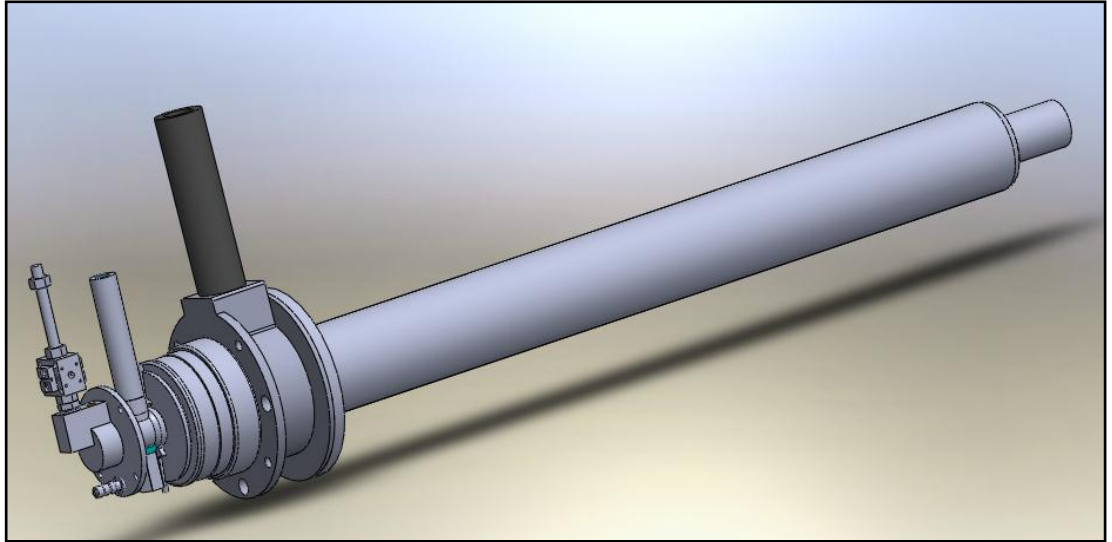
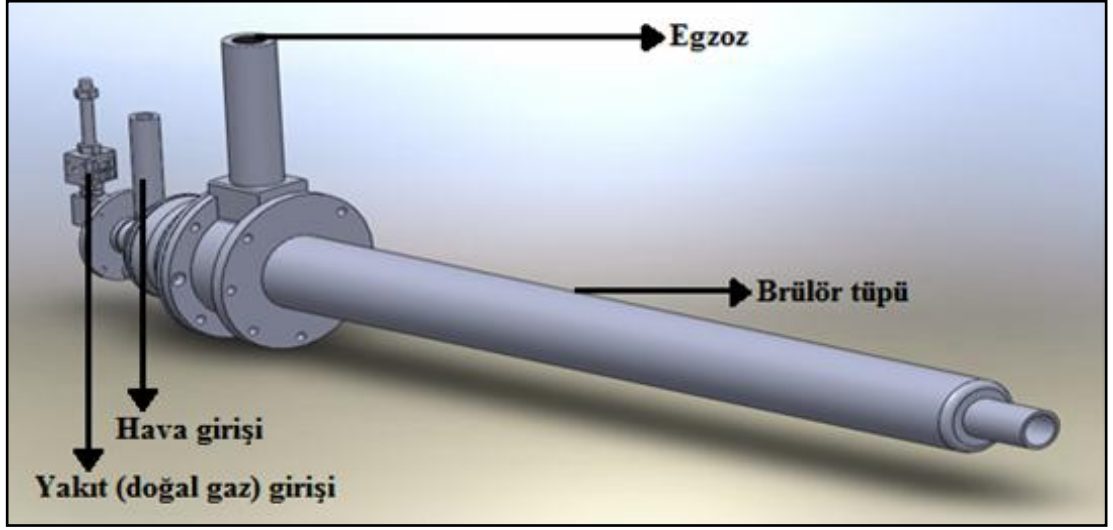
### 5.4.1. Brülör tüpü

Yanma işleminin gerçekleştiği, hava-yakıt kanalı, yanma borusu, hava-yakıt karıştırıcı, ateşleme elektrodu, iyonizasyon çubuğu ve besleme havası ısıtıcısını (reküperatör) koruyan, ısı işlem fırını içerisine egzoz gazlarının çıkışını engelleyen tüptür.

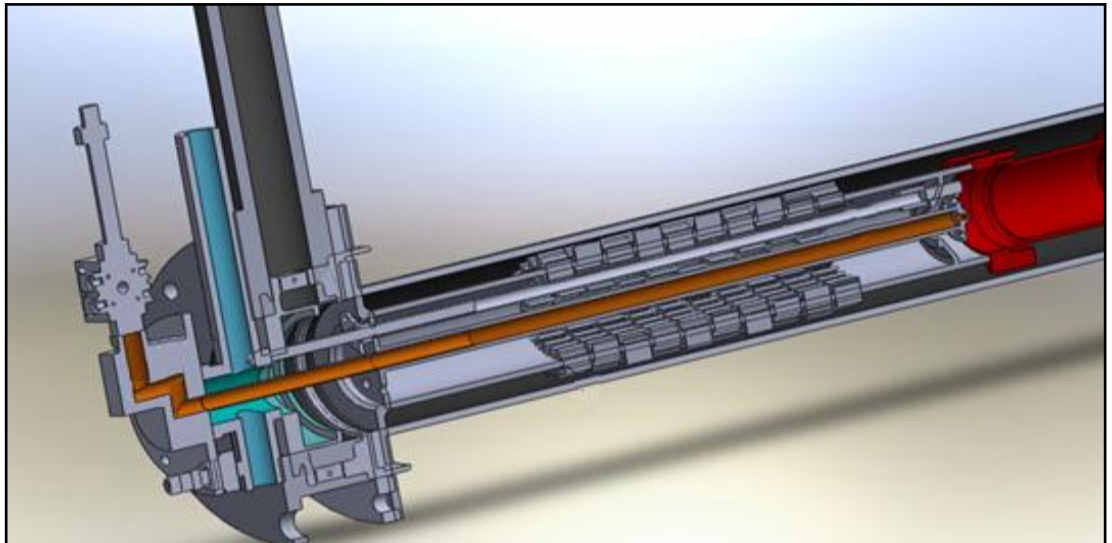
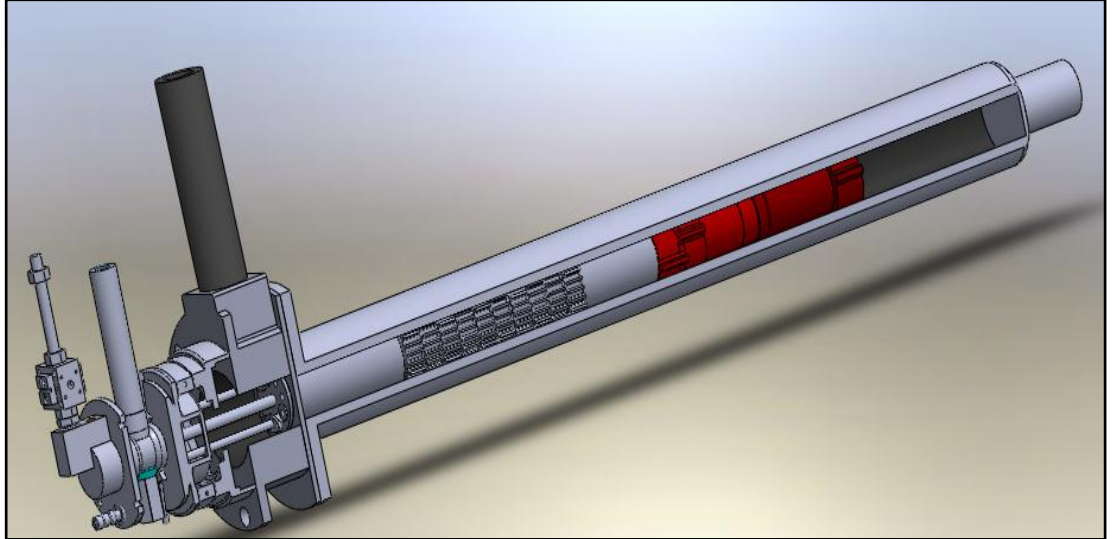
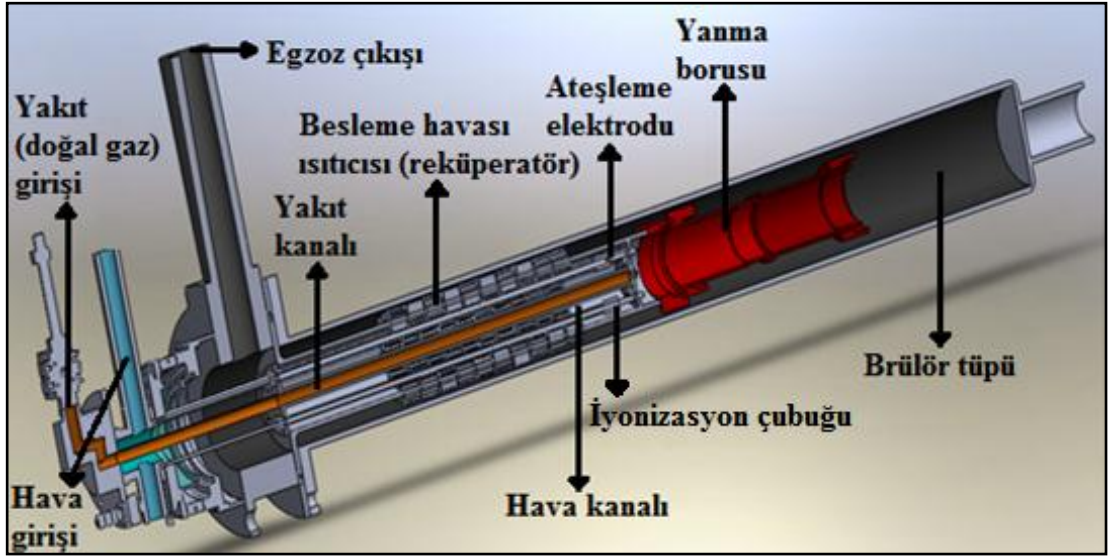
Brülör tüpü, yüksek sıcaklığa ve korozyona karşı dayanıklı malzemeden üretilmiştir. Bağlantı elemanlarının ısı işlemi sırasında herhangi bir nedenden dolayı, brülör tüpünün delinmesi durumunda yanma işleminin sonucunda oluşan egzoz gazları baca tahliyesinden önce ısı işlem fırını atmosferi içerisine karışacaktır. Egzoz gazlarının ısı işlem fırını atmosferi içerisine karışması bağlantı elemanlarının dışlarının karbon kaybetmesine (dekarbürizasyon) neden olabilecektir. Isı işlem tekniği ve uluslararası ısı işlem standartları açısından dışların karbon kaybetmesi dış dayanımını düşüreğinden istenmeyen bir durumdur.

Brülör tüpü, 5 mm kalınlığındaki AISI 310 kalite sacdan üretilmiştir. Plaka halindeki saca silindirik bükme işlemi uygulanmıştır. Silindirik bükülmüş sacın iki tarafı dikiş kaynağı yapılarak doldurulmuştur. Sacın kalınlığı da dikkate alındığında, kaynak işleminin 5-10 paso şeklinde uygulanması gerekmektedir. Kaynak işlemi yapılarak birleştirilmiş tüpte, kaynak yüzeyleri temizlenmiştir. Temizlenen, kaynak bölgesinde çatlak kontrolü ve sızdırmazlık testleri uygulanmıştır.

Brülör tüpü kaynak bölgesi çatlak kontrolü için sıvı penentran testi yapılmıştır. Test sırasında kaynak çatlağı görülen bölgelerde, yeniden kaynak işlemi yapılarak çatlaklar tamamen kapatılmıştır. Sızdırmazlık testi, su kullanılarak yapılmıştır. Şekil 5.4'de brülör tüpü, Şekil 5.5'de ise brülör tüpünün kesiti ve içerisinde bulunan elemanlar verilmiştir.



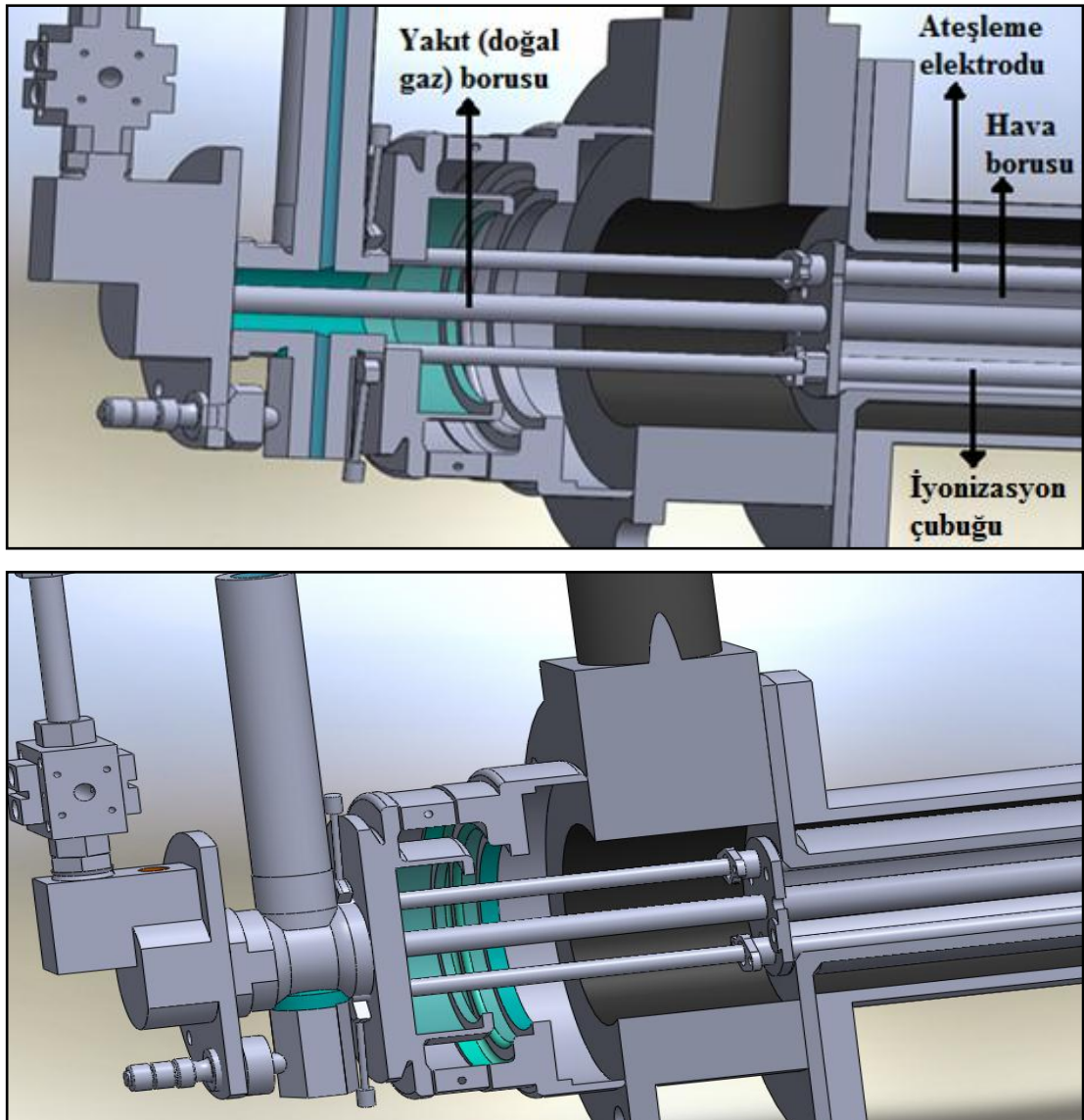
Şekil 5.4. Brülör tüpü



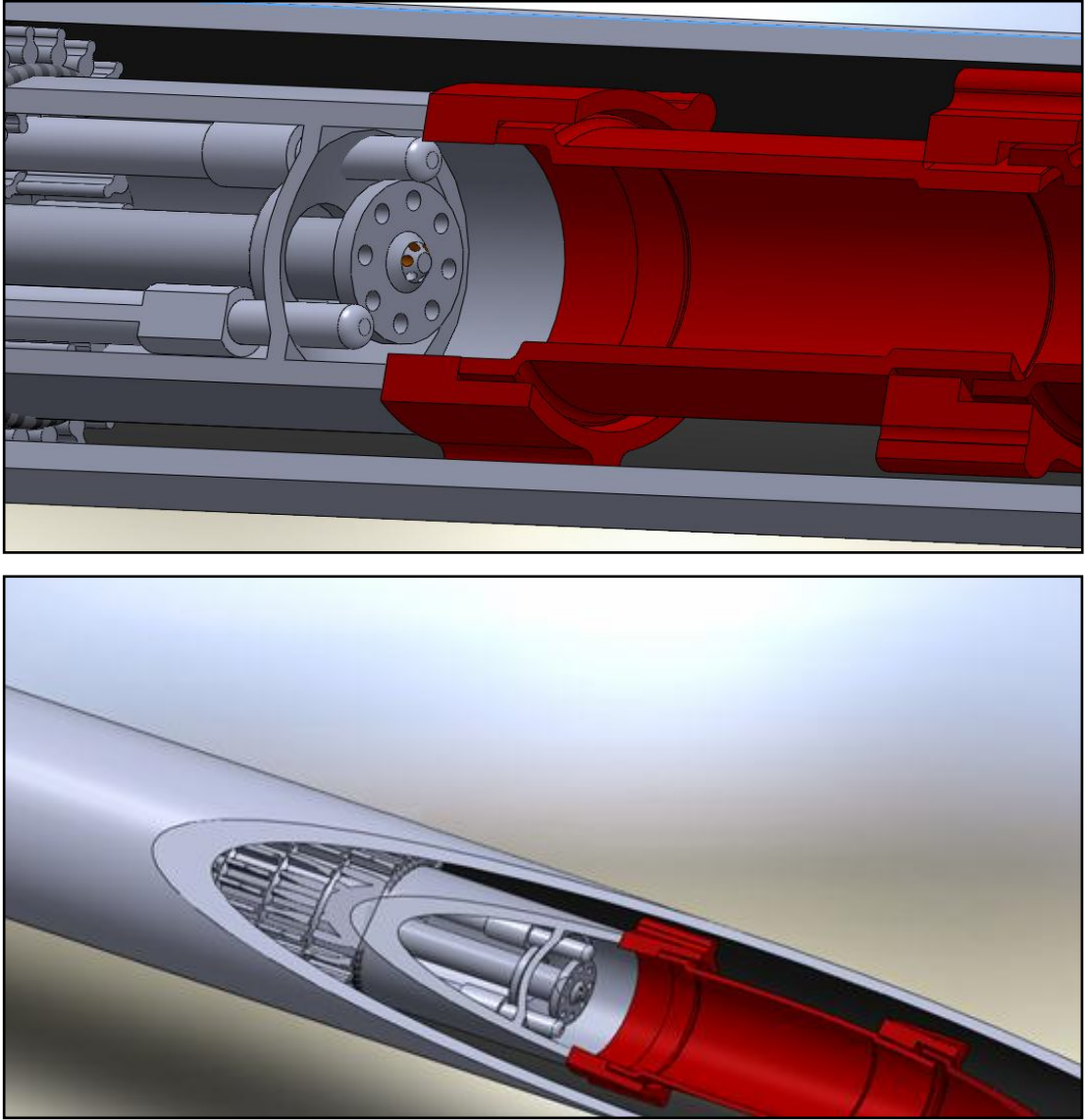
Şekil 5.5. Brülör tüpü kesiti

#### 5.4.2. Hava ve yakıt boruları

Brülör tüpünün içerisinde bulunan, dıştaki borudan havanın, içteki borudan doğal gazın geçtiği boru sistemidir. Hava ve yakıt boruları, 5-6 mm kalınlığındaki AISI 310 kalite sacdan üretilmiştir. Şekil 5.6'da hava ve yakıt boruları, Şekil 5.7'de ise hava-yakıt akışı verilmiştir.



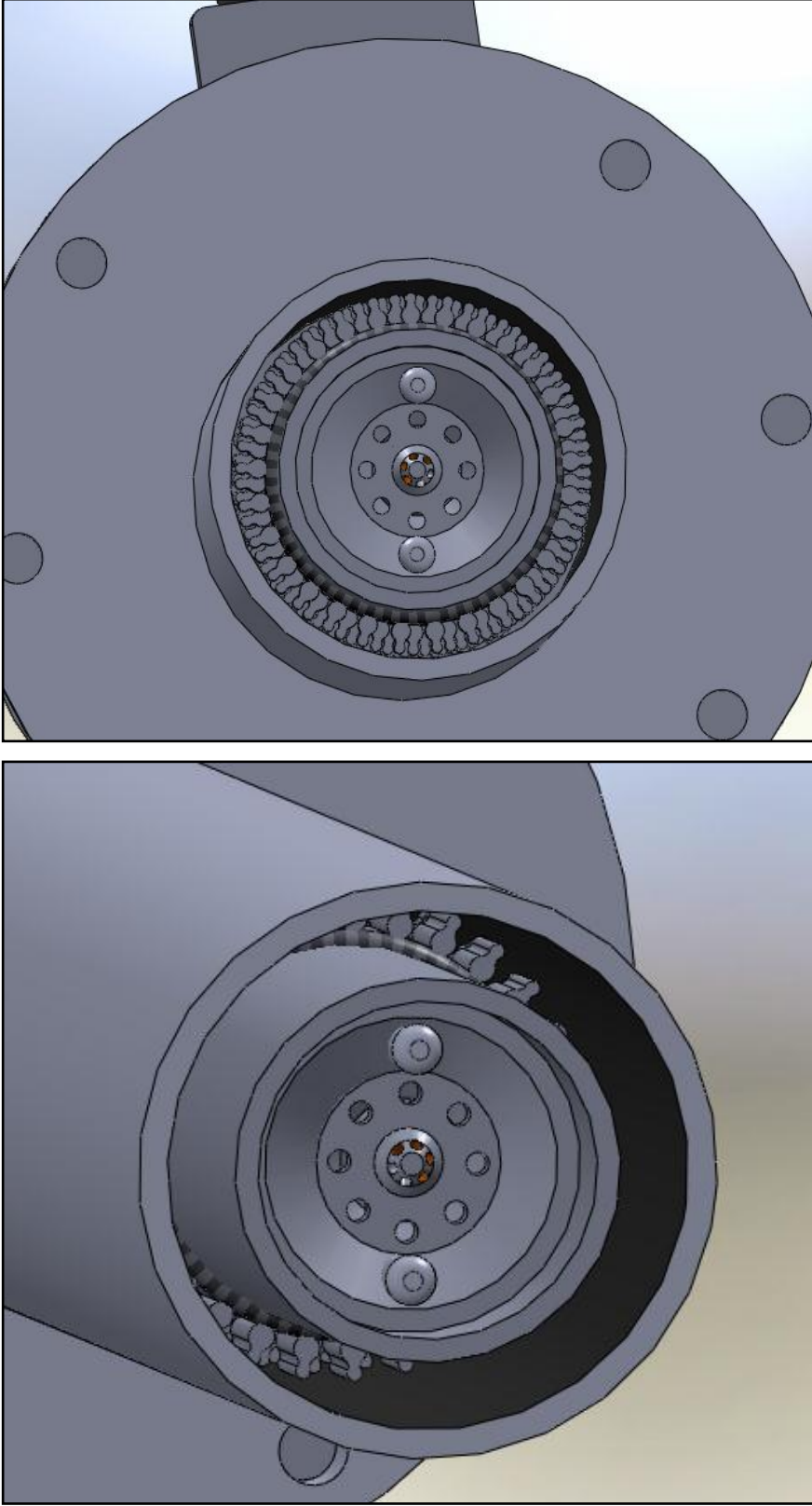
Şekil 5.6. Hava ve yakıt boruları



Şekil 5.7. Hava-yakıt akışı

#### 5.4.3. Hava-yakıt karıştırıcı

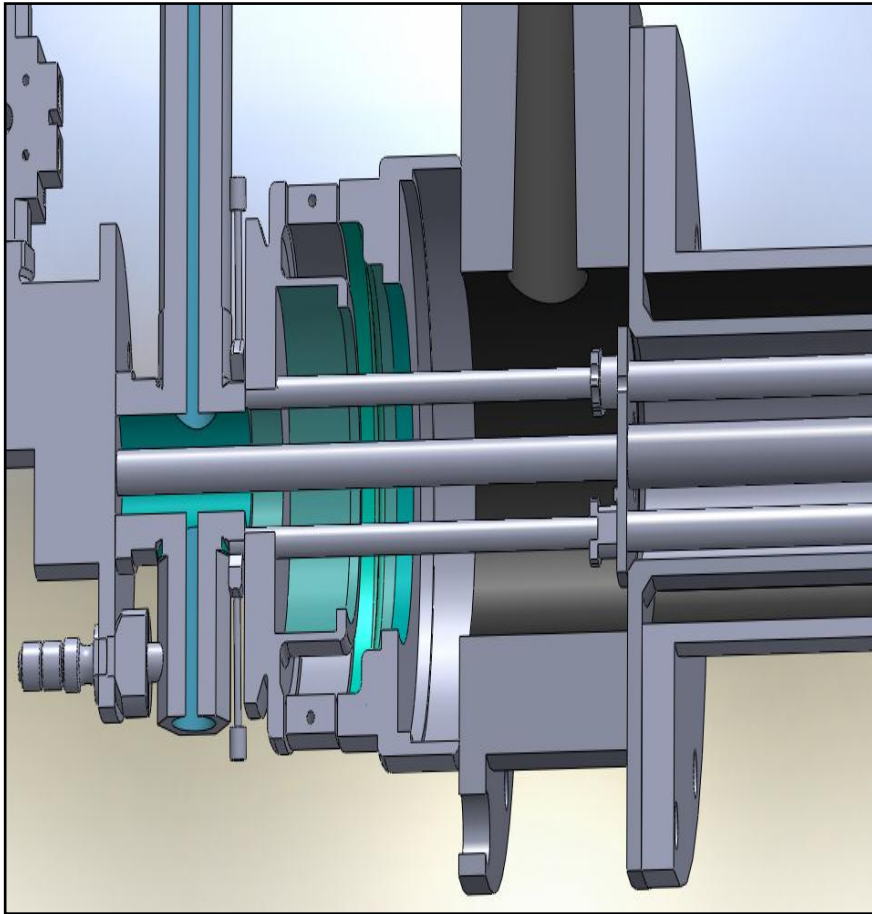
İçiçe geçmiş iki boruyla birlikte brülör içerisinde taşınan doğal gaz ve havanın yanabilmesi için karıştırılması gerekmektedir. Hava-yakıt karıştırıcısı, kanal içerisinde akan hava ve doğal gazın pülverize edilerek karışmasını sağlayan elemandır. Karıştırıcı eleman Thermax 530 malzemedен üretilmiştir. Şekil 5.8’de hava-yakıt karıştırıcı verilmiştir.



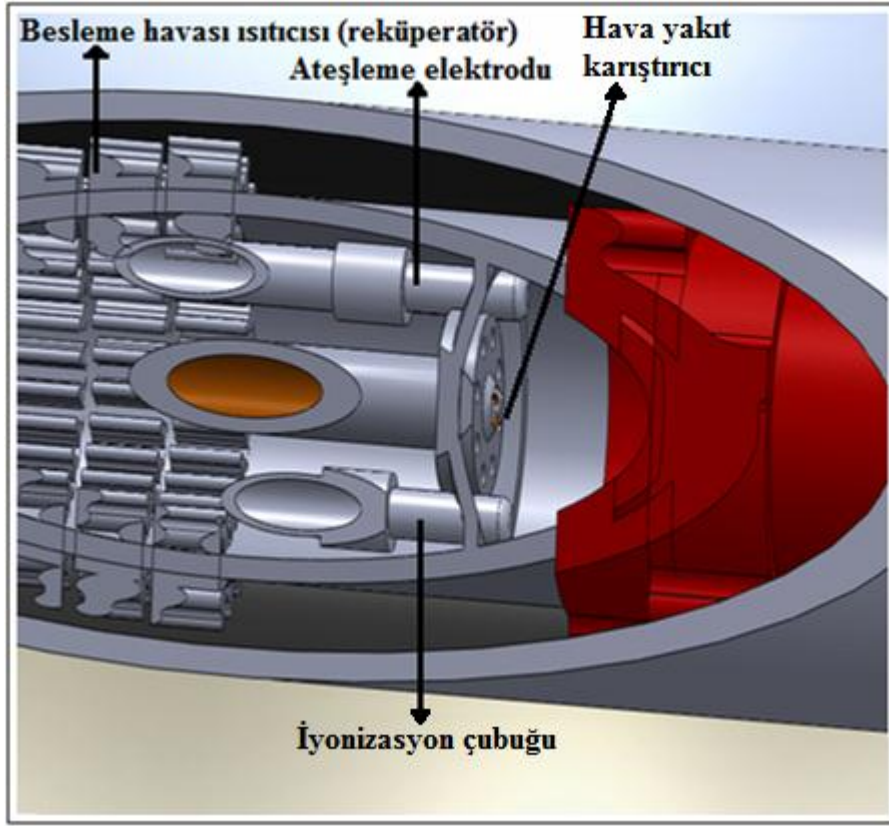
Şekil 5.8. Hava yakıt karıştırıcı

#### 5.4.4. Ateşleme sistemi

Ateşleme sistemi, ateşleme elektrodu ve iyonizasyon çubuğundan oluşmaktadır. Hava-yakıt karıştırıcı da homojen olarak karıştırılan doğal gaz-havanın tutuşması ateşleme elektrodu vasıtasıyla sağlanır. Ateşleme elektrodu manuel ya da elektronik olarak kumanda edilebilir. Ateşleme elektrodu Thermax 70 malzemeden üretilmiştir. Ateşlemeden sonra alevin oluşup oluşmadığı iyonizasyon çubuğuyla kontrol edilir. Alevin sönmesi durumunda iyonizasyon çubuğu bunu algılayarak elektronik kontrol ünitesine gönderdiği sinyal vasıtasıyla, yeniden ateşlemenin yapılmasını sağlar. Şekil 5.9'da ateşleme sistemi, Şekil 5.10'da ateşleme sistemi detayı verilmiştir.



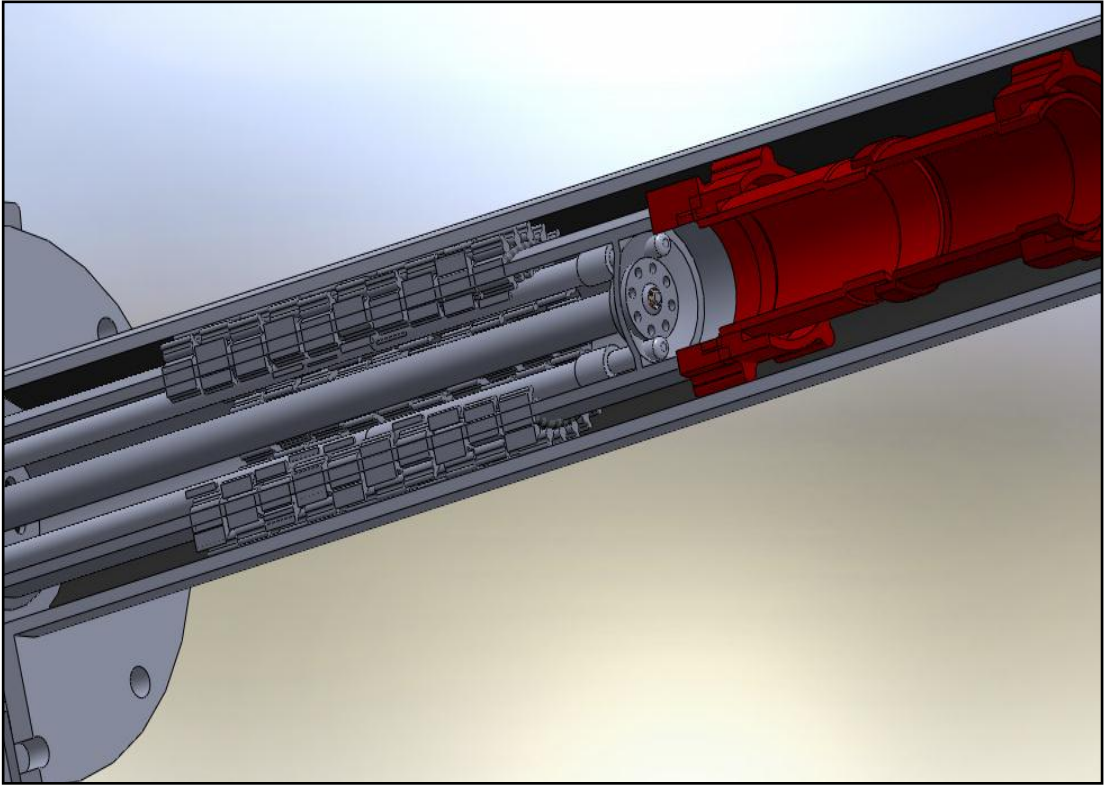
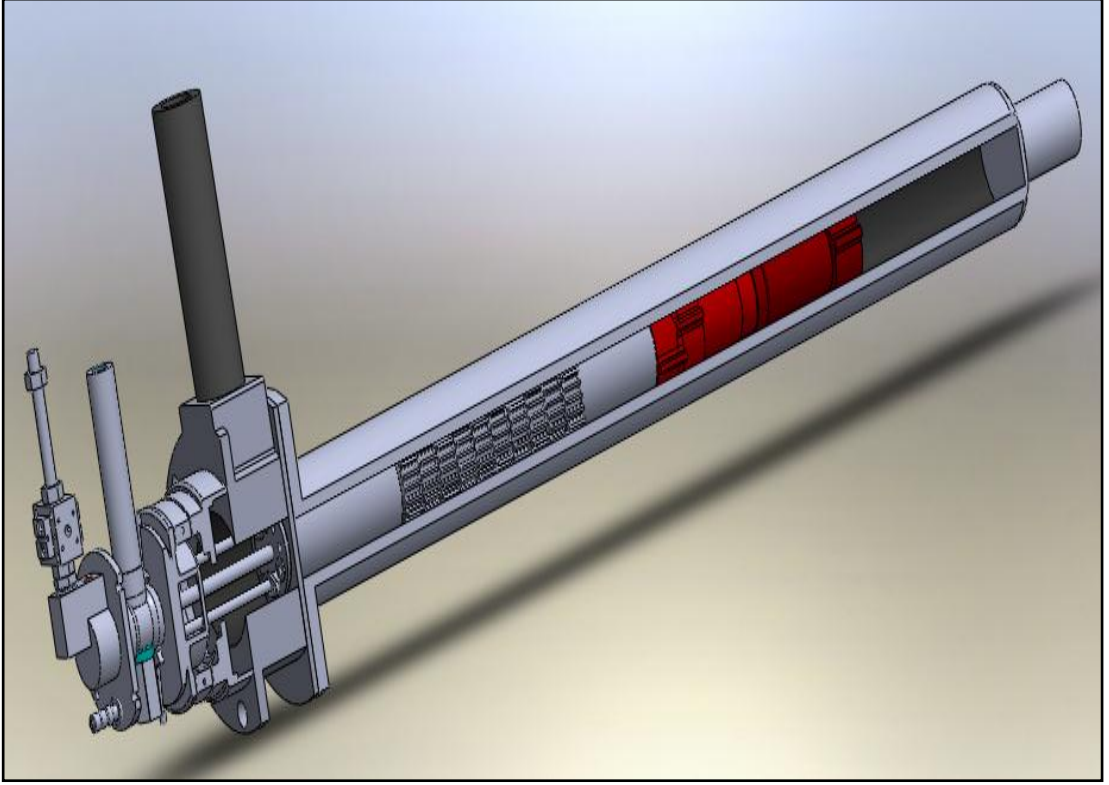
Şekil 5.9. Ateşleme sistemi



Şekil 5.10. Ateşleme sistemi detayı

#### 5.4.5. Yanma borusu (kanalı)

Hava-yakıt karıştırıcısının çıkışında, yanma borusu başlar. Yanma borusunda yanma işlemi gerçekleştiğinden, yüksek sıcaklık ortaya çıkar. Yanma borusunun üretiminde Thermax 70 ya da Inconel malzeme kullanılmaktadır. Şekil 5.11’de yanma borusu verilmiştir.

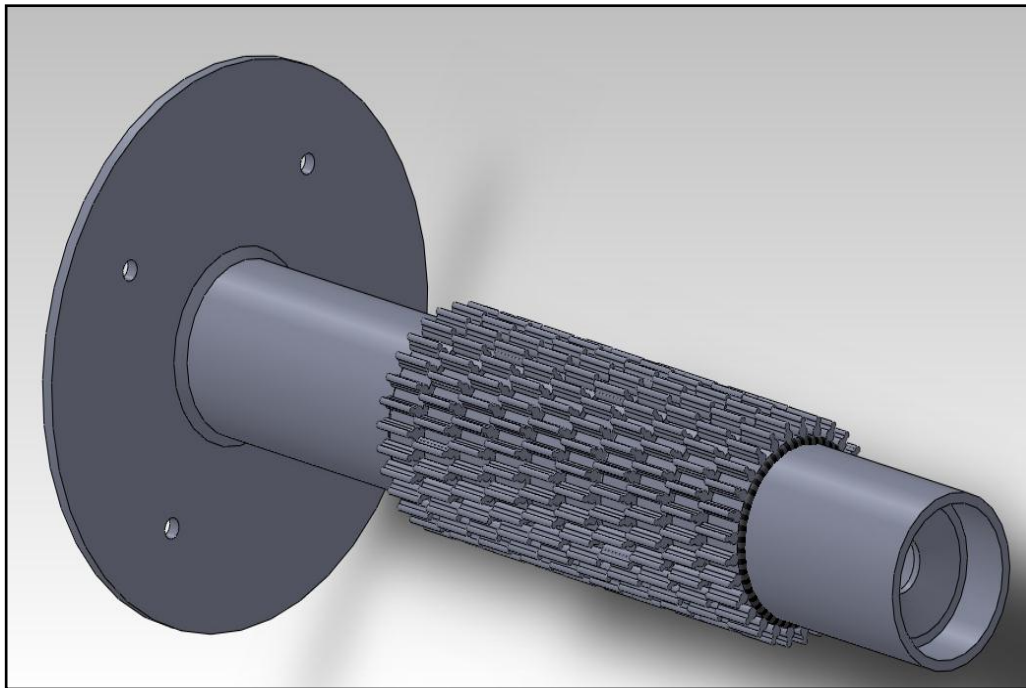


Şekil 5.11. Yanma borusu ve kesiti

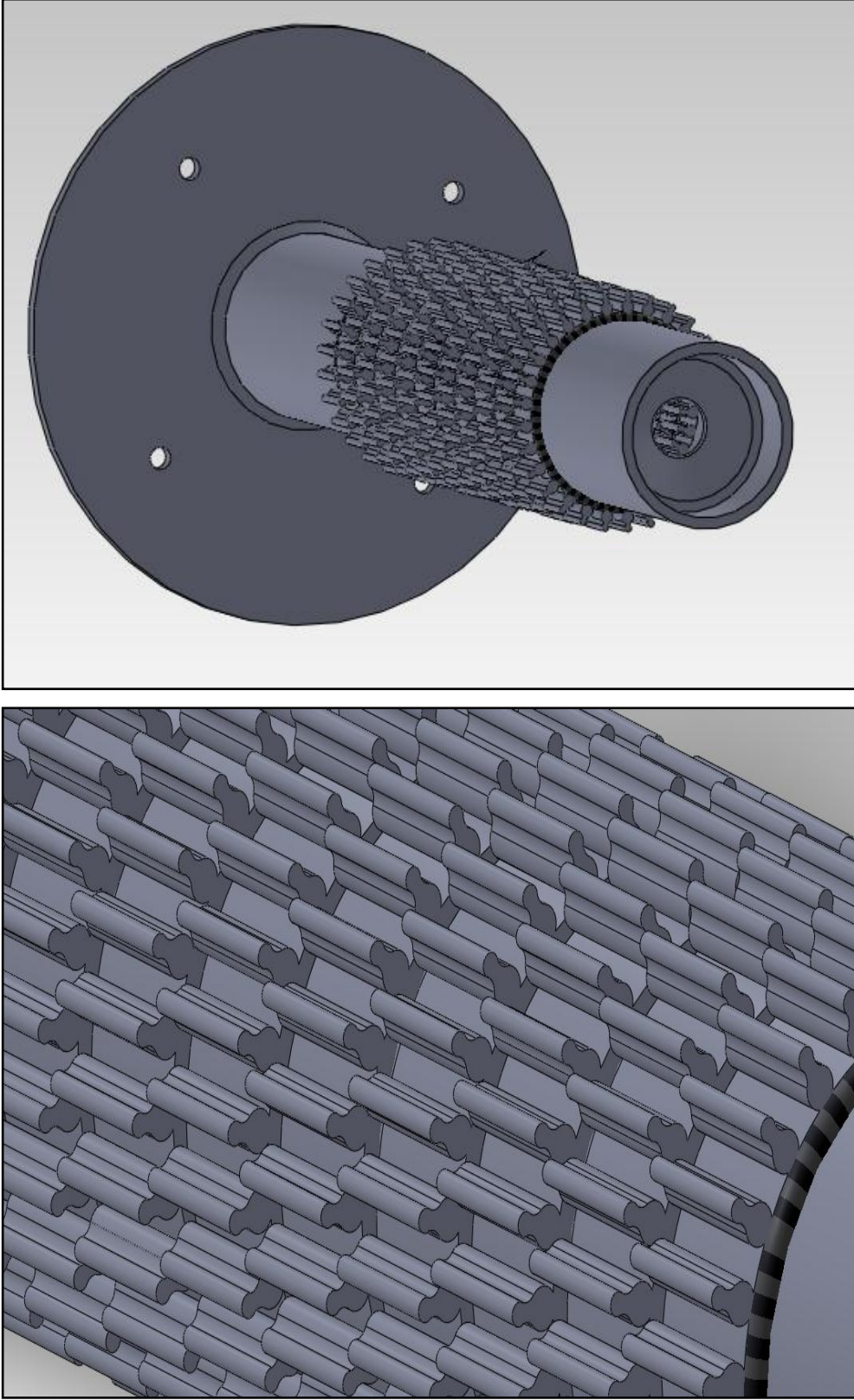
#### 5.4.6. Besleme havası ısıtıcısı (reküperatör)

Yanma işlemi tamamlandıktan sonra egzoz gazları yanma borusunun üzerinden bacaya doğru hareket etmeye başlar. Egzoz gazlarının sıcaklığı 550–600 °C civarındadır. Yanmış gazlar hava–yakıt borusunun üzerinden geçerken besleme havasının ısınmasına da yardımcı olur. Yanmış gazlar hava–yakıt borusundan geçerken, bu borunun üzerinde ki geçiş süresinin arttırılması gereklidir. Yanmış gazların geçiş süreci uzadıkça, besleme havasının sıcaklığı da artacaktır. Besleme havasının sıcaklığının artışı ise yanma verimini artıracaktır.

Besleme havasının sıcaklığını artırabilmek amacıyla, kanatçıklardan oluşan silindirik kesitli bir boru kullanılmıştır. Yanmış gazlar bacaya doğru hareket ederken, boru üzerindeki konik şekilde dizilmiş kanatçıklara çarpılmaktadır. Bu kanatçıklar yanmış gazların hava besleme borusu üzerinden daha yavaş bir şekilde geçişini sağlamaktadır. Besleme havası ısıtıcısı AISI 310 S malzemedeki döküm yoluyla üretilmiştir. Şekil 5.12’de besleme havası ön ısıtıcısının önden görünüşü, Şekil 5.13’de besleme havası ön ısıtıcısı kesiti verilmiştir.



Şekil 5.12. Besleme havası ön ısıtıcısı önden görünüşü



Şekil 5.13. Besleme havası ön ısıtıcısı kesiti

## **6. DENEY YERİ VE ÖLÇÜM CİHAZLARI**

### **6.1. Deney Yeri**

Deneyleer için Ankara Mitaş Cıvata'da bulunan 1 500 kg/saat kapasiteli doğal gazlı sürekli yüklemeli, tel bant konveyörlü, azot-metanol atmosfer kontrollü, ısıl işlem fırını kullanılmıştır. Isıl işlem fırını, sertleştirme ve menevişleme olarak iki ana bölümden oluşmaktadır. Yanma deneyleri, sertleştirme fırınında, 860-900 °C ortam sıcaklığında yapılmıştır. Isıl işlem fırını iş akışı aşağıda verilmiştir:

- 1) Ön yükleme
- 2) Alkali deterjanla yıkama
- 3) Kurutma
- 4) Sertleştirme fırını
- 5) Yağda soğutma
- 6) Alkali deterjanla yıkama
- 7) Kurutma
- 8) Menevişleme fırını

### **6.2. Ölçüm Cihazları**

#### **6.2.1. Emisyon ölçüm cihazı**

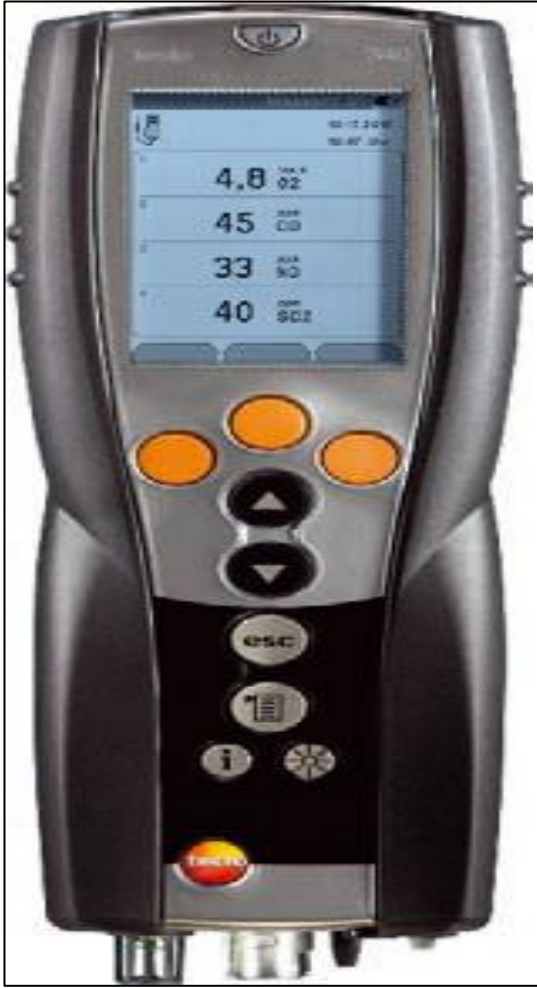
Yanma sonucunda ortaya çıkan baca gazlarının ölçülmesi için "Testo 350S Baca Gazı Ve Yanma Verimliliği Analiz Cihazı" kullanılmıştır. Cihazda, kondensat tutucu ünitesi bulunmaktadır ve elektrokimyasal olarak ölçüm yapmaktadır. Elektrokimyasal metot kullanarak ölçüm yapan cihazda, O<sub>2</sub> (oksijen), CO (karbonmonoksit) ve NO<sub>x</sub> (azotoksit) hücreleri, yanma gazı içerisindeki toz/partikül ve su buharı etkisinden korunur. Bu sebeple baca gazı ölçümleri, kuru esasa göre gerçekleştirilmektedir. Yaş baca gazı değerleri ölçülememektedir.

Testo 350S Baca Gazı Ve Yanma Verimliliği Analiz Cihazı'na bağlanacak pitot tüpü ile baca gazı hızı (m/sn) ve hacimsel debi (m<sup>3</sup>/saat) olarak ölçülebilmektedir. Baca gazlarının hacimsel debilerinin bulunabilmesi için öncelikli olarak baca gazı hızlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Pitot tüpü ile hız hesabı toplam basınç ile statik basınç farkının alınarak, baca gazı hareketinden kaynaklanan dinamik basıncın bulunmasıyla hesaplanmaktadır. Bu hesaplama tekniğinde, dinamik basıncı etkileyebilecek en önemli değişken sıcaklıktır ve ölçüm öncesinde sıcaklığın ölçülerek cihaza manuel olarak girilmesi gerekmektedir.

Hacimsel debi hesabı için de baca gazı akışının olduğu borunun kesit alanının cihaza tanımlanmış olması gereklidir. Hız ve hacimsel debi değerleri kullanılarak, CO ve NO<sub>x</sub> için kütleli debi değeri (kg/saat) cihaz yazılımı tarafından bulunabilmektedir. Cihazda hidrojen kompanizasyonu bulunmaktadır. Bu sayede, cihaz tarafından ölçülen CO değerlerinin hassasiyeti yüksektir. Ölçümlerde kullanılan cihazın teknik özellikleri Çizelge 6.1'de, resmi Resim 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Testo 335 baca gazı ve yanma verimliliği analiz cihazı teknik özellikleri

Tanım	Teknik Özellik
Sıcaklık	-40 ile +1 200 °C
Baca çekisi	-40 ile +40 mbar
Verimlilik	0 – % 120
Oksijen (O <sub>2</sub> )	0 – % 21 (Hassasiyet: ± % 0,8)
Karbodioksit (CO <sub>2</sub> )	Oksijen değerini kullanarak yanma denkleminde otomatik hesaplama
Karbonmonoksit (CO)	0 – 1 000 ppm (Hassasiyet: 1 ppm)
Azotoksitler (NO <sub>x</sub> )	0 – 300 ppm (Hassasiyet: 1 ppm)
Azotdioksit (NO <sub>2</sub> )	0 – 500 ppm (Hassasiyet: 0,1 ppm)
Kükürtdioksit (SO <sub>2</sub> )	0 – 5 000 ppm (Hassasiyet: 1 ppm)



Resim 6.1. Testo 335 baca gazı ve yanma verimliliği analiz cihazı

### 6.2.2. Dijital manometre

Deney yapılacak brülörlerde, brülöre giren doğal gaz-havanın basıncının ayarlanması ve kontrol edilmesi amacıyla Rothenberger Ro-Press tipi dijital manometre kullanılmıştır. Dijital manometre 0–460 mbar basınç aralığında çalışmaktadır. Cihaz hassasiyeti,  $\pm \% 1$ 'dir. Resim 6.2'de Rothenberger Ro-Press tipi dijital manometrenin resmi verilmiştir.



Resim 6.2. Rothenberger Ro-Press tipi dijital manometre

### 6.2.3. Sıcaklık ölçüm cihazı

Brülör içerisindeki sıcaklığın ölçülmesi için Lead Shine 305 dijital sıcaklık ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümünde kullanılan cihazın teknik özellikleri Çizelge 6.2’de, resmi Resim 6.3’de verilmiştir. Ayrıca, bu cihazla birlikte Elimko E-MI07-1K10-100 ısı çift (thermocouple) kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan ısı çiftinin teknik özellikleri Çizelge 6.3’de, resmi Resim 6.4’de verilmiştir

Çizelge 6.2. Lead Shine dijital sıcaklık ölçüm cihazı teknik özellikleri

Tanım	Teknik Özellik
Sıcaklık	-50 ile 1 300 °C (Hassasiyet: $\pm 0,2$ °C)
Sıcaklık birimi	°C, °F seçilebilir
Giriş tipi	K tipi T/C girişi



Resim 6.3. Lead Shine dijital sıcaklık ölçüm cihazı

Çizelge 6.3. Elimko E-MI07-1K10-100 ısı çift (thermocouple) teknik özellikleri

Tanım	Teknik Özellik
Sıcaklık	-20 ile +1 200 °C (Hassasiyet: $\pm 0,2$ °C)
Ölçüm elemanı	1xNiCr-Ni
Koruyucu	Inconel - 100
Çap x Boy	1 – 1 000 mm
Soket	TS2-21200-K



Resim 6.4. Elimko E-MI07-1K10-100 ısı çifti (thermocouple)

#### 6.2.4. Doğal gaz debi ölçüm cihazı

Brülöre gönderilen doğal gaz debisinin ölçülmesi için Krom Schroder marka DM 65Z 50-40 modeli debi ölçer kullanılmıştır. Krom Schroder marka DM 65Z 50-40 debi ölçer 5-100 m<sup>3</sup>/h debi aralığında, -10 °C – +60 °C sıcaklığında, maksimum 4 bar basınçta çalışabilmektedir. Cihaz hassasiyeti, ± % 1'dir. Resim 6.5'te Krom Schroder DM 65Z 50-40 model debi ölçerin resmi verilmiştir.



Resim 6.5. Krom Schroder DM 65Z 50-40 model debi ölçer

### 6.2.5. Basınç ölçüm cihazları

Sertleştirme fırını giriş hattındaki doğal gaz ve hava basıncının ölçülebilmesi için iki farklı manometre kullanılmıştır. Doğal gaz basıncının ölçülebilmesi Krom Schroder RFM 6 RB 100 model manometre kullanılmıştır. RFM 6 RB 100 model manometre 0–6 bar basınç aralığında çalışmakta olup, EN837–1 standardına uygun olarak üretilmiştir. Cihaz hassasiyeti,  $\pm \% 1,6$ 'dır. Resim 6.6'da Krom Schroder RFM 6 RB 100 model manometre resmi verilmiştir.

Hava basıncının ölçülebilmesi için de, Krom Schroder KFM 160 RB 100 model manometre kullanılmıştır. KFM 160 RB 100 model manometre 0–160 milibar basınç aralığında çalışmakta olup, EN837–3 standardına uygun olarak üretilmiştir. Cihaz hassasiyeti,  $\pm \% 1,6$ 'dır. Resim 6.7'de Krom Schroder KFM 160 RB 100 model manometre resmi verilmiştir.



Resim 6.6. Krom Schroder RFM 4 RB 100 model manometre



Resim 6.7. Krom Schroder KFM 160 RB 100 model manometre

## **7. DENEY PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE YANMA DENEYLERİ**

### **7.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi**

Brülörde doğal gaz yanmasıyla ilgili deneylere başlamadan önce, yanmayı etkileyecek girdilerin belirlenmesi gerekmektedir. Tespit edilen girdiler, sabit ve değişken olmak üzere ikiye ayrılacaktır. Sabit olarak tespit edilen girdilere ait değerler, değişken girdileri etkilemeyecek şekilde sabitlenecektir. Değişken girdilerin büyüklükleri değiştirilerek, doğal gaz tüketimi, hava fazlalık katsayısı, baca gazı emisyon çıktıları analiz edilebilecektir.

Brülörde doğal gaz yanmasını etkileyen girdiler aşağıda verilmiştir.

- 1) Ana gaz hattı doğal gaz basıncı
- 2) Ana gaz hattı hava basıncı
- 3) Ana gaz hattı doğal gaz sıcaklığı
- 4) Ana gaz hattı hava sıcaklığı
- 5) Brülör girişi doğal gaz basıncı
- 6) Brülör girişi hava basıncı
- 7) Brülör girişi doğal gaz sıcaklığı
- 8) Brülör girişi hava sıcaklığı
- 9) Isıl işlem fırını iç ortam sıcaklığı

Yukarıda verilen girdilerin her birinin brülördeki yanma olayına etkisinin deneysel olarak incelenebilmesi mümkün değildir. Dolayısıyla, brülör girişi doğal gaz ve hava basıncı dışındaki değerlerin sabit tutularak, değişken girdi sayısı ikiye düşürülmüştür. Brülör girişi doğal gaz ve hava basıncı girdi değerlerine bağlı olarak ana gaz hattı doğal gaz debisi ölçülecektir. Çizelge 7.1’de sabit girdiler ve değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.1. Sabit girdiler ve değerleri

Girdi Tanımı	Sabit Değeri
Ana gaz hattı doğal gaz basıncı	125 mbar
Ana gaz hattı hava basıncı	60 mbar
Ana gaz hattı doğal gaz sıcaklığı	Ortam sıcaklığı
Ana gaz hattı hava sıcaklığı.	Ortam sıcaklığı
Brülör girişi doğal gaz sıcaklığı	Ortam sıcaklığı
Brülör girişi hava sıcaklığı	Ortam sıcaklığı
Isıl işlem fırını iç ortam sıcaklığı	860 – 880 °C

Brülörde yanma sonucunda oluşan çıktılar aşağıda verilmiştir.

- 1) Yanma (baca gazı) sıcaklığı
- 2) Hava fazlalık katsayısı
- 3) Baca gazındaki oksijen miktarı
- 4) Baca gazındaki karbondioksit miktarı
- 5) Baca gazındaki karbonmonoksit miktarı
- 6) Baca gazındaki azotdioksit miktarı
- 7) Baca gazındaki azotoksit miktarı
- 8) Baca gazındaki su miktarı
- 9) Doğal gaz tüketimi
- 10) Brülör içerisindeki yanma sıcaklık değeri
- 11) Isıl işlem fırını iç ortam sıcaklığı

Değişken girdi olarak alınan brülör giriş doğal gaz ve hava basıncı değerlerine göre, hava fazlalık katsayısı, yanma (baca) gazı sıcaklığı, baca gazı emisyonları (oksijen, karbondioksit, karbonmonoksit, azotoksit, azotdioksit,su) ve doğal gaz tüketimi değişecektir. Isıl işlem fırını ortam sıcaklığını 860–880 °C değerinin altına düşürmeden, en düşük doğal gaz tüketimi değeri en önemli çıktı olmaktadır. Doğal

gaz tüketiminin en düşük olduğu değerde, hava fazlalık katsayısı da optimum değerde olacaktır. Baca gazı emisyon değerleri için yasal kısıtlamalar bulunmaktadır. Doğal gazlı ısıtma işlem fırınlarının çevreye verebilecekleri emisyon değerleri 3.7.2009 tarihli, Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde verilmiştir. Çizelge 7.2'de, Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği yakma ısıtma gücü 100 MW'ın altındaki tesisler için baca gazı emisyonlarının sınır değerleri verilmiştir [21, 56, 57].

Çizelge 7.2. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği yakma ısıtma gücü 100 MW'ın altındaki tesisler için baca gazı emisyonlarının sınır değerleri

Yakıt	Kükürdioksit		Karbonmonoksit		Azotoksit	
	mg/ Nm <sup>3</sup>	ppm	mg/ Nm <sup>3</sup>	ppm	mg/ Nm <sup>3</sup>	ppm
Doğal Gaz, LPG, Rafineri Gazı	100	35	100	80	800	390

Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde, karbondioksit emisyonları için herhangi bir sınır değeri verilmemiştir. Baca gazı emisyonları içerisinde karbondioksit oranının iyi bir yanmanın doğal sonucu olarak, yüksek olması beklenmektedir. Ancak, karbondioksit emisyonlarının atmosferde oluşturdukları sera etkisi nedeniyle, mümkün olduğunca düşük tutulması da hedeflenmektedir. Doğal gazın yakılması durumunda baca gazları içerisindeki karbondioksit oranının % 10,50–11,50 aralığında bulunması uygun olarak değerlendirilmektedir [58, 59].

Karbonmonoksit oluşumuna neden olmayacak şekilde, hava fazlalık katsayısına bağlı olarak, baca gazları içerisinde oksijen oranının mümkün olduğunca düşük olması istenilmektedir. Doğal gaz da, % 2–3 oksijen oranı baca gazı analizleri için ideal değer olarak kabul edilmektedir [60,61].

Karbonmonoksit, enerji kaybına ve islilik sonucu kirlenmeye neden olmaktadır. Doğal gaz-hava karışımındaki hava miktarı artırılarak eksik yanma tamamlanmak suretiyle karbonmonoksit, karbondioksite dönüştürülmelidir [61, 62]. Doğal gazın içerisinde kükürt bulunmadığı için baca gazı emisyonları içerisinde kükürtdioksit oluşumu beklenmemektedir [62, 63]. Bu nedenle, baca gazı emisyon ölçümünde kükürtdioksit ölçümü yapılmamıştır.

## 7.2. Yanma Deneyleeri

Değişken girdi olarak tanımlanan brülör girişi doğal gaz ve hava basıncı değerlerine göre hava fazlalık katsayısının ( $\lambda$ ) belirlenmesi gereklidir. Yapılan deneylerde, brülör girişi doğal gaz ve hava basıncı değerlerine göre elde edilen hava fazlalık katsayısı ( $\lambda$ ) değerleri Çizelge 7.3’de verilmiştir.

Çizelge 7.3. Brülör girişi doğal gaz-hava basıncı değerlerine göre hava fazlalık katsayısı ( $\lambda$ ) değerleri

Hava Fazlalık Katsayısı	Doğal Gaz Giriş Basıncı	Hava Giriş Basıncı
(Landa)	(milibar)	(milibar)
1	9	9,00
1,05	9	9,50
1,1	9	10,00
1,15	9	10,35
1,2	9	10,75
1,25	9	11,25
1,3	9	11,75
1,35	9	12,20
1,4	9	12,75
1,45	9	13,20
1,5	9	13,50

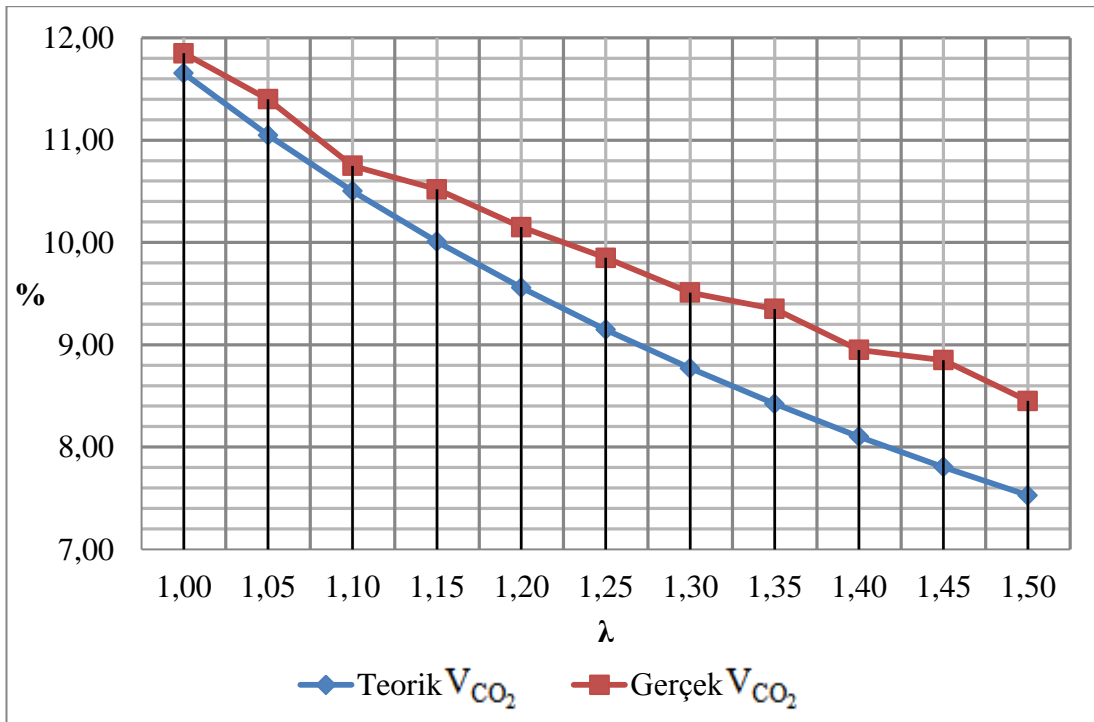
Hava fazlalık katsayısının 1 olduğu durum tam yanma durumudur. Yapılan deneylerde, hava fazlalık katsayı 1 olarak ölçülememiştir. En düşük hava fazlalık katsayısı 1,02 olarak ölçülmüştür.

Brülör girişi doğal gaz ve hava basıncı değerlerine göre hava fazlalık katsayıları tespit edildikten sonra, istenilen hava fazlalık katsayısındaki baca gazı emisyon ölçümleri alınmıştır. Bölüm 4'te, farklı hava fazlalık katsayıları için teorik olarak hesaplanan karbondioksit, azot, oksijen ve azotoksit emisyonları deneysel olarak tespit edilmiştir. Baca gazı analiz cihazı ile azotmonoksit (NO), azotoksitler (NO<sub>x</sub>) ve azotdioksit (NO<sub>2</sub>) olarak ölçüm alınabilmektedir.

1,00–1,50 arasındaki hava fazlalık katsayıları için teorik ve gerçek karbondioksit, azot, oksijen, emisyonları karşılaştırılarak çizelge ve şekil haline getirilmiştir. Ayrıca, teorik olarak hesaplanamayan karbonmonoksit ve azotoksit emisyonları için ölçümler yapılarak, elde edilen sonuçlar çizelge ve şekil olarak verilmiştir.

Çizelge 7.4. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek karbondioksit emisyonlarının karşılaştırılması

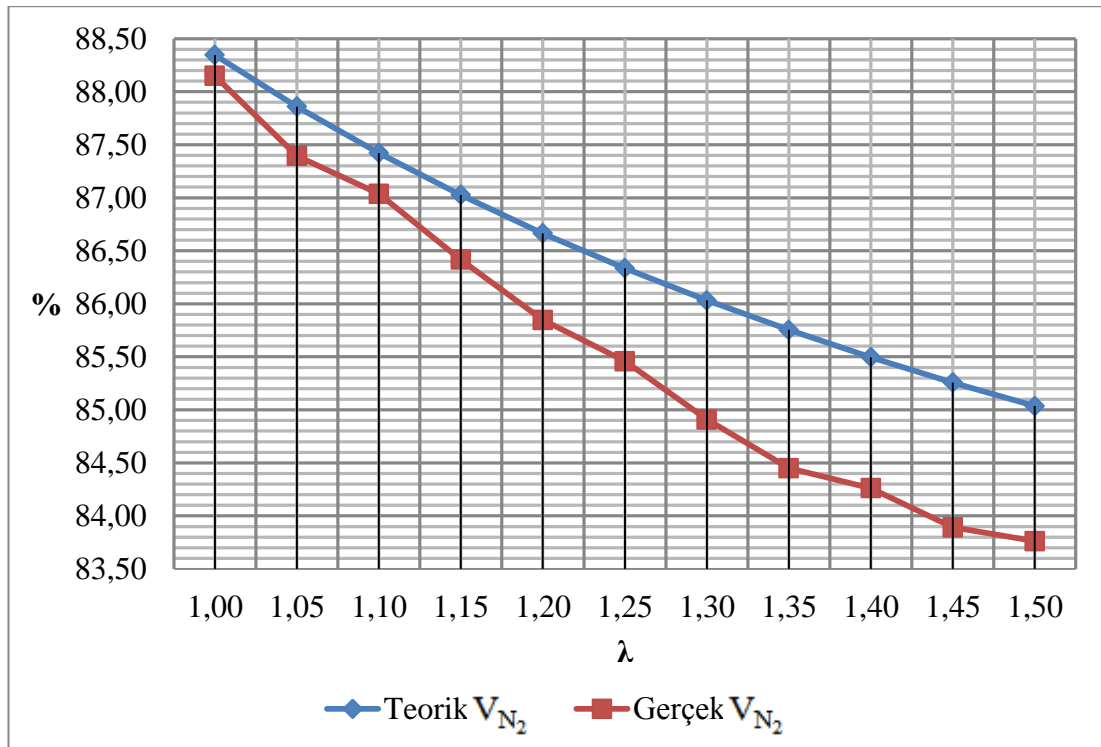
$\lambda$	Min. O <sub>2</sub> Miktarı	Yakma Havası (L <sub>min</sub> )	V <sub>CO<sub>2</sub></sub>		
			Teorik	Gerçek	% Değişim
1,00	1,78	8,49	11,65	11,85	1,68
1,05	1,78	8,91	11,05	11,40	3,18
1,10	1,78	9,33	10,50	10,75	2,35
1,15	1,78	9,76	10,01	10,52	5,11
1,20	1,78	10,18	9,56	10,15	6,19
1,25	1,78	10,61	9,15	9,85	7,69
1,30	1,78	11,03	8,77	9,51	8,44
1,35	1,78	11,46	8,42	9,35	11,02
1,40	1,78	11,88	8,10	8,95	10,48
1,45	1,78	12,30	7,80	8,85	13,40
1,50	1,78	12,73	7,53	8,45	12,25



Şekil 7.1. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek karbondioksit emisyonlarının karşılaştırılması

Çizelge 7.5. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek azot emisyonlarının karşılaştırılması

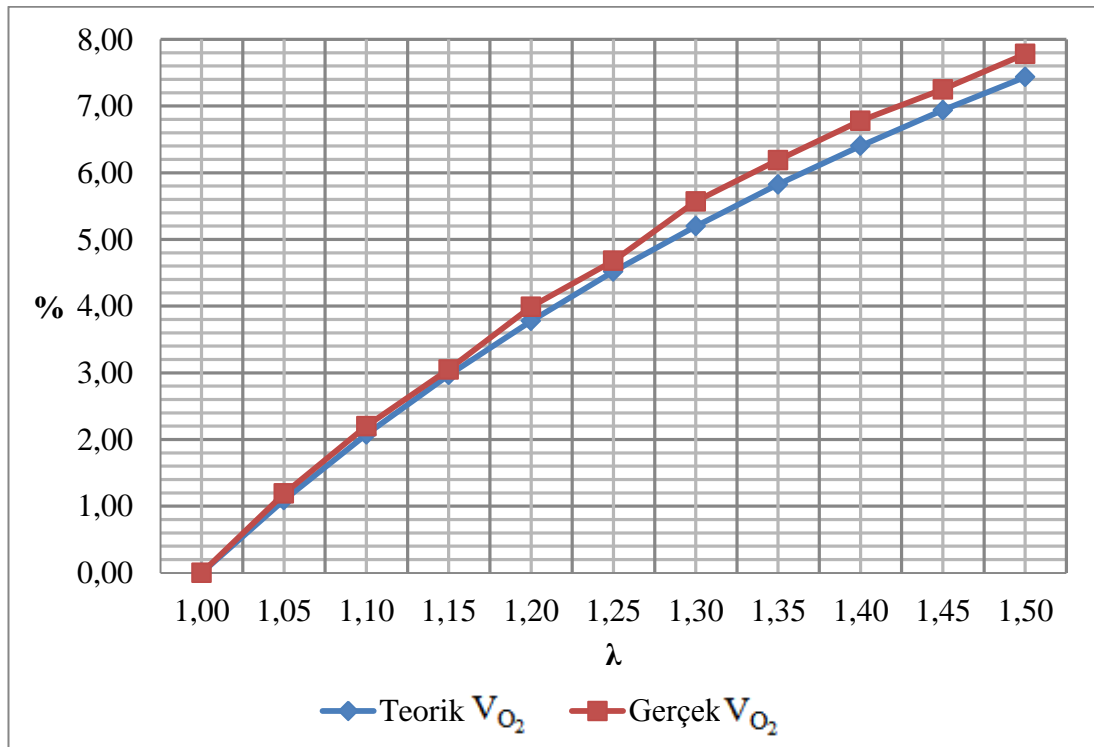
$\lambda$	Min. O <sub>2</sub> Miktarı	Yakma Havası (L <sub>min</sub> )	V <sub>N<sub>2</sub></sub>		
			Teorik	Gerçek	% Değişim
1,00	1,78	8,49	88,35	88,15	-0,22
1,05	1,78	8,91	87,86	87,39	-0,53
1,10	1,78	9,33	87,42	87,04	-0,44
1,15	1,78	9,76	87,03	86,42	-0,70
1,20	1,78	10,18	86,67	85,85	-0,94
1,25	1,78	10,61	86,34	85,46	-1,01
1,30	1,78	11,03	86,03	84,91	-1,31
1,35	1,78	11,46	85,75	84,45	-1,52
1,40	1,78	11,88	85,50	84,26	-1,45
1,45	1,78	12,30	85,26	83,89	-1,60
1,50	1,78	12,73	85,04	83,76	-1,50



Şekil 7.2. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek azot emisyonlarının karşılaştırılması

Çizelge 7.6. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek oksijen emisyonlarının karşılaştırılması

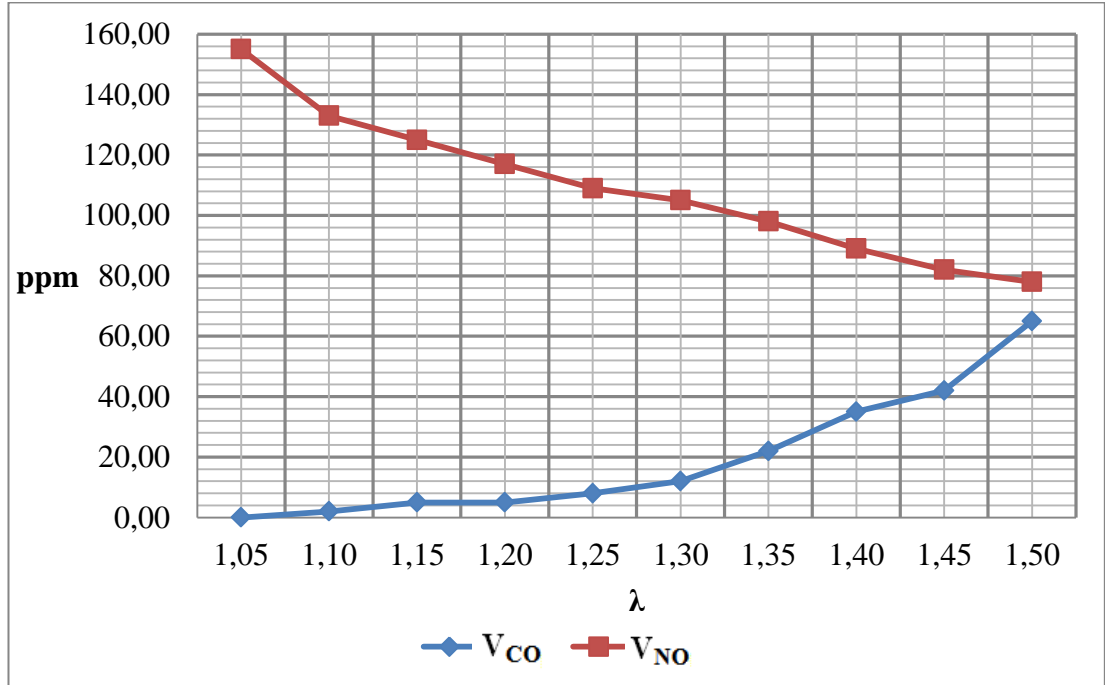
$\lambda$	Min. O <sub>2</sub> Miktarı	Yakma Havası (L <sub>min</sub> )	V <sub>O<sub>2</sub></sub>		
			Teorik	Gerçek	% Değişim
1,00	1,78	8,49	0,00	0,00	0,00
1,05	1,78	8,91	1,09	1,19	9,04
1,10	1,78	9,33	2,07	2,20	6,03
1,15	1,78	9,76	2,97	3,05	2,84
1,20	1,78	10,18	3,78	3,99	5,65
1,25	1,78	10,61	4,52	4,68	3,59
1,30	1,78	11,03	5,20	5,57	7,16
1,35	1,78	11,46	5,82	6,19	6,29
1,40	1,78	11,88	6,40	6,78	5,90
1,45	1,78	12,30	6,94	7,25	4,50
1,50	1,78	12,73	7,44	7,78	4,63



Şekil 7.3. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki teorik ve gerçek oksijen emisyonlarının karşılaştırılması

Çizelge 7.7. Hava fazlalık katsayıları için kuru duman gazındaki karbonmonoksit ve azotoksit emisyonlarının miktarları

$\lambda$	Min. O <sub>2</sub> Miktarı	Yakma Havası (L <sub>min</sub> )	V <sub>CO</sub>		V <sub>NO</sub>	
			PPM	%	PPM	%
1,00	1,78	8,49	-	-	-	-
1,05	1,78	8,91	0,00	0,00	155,00	0,0155
1,10	1,78	9,33	2,00	0,0002	133,00	0,0133
1,15	1,78	9,76	5,00	0,0005	125,00	0,0125
1,20	1,78	10,18	5,00	0,0005	117,00	0,0117
1,25	1,78	10,61	8,00	0,0008	109,00	0,0109
1,30	1,78	11,03	12,00	0,0012	105,00	0,0105
1,35	1,78	11,46	22,00	0,0022	98,00	0,0098
1,40	1,78	11,88	35,00	0,0035	89,00	0,0089
1,45	1,78	12,30	42,00	0,0042	82,00	0,0082
1,50	1,78	12,73	65,00	0,0065	78,00	0,0078



Şekil 7.4. Hava fazlalık katsayıları için karbonmonoksit ve azotoksit emisyonlarının miktarları

### 7.3. Hava Fazlalık Katsayısı ve Doğal Gaz Tüketiminin Tespiti

Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde belirtilen emisyon değerleri dikkate alınarak, yanma deneyleri sonunda elde edilen hava fazlalık katsayıları, karbondioksit, karbonmonoksit, azotoksit, azot ve oksijen miktarları incelendiğinde, en uygun emisyon değerlerinin hava fazlalık katsayısının 1,10 olduğunda ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Doğal gaz giriş basıncı 9 milibar, hava giriş basıncının 10,35 milibar olarak ayarlandığında hava fazlalık katsayısı 1,10 olmaktadır. Hava fazlalık katsayısı tolerans değeri 1,10 +0,05 olarak alınması uygun olacaktır.

Doğal gaz yanması ile ilgili yapılan çalışmalarda kuru baca gazları içerisindeki karbondioksit oranının % 10,5–11,5 ve oksijen oranının % 2–3 seviyesinde bulunması uygun olarak değerlendirilmektedir [58, 59, 60, 61]. Hava fazlalık katsayısı 1,10 olduğunda kuru baca gazındaki hacimsel oksijen % 2,20–3,05, karbondioksit miktarı % 10,52–10,75, karbonmonoksit miktarı 0–10 ppm, azotoksitler ise 125–150 ppm aralığında ölçülmektedir. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde karbonmonoksit emisyon miktarı maksimum 80 ppm, azotoksit emisyon miktarı maksimum 390 ppm olarak verilmiştir. Yeni brülör tasarımıyla, doğal gazın yakılması sonucu ortaya çıkan baca gazı içerisindeki karbonmonoksit ve azotoksit emisyon değerleri yasal gerekliliklerin oldukça altında gelmektedir.

Hava fazlalık katsayısı 1,10–1,15 aralığında ayarlanarak Mart 2012'den itibaren ısıtım hattı sertleştirme fırınında doğal gaz tüketimleri ölçülmeye başlanmıştır. Deneylerin yapıldığı sürekli ısıtım fırını Haziran 2009'da üretime başlamıştır. 2009–2011 yılları arasında kullanılan yıllık doğal gaz tüketim değerleri, 2012 yılına ait de 01.01.2012–30.05.2012 tüketim değerleri Çizelge 7.8'de verilmiştir.

Yeni brülör tasarımı ve yeni brülörlerde yanma için belirlenen hava fazlalık katsayısı 1,10 değeri için 2012 yılı Mart–Nisan–Mayıs ayları için birim kg başına düşen doğal gaz tüketimi, 2011 yılı aylık ortalama doğal gaz tüketimine göre % 13,68 oranında

azalmıştır. 2011 yılı aylık ortalama doğal gaz tüketimi 0,108 m<sup>3</sup>/kg değerinden, yeni brülörlerin devreye girmesiyle birlikte 2012 yılı Mart–Nisan–Mayıs ayları için ortalama doğal gaz tüketimi 0,095 m<sup>3</sup>/kg değerine düşmüştür.

Deneylelerin yapıldığı ısıl işlem fırınında 2012 yılı itibariyle, 450 000 m<sup>3</sup> doğal gaz kullanılması planlanmaktadır. Yeni brülör tasarımı ile birlikte 61 560 m<sup>3</sup> /yıl doğal gaz kullanımında tasarruf yapılması beklenmektedir. Başkent Gaz, Mayıs 2012 doğalgaz ücret tarifesine göre, sanayi kuruluşları için KDV dahil doğal gaz fiyatı 0,810905 TL/ m<sup>3</sup> ’tür [64]. Mayıs 2012 itibariyle, sanayi kuruluşları için geçerli olan doğal gaz fiyatları baz alındığında 61 560 m<sup>3</sup> /yıl olan doğal gaz tasarrufunun maddi değeri 49.870, 65 TL/yıl olacaktır.

Çizelge 7.8. 2009–2012 yıllarına ait aylık doğal gaz tüketimleri

Yıllar	Yıllık Toplam Doğal Gaz Tüketimi (m <sup>3</sup> )	Ortalama Doğal Gaz Tüketimi (m <sup>3</sup> /kg cıvata)
2009	85 349	0,102
2010	151 032	0,113
2011	297 444	0,118
2012 (01.03–30.05 arası)	114 000	0,095

#### 7.4. Brülör Verim Hesaplamaları

Brülörde yanma veriminin artırılabilmesi için yanma esnasında açığa çıkan ısıdan tamamen faydalanmaya ve duman gazı kayıplarının düşük tutulmasına çalışılır. Brülör veriminin hesaplanabilmesi için baca gazı duyulur ısı kaybının hesaplanması gereklidir. Baca gazı duyulur ısı kaybı, yanma odasına giren yakıt/hava karışımı ve yanma odasını terk eden baca gazlarının sıcaklıkları arasındaki fark olarak tanımlanabilir. Hava fazlalığı, baca gazı hacmi ve baca gazı sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, baca gazı duyulur ısı kaybıda o kadar yüksek olur. Alman standartlarına göre yüzdesel olarak açığa çıkan baca gazı duyulur ısı kaybı Eş. 7.1'e göre hesaplanır. Baca gazı duyulur ısı kaybı 100'den çıkarılarak brülörlerdeki yanma verimi bulunur [47, 65, 66].

$$q_A = f \frac{T_A - T_B}{CO_2} \quad (7.1)$$

- $q_A$  : Baca gazı duyulur ısı kaybı (%)  
 $f$  : Siegert katsayısı (Birimsiz)  
 $T_A$  : Baca gazı çıkış sıcaklığı (°C)  
 $T_B$  : Ortam hava sıcaklığı (°C)  
 $CO_2$  : Baca gazı içerisindeki karbondioksit yüzdesi (%)

Siegert katsayısı (f) yakıt türüne, baca gazı hacmine ve hava fazlalık katsayısına bağlıdır. Siegert katsayısı doğal gaz yakıtlı hava üflemeli(fanlı) brülörde 0,46, üflemez(fansız) brülörlerde ise 0,42 olarak alınmaktadır. Yanma deneylerinde kullanılan brülörlerde hava fanı kullanıldığı için Siegert katsayısı 0,46 olarak alınmıştır [48, 57, 58]. Farklı baca gazı-ortam sıcaklıkları ve baca gazı içerisindeki karbondioksit oranına göre hesaplanan brülör verimleri Çizelge 7.9'da verilmiştir. Çizelge 7.9'da görüleceği üzere mevcut çalışma şartlarında brülör verimleri % 91'in üzerindedir.

Çizelge 7.9. Brülör verim değerleri

<b>Deney</b>	<b>Sievert Katsayısı</b>	<b>Baca Gazı Sıcaklığı</b>	<b>Ortam Sıcaklığı</b>	<b>Karbondiyoksit Oranı (%)</b>	<b>Duyulur Isı Kaybı (%)</b>	<b>Verim (%)</b>
1	0,46	188	25	10,78	6,96	93,04
2	0,46	185	26	10,59	6,91	93,09
3	0,46	220	26	10,61	8,41	91,59
4	0,46	201	25	10,69	7,57	92,43
5	0,46	215	24	10,68	8,23	91,77
6	0,46	195	28	10,57	7,27	92,73
7	0,46	197	27	10,70	7,31	92,69
8	0,46	182	26	10,80	6,64	93,36
9	0,46	189	26	10,72	6,99	93,01
10	0,46	178	27	10,59	6,56	93,44
11	0,46	182	29	10,66	6,60	93,40
12	0,46	184	27	10,58	6,83	93,17
13	0,46	197	27	10,69	7,32	92,68
14	0,46	213	30	10,29	8,18	91,82
15	0,46	202	31	10,92	7,20	92,80
16	0,46	198	25	10,35	7,69	92,31
17	0,46	185	27	10,67	6,81	93,19
18	0,46	187	28	10,87	6,73	93,27
19	0,46	197	26	10,32	7,62	92,38
20	0,46	201	25	10,74	7,54	92,46

### 7.5. Baca Gazı Duyulur Isı Kaybı Hesaplamaları İçin Hata Analizi

Deneylelerden elde edilen veriler kullanılırken analiz yapılmalıdır. Deney yapım sürecinde deneyi yapan kişi ne kadar tecrübeli olursa olsun, deney bulgularında bazı hatalar görülebilmektedir. Deneysel hatalar genel olarak üç grupta toplanmaktadır. Birincisi, dikkatsizlik ve tecrübesizlikten kaynaklanan hatalardır. Yanlış sistem tasarımı ve ölçme aleti seçimi bu tür hatalara neden olmaktadır. İkincisi ise sabit veya sistematik bir şekilde sürekli devam eden hatalar olup, tekrar edilen okumalarda görülmektedir. Diğer hatalar ise rastgele hatalar olup, bunlar deneyde kullanılan elemanların değişiminden, deneyi yapanların dikkatsizliklerinden ve elektrik geriliminin değişmesi sonucu oluşan hatalardır [67, 68].

Çalışmanın deneysel aşamasında, sistemde kullanılan cihaz ve ekipmanlardan, emisyon ölçüm cihazı ve ısı çiftlerinin kalibrasyon hatalarından dolayı yanlış hesaplama yapılabilmektedir. Bu hatalar, cihazların imalatından, bağlantı yerlerinden ve cihazları kullanan kişilerin kullanım hatasından oluşabilmektedir [67, 68]. Cihaz ve ölçüm aletlerinin hatalarını ölçebilmek için hata analizi yönteminde hesaplanması istenilen büyüklük  $R$  ve bu büyüklüğe etki eden  $n$  adet bağımsız değişkenlerde  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  ise;

$$R = R ( x_1, x_2, x_3, \dots, x_n ) \quad (7.2)$$

$R$  değeri yukarıdaki gibi yazılabilir.  $W_R$ ,  $R$  büyüklüğünün hata miktarı ve her bir bağımsız değişkene ait hata oranları  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  ise;

$$W_R = m. \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Brülörlerin verim hesaplamasının yapılabilmesi için öncelikli olarak baca gazı duyulur ısı kaybının hesaplanması gerekir. Baca gazı

duyulur ısı kaybının hesaplanmasında kullanılan sıcaklık ve yüzdesel karbondioksit miktarının belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerde ortaya çıkan hata miktarının hesaplaması, Eş. 7.3 kullanılarak yapılabilmektedir.

Çizelge 7.9'da verilen brülör verim değerlerinin hesaplanmasında kullanılan Deney 1, Deney 2 ve Deney 3 ölçüm değerleri için Eş. 7.3 kullanılarak yapılan hata miktarı hesaplamaları aşağıda verilmiştir.

Deney 1 için baca gazı duyulur ısı kaybı hata miktarı:

Baca Gazı Sıcaklığı ( $T_A$ ) : 188 °C

Ortam Sıcaklığı ( $T_B$ ) : 25 °C

Karbondiosit Yüzdesi ( $CO_2$ ) : 10,78

$$\frac{W_q}{q} = \left[ \left( \frac{w_{T_A}}{T_A} \right)^2 + \left( \frac{w_{T_B}}{T_B} \right)^2 + \left( \frac{w_{CO_2}}{CO_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.4)$$

$$\frac{W_q}{q} = \left[ \left( \frac{0,2}{188} \right)^2 + \left( \frac{0,2}{25} \right)^2 + \left( \frac{0,8}{10,78} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.5)$$

$$\frac{W_q}{q} = \% 7,46 \quad (7.6)$$

Deney 2 için baca gazı duyulur ısı kaybı hata miktarı:

Baca Gazı Sıcaklığı ( $T_A$ ) : 185 °C

Ortam Sıcaklığı ( $T_B$ ) : 26 °C

Karbondiosit Yüzdesi ( $CO_2$ ) : 10,59

$$\frac{W_q}{q} = \left[ \left( \frac{w_{T_A}}{T_A} \right)^2 + \left( \frac{w_{T_B}}{T_B} \right)^2 + \left( \frac{w_{CO_2}}{CO_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.7)$$

$$\frac{W_q}{q} = \left[ \left( \frac{0,2}{185} \right)^2 + \left( \frac{0,2}{26} \right)^2 + \left( \frac{0,8}{10,59} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.8)$$

$$\frac{W_q}{q} = \% 7,59 \quad (7.9)$$

Deney 3 için baca gazı duyulur ısı kaybı hata miktarı:

Baca Gazı Sıcaklığı ( $T_A$ ) : 220 °C

Ortam Sıcaklığı ( $T_B$ ) : 26 °C

Karbondiosit Yüzdesi ( $CO_2$ ) : 10,61

$$\frac{W_q}{q} = \left[ \left( \frac{w_{T_A}}{T_A} \right)^2 + \left( \frac{w_{T_B}}{T_B} \right)^2 + \left( \frac{w_{CO_2}}{CO_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.10)$$

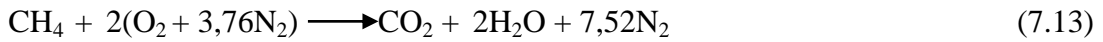
$$\frac{W_q}{q} = \left[ \left( \frac{0,2}{220} \right)^2 + \left( \frac{0,2}{26} \right)^2 + \left( \frac{0,8}{10,61} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.11)$$

$$\frac{W_q}{q} = \% 7,57 \quad (7.12)$$

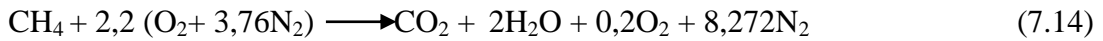
Duyulur ısı kaybının belirlenmesinde, sıcaklıkların ölçülmesinde kullanılan ısı çiftlerinin kalibrasyonundan ve ölçüm cihazlarının hassasiyetinden dolayı hatalar oluşmaktadır. Deneysel verilerin sıcaklık okumalarında  $\pm 0,2$  °C hassasiyetinde ısı çiftleri kullanılmıştır. Karbondioksit emisyon ölçümündeki hatalar, kullanılan emisyon ölçüm cihazının hassasiyetinden, ölçüm esnasında yapılan yanlışlıklardan ve sistemde oluşabilecek kaçaıklardan oluşmaktadır. Emisyon ölçüm cihazı ve ısı çiftlerindeki hatalardan, baca gazı duyulur ısı kaybı hata oranı yaklaşık okunan değer  $\pm \% 7,50$  civarında olduğu görülmüştür. Duyulur ısı kaybı oranları Çizelge 7.9'da verilmiştir. Çizelge 7.9'a göre duyulur ısı kaybı oranı  $\% 6,56-8,41$  arasında değişmektedir. Baca gazı duyulur ısı kaybı 100'den çıkarılarak brülörlerdeki yanma verimi bulunmaktadır.

## 7.6. Hava-Yakıt Oranı ve Çiğ Noktası Sıcaklığının Hesaplanması

Yanma işlemlerinin analizinde, yakıt ve havanın sayısal olarak ifadesi için sıkça kullanılan büyüklük hava-yakıt oranı (HY)'dır. Genellikle kütleyle göre ifade edilir ve yanma işlemlerinde havanın kütesinin yakıtın kütesine oranı olarak tanımlanır. Hava fazlalık katsayısının 1,10 olduğu durumdaki hava-yakıt oranının hesaplanabilmesi için öncelikli olarak metana ait yanma denkleminin girdi ve ürünler kısmının denkleştirilmesi gerekmektedir. Metanın stokiyometrik yanma denklemi aşağıda verilmiştir.



Hava fazlalık katsayısının 1,10 ( $\lambda = 1,10$ ) olduğu durumda Eş. 7.11 aşağıda verilen şekle dönüşür.



$$\text{Hava Yakıt Oranı} = \frac{m_{\text{hava}}}{m_{\text{yakıt}}} = \frac{(2,2 \times 4,76 \text{ kmol}) \cdot (29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})}{(1 \text{ kmol}) \cdot (12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}) + (2 \text{ kmol}) \cdot (2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})} \quad (7.15)$$

$$\text{Hava Yakıt Oranı} = \frac{239,88 \text{ kg}}{16 \text{ kg}} = 14,99 \text{ kg hava / kg yakıt} \quad (7.16)$$

Hava fazlalık katsayısının 1,10 olduğu durumda, yanma sırasında her 1 kg yakıt için 15 kg hava sağlanmalıdır.

Ürünlerin çiğlenme noktası, ürünler sabit basınç altında soğutulurken ürünler içinde bulunan su buharının yoğuşmaya başladığı sıcaklıktır. Buhar-gaz karışımının çiğlenme noktası su buharının kısmi basıncına karşılık gelen doyumluk sıcaklığına eşittir. Bu nedenle, öncelikli olarak su buharının kısmi basıncının ( $P_{su}$ ) bilinmesi

gerekir. Hava fazlalık katsayısının 1,10 olduğu durumda, yanma gazlarının ideal davrandığı varsayılarak;

$$P_{su} = \left( \frac{N_{su}}{N_t} \right) (P_t) = \left( \frac{2 \text{ kmol}}{11,47 \text{ kmol}} \right) (100 \text{ kPa}) = 17,43 \text{ kPa} \quad (7.17)$$

Su buharının kısmi basıncına göre, doymuş buhar tablosundan çığ noktası (yoğuşma) sıcaklığı interpolasyon yapılarak 57 °C olarak bulunur [43,44].

Çizelge 7.9'da verilen baca gazı sıcaklıkları incelendiğinde, baca gazı sıcaklıklarının 182–215 °C arasında deđiştđği görölmektedir. Baca gazı çıkış sıcaklıklarının çığ noktası sıcaklıklarının üzerinde olması nedeniyle bacada yoğuşma görölmemektedir.

### 7.7. Adyabatik Alev Sıcaklığının Hesaplanması

Termodinamik, bir işlem sırasında belli hallerdeki enerji değerleri ile değil, sistemin enerjisindeki değişim ile ilgilenmektedir. Bu yüzden, referans olarak herhangi bir hal seçilebilir ve o haldeki maddenin iç enerjisi veya entalpisi sıfır olarak kabul edilebilir. İşlem sırasında kimyasal bileşimde herhangi bir değişiklik olmadığı zaman, seçilen referans hal sonuca etki etmez. Bununla beraber, işlemde kimyasal tepkimeler olduğu zaman, işlem sonunda sistemin bileşimi, işlemin başlangıcında sahip olduğu halde uzun süre kalmaz. Bu durumda, tüm maddeler için genel bir referans haline gerek vardır. Seçilen referans hal, standart referans olarak da bilinen 25 °C ve 1 atm'dir. Standart referans haldeki büyüklük değerleri  $h^\circ$  (entalpi) ve  $u^\circ$  (iç enerji)'da olduğu gibi ( $^\circ$ ) üst indisi ile gösterilmektedir [43].

İş etkileşiminin olmadığı yanma tepkimelerinde, sürekli akıştaki enerji denklik bağıntısından bu işlem sırasındaki ısı transferi, ürünler ve girdilerin entalpileri arasındaki farka eşit olacaktır.

$$Q = H_{ürün} - H_{girdi} \quad (7.18)$$

Standart haldeki büyüklüklerin yanında kimyasal tepkime sırasında, kimyasal enerjideki değişimleri tanımlayabilmek için tepkime entalpisi ( $h_T$ ) kullanılır. Tepkime entalpisi, tüm tepkime için belli bir haldeki ürünlerin entalpileriyle, aynı haldeki girdilerin entalpileri arasındaki fark olarak tanımlanır. Yanma işleminde, tepkime entalpisi genellikle yanma entalpisi ( $h_Y$ ) olarak adlandırılır. Yanma entalpisi, 1 kmol (veya 1 kg) yakıtın belli bir basınç ve sıcaklıkta tamamen yandığı zaman ortaya çıkan ısı miktarını temsil eder [43, 44].

$$h_T = h_Y = H_{\text{ürün}} - H_{\text{girdi}} \quad (7.19)$$

Çok farklı yakıt ve yakıt karışımları vardır. Bu nedenle, tüm haller için  $h_Y$  değerlerinin listesinin hazırlama imkanı yoktur. Bunun yanında, yanma tamamlanmadığı zaman yanma entalpisi çok kullanılmaz. Bu yüzden bir kaç referans haldeki, element veya bileşiğin kimyasal enerjisini temsil edecek daha temel bir özelliğe sahip olmak çok pratik bir yaklaşımdır. Bu özellik belli bir haldeki bir maddenin kendi kimyasal birleşiminden ileri gelen entalpi olarak görülen oluşum entalpisi ( $h_{o1}$ )'dir [43].

Başlangıç noktası oluşturmak üzere, tüm kararlı elementlerin ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$  ve  $C$  gibi)  $25^\circ C$  ve  $1 \text{ atm}$ 'de ki standart referans haldeki oluşum entalpileri sıfır kabul edilir. Diğer bir ifadeyle, tüm kararlı elementler için  $h_{o1} = 0$ 'dır. Bu durum,  $0,01^\circ C$  'deki doymuş sıvı suyun iç enerjisinin sıfır olarak alınmasından farklı değildir [44].

Bir elementin kararlı şekli, onun  $25^\circ C$  ve  $1 \text{ atm}$ 'de kimyasal olarak kararlı şeklidir. Örneğin, azot  $25^\circ C$  ve  $1 \text{ atm}$ 'de iki atomlu ( $N_2$ ) şekilde bulunur. Bu yüzden, standart referans halde azotun kararlı şekli tek atomlu azot ( $N$ ) değil, iki atomlu azot ( $N_2$ )'tur. Eğer, bir element  $25^\circ C$  ve  $1 \text{ atm}$ 'de ki kararlı şeklinden daha başka şekillerde bulunursa, onlardan birisi kararlı şekil olarak belirlenmelidir. Örneğin, karbon için kararlı şeklin, elmas değil grafitin olduğu kabul edilmiştir [43, 44].

Hiç bir iş etkileşimi, kinetik ve potansiyel enerjide herhangi bir değişme olmadığında, yanma işleminde ortaya çıkan kimyasal enerji ya çevreye ısı olarak verilir ya da yanma ürünlerinin sıcaklıklarını yükseltme için kullanılır. Isı kaybı azaldıkça sıcaklıktaki yükselme artar. Çevreye hiç ısı kaybının olmadığı sınır halinde ( $Q=0$ ), ürünlerin sıcaklıkları tepkimenin adyabatik alev veya adyabatik yanma sıcaklığı denilen maksimum değerine ulaşacaktır. Kararlı akım yanma işleminde adyabatik alev sıcaklığı Eş. 7.18 'de  $Q = 0$  ve  $W = 0$  konularak bulunabilir.

$$H_{\text{ürün}} = H_{\text{girdi}} \quad (7.20)$$

$$\sum N_{\text{ü}} (h_{\text{ol}} + h - h^{\circ})_{\text{ü}} = \sum N_{\text{g}} (h_{\text{ol}} + h - h^{\circ})_{\text{g}} \quad (7.21)$$

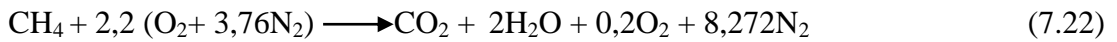
Eş. 7.21'de verilen  $N_{\text{ü}}$  ürünlerin,  $N_{\text{g}}$  ise girdilerin kmol olarak miktarı olarak tanımlanır. Başlangıçta girdiler ve onların halleri belirlendikten sonra, girdilerin entalpileri ( $H_{\text{girdi}}$ ) kolayca bulunabilir. Ürünlerin sıcaklıkları hesaplamadan önce bilinmediğinden, ürünlerin entalpilerinin ( $H_{\text{ürün}}$ ) hesaplaması, o kadar kolay değildir. Bu nedenle, adyabatik alev sıcaklığının belirlenebilmesi için yanma ürünlerinin duyulur entalpi değişimlerini veren eşitlikler olmadığında tekrarlanan bir tekniğin kullanılması gerekir. Gaz ürünler için bir sıcaklık kabul edilir ve bu sıcaklıktaki  $H_{\text{ürün}}$  belirlenir. Bulunan değer  $H_{\text{girdi}}$  eşit değilse, hesaplamalar başka bir sıcaklık için tekrarlanır. O zaman, adyabatik alev sıcaklığı bu iki sonuçtan interpolasyon ile bulunur. Oksitleyici hava olduğunda, gaz ürünler çoğunlukla azot ( $N_2$ )'dur. Bu nedenle, adyabatik alev sıcaklığı için ilk tahmin tüm gaz ürünlere azot gibi işlem yaparak elde edilir [43].

Yanma odasında, maddenin karşılaşacağı en yüksek sıcaklık metalurjik değerlendirmeler ile sınırlanır. Bu yüzden, adyabatik alev sıcaklığı yanma odalarının, gaz türbinlerinin ve nozulların tasarımında çok önemlidir. Bununla birlikte, bu cihazlarda olan maksimum sıcaklıklar adyabatik alev sıcaklığından oldukça düşüktür. Çünkü, genellikle yanma tam olmaz. Isı kaybı olur ve yüksek sıcaklıklarda gaz ürünler ayrışmaya uğrarlar. Yanma odasındaki maksimum sıcaklık, soğutucu olarak da iş yapan fazla hava miktarı ayarlanarak kontrol edilebilir [43, 44].

Tasarımı yapılan brülörlerde, hava fazlalık katsayısının 1,10 ( $\lambda = 1,10$ ) olduğu durum için adyabatik alev sıcaklığının hesaplanması aşağıda verilmiştir. Hesaplamalar yapılırken yapılan kabuller:

- 1) Yanma işlemi kararlı bir işlem olarak alınmıştır.
- 2) Yanma odası adyabatiktir.
- 3) Hiçbir iş etkileşimi yoktur.
- 4) Hava ve yanma gazları ideal gazlardır.
- 5) Kinetik ve potansiyel enerjideki değişimler ihmal edilmiştir.
- 6) Yakıt-havanın sıcaklığı 25 °C olarak alınmıştır.
- 7) Yakıt-havanın basıncı 1 atm olarak alınmıştır.

Hava fazlalık katsayısı 1,10 için denkleştirilmiş yanma denklemi;



olarak bulunur. Yukarıda verilen kabuller ışığında, adyabatik alev sıcaklığı bağıntısı

$$H_{\text{ürün}} = H_{\text{girdi}} \quad (7.23)$$

$$\sum N_{\text{ü}} (h_{\text{ol}} + h - h^{\circ})_{\text{ü}} = \sum N_{\text{g}} (h_{\text{ol}})_{\text{g}} = (Nh_{\text{ol}})_{\text{Metan}} \quad (7.24)$$

şeklini alır. Tüm girdiler standart referans halde olduğu için azot ve oksijen için oluşum entalpileri  $h_{\text{ol}} = 0$ 'dır.

Girdi-ürünlerin 298 K'de ki  $h_{\text{ol}} = 0$  ve  $h$  değerleri Çizelge 7.10'da verilmiştir.

Çizelge 7.10. Girdi-ürünlerin 298 K'de  $h_{ol} = 0$  ve  $h$  değerleri

Madde	$h_{ol}$ (kJ/kmol)	$h_{298}$ (kJ/kmol)
$\text{CH}_4$ (gaz)	-74 800	-
$\text{O}_2$	0	8 682
$\text{N}_2$	0	8 669
$\text{H}_2\text{O}$ (gaz)	-241 820	9 904
$\text{CO}_2$	-393 520	9 364

$$(1 \text{ kmol CO}_2) [ (-393 520 + h_{\text{CO}_2} + 9 364) \text{ kJ/kmol CO}_2] + (2 \text{ kmol H}_2\text{O}) [ (-241 820 + h_{\text{H}_2\text{O}} - 9 904) \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}] + (0,2 \text{ kmol O}_2) [ (0 + h_{\text{O}_2} - 8 682) \text{ kJ/kmol O}_2] + 0,2 \text{ kmol N}_2 [ (0 + h_{\text{N}_2} - 8 669) \text{ kJ/kmol N}_2] = (1 \text{ kmol CH}_4) (-74 850 \text{ kJ/kmol CH}_4) \quad (7.25)$$

$$\begin{aligned} & -402 884 + h_{\text{CO}_2} - 503 448 + 2 h_{\text{H}_2\text{O}} - 1 736,4 + 0,2 h_{\text{O}_2} - 71 709 + 8 272 h_{\text{N}_2} \\ & = -74 850 \end{aligned} \quad (7.26)$$

$$h_{\text{CO}_2} + 2 h_{\text{H}_2\text{O}} - 1 736,4 + 0,2 h_{\text{O}_2} + 8 272 h_{\text{N}_2} = 904927,40 \text{ kJ} \quad (7.27)$$

Eş. 7.27'de üç bilinmeyenli bir eşitliğin olduğu görülmektedir. İdeal gazlar için  $h = h(T)$  olduğu için gerçekte sadece bir bilinmeyen vardır o da ürün sıcaklığı ( $T_{\text{ürün}}$ )'dir. Bu nedenle ürünlerin sıcaklıklarının belirlenebilmesi için deneme-yanılma yaklaşımı kullanılacaktır.

İlk tahmin, eşitliğin sağ tarafı toplam mol sayısına bölünerek  $904927,40 / (1 + 2 + 0,2 + 8,272) = 78881,39 \text{ kJ/kmol}$  şeklinde elde edilir.

Bu entalpi değeri yaklaşık  $\text{N}_2$  için 2 350 K,  $\text{O}_2$  için 2 275 K,  $\text{H}_2\text{O}$  için 2 300 K ve  $\text{CO}_2$  için 1 900 K'dir. Mol sayısının büyük çoğunluğunun  $\text{N}_2$  olması nedeniyle  $T_{\text{ürün}}$

2 350 K'e yakın ancak bu değerin biraz altında olacaktır. Bu nedenle başlangıç için ürün sıcaklığı 2 200 K alınacaktır.

2 200 K alınan ürün sıcaklığı için entalpi değerleri termodinamik tablolarda;

$$h_{\text{CO}_2} = 112\,936 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{\text{H}_2\text{O}} = 92\,940 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{\text{O}_2} = 75\,484 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{\text{N}_2} = 72\,040 \text{ kJ/kmol}$$

olarak verilmiştir [43]. Verilen bu entalpi değerleri Eş. 7.27'de yerine konulursa;

$$112\,936 + 2 \times 92\,940 + 0,2 \times 75\,484 + 8,272 \times 72\,040 = 909\,827,68 \text{ kJ} \quad (7.28)$$

bulunur. Bu değer, Eş. 7.25'in sağ tarafındaki 904927,40 kJ değerinden daha büyüktür. Bu nedenle gerçek adyabatik alev sıcaklığı 2 200 K değerinin altında olacaktır.  $T_{\text{ürün}}$  sıcaklığı 2 100 K seçilerek işlemler tekrarlanır.

2 100 K alınan ürün sıcaklığı için entalpi değerleri termodinamik tablolarda;

$$h_{\text{CO}_2} = 106\,864 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{\text{H}_2\text{O}} = 87\,735 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{\text{O}_2} = 71\,668 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{\text{N}_2} = 68\,417 \text{ kJ/kmol}$$

olarak verilmiştir [43]. Verilen bu entalpi değerleri Eş. 7.25'de yerine konulursa;

$$106\,864 + 2 \times 87\,735 + 0,2 \times 71\,668 + 8,272 \times 68\,417 = 862\,613,02 \text{ kJ} \quad (7.29)$$

bulunur. Bu değer, Eş. 7.27'nin sağ tarafındaki 904927,40 kJ değerinden daha küçüktür. Bu nedenle gerçek ürün sıcaklığı 2 100 K değerinin üzerinde olacaktır.

Gerçek ürün sıcaklığı 2 100 K'den yüksek, 2 200 K değerinden de düşük olacaktır. 2 100 K ve 2 200 K sıcaklık değerleri arasında interpolasyon yapılarak adyabatik alev sıcaklığı 2189,62 K olarak bulunur.

Hava fazlalık katsayısının 1,15 ( $\lambda = 1,15$ ) olduğu durumda, yukarıda verilen işlemler tekrar edilerek adyabatik alev sıcaklığı 2 127,67 K bulunur. Hava fazlalık katsayısı arttıkça adyabatik alev sıcaklığı düşmektedir.

Brülörün tamamen yalıtılması durumunda ortaya çıkabilecek maksimum adyabatik alev sıcaklığı 2 189,62 K olacaktır. Adyabatik alev sıcaklığı, yanma odasında, maddenin karşılaşabileceği en yüksek sıcaklık değeridir. Tasarımı yapılan brülörlerde alev sıcaklıkları 1 200–1 300 K aralığında ölçülmektedir. Ölçülen alev sıcaklık değerleri, adyabatik alev sıcaklık değerinden oldukça düşüktür. Bu nedenle, yanma sırasında ortaya çıkacak yüksek sıcaklıklar nedeniyle brülörlerin üretiminde kullanılan metallerin erimesi, yırtılması ya da delinmesi gibi bir durumla karşılaşılmamaktadır.

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doğal gazlı sürekli yüklemeli, tel bant konveyörlü, azot-metanol atmosfer kontrollü, ısıtım işlem fırınlarında kullanılmak üzere brülör tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Tasarımı yapılan brülörde, doğal gaz yanması için teorik ve deneysel olarak incelenmiştir.

Brülörde doğal gaz yanmasıyla ilgili deneylere başlamadan önce, yanmayı etkileyecek girdiler tespit edilmiştir. Tespit edilen girdiler, sabit ve değişken olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Sistem üzerinde yapılan analizde, doğal gaz yanması için 8 adet girdi ve 12 adet çıktı parametresi belirlenmiştir.

Değişken girdi olarak alınan brülör giriş doğal gaz ve hava basıncı değerlerine göre, hava fazlalık katsayısı, yanma (baca) gazı sıcaklığı, baca gazı emisyonları (oksijen, karbondioksit, karbonmonoksit, azotoksit, azotdioksit, su) ve doğal gaz tüketimi değişecektir. Isıtım işlem fırını ortam sıcaklığını 860–880 °C sıcaklık değerinin altına düşürmeden, en düşük doğal gaz tüketimi değeri en önemli çıktı olarak kabul edilmiştir.

Yapılan deneylerde, hava fazlalık katsayı 1 olarak ölçülemedi. En düşük hava fazlalık katsayısı 1,02 olarak ölçülmüştür. Brülör girişi doğal gaz ve hava basıncı değerlerine göre hava fazlalık katsayıları tespit edildikten sonra, istenilen hava fazlalık katsayısındaki baca gazı emisyon ölçümleri alınmıştır. Farklı hava fazlalık katsayıları için teorik olarak hesaplanan karbondioksit, azot ve oksijen emisyonları deneysel olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, teorik olarak hesaplanamayan karbonmonoksit ve azotoksit emisyonları için ölçümler yapılmıştır.

Karbondioksit için yapılan teorik baca gazı hesaplamalarıyla, deneysel yapılan baca gazı ölçümleri arasında hava fazlalık katsayısının 1–1,20 olduğu değerlerde değişim % 1,68–6,19 olarak tespit edilmiştir. Hava fazlalık katsayısının 1,20'den daha büyük olduğu durumlarda teorik ve deneysel veriler arasındaki değişim % 10 değerinin üzerinde çıkmıştır.

Hava fazlalık katsayısının 1–1,50 arasındaki değerleri için oksijen için yapılan teorik baca gazı hesaplamalarıyla, deneysel yapılan baca gazı ölçümleri arasındaki değişim ortalama % 5 olarak bulunmuştur. Hava fazlalık katsayısının artışıyla birlikte deneysel olarak ölçülen oksijen miktarıyla, teorik olarak hesaplanan oksijen miktarı arasındaki değişim yüzdesi düşmektedir.

Azot ölçümlerinde ise deneysel değerler, teorik olarak hesaplanan değerlerin % 1–1,60 altında ölçülmüştür. Hava fazlalık katsayısının 1,30'dan daha büyük olduğu durumlarda deneysel verilerle, teorik hesaplamalar arasındaki değişim % 1,5 değerinin üzerinde çıkmıştır.

Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde belirtilen emisyon değerleri dikkate alınarak, yanma deneyleri sonunda elde edilen hava fazlalık katsayıları, karbondioksit, karbonmonoksit, azotoksit, azot ve oksijen miktarları incelediğinde, en uygun emisyon değerlerinin hava fazlalık katsayısının 1,10 olduğunda ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Doğal gaz giriş basıncı 9 milibar, hava giriş basıncı 10,35 milibar olduğunda hava fazlalık katsayısı 1,10 olmaktadır. Hava fazlalık katsayısı tolerans değeri 1,10 +0,05 olarak alınmıştır.

Hava fazlalık katsayısı 1,10 olduğunda kuru baca gazındaki hacimsel oksijen % 2,20–3,05, karbondioksit miktarı % 10,52–10,75, karbonmonoksit miktarı 0–10 ppm, azotoksitler ise 125–150 ppm aralığında ölçülmüştür. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde karbonmonoksit emisyon miktarı maksimum 80 ppm, azotoksit emisyon miktarı maksimum 390 ppm olarak verilmiştir. Yeni brülör tasarımıyla, doğal gazın yakılması sonucu ortaya çıkan baca gazı içerisindeki karbonmonoksit ve azotoksit emisyon değerleri yasal gerekliliklerin oldukça altında gelmektedir.

Hava fazlalık katsayısı 1,10–1,15 aralığında ayarlanarak Mart 2012'den itibaren ısıtım hattı sertleştirme fırınında doğal gaz tüketimleri ölçülmeye başlanmıştır. Deneylerin yapıldığı sürekli ısıtım fırını Haziran 2009'da üretime başlamıştır. Yeni brülör tasarımı ve yeni brülörlerde yanma için belirlenen hava fazlalık katsayısı

1,10 değeri için 2012 yılı Mart-Nisan-Mayıs ayları için birim kg başına düşen doğal gaz tüketimi, 2011 yılı aylık ortalama doğal gaz tüketimine göre % 13,68 oranında azalmıştır. 2011 yılı aylık ortalama doğal gaz tüketimi 0,108 m<sup>3</sup>/kg değerinden, yeni brülörlerin devreye alınmasıyla birlikte 2012 yılı Mart–Nisan–Mayıs ayları için ortalama doğal gaz tüketimi 0,095 m<sup>3</sup>/kg değerine düşmüştür.

Deneilerin yapıldığı ısıl işlem fırınında 2012 yılı itibariyle, 450 000 m<sup>3</sup> doğal gaz kullanılması planlanmaktadır. Yeni brülör tasarımı ile birlikte 61 560 m<sup>3</sup> /yıl doğal gaz kullanımında tasarruf yapılması beklenmektedir. Mayıs 2012 itibariyle, sanayi kuruluşları için geçerli olan doğal gaz fiyatları baz alındığında 61 560 m<sup>3</sup> /yıl olan doğal gaz tasarrufunun maddi değeri 49.870, 65 TL/yıl olacaktır.

Brülör veriminin hesaplanabilmesi için baca gazı duyulur ısı kaybı hesaplanmıştır. Baca gazı duyulur ısı kaybı, yanma odasına giren yakıt/hava karışımı ve yanma odasını terk eden baca gazlarının sıcaklıkları arasındaki fark olarak tanımlanmıştır. Baca gazı duyulur ısı kaybı 100'den çıkarılarak brülörlerdeki yanma verimi bulunmuştur. Farklı baca gazı–ortam sıcaklıkları ve baca gazı içerisindeki karbondioksit oranına göre hesaplanan brülör verimleri % 91'in üzerinde çıkmıştır.

Duyulur ısı kaybının belirlenmesinde, sıcaklıkların ölçülmesinde kullanılan ısıl çiftlerin kalibrasyonundan ve ölçüm cihazlarının hassasiyetinden dolayı hatalar oluşmaktadır. Deneysel verilerin sıcaklık okumalarında  $\pm 0,2$  °C hassasiyetinde ısıl çiftler kullanılmıştır. Karbondioksit emisyon ölçümündeki hatalar, kullanılan emisyon ölçüm cihazının hassasiyetinden, ölçüm esnasında yapılan yanlışlıklardan ve sistemde oluşabilecek kaçaklardan oluşmaktadır. Emisyon ölçüm cihazı ve ısıl çiftlerdeki hatalardan, baca gazı duyulur ısı kaybı hata oranı okunan değerin yaklaşık  $\pm$  % 7,50 civarında olduğu hesaplanmıştır. Yapılan deneylerde, duyulur ısı kaybı oranının % 6,56 – 8,41 arasında değiştığı görülmüştür.

Hava fazlalık katsayısının 1,10 olduğu durumda, yanma sırasında her 1 kg yakıt için 15 kg hava sağlanması gerektiği hesaplanmıştır.

Ürünlerin çığlenme noktası, ürünler sabit basınç altında soğutulurken ürünler içinde bulunan su buharının yoğuşmaya başladığı sıcaklıktır. Buhar-gaz karışımının çığlenme noktası su buharının kısmi basıncına karşılık gelen doyumluk sıcaklığına eşittir. Hava fazlalık katsayısının 1,10 olduğu durumda, su buharının kısmi basıncı 17,43 kPa bulunmuştur. Su buharının kısmi basıncına göre, doymuş buhar tablosundan çığ noktası (yoğuşma) sıcaklığı interpolasyon yapılarak 57 °C olarak hesaplanmıştır. Sistemde oluşan baca gazı sıcaklıkları incelendiğinde, baca gazı sıcaklıklarının 182-215 °C arasında değiştiği görülmektedir. Baca gazı çıkış sıcaklıklarının çığ noktası sıcaklıklarının üzerinde olması nedeniyle bacada yoğuşma görülmemektedir.

Hiç bir iş etkileşimi, kinetik ve potansiyel enerjide herhangi bir değişme olmadığında, yanma işleminde ortaya çıkan kimyasal enerji ya çevreye ısı olarak verilir ya da yanma ürünlerinin sıcaklıklarını yükseltme için kullanılır. Isı kaybı azaldıkça sıcaklıktaki yükselme artar. Çevreye hiç ısı kaybının olmadığı sınır halinde ( $Q=0$ ), ürünlerin sıcaklıkları tepkimenin adyabatik alev veya adyabatik yanma sıcaklığı denilen maksimum değerine ulaşacaktır. Hava fazlalık katsayısının 1,10 olduğu durumda adyabatik alev sıcaklığı 2 189,62 K, hava fazlalık katsayısının 1,15 olduğu durumda adyabatik alev sıcaklığı 2 127,67 K olarak bulunmuştur. Hava fazlalık katsayısı arttıkça adyabatik alev sıcaklığı düşmektedir.

Brülörün tamamen yalıtılması durumunda ortaya çıkabilecek maksimum adyabatik alev sıcaklığı 2 189,62 K olacaktır. Adyabatik alev sıcaklığı, yanma odasında, maddenin karşılaşabileceği en yüksek sıcaklık değeridir. Tasarımı yapılan brülörlerde alev sıcaklıkları 1 200 – 1 300 K aralığında ölçülmektedir. Ölçülen alev sıcaklık değerleri, adyabatik alev sıcaklık değerinden oldukça düşüktür. Bu nedenle, yanma sırasında ortaya çıkacak yüksek sıcaklık nedeniyle brülörlerin üretiminde kullanılan metallerin erimesi, yırtılması ya da delinmesi gibi bir durumla karşılaşılmamaktadır.

Yapılan deneylerin sonucunda elde edilen veriler, PIC (Çevre Arabirimlerini Kontrol edici) mikrodenetleyicilerin girdisi olarak kabul edilerek, brülörlerin elektronik olarak kontrol edilmeleri sağlanmıştır.

Baca gazı emisyonlarına uygun olarak ayarlanmayan hava-yakıt karışımıyla çalışan brülörlerde ve yanma borularında, termal gerilmeler nedeniyle delikler, yırtılmalar oluştuğunda tüm ısıtım hattı durdurularak, bakım-onarım yapılmaktadır. Isıtım hattında, 860-900 °C sıcaklık aralığında çalışıldığından brülörlerin değiştirilmesi ve bakımı için ısıtım fırını kademeli olarak soğutulmaktadır. Arızalı olan brülörlerin değişimi ve bakımları yapıldıktan sonra, ısıtım hattı kademeli olarak ısıtılmaktadır. Isıtım fırınının soğutulması, brülörlerin bakım-onarımı ve yeniden ısıtılması yaklaşık iki hafta sürmektedir. Fırının ısıtılması ve soğutulmasında enerji kayıpları yaşanmaktadır.

Optimum hava fazlalık katsayısı değerinde, doğal gaz tüketiminin düştüğü gözlenmiştir. Yüksek yanma verimiyle çalışan brülörlerin ömürlerinin artması da beklenmektedir. Brülörlerin ömürlerinin artması, ısıtım üretim kayıplarını ve enerji kayıplarını da düşürecektir. Ayrıca, bakım-onarım maliyetlerinin düşmesini de sağlayacaktır. Üretim kayıplarının azalması, bakım-onarım maliyetlerinin düşmesi üretim maliyetlerini düşürecek, üretim maliyetlerinin düşmesi ise yurt içi ve yurt dışı piyasalarda rekabet gücünün artmasını beraberinde getirecektir.

Kontrollü hava-yakıt ayarlarıyla ısıtım hattı sıcaklık değerleri daha hassas kontrol edilebilmektedir. Bu durum, ısıtım kalitesinin artırılmasını da sağlamıştır. Isıtım kalitesinin artırılmasıyla, otomotiv ana sanayi tarafından talep edilen özel bağlantı elemanlarının ısıtım işlemleri de yapılabilecektir.

Doğal gaz yakıtlı endüstriyel ısıtım fırınları ve ocaklarda kullanılan kapalı tip brülörler üzerinde gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik öneriler aşağıda verilmiştir.

- Tasarımı yapılan brülörlerin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programları kullanılarak modellenmesi yapılabilecektir. Özellikle besleme havası ısıtıcısının (reküperatör) geometrisinin değiştirilmesinin, besleme havası sıcaklığına etkisi analiz edilebilecektir.
- HAD paket programlarıyla, doğal gaz-hava karışımı modellenebilir. Brülör borusunda termal gerilme analizleri yapılarak, sıcaklık dağılımı incelenebilir.
- Brülörler, PID (Oransal-İntegral-Türevsel) ve PIC (Çevre Arabirimlerini Kontrol edici) mikrodenetleyiciler ile iki farklı kontrol mekanizmasıyla kontrol edilebilir. İki farklı kontrol mekanizmasıyla kontrol edilen brülörlerin doğal gaz tüketimleri ve ömürleri incelenebilir.

## KAYNAKLAR

1. İskender, S., “Türkiye’de ve dünyada enerji & nükleer enerji gerçeği”, *Türkiye Teknik Elemanlar Vakfı*, Ankara, 1-10 (2005).
2. İskender, S., “Asrın çözölemeyen problemi: enerji”, *Türkiye Teknik Elemanlar Vakfı*, Ankara, 3-6, 10-12, 173-174,181-182 (2007).
3. Özrul, Z., “ETKB 2010-2014 dönemi stratejik planı perspektifinde türkiye enerji politika ve stratejileri”, *16. Uluslararası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 299-334 (2010).
4. Ayık, A., “Türkiye’de enerji sorunu ve sorunun arz tarafından çözümünde gündemde olan iki başlık: nükleer enerji ve yenilenebilir enerji”, *16. Uluslararası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 6-12 (2010).
5. Arıkan, O., “Elektrikli ısıtım fırınlarının modellenmesi ve sıcaklık kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *TOBB Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara,1-5, 6-10 (Ağustos 2009).
6. Özen, E., “İki boyutlu bir brülördeki yanmanın hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-10 (2009).
7. Bakrozis, A.G., Papailiou, D.D., Koutmos, P., “A study of the turbulent structure of a two-dimensional diffusion flame formed behind a slender bluff-body”, *Combustion and Flame 119*, 291-306 (1999).
8. Jamaluddin, A.S., Smith, P.J., , “Discrete ordinates solution of radiative transfer equation in non-axisymmetric cylindrical enclosures”, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 6(2): 242 (1992).
9. Smith, J.D., Henneke, M., Jayakaran, J.D., Lora, M., “Computational fluid dynamics (cfd) based combustion modeling”, The John Zink Combustion Handbook, Baukal, C. E., Ed., *CRC Press, Boca Raton*, Oklahoma, 710-718 (2002).
10. Smith, J.D., Lora, M., Hixon, E.M., Eldedge, T., “CFD in burner development, industrial burners handbook”, John Zink Co. LLC, *CRC Pres Tulsa*, Oklahoma, 280-285 (2004).
11. Çetin, G., “Optimization of lamela burner fin deck”, Yüksek Lisans Tezi, *İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, İzmir, 1-15 (2007).

12. Naha, S., Aggarwal, S.K., “Fuel effects on NO<sub>x</sub> emissions in partially premixed flames”, *Elsevier, Combustion and Flame*, 139: 90-105 (2004).
13. Parmantier, S., Braack M., Riedel U., Warnatz J., “Modeling of combustion in a lamella burner”, *Taylor & Francis, Combust. Sci. and Tech.*, 175: 185-206 (2006).
14. Tali, E., Maclean S., Giese A., “Ürün gazının yanması esnasında yanma sistemlerinde oluşan NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaltılmasının incelenmesi”, *Mühendis ve Makina*, 51 (610): 2-13 (2010).
15. İşyarlar, B., “Doğal gaz yakıtlı bir yanma odasında termodinamik hal büyüklüklerinin analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara,17-23 (2007).
16. Başaraner, S., “Doğal gaz yakıtlı kazanlarda yanma odasının matematiksel modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-124 (1995).
17. Karel, A., “Sürekli yanma odalarında alev çıkış sıcaklığına etkiyen çeşitli parametrelerin analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-99 (1990).
18. Kılıç, Y., “Yarım silindirik veya dikdörtgenler prizması şekilli kazanların yanma odalarında ışıma ile olan ısı aktarımının matematiksel modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-100 (1995).
19. Sürmen, A., “Sürekli yanma odalarında alev cephesinin dinamik yapısına ait bir çalışma”, Doktora Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 2-11 (1986).
20. Topal, H., “Izgaralı kazanlarda yanma odasındaki yapısal değişikliklerin kazan ısı performans ve emisyon davranışına etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-17 (1992).
21. Çankaya, O., “Doğal gaz yanmasında emisyonlar üzerine parametrik çalışma”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 1-30 (2009).
22. Mishra, D. P., “Effects of initial temperature on the structure of laminar CH<sub>4</sub> –Air premixed flames”, *Fuel*, 82: 1471-1475, (2003).
23. Ballester, J. M., Dopata, C., Fueyo, N., “investigation of low-no<sub>x</sub> strategies for natural gas combustion”, *Fuel*, 76: 435-446 (1997).

24. Hepbaşı, A., “Doğal gaz yakıtlı örnek bir tesiste duman gazı geri beslemesiyle azotoksitleri emisyonlarının azaltılması”, *Isı Bilimi ve Tekniği 8. Ulusal Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir (1991).
25. Zeynalov, M. A., Yüksel, B., Bulgan, A. T., “Doğal gaz yakıcı dizaynının yanmanın iyileştirilmesine etkisi”, *Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü II. Ulusal Sempozyumu*, Eskişehir (1993).
26. Nishimura, M., Suzuki, T., Nakanishi, R., Kitamura, R., “Low NO<sub>x</sub> combustion under high temperature condition in an industrial furnace”, *Energy Convers. Mgmt.*, 38 (10-13): 1353-1363 (1997).
27. Kelly C.D., Watanpongse D., Gaskey K.M., “Application of modern control to a continuous anneal line”, *IEEE* : 8(2): 32-37 (1998).
28. Yager, E.J., Soukup, T.F., Boughtonl J.R., “Computer integrated manufacturing at Itv steel’s continuous annealing line”, *Iron and Steel Engineer*, (12), 15-20 (1994).
29. Laurinen, P., Roning, J., “An adaptive neural network model for prectecting the post roughning mill temperature of steel slabs in the reheating furnace”, *Journal of Material Processing Technology*, 168, 423-430 (2001).
30. Yager, E.J., Taya, K., Ueda, I., Honjoh, M., “Development of the strip temperature control technique for a continuous annealing line” The Minerals, Metals and Materials Society, 133-142 (1992).
31. Watanpongse D., Gaskey K.M., “Application of modern control to a continuous anneal line”, *IEEE*:8(2): 32-37 (1998).
32. Cao, Shu-kun., Xu, Jing., Shi, Lei., “The temperature control system of continuously multi-segments sintering furnaces”, *IEEE*, 978-0-7695-3391-9 (2008).
33. Eroğlu, M., “Akaryakıtla çalışan endüstriyel tav fırınlarında yanma, sıcaklık ve basıncın optimum kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-20 (Şubat 1987).
34. Ming, Z., Datai, Y., “A new strip temperature control method for the heating section of continuous annealing line”, *IEEE*, 978-1-4244-1674-5 (2008).
35. Ramirez, M., Haber, R., Penap, V., Rodriguez, I., “Fuzzy control of a multiple hearth furnace”, *Computers in Industry*, 54, 105-113 (2002).

36. Radakovic Z.R., Milosevic V.M., Radakovic, S.B., “Application of temperature fuzzy controller in an indirect resistance furnace”, *Applied Energy*, (73): 167-182 (2002).
37. Abilov, A., G., Zeybek, Z., Tuzunalp, O., Telatar, Z., “Fuzzy temperature control of industrial refineries furnaces through combined feedforward/feedback multivariable cascade systems”, *Chemical Engineering and Processing*, (41): 87-98 (2002).
38. ISO 898/1, “Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel-Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes-Coarse thread and fine pitch thread”, *International Standard*, Cenova, İsviçre, 7-8 (2009).
39. Topbaş, M.A., “Çelik ve ısıtım işlem el kitabı”, *Prestij Yayıncılık ve Basım Hizmetleri*, İstanbul, 58-71 (1998).
40. Davis, R.J., Davidson, G.M., “Heat treating second edition”, *ASM International*, New York, 3-5, 68-75 (1997).
41. Onaran, K., “Malzeme bilimi dördüncü baskı”, *Bilim Teknik Yayınevi*, İstanbul, 304-305 (1993).
42. Callister, W.D., “Materials science and engineering an introduction sixth edition”, *John Wiley&Sons Inc.*, New York, 320-323 (2003).
43. Chandler, H., “Heat treater’s guide”, *ASM International*, New York, 96-105 (1995).
44. Çengel, Y.A., Boles, M.A., “Thermodynamics: an engineering approach sixth edition”, *McGraw-Hill*, New York, 752-762 (2008).
45. Öztürk, A., Kılıç, A., “Çözümlü problemlerle termodinamik üçüncü baskı”, *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul, 483-485 (1993).
46. Karakoç, T.H., “Gaz türbinli motorların yakıt sistemleri”, *T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınları; No.984*, Eskişehir, 1-8 (2008).
47. Kılıç, H., “Doğal gaz yanma bilgileri”, *Kimya Mühendisliği Dergisi*, 144: 12- 24 (2001).
48. Hızıroğlu H.T., Çakır, A., “Yanma ve bacalar”, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayınları; Yayın No:MMO/2007/445*, Ankara, 1-62 (2007).
49. İnternet : İ.T.Ü. Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü “Doğal Gazın özellikleri”, [http://atlas.cc.itu.edu.tr/~pdgmb/question/faq\\_t.html#5](http://atlas.cc.itu.edu.tr/~pdgmb/question/faq_t.html#5) (2011).

50. İnternet : İstanbul Üniversitesi, “Doğal gazın özellikleri ve yanma bilgileri”, <http://www.istanbul.edu.tr/yerkure/Petrol1.htm> (2011).
51. Gürü, M., Yalçın, H., “Stokiyometri birinci baskı”, *Palme Yayıncılık*, Ankara, 519-525 (2009).
52. Gürü, M., Yalçın, H., “Stokiyometri problemleri birinci baskı”, *Palme Yayıncılık*, Ankara, 387, 419 (2009).
53. Karakoç, T.H., “Enerji ekonomisi”, *Demirdöküm Yayınları*, İstanbul, 43-49 (1997).
54. Karakoç, T.H., “Brülörler”, *Demirdöküm Yayınları; Teknik Yayın 7*, İstanbul, 51-73 (2000).
55. Karakoç, T.H., “Doğal gaz tesisatı (tanımı, cihazı ve uygulama projeleri)”, *Demirdöküm Yayınları; Teknik Yayın 10*, İstanbul, 23-64 (2007).
56. Karakoç, T.H., “Kalorifer tesisatı hesapları ikinci baskı”, *Demirdöküm Yayınları; Teknik Yayın 9*, İstanbul, 112-122 (2007).
57. Çevre ve Orman Bakanlığı, “Sanayi kaynaklı hava kirliliğinin kontrolü yönetmeliği”, Ankara, 39-40 (2009).
58. Dağsöz, A.K., “Doğalgaz tanımı, cihazları, devreleri ve hesabı”, *Demirdöküm Yayınları*, İstanbul, 29-40 (1999).
59. Bilgin, A., “Kazanlarda enerji verimliliği”, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, Sayı 95, İstanbul, 13-18 (2006).
60. İnternet : Makina Mühendisleri Odası, Durukan, M., “Yanma analizleri ve doğalgaz uygulamalarındaki önemi”, [http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/7af4fb322bb5c89\\_ek.pdf?dergi=156](http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/7af4fb322bb5c89_ek.pdf?dergi=156) (2012).
61. Bilgin, A., “Kazanlarda enerji verimliliği ve emisyonlar”, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 122, İstanbul, 59-65 (2011).
62. Küçükçalı, R., “Doğalgaz tesisatı (ısıtma, baca, kazan, LPG)”, *Isısan Yayınları*, İstanbul, 78-86 (1998).
63. Küçükçalı, R., “Doğal gaz çalışmaları”, *Isısan Yayınları*, İstanbul, 98-112 (1991).

64. Kalyoncu, M., “Yapılarda doğalgaz dönüşümü ve denetimi”, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayınları; Yayın No:MMO/2007/434*, Konya, 34-42 (2007).
65. İnternet: Başkent Gaz, “Mayıs 2012 doğalgaz fiyatları”, <http://www.baskentdogalgaz.com.tr/inc/main.asp?id=tarifearsiv> (Mayıs 2012).
66. Knospe, B., Schulz, M., Hessler, W., “Flue gas analysis in industry first edition”, Lenzkirch, *Testo*, Almanya, 20-22 (2010).
67. Knospe, B., Schulz, M., Hessler, W., “Flue gas analysis for practical users electronic measurement of physical and chemical values second edition”, Lenzkirch, *Testo*, Almanya, 31-32 (2011).
68. Genceli, O., “Ölçme tekniği”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 20-29 (2005).
69. Baysal, E., Eşmerkezli borulu ısı değıştiricilerinde helisel türbülatorlerin etkilerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 35-38 (2009).

**EKLER**

### EK-1 Isıl işlem firması iş akışı



Resim 1.1. Ön yükleme

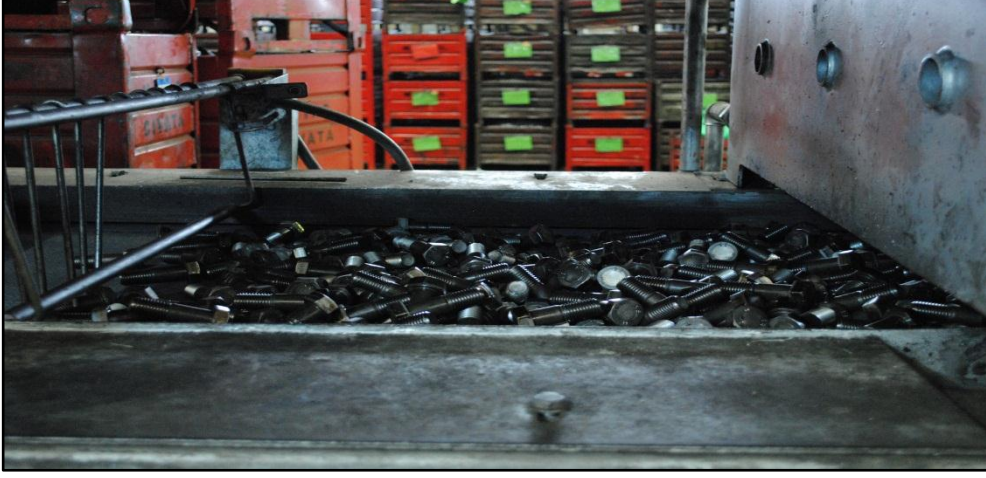


Resim 1.2. Ön yükleme



Resim 1.3. Serleştirme firması öncesi alkali deterjanla yıkama ünitesi

EK-1 (DEVAM) Isıl işlem fırını iş akışı



Resim 1.4. Sertleştirme fırını girişi



Resim 1.5. Sertleştirme fırını yükleme girişi



Resim 1.6. Sertleştirme fırını doğal gaz hattı

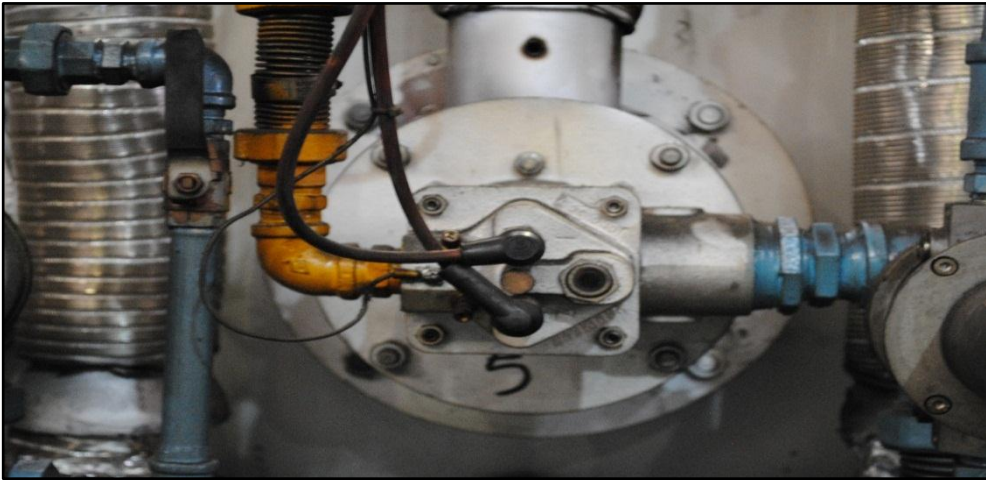
EK-1 (DEVAM) Isıl işlem fırını iş akışı



Resim 1.7. Sertleştirme fırını brülörleri



Resim 1.8. Sertleştirme fırını brülör ve baca tesisatı

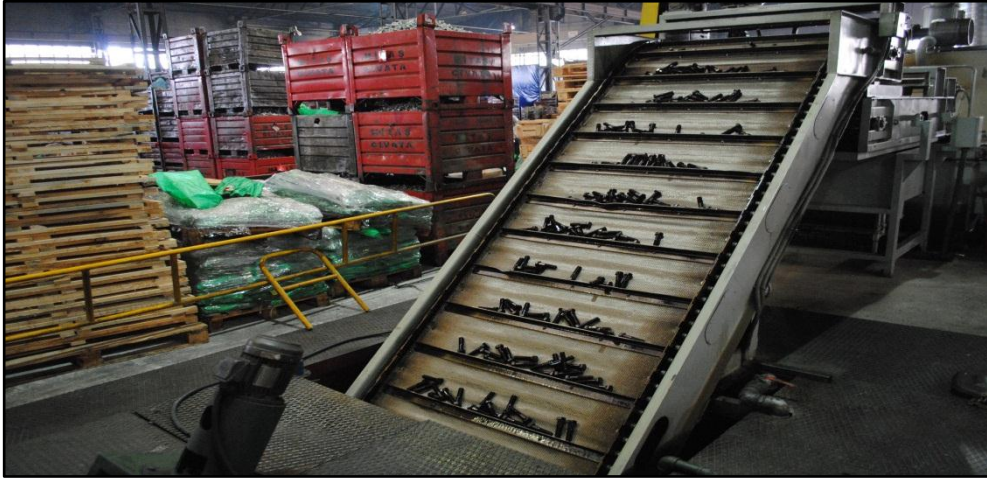


Resim 1.9. Sertleştirme fırını brülör bağlantı detayı

### EK-1 (DEVAM) Isıl işlem fırını iş akışı



Resim 1.10. Sertleştirme fırını brülör kumanda paneli



Resim 1.11. Sertleştirme fırını malzeme çıkışı



Resim 1.12. Menevişleme fırını öncesi alkali deterjanla yıkama ünitesi

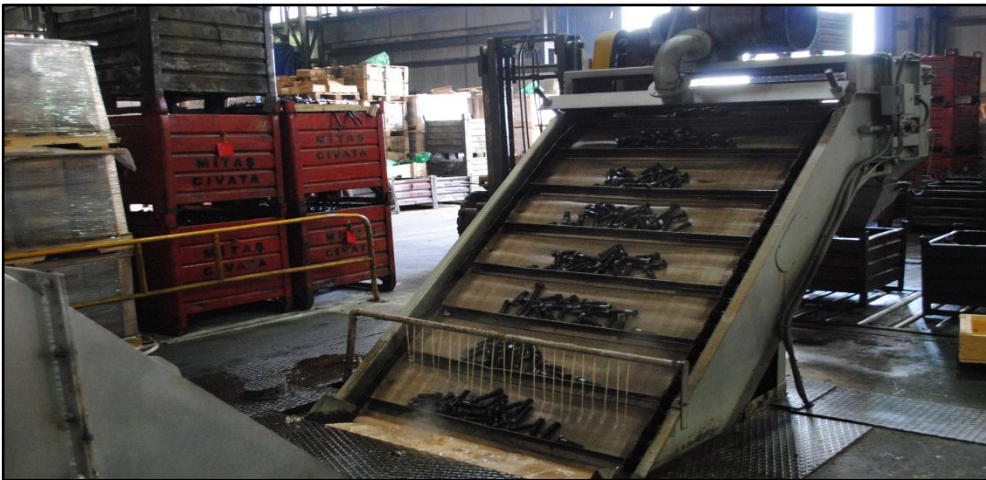
EK-1 (DEVAM) Isıl işlem fırını iş akışı



Resim 1.13. Menevişleme fırını yükleme girişi



Resim 1.14. Menevişleme fırını brülörleri ve kumanda paneli



Resim 1.15. Siyahlaştırma tankı malzeme çıkışı

EK-1 (DEVAM) Isıl işlem fırını iş akışı



Resim 1.16. Sertleştirme fırını önden görünüşü

EK-2 Aç-kapa kumanda edilen kontrolsüz yanmaya maruz kalmış brülör tüpleri



Resim 2.1. Aç-kapa kumanda edilen brülör tüpleri



Resim 2.2. Aç-kapa kumanda edilen brülör tüpleri



Resim 2.3. Aç-kapa kumanda edilen brülör tüpleri

## EK-3 Baca gazı analiz değerleri

<p>-----  Testo t350 S  Testo t350 S  SN: 01760728 /TR  -----  civata isil islem  22.03.12 14:15:49  -----  Yakit: Nat. Gaz  2.28 % O2  2 ppm CO  10.61 % CO2  184 ppm NO  4.3 ppm NO2  189 ppm NOx  44 ppm H2  68.4 % EffN  12.2 °C Excess air  26.1 °C Ort.HavaSic.  691.5 °C BacaBaz.Sic.  -----  m/sn Hz  m3/s Debi  -----  Isi taşıma sic.: --- °C  -----</p>	<p>-----  Testo t350 S  Testo t350 S  SN: 01760728 /TR  -----  civata isil islem  22.03.12 14:47:07  -----  Yakit: Nat. Gaz  2.30 % O2  0 ppm CO  10.59 % CO2  205 ppm NO  5.4 ppm NO2  211 ppm NOx  33 ppm H2  70.3 % EffN  12.3 °C Excess air  26.6 °C Ort.HavaSic.  651.4 °C BacaBaz.Sic.  -----  m/sn Hz  m3/s Debi  -----  Isi taşıma sic.: --- °C  -----</p>
<p>-----  Testo t350 S  Testo t350 S  SN: 01760728 /TR  -----  civata isil islem  22.03.12 14:03:21  -----  Yakit: Nat. Gaz  2.14 % O2  21 ppm CO  10.69 % CO2  165 ppm NO  2.8 ppm NO2  168 ppm NOx  80 ppm H2  68.4 % EffN  11.3 °C Excess air  25.8 °C Ort.HavaSic.  695.6 °C BacaBaz.Sic.  -----  m/sn Hz  m3/s Debi  -----  Isi taşıma sic.: --- °C  -----</p>	<p>-----  Testo t350 S  Testo t350 S  SN: 01760728 /TR  -----  civata isil islem  22.03.12 14:51:17  -----  Yakit: Nat. Gaz  2.35 % O2  0 ppm CO  10.57 % CO2  144 ppm NO  5.2 ppm NO2  150 ppm NOx  31 ppm H2  74.0 % EffN  12.8 °C Excess air  26.9 °C Ort.HavaSic.  571.8 °C BacaBaz.Sic.  -----  m/sn Hz  m3/s Debi  -----  Isi taşıma sic.: --- °C  -----</p>

Şekil 3.1. Baca gazı analiz değerleri

## EK-3 (DEVAM) Baca gazı analiz değerleri

<p>-----  Testo t350 S  Testo t350 S  SN: 01760728 /TR  -----  civata isil islem  22.03.12 14:09:50</p> <p>Yakit: Mat. Gaz</p> <table> <tr><td>2.16</td><td>%</td><td>O2</td></tr> <tr><td>5</td><td>ppm</td><td>CO</td></tr> <tr><td>10.68</td><td>%</td><td>CO2</td></tr> <tr><td>108</td><td>ppm</td><td>NO</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>ppm</td><td>NO2</td></tr> <tr><td>11.3</td><td>ppm</td><td>NOx</td></tr> <tr><td>42</td><td>ppm</td><td>H2</td></tr> <tr><td>72.7</td><td>%</td><td>EffN</td></tr> <tr><td>11.5</td><td>%</td><td>Excess air</td></tr> <tr><td>23.2</td><td>°C</td><td>Ort.HavaSic.</td></tr> <tr><td>600.4</td><td>°C</td><td>Bacabaz.Sic.</td></tr> <tr><td>-----</td><td>m3/sn</td><td>Hyz</td></tr> <tr><td>-----</td><td>m3/s</td><td>Debi</td></tr> </table> <p>-----  Isi taşıma sic.: --- °C  -----</p>	2.16	%	O2	5	ppm	CO	10.68	%	CO2	108	ppm	NO	4.5	ppm	NO2	11.3	ppm	NOx	42	ppm	H2	72.7	%	EffN	11.5	%	Excess air	23.2	°C	Ort.HavaSic.	600.4	°C	Bacabaz.Sic.	-----	m3/sn	Hyz	-----	m3/s	Debi	<p>-----  Testo t350 S  Testo t350 S  SN: 01760728 /TR  -----  civata isil islem  22.03.12 14:54:26</p> <p>Yakit: Mat. Gaz</p> <table> <tr><td>2.11</td><td>%</td><td>O2</td></tr> <tr><td>16</td><td>ppm</td><td>CO</td></tr> <tr><td>10.70</td><td>%</td><td>CO2</td></tr> <tr><td>220</td><td>ppm</td><td>NO</td></tr> <tr><td>4.8</td><td>ppm</td><td>NO2</td></tr> <tr><td>225</td><td>ppm</td><td>NOx</td></tr> <tr><td>101</td><td>ppm</td><td>H2</td></tr> <tr><td>66.7</td><td>%</td><td>EffN</td></tr> <tr><td>11.2</td><td>%</td><td>Excess air</td></tr> <tr><td>25.8</td><td>°C</td><td>Ort.HavaSic.</td></tr> <tr><td>734.2</td><td>°C</td><td>Bacabaz.Sic.</td></tr> <tr><td>-----</td><td>m3/sn</td><td>Hyz</td></tr> <tr><td>-----</td><td>m3/s</td><td>Debi</td></tr> </table> <p>-----  Isi taşıma sic.: --- °C  -----</p>	2.11	%	O2	16	ppm	CO	10.70	%	CO2	220	ppm	NO	4.8	ppm	NO2	225	ppm	NOx	101	ppm	H2	66.7	%	EffN	11.2	%	Excess air	25.8	°C	Ort.HavaSic.	734.2	°C	Bacabaz.Sic.	-----	m3/sn	Hyz	-----	m3/s	Debi
2.16	%	O2																																																																													
5	ppm	CO																																																																													
10.68	%	CO2																																																																													
108	ppm	NO																																																																													
4.5	ppm	NO2																																																																													
11.3	ppm	NOx																																																																													
42	ppm	H2																																																																													
72.7	%	EffN																																																																													
11.5	%	Excess air																																																																													
23.2	°C	Ort.HavaSic.																																																																													
600.4	°C	Bacabaz.Sic.																																																																													
-----	m3/sn	Hyz																																																																													
-----	m3/s	Debi																																																																													
2.11	%	O2																																																																													
16	ppm	CO																																																																													
10.70	%	CO2																																																																													
220	ppm	NO																																																																													
4.8	ppm	NO2																																																																													
225	ppm	NOx																																																																													
101	ppm	H2																																																																													
66.7	%	EffN																																																																													
11.2	%	Excess air																																																																													
25.8	°C	Ort.HavaSic.																																																																													
734.2	°C	Bacabaz.Sic.																																																																													
-----	m3/sn	Hyz																																																																													
-----	m3/s	Debi																																																																													
<p>-----  Testo t350 S  Testo t350 S  SN: 01760728 /TR  -----  civata isil islem  22.03.12 18:08:20</p> <p>Yakit: Mat. Gaz</p> <table> <tr><td>2.29</td><td>%</td><td>O2</td></tr> <tr><td>5</td><td>ppm</td><td>CO</td></tr> <tr><td>10.60</td><td>%</td><td>CO2</td></tr> <tr><td>172</td><td>ppm</td><td>NO</td></tr> <tr><td>4.0</td><td>ppm</td><td>NO2</td></tr> <tr><td>176</td><td>ppm</td><td>NOx</td></tr> <tr><td>32</td><td>ppm</td><td>H2</td></tr> <tr><td>68.7</td><td>%</td><td>EffN</td></tr> <tr><td>12.2</td><td>%</td><td>Excess air</td></tr> <tr><td>20.7</td><td>°C</td><td>Ort.HavaSic.</td></tr> <tr><td>678.4</td><td>°C</td><td>Bacabaz.Sic.</td></tr> <tr><td>-----</td><td>m3/sn</td><td>Hyz</td></tr> <tr><td>-----</td><td>m3/s</td><td>Debi</td></tr> </table> <p>-----  Isi taşıma sic.: --- °C  -----</p>	2.29	%	O2	5	ppm	CO	10.60	%	CO2	172	ppm	NO	4.0	ppm	NO2	176	ppm	NOx	32	ppm	H2	68.7	%	EffN	12.2	%	Excess air	20.7	°C	Ort.HavaSic.	678.4	°C	Bacabaz.Sic.	-----	m3/sn	Hyz	-----	m3/s	Debi	<p>-----  Testo t350 S  Testo t350 S  SN: 01760728 /TR  -----  civata isil islem  22.03.12 18:32:41</p> <p>Yakit: Mat. Gaz</p> <table> <tr><td>2.26</td><td>%</td><td>O2</td></tr> <tr><td>3</td><td>ppm</td><td>CO</td></tr> <tr><td>10.62</td><td>%</td><td>CO2</td></tr> <tr><td>147</td><td>ppm</td><td>NO</td></tr> <tr><td>4.1</td><td>ppm</td><td>NO2</td></tr> <tr><td>152</td><td>ppm</td><td>NOx</td></tr> <tr><td>39</td><td>ppm</td><td>H2</td></tr> <tr><td>66.8</td><td>%</td><td>EffN</td></tr> <tr><td>12.1</td><td>%</td><td>Excess air</td></tr> <tr><td>21.4</td><td>°C</td><td>Ort.HavaSic.</td></tr> <tr><td>720.9</td><td>°C</td><td>Bacabaz.Sic.</td></tr> <tr><td>-----</td><td>m3/sn</td><td>Hyz</td></tr> <tr><td>-----</td><td>m3/s</td><td>Debi</td></tr> </table> <p>-----  Isi taşıma sic.: --- °C  -----</p>	2.26	%	O2	3	ppm	CO	10.62	%	CO2	147	ppm	NO	4.1	ppm	NO2	152	ppm	NOx	39	ppm	H2	66.8	%	EffN	12.1	%	Excess air	21.4	°C	Ort.HavaSic.	720.9	°C	Bacabaz.Sic.	-----	m3/sn	Hyz	-----	m3/s	Debi
2.29	%	O2																																																																													
5	ppm	CO																																																																													
10.60	%	CO2																																																																													
172	ppm	NO																																																																													
4.0	ppm	NO2																																																																													
176	ppm	NOx																																																																													
32	ppm	H2																																																																													
68.7	%	EffN																																																																													
12.2	%	Excess air																																																																													
20.7	°C	Ort.HavaSic.																																																																													
678.4	°C	Bacabaz.Sic.																																																																													
-----	m3/sn	Hyz																																																																													
-----	m3/s	Debi																																																																													
2.26	%	O2																																																																													
3	ppm	CO																																																																													
10.62	%	CO2																																																																													
147	ppm	NO																																																																													
4.1	ppm	NO2																																																																													
152	ppm	NOx																																																																													
39	ppm	H2																																																																													
66.8	%	EffN																																																																													
12.1	%	Excess air																																																																													
21.4	°C	Ort.HavaSic.																																																																													
720.9	°C	Bacabaz.Sic.																																																																													
-----	m3/sn	Hyz																																																																													
-----	m3/s	Debi																																																																													

Şekil 3.2. Baca gazı analiz değerleri

## EK-3 (DEVAM) Baca gazı analiz değerleri

<p>-----            Testo t350 S            Testo t350 S            SN: 01760728 /TR            -----            civata isil islem            22.03.12 17:58:51            -----            Yakıt: Mat. Gaz            2.15 % O2            4 ppm CO            10.68 ppm CO2            111 ppm NO            3.4 ppm NO2            115 ppm NOx            39 ppm H2            68.6 % EffN            19.4 °C Excess air            19.9 °C Ort.HavaSic.            684.7 °C BacaBaz.Sic.            -----            m/sn Hz            m3/s Debi            -----            Isi taşıma sic.: --- °C            -----</p>	<p>-----            Testo t350 S            Testo t350 S            SN: 01760728 /TR            -----            civata isil islem            22.03.12 17:49:19            -----            Yakıt: Mat. Gaz            2.14 % O2            3 ppm CO            10.68 ppm CO2            136 ppm NO            3.6 ppm NO2            139 ppm NOx            37 ppm H2            69.8 % EffN            11.4 °C Excess air            21.1 °C Ort.HavaSic.            660.5 °C BacaBaz.Sic.            -----            m/sn Hz            m3/s Debi            -----            Isi taşıma sic.: --- °C            -----</p>
<p>-----            Testo t350 S            Testo t350 S            SN: 01760728 /TR            -----            civata isil islem            22.03.12 18:22:14            -----            Yakıt: Mat. Gaz            2.19 % O2            1 ppm CO            10.66 ppm CO2            154 ppm NO            4.7 ppm NO2            159 ppm NOx            38 ppm H2            72.8 % EffN            11.6 °C Excess air            20.4 °C Ort.HavaSic.            593.1 °C BacaBaz.Sic.            -----            m/sn Hz            m3/s Debi            -----            Isi taşıma sic.: --- °C            -----</p>	<p>-----            Testo t350 S            Testo t350 S            SN: 01760728 /TR            -----            civata isil islem            22.03.12 11:36:29            -----            Yakıt: Mat. Gaz            2.10 % O2            5 ppm CO            10.71 ppm CO2            121 ppm NO            4.7 ppm NO2            126 ppm NOx            42 ppm H2            71.1 % EffN            11.1 °C Excess air            20.8 °C Ort.HavaSic.            632.9 °C BacaBaz.Sic.            -----            m/sn Hz            m3/s Debi            -----            Isi taşıma sic.: --- °C            -----</p>

Şekil 3.3. Baca gazı analiz değerleri

## EK-4 Baca gazı ölçümleri

Çizelge 4.1. Baca gazı analizleri (Deney:1–20)

Deney	HFK	Oksijen (%)	Karbondioksit (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Azotoksitler (ppm)
1	1,10	2,20	10,73	2,00	132,00
2	1,15	2,75	10,25	5,00	120,00
3	1,15	3,03	10,26	3,00	125,00
4	1,10	2,16	10,73	5,00	128,00
5	1,12	2,28	10,52	4,00	122,00
6	1,10	2,14	10,73	4,00	135,00
7	1,13	2,35	10,48	5,00	114,00
8	1,10	2,18	10,73	0	130,00
9	1,09	2,11	10,83	0	138,00
10	1,12	2,29	10,51	1,00	118,00
11	1,13	2,28	10,44	1,00	125,00
12	1,12	2,26	10,53	5,00	124,00
13	1,10	2,18	10,73	3,00	134,00
14	1,14	2,65	10,31	2,00	115,00
15	1,13	2,35	10,48	5,00	122,00
16	1,12	2,25	10,54	4,00	121,00
17	1,13	2,45	10,42	8,00	128,00
18	1,13	2,35	10,48	5,00	130,00
19	1,13	2,38	10,46	4,00	128,00
20	1,12	2,29	10,51	3,00	124,00

## EK-4 (DEVAM) Baca gazı ölçümleri

Çizelge 4.1. Baca gazı analizleri (Deney:21–40)

Deney	HFK	Oksijen (%)	Karbondioksit (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Azotoksitler (ppm)
21	1,10	2,18	10,73	0	129,00
22	1,13	2,39	10,46	3,00	120,00
23	1,15	2,97	10,26	5,00	125,00
24	1,10	2,16	10,73	3,00	130,00
25	1,12	2,31	10,50	2,00	125,00
26	1,10	2,15	10,73	4,00	133,00
27	1,13	2,35	10,55	3,00	125,00
28	1,10	2,18	10,73	5,00	130,00
29	1,12	2,28	10,54	4,00	138,00
30	1,14	2,58	10,35	1,00	118,00
31	1,13	2,28	10,44	1,00	125,00
32	1,12	2,26	10,53	5,00	124,00
33	1,10	2,18	10,73	3,00	134,00
34	1,15	2,75	10,25	2,00	118,00
35	1,13	2,35	10,48	5,00	122,00
36	1,12	2,25	10,54	4,00	121,00
37	1,13	2,45	10,42	8,00	128,00
38	1,13	2,35	10,48	5,00	124,00
39	1,10	2,18	10,73	0	128,00
40	1,12	2,27	10,52	4,00	122,00

## EK-4 (DEVAM) Baca gazı ölçümleri

Çizelge 4.1. Baca gazı analizleri (Deney:41–60)

Deney	HFK	Oksijen (%)	Karbondioksit (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Azotoksitler (ppm)
41	1,10	2,20	10,73	2,00	130,00
42	1,10	2,18	10,69	5,00	118,00
43	1,12	2,76	10,54	3,00	123,00
44	1,10	2,16	10,73	5,00	126,00
45	1,12	2,29	10,51	4,00	120,00
46	1,10	2,19	10,73	1,00	133,00
47	1,13	2,35	10,48	5,00	112,00
48	1,10	2,21	10,73	2,00	128,00
49	1,10	2,12	10,73	5,00	136,00
50	1,12	2,32	10,50	1,00	116,00
51	1,13	2,28	10,44	1,00	123,00
52	1,12	2,26	10,53	5,00	122,00
53	1,10	2,18	10,73	3,00	132,00
54	1,14	2,65	10,31	6,00	113,00
55	1,13	2,35	10,48	5,00	120,00
56	1,12	2,25	10,54	4,00	119,00
57	1,15	2,78	10,24	12,00	126,00
58	1,10	2,20	10,73	5,00	128,00
59	1,13	2,38	10,46	4,00	126,00
60	1,13	2,34	10,49	3,00	122,00

## EK-4 (DEVAM) Baca gazı ölçümleri

Çizelge 4.1. Baca gazı analizleri (Deney:61–80)

Deney	HFK	Oksijen (%)	Karbondioksit (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Azotoksitler (ppm)
61	1,10	2,20	10,73	2,00	130,00
62	1,10	2,18	10,68	5,00	121,00
63	1,10	2,19	10,69	3,00	126,00
64	1,10	2,22	10,71	5,00	131,00
65	1,10	2,28	10,66	4,00	126,00
66	1,11	2,24	10,63	4,00	134,00
67	1,13	2,35	10,48	5,00	126,00
68	1,10	2,18	10,71	1,00	131,00
69	1,10	2,15	10,67	1,00	139,00
70	1,12	2,29	10,51	1,00	119,00
71	1,13	2,28	10,44	1,00	126,00
72	1,12	2,26	10,53	5,00	125,00
73	1,10	2,18	10,73	3,00	135,00
74	1,14	2,65	10,31	2,00	119,00
75	1,13	2,35	10,48	5,00	123,00
76	1,12	2,25	10,54	4,00	122,00
77	1,11	2,35	10,63	12,00	129,00
78	1,13	2,35	10,48	14,00	138,00
79	1,13	2,38	10,46	4,00	129,00
80	1,14	2,89	10,35	3,00	123,00

## EK-4 (DEVAM) Baca gazı ölçümleri

Çizelge 4.1. Baca gazı analizleri (Deney:81–100)

Deney	HFK	Oksijen (%)	Karbondioksit (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Azotoksitler (ppm)
81	1,15	3,01	10,52	2,00	133,00
82	1,14	2,78	10,68	5,00	124,00
83	1,10	2,18	10,68	3,00	129,00
84	1,10	2,22	10,71	5,00	134,00
85	1,10	2,28	10,66	4,00	129,00
86	1,14	2,92	10,35	4,00	137,00
87	1,13	2,35	10,48	5,00	129,00
88	1,10	2,18	10,71	1,00	134,00
89	1,17	3,15	10,25	14,00	142,00
90	1,12	2,29	10,51	1,00	122,00
91	1,13	2,28	10,44	1,00	129,00
92	1,12	2,26	10,53	5,00	128,00
93	1,10	2,18	10,59	3,00	138,00
94	1,14	2,65	10,31	2,00	122,00
95	1,13	2,35	10,48	5,00	126,00
96	1,12	2,25	10,54	4,00	125,00
97	1,11	2,35	10,63	12,00	132,00
98	1,13	2,35	10,48	14,00	125,00
99	1,10	2,18	10,71	4,00	132,00
100	1,10	2,20	10,69	3,00	128,00

## EK-5 ISO 898/1 Standardı

Çizelge 5.1. ISO 898/1 standardı kimyasal kompozisyon ve meneviş sıcaklıkları

Table 2 — Steels							
Property class	Material and heat treatment	Chemical composition limits (cast analysis, %) <sup>a</sup>				B <sup>b</sup> max.	Tempering temperature °C min.
		C min.	C max.	P max.	S max.		
4.6 <sup>c, d</sup>	Carbon steel or carbon steel with additives	—	0,55	0,050	0,060	Not specified	—
4.8 <sup>d</sup>							
5.6 <sup>c</sup>		0,13	0,55	0,050	0,060		
5.8 <sup>d</sup>		—	0,55	0,050	0,060		
6.8 <sup>d</sup>		0,15	0,55	0,050	0,060		
8.8 <sup>f</sup>	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr) quenched and tempered	0,15 <sup>e</sup>	0,40	0,025	0,025	0,003	425
	or Carbon steel quenched and tempered	0,25	0,55	0,025	0,025		
	or Alloy steel quenched and tempered <sup>g</sup>	0,20	0,55	0,025	0,025		
9.8 <sup>f</sup>	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr) quenched and tempered	0,15 <sup>e</sup>	0,40	0,025	0,025	0,003	425
	or Carbon steel quenched and tempered	0,25	0,55	0,025	0,025		
	or Alloy steel quenched and tempered <sup>g</sup>	0,20	0,55	0,025	0,025		
10.9 <sup>f</sup>	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr) quenched and tempered	0,20 <sup>e</sup>	0,55	0,025	0,025	0,003	425
	or Carbon steel quenched and tempered	0,25	0,55	0,025	0,025		
	or Alloy steel quenched and tempered <sup>g</sup>	0,20	0,55	0,025	0,025		
12.9 <sup>f, h, i</sup>	Alloy steel quenched and tempered <sup>g</sup>	0,30	0,50	0,025	0,025	0,003	425
12.9 <sup>f, h, i</sup>	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr or Molybdenum) quenched and tempered	0,28	0,50	0,025	0,025	0,003	380

<sup>a</sup> In case of dispute, the product analysis applies.

<sup>b</sup> Boron content can reach 0,005 %, provided that non-effective boron is controlled by addition of titanium and/or aluminium.

<sup>c</sup> For cold forged fasteners of property classes 4.6 and 5.6, heat treatment of the wire used for cold forging or of the cold forged fastener itself may be necessary to achieve required ductility.

<sup>d</sup> Free cutting steel is allowed for these property classes with the following maximum sulphur, phosphorus and lead contents: sulphur 0,34 %; phosphorus 0,11 %; lead 0,35 %.

<sup>e</sup> In case of plain carbon boron steel with a carbon content below 0,25 % (cast analysis), the minimum manganese content shall be 0,6 % for property class 8.8 and 0,7 % for 9.8 and 10.9.

<sup>f</sup> For the materials of these property classes, there shall be a sufficient hardenability to ensure a structure consisting of approximately 90 % martensite in the core of the threaded sections for the fasteners in the "as-hardened" condition before tempering.

<sup>g</sup> This alloy steel shall contain at least one of the following elements in the minimum quantity given: chromium 0,30 %, nickel 0,30 %, molybdenum 0,20 %, vanadium 0,10 %. Where elements are specified in combinations of two, three or four and have alloy contents less than those given above, the limit value to be applied for steel class determination is 70 % of the sum of the individual limit values shown above for the two, three or four elements concerned.

<sup>h</sup> A metallographically detectable white phosphorus enriched layer is not permitted for property class 12.9/12.9. It shall be detected by a suitable test method.

<sup>i</sup> Caution is advised when the use of property class 12.9/12.9 is considered. The capability of the fastener manufacturer, the service conditions and the wrenching methods should be considered. Environments may cause stress corrosion cracking of fasteners as processed as well as those coated.

EK-5 (DEVAM) ISO 898/1 Standardı

Çizelge 5.2. ISO 898/1 standardı mekanik değerler

Table 3 — Mechanical and physical properties of bolts, screws and studs													
No.	Mechanical or physical property	Property class											
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9/ 12.9		
							$d \leq 16$ mm <sup>a</sup>	$d > 16$ mm <sup>b</sup>	$d \leq 16$ mm				
1	Tensile strength, $R_m$ , MPa	nom. <sup>c</sup>	400		500		600		800		900	1 000	1 200
		min.	400	420	500	520	600	800	830	900	1 040	1 220	
2	Lower yield strength, $R_{eL}$ <sup>d</sup> , MPa	nom. <sup>c</sup>	240	—	300	—	—	—	—	—	—	—	—
		min.	240	—	300	—	—	—	—	—	—	—	—
3	Stress at 0,2 % non-proportional elongation, $R_{p0,2}$ , MPa	nom. <sup>c</sup>	—	—	—	—	—	640	640	720	900	1 080	—
		min.	—	—	—	—	—	640	660	720	940	1 100	—
4	Stress at 0,0048 $d$ non-proportional elongation for full-size fasteners, $R_{pf}$ , MPa	nom. <sup>c</sup>	—	320	—	400	480	—	—	—	—	—	—
		min.	—	340 <sup>e</sup>	—	420 <sup>e</sup>	480 <sup>e</sup>	—	—	—	—	—	—
5	Stress under proof load, $S_p$ <sup>f</sup> , MPa	nom.	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970	—
		Proof strength ratio $\frac{S_{p,nom}/R_{eL \min} \text{ or } S_{p,nom}/R_{p0,2 \min} \text{ or } S_{p,nom}/R_{pf \min}}$	0,94	0,91	0,93	0,90	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,88	—
6	Percentage elongation after fracture for machined test pieces, $A$ , %	min.	22	—	20	—	—	12	12	10	9	8	—
7	Percentage reduction of area after fracture for machined test pieces, $Z$ , %	min.	—				52			48	48	44	—
8	Elongation after fracture for full-size fasteners, $A_f$ (see also Annex C)	min.	—	0,24	—	0,22	0,20	—	—	—	—	—	—
9	Head soundness	No fracture											
10	Vickers hardness, HV $f \geq 98$ N	min.	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385	—
		max.	220 <sup>g</sup>				250	320	335	360	380	435	—
11	Brinell hardness, HBW $f = 30 D^2$	min.	114	124	147	152	181	238	242	276	304	366	—
		max.	209 <sup>g</sup>				238	304	318	342	361	414	—
12	Rockwell hardness, HRB	min.	67	71	79	82	89	—					
		max.	95,0 <sup>g</sup>				99,5	—					
12	Rockwell hardness, HRC	min.	—				22	23	28	32	39	—	
		max.	—				32	34	37	39	44	—	
13	Surface hardness, HV 0,3	max.	—				h			h, i	h, j	—	
14	Height of non-decarburized thread zone, $B$ , mm	min.	—				$1/2 H_1$			$2/3 H_1$	$3/4 H_1$	—	
		Depth of complete decarburization in the thread, $C$ , mm	max.	—				0,015					
15	Reduction of hardness after retempering, HV	max.	—				20						
16	Breaking torque, $M_B$ , N·m	min.	—				in accordance with ISO 898-7						
17	Impact strength, $K_V$ <sup>k, l</sup> , J	min.	—	27	—		27	27	27	27	m		
18	Surface integrity in accordance with	ISO 6157-1 <sup>n</sup>										ISO 6157-3	

<sup>a</sup> Values do not apply for structural bolting.  
<sup>b</sup> For structural bolting  $d \geq M12$ .  
<sup>c</sup> Nominal values are specified only for the purpose of the designation system for property classes. See Clause 5.  
<sup>d</sup> In cases where the lower yield strength  $R_{eL}$  cannot be determined, it is permissible to measure the stress at 0,2 % non-proportional elongation  $R_{p0,2}$ .  
<sup>e</sup> For the property classes 4.8, 5.8 and 6.8 the values for  $R_{pf \min}$  are under investigation. The present values are given for calculation of the proof stress ratio only. They are not test values.  
<sup>f</sup> Proof loads are specified in Tables 5 and 7.  
<sup>g</sup> Hardness determined at the end of a fastener shall be 250 HV, 238 HB or 99,5 HRB maximum.  
<sup>h</sup> Surface hardness shall not be more than 30 Vickers points above the measured core hardness of the fastener when determination of both surface hardness and core hardness are carried out with HV 0,3.  
<sup>i</sup> Any increase in hardness at the surface which indicates that the surface hardness exceeds 390 HV is not acceptable.  
<sup>j</sup> Any increase in hardness at the surface which indicates that the surface hardness exceeds 435 HV is not acceptable.  
<sup>k</sup> Values are determined at a test temperature of  $-20$  °C, see 9.14.  
<sup>l</sup> Applies to  $d \geq 16$  mm.  
<sup>m</sup> Value for  $K_V$  is under investigation.  
<sup>n</sup> Instead of ISO 6157-1, ISO 6157-3 may apply by agreement between the manufacturer and the purchaser.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : İSKENDER, Serdar  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 1976, Ankara  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (312) 296 26 06  
 Faks : 0 (312) 211 03 18  
 e-mail : siskender@mitas.com.tr

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Ens. Makina Mühendisliği Anabilim Dalı	2000
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi/Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü	1997
Lise	Ankara Kalaba Lisesi/Fen kolu	1993

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2003–halen	Mitaş Cıvata	Genel Müdür
2002–2003	Mitaş Cıvata	Tek. Genel Müdür Yard.
2001–2002	Mitaş Cıvata	Fabrika Müdürü
1998–2001	Mitaş Cıvata	İmalat Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

**Yayınlar**

- 1) İskender, S., “Plastik Enjeksiyon Makinası Enjekte Kısmı Hidrolik Devre Tasarımı ve Hidromotor Devresinin Kurulması”, Makina Tasarım Teorisi ve Modern İmalat Yöntemleri Konferansı, Ankara, 420–425, 1997.
- 2) İskender, S., “Dünya Enerji Durumu ve Geleceğe Yönelik Planlar”, Türkiye 10. Enerji Kongresi, İstanbul, Cilt 2:81–89, 2006.
- 3) İskender, S., “Nükleer Enerji Gerçeği”, Türkiye 10. Enerji Kongresi, İstanbul, Cilt 2:371–380, 2006.
- 4) İskender, S., “Türkiye Enerji Durumu ve Geleceğe Yönelik Planlar”, Türkiye 10. Enerji Kongresi, İstanbul, Cilt 1:131–144, 2006.

**Hobiler**

Basketbol, gezi, tarih.