T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK ALEV HIZLARINA SAHİP ENDÜSTRİYEL YAKICILARDA YANMA SONUCU OLUŞAN EMİSYONLARIN DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Barkın KILIÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Danışman

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Ocak, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK ALEV HIZLARINA SAHİP ENDÜSTRİYEL YAKICILARDA YANMA SONUCU OLUŞAN EMİSYONLARIN DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Barkın KILIÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 15.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Özgen AÇIKGÖZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Örğ. Üye. Mehmet Salih CELLEK, Üye
Bingöl Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Yüksek Alev Hızlarına Sahip Endüstriyel Yakıcılarda Yanma Sonucu Oluşan Emisyonların Deneysel Ve Nümerik Olarak İncelenmesi başlıklı çalışmada gerçekleştirilen tüm deneyler sonucunda elde edilen sonuçlarına ve verilerine ilişkin sahtecilik ve/veya çarpıtma yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik kurallarına ve ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde karşılaşacağım yasal sonuçları kabul ederim.

Barkın KILIÇ

İmza

Sevdiklerime,

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez danışmanım olan Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ'a tüm bu süreçte yapılan çalışmalarımda verdiği destekten, bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösterdiği için minnettar olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca sadece tezim için yardımcı olmakla kalmayıp destekleri sayesinde akademik çalışmalar gerçekleştirmemi sağladığı için teşekkürü içtenlikle bir borç bilirim. Bu çalışmanın tamamlanmasında gösterdiği sonsuz destekten ve bana değerli laboratuvarında çalışma fırsatı sağladığı için Termo Isı Sistemleri A.Ş.'ye sonsuz teşekkürlerimi sunmak isterim. Termo Isı Sistemleri A.Ş.'deki çalışmalarım sırasında içten yardım ve destekleri için ECOSTAR ekibindeki herkese, özellikle hem gösterdiği dostluk hem de emekleri ile özenerek yapılan deneyler sayesinde çalışmaya katkı sağladıkları için minnettarım.

Barkın KILIÇ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xiv
ÖZET xv
ABSTRACT xvii
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti ... 1
1.2 Tezin Amacı ... 19
1.3 Hipotez ... 19
2 YANMANIN TEMEL KAVRAMLARI VE ELEMANLARI 20
2.1 Temel Kavramlar ... 20
2.1.1 Yanma ... 21
2.1.2 Yanma Çeşitleri ... 22
2.1.3 Kalorifik Değer ... 23
2.2 Gaz Yakıtlar ... 24
2.2.1 Doğal Gaz ... 24
2.2.2 Metan ... 25
2.3 Gaz Yakıt Yanma Reaksiyonlari Ve Stokiyometri ... 25
2.4 Yanma Sonrası Emisyonlar ... 28
2.4.1 Yanma Ürünleri ve Emisyonları ... 28
2.4.1.1 CO_2 Emisyonu 28
2.4.1.2 O_2 Emisyonu 29
2.4.1.3 CO Emisyonu 29
2.4.1.4 NO_x Emisyonu 29
2.4.2 CO ve NO_x Sınırları ve Yönetmelikler ... 30
2.5 Yanma Odaları ve Brülörler ... 32
2.5.1 Yanma Odaları ... 32
2.5.2 Brülörler ... 33
2.5.3 Brülörde Gaz Kontrol Hattı Ekipmanları ... 34
2.6 Prosese Özel Gaz Yakıtlı Brülörler ... 35
2.6.1 Monoblok Brülörler ... 35

2.6.2 Endüstriyel Brülörler 36
3 YAPILAN DENEYSEL ve NÜMERİK ÇALIŞMA 38
3.1 Deneysel Yöntem 38
3.1.1 Deneysel Sistem ve Ekipmanları 38
3.1.2 Test Brülörleri 41
3.1.2.1 FPB 200 42
3.1.2.2 ECO 2 43
3.1.2.3 Yüksek Alev Hızına Sahip Brülör FUSE 2 44
3.1.3 Yakıt İçeriği 45
3.2 Ölçüm Cihazlarının Doğruluk-Belirsizlik Analizi 45
3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Çalışması 46
3.3.1 Korunum Denklemleri 47
3.3.2 Yanma Modelleri 48
4 BULGULAR VE TARTIŞMALAR 52
4.1 Deneysel Çalışmalar 52
4.2 Nümerik Çalışmalar 63
4.2.1 3B Brülör Geometrilerinin HAD Analiz Programlarına Hazırlanması ... 64
4.2.2 Sınır Koşulları 71
4.2.3 Reaktif Analizler 75
4.3 Nümerik ve Deneysel Çalışmaların Karşılaştırılması 84
5 SONUÇ VE ÖNERİLER 86
KAYNAKÇA 89
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 94

SİMGE LİSTESİ

E	Turbulent dissipation rate
g	Yer çekimi ivmesi
k	Türbülans kinetik enerjisi
T	Sıcaklık
U	Akış hızı
α	Emilim katsayısı
Ar	Arrhenius faktörü
C	Karbon elementi
CH_4	Metan
C_2H_6	Etan
C_3H_8	Propan
C_4H_{10}	Bütan
C_5H_{12}	Pentan
C_6H_{14}	Hekzan
$C_{6.9}H_{14.5}$	Benzin
$C_{17}H_{34}$	Motorin
CO	Karbonmonoksit
CO2	Karbondioksit
Ea	Aktivasyon enerjisi
H	Entalpi
HCN	Hidrosiyanik asit
HFCs	Hidroflorür karbonlar
Hu	Yakıt alt ısıl değeri
H2	Hidrojen
I	Toplam radyasyon yoğunluğu
kf	İleri reaksiyon oranı
kr	Ters reaksiyon oranı
m	Kütle
ṁ y	Yakıt kütlesi
ρ	Yoğunluk
N_2	Azot
NO	Azot monoksit

NO_2	Azot dioksit
NO_x	Azot oksitler
N_2O	Diazotoksit
O	Oksijen atomu
OH	Hidroksil radikali
O_2	Oksijen
P	Basınç
PFCs	Perfloro karbonlar
r	Yarıçap
RZ	Resirkilasyon bölgesi
S	Kükürt
Sh	Kimyasal reaksiyon ısısı
SO_x	Kükürt oksitler
SF_6	Sülfür hekza florid
z	Eksenel Mesafe
Z	Kazan yükü artırım katsayısı
βr	Boyutsuz sıcaklık derecesi
η_k	Kazan verimi
Q	Brülör kapasitesi
Q_K	Kazan kapasitesi
Q_h	Kazanın ısı yükü
ε	Türbülans yitim hızı
λ	Hava Fazlalık Katsayısı
ω_k	Açısal Hız
Δ	Komşu buluşma noktaları arasındaki mesafe
μ	Moleküler viskozite

KISALTMA LİSTESİ

CPS	Click Per Second
DG	Doğal Gaz
ED	Eddy Dissipation (Girdap Yitimi)
EDC	Eddy Dissipation Concept
EFGR	External Flue Gas Recirculation
FPS	Frame Per Second
FR/ED	Finite Rate/Eddy Dissipation
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HFK	Hava Fazlalık Katsayısı
HHV	Higher Heating Value
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
LHV	Lower Heating Value
NPC	Non Premix Combustion
PDF	Olası Yoğunluklu Fonksiyon
PM	Periyodik Model
PPC	Partial-Premix Combustion
Ppm	Parts Per Million
RSM	Reynolds Stress Modeli

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Yanmanın endüstrideki önemi [19] 2

Şekil 1.2 Tarihsel ve öngörülen dünya enerji tüketimi [19] 3

Şekil 1.3 Yanma üçgeni [19] 3

Şekil 1.4 Brülörün nozulu üzerindeki tipik metan-hava karışımı yanması sonrası oluşan alev formu[22] 5

Şekil 1.5 (a) 0.001 ve (b) 5 saniyelik maruz kalma süresinde görseli alınan düzensiz alevler. Gaz hızı=(l) 3 Cps; (2) 4 Cps; (3) 5 fps; (4) 6 fps; (5) 7 fps. [22] 5

Şekil 1.6 Yanma hücresinde bulunan yüksek hızlı brülör alevi[27] 7

Şekil 1.7 Yuvarlak ve yuva şekilli yüksek hızlı brülör çıkışları[19] 8

Şekil 1.8 Serbest türbülanslı bir jet [19] 9

Şekil 1.9 Bir alüminyum eritici ısıtmasında tek bir brülörün kullanımı [19] 10

Şekil 1.10 Bir çelik fabrikası kok fırınının ısınmasında birden fazla brülörün kullanımı [19] 10

Şekil 1.11 Farklı lambda oranlarında yakma testi gerçekleştirilirken baca gazından ölçümü yapılan (a) oksijen, (b) karbonmonoksit ve (c) karbondioksit emisyonlarının deneysel verilerinin karşılaştırılması [28] 11

Şekil 1.12 Farklı ısıl kapasiteler için kullanılan doğal gaz hacimsel debileri ile yakma testi gerçekleştirilirken baca gazından ölçümü yapılan (a) oksijen ve (b) karbondioksit emisyonlarının deneysel verilerinin karşılaştırılması [28] 12

Şekil 1.13 Farklı lambda oranlarında yakma testi gerçekleştirilirken baca gazından ölçümü yapılan (a) oksijen ve (b) karbondioksit emisyonlarının deneysel verilerinin HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılması [28] 12

Şekil 1.14 Farklı ısıl kapasiteler için kullanılan doğal gaz hacimsel debileri ile yakma testi gerçekleştirilirken baca gazından ölçümü yapılan (a) oksijen ve (b) karbondioksit emisyonlarının deneysel verilerinin HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılması [28].... 13

Şekil 1.15 Çeşitli brülör ısıl yükleriyle baca atık gazındaki (a) CO_2, (b) O_2, (c) CO ve (d) NO_x değişimleri [29] 14

Şekil 1.16 Test esnasında kullanılan çeşitli lambda değerlerine karşı baca atık gazındaki (a) CO_2, (b) O_2, (c) CO ve (d) NO_x değişimleri [29] 15

Şekil 1.17 Deneysel ve farklı türbülans modellerinin kullanıldığı HAD analizlerini içeren nümerik çalışmaların (a) CO_2 (b) O_2, (c) CO, (d) T ve (e) NO_x karşılaştırılması [29] ..... **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 1.18 Deneysel ve farklı yanma modellerinin kullanıldığı HAD analizlerini içeren nümerik çalışmaların (a) sıcaklık ve yanma emisyonları (b) NO_x, (c) CO_2, (d) O_2 ve (e) CO karşılaştırılması [29] 17

Şekil 1.19 Sabit hava fazlalık katsayısı değeri (1.17) için baca gazı emisyon ve sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması [30] 18

Şekil 1.20 Sabit yakıt tüketimi için (45 Nm^3 /h) baca gazı emisyon ve sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması [30] 18

Şekil 2.1 Yanma tipleri: (a) ön karışımsız yanma, (b) kısmi ön karışımlı yanma ve (c) ön karışımlı yanma [28] 23

Şekil 2.2 Fazla hava baca gazı ürünleri [28] 27

Şekil 2.3 Lambda alev sıcaklık değişimleri grafiği [5] 28

Şekil 2.4 Yanma ürünleri (%) – Lambda [45] 30

Şekil 2.5 Örnek bir sıcak su kazanı ve ekipmanları [48] 33

Şekil 2.6 (a) Yüksek ve (b) düşük gaz basıncı için gaz yolu ve kontrol hattı elemanları [52] 35

Şekil 2.7 Monoblok brülör grupları olan (a) ECO NG LNX, (b) ECO NG LNX (FGR), (c) ECO (Turuncu), (d) ECO WO ve (e) ECO (Kare) [52] 36

Şekil 2.8 Endüstriyel brülör grupları olan (a) ECO, (b) MIB, (c) DIB, (d) DSE, (e) GIB, (f) CIB, (g) FPB, (h) GRM, (ı) T/HI, (i) DIP, (j)SHG ve (k) Start-up Brülörler [52] 37

Şekil 3.1 Deneysel çalışmaların yapıldığı ve firmada kurulu bulunan test ünitesinin şematik görünüşü [52] 39

Şekil 3.2 Sisteme gelen doğal gazın 300 mbar basınç seviyesine düşürüldüğü regülatör gaz debimetresi [52] 40

Şekil 3.3 Doğal gaz debimetresinde debi ve sıcaklık ölçümlerinin görseli [52] 40

Şekil 3.4 Yanma sonucunda oluşan emisyon ölçümünde kullanılan cihaz [52] 41

Şekil 3.5 NOVA marka ölçme cihazında anlık emisyon ölçümlerin gösterimi 41

Şekil 3.6 Deneysel çalışmalarda kullanılan ECOSTAR FPB serisinden temsili bir brülörün görseli [52] 42

Şekil 3.7 Saha şartlarında ECOSTAR FPB brülörünün kullanımını gösteren temsili görsel [52] 42

Şekil 3.8 Deneysel çalışmalarda kullanılan ECOSTAR ECO serisinden temsili bir brülörün görseli [52] 43

Şekil 3.9 Deneysel çalışmalarda kullanılan ECOSTAR FUSE serisinden temsili bir brülörün görseli [52] 44

Şekil 4.1 Test fırınının görseli [52] 522

Şekil 4.2 Test fırınında (a) ECO 2 ve (b) FPB 200 brülörlerinin montajının yapılması [52] 533

Şekil 4.3 Test fırınında (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin performans testi esnasında alev formlarının incelenmesi [52] 54

Şekil 4.4 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin lambda değerleriyle karbondioksit yüzdesinin değişimi 57

Şekil 4.5 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre FPB 200 brülörünün lambda değerleriyle karbonmonoksit değerinin ppm biriminde değişimi 588

Şekil 4.6 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin lambda değerleriyle nitrojen oksit değerinin ppm biriminde değişimi 599

Şekil 4.7 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin farklı ısıl kapasite değerleriyle karbondioksit yüzdesinin değişimi 61

Şekil 4.8 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre (a) FPB 200 ve (b) FUSE 2 brülörlerinin farklı ısıl kapasite değerleriyle karbonmonoksit değerinin ppm biriminde değişimi 62

Şekil 4.9 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin farklı ısıl kapasite değerleriyle nitrojen oksit değerinin ppm biriminde değişimi..... 63

Şekil 4.10 Ar-Ge test fırınının HAD analizlerine hazır olan kusursuz geometrisinin (a) yandan ve (b) izometrik görünüşü 65

Şekil 4.11 Ar-Ge test fırınına montajlanmış olan (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin yandan görünüşleri 65

Şekil 4.12 Ar-Ge test fırınına montajlanmış olan (a) ECO 2 ve (b) FPB 200 brülörlerinin izometrik görünüşleri..... 66

Şekil 4.13 Design Modeler'da yapılan operasyonlar sonrasında Ansys- Meshing programına aktarılmaya hazır FUSE 2- fırın montajının kusursuz geometrisinin (a) yandan, (b) izometrik görünüşü, (c) FUSE 2 modeli izometrik görünüşü ve (d) test fırını ile brülörün ayrılmış geometrisinin izometrik görünüşü 67

Şekil 4.14 Ağ örgülerinin fırın montajı ile hazırlanmış olduğu (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin yandan görünüşleri (FloEFD)..... 68

Şekil 4.15 Ağ örgülerinin hazırlanmış olduğu (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin yandan görünüşleri (FloEFD)..... 68

Şekil 4.16 Yüksek hızlı brülör ve fırın geometrisine ait sayısal ağ görseli (a)montaj izometrik görünüşü, (b) montaj yan görünüşü ve (c) sadece FUSE 2 brülörün görünüşü (ANSYS)..... 69

Şekil 4.17 Yüksek hızlı brülör geometrisine ait sayısal ağ kalitesi ve eleman sayısının gösterilmesi..... 69

Şekil 4.18 Yüksek hızlı brülör ve fırın geometrisine ait sayısal ağ görseli (ANSYS) ... 70

Şekil 4.19 Yüksek hızlı brülör geometrisine ait sayısal ağ görseli (ANSYS) 70

Şekil 4.20 Çordaş gaz dağıtım firmasından alınan ve testlerde kullanılmış olan doğalgaz karışımının LHV ve HHV hesaplamaları 71

Şekil 4.21 Ağ örgülerinin fırın montajı ile hazırlanmış (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin sınır koşulları seçimi ve tanımlanan değeleri (FloEFD)..... 74

Şekil 4.22 Yüksek hızlı brülör geometrisi için adlandırılmış sınır koşulları seçimi (ANSYS)..... 75

Şekil 4.23 150 kW kapasite için ECO 2 brülörü FloEFD reaktan analizlerinin konturların karşılaştırılması (a) hız, (b) yoğunluk, (c) sıcaklık ve (d) göreseli basınç... 76

Şekil 4.24 150 kW kapasite için FPB 200 brülörü FloEFD reaktan analizlerinin konturların karşılaştırılması (a) hız, (b) yoğunluk, (c) sıcaklık ve (d) göreseli basınç... 77

Şekil 4.25 150 kW kapasite için FPB 200 brülörü FloEFD reaktan analizlerinin konturların karşılaştırılması (a) hız, (b) yoğunluk, (c) sıcaklık ve (d) göreseli basınç... 78

Şekil 4.26 Kullanılan Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (Probability Density Function) kimya ile türbülans arasındaki ilişkiyi gösteren modelin grafiği..... 79

Şekil 4.27 Yakınsama kriterlerinin seçimleri için baca gazındaki ölçulmesi adına (a) molar oksijen oranı ve (b) atık baca gazındaki sıcaklık..... 80

Şekil 4.28 Yapılan HAD analizi sonrasında ortalama sonuçların değerlendirilmesi (a) statik basınç, (b)yoğunluk, (c) hız, (d) sıcaklık, (e) metan, (f) O_2, (g) H_2O , (h) CO ve (ı) CO_2..... 81

Şekil 4.29 Yapılan HAD analizi sonrasında ortalama y+ sonuçlarının değerlendirilmesi 82

Şekil 4.30 Yapılan HAD analizi sonrasında ortalama ısı 82

Şekil 4.31 Yapılan HAD analizi sonrasında ortalama sonuçların değerlendirilmesi (a) statik basınç, (b)yoğunluk, (c) hız, (d) sıcaklık, (e) metan, (f) O_2, (g) H_2O , (h) CO ve (ı) CO_2 83

Şekil 4.32 Yapılan HAD analizi sonrasında (a) CO_2 (kuru) ve (b) CO (kuru) hesapları 84

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Yaygın kullanılan yakıtların LHV ve HHV değerleri 24

Tablo 2.2 Fan destekli brülörler için tahmini emisyon değerleri 29

Tablo 2.3 EN 676: 2008 NO_x sınırlamaları- emisyon sınıfı..... 31

Tablo 2.4 Doğal gaz için NO_x ve CO emisyonlarının dönüşümü [28] 31

Tablo 2.5 Gaz yakıt yanmasında Azotoksit (NO_x), Karbonmonoksit (CO), hidrokarbon (C_xH_y) konsantrasyonu ve islilik derecesi [47]. 32

Tablo 3.6 FPB Proses Brülörleri (FPB 200) özellikleri [52] 43

Tablo 3.7 ECO 2 Brülörleri özellikleri [52]..... 44

Tablo 3.8 Deneysel çalışmada yapılan ölçümlerin doğruluk- belirsizlik değerleri [29,30] 4546

Tablo 3.9 Yanmanın modellenmesi 50

Tablo 4.1 150 kW gaz tüketimi için farklı hava fazlalık değerleri için emisyon testi değerleri [52]..... 555

Tablo 4.2 Farklı kapasiteler için emisyon testi değerleri [52] 60

Tablo 4.3 %100 metanın 1~1.5 λ değerleri için teorik hava/gaz oranı, oksijen oranı ve fazla hava oranları hesapları [23]..... 72

Tablo 4.4 Yüksek hızlı brülörde yakıt ve hava kütle akış girişi için sınır koşulu hesaplamaları ile ulaşılan değerler..... 72

Tablo 4.5 Yakıt ve hava kütle akışı giriş sınır koşulları için hesaplanan hidrolik çap .. 73

Tablo 4.6 Yapılan HAD analizi sonrasında (a) CO_2 (kuru) ve (b) CO (kuru) hesapları 84

Tablo 4.7 150 kW ısı kapasiteli yüksek hızlı brülör olan FUSE 2 deneysel ve nümerik çalışmaların %3 oksijen/ 1.17 lambda referansında elde edilen değerlerin karşılaştırılması..... 85

ÖZET

Yüksek Alev Hızlarına Sahip Endüstriyel Yakıcılarda Yanma Sonucu Oluşan Emisyonların Deneysel Ve Nümerik Olarak İncelenmesi

Barkın KILIÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

İnsan nüfusunun dünya genelinde hızla yükselmesi ve teknolojideki gelişmeler ile artan enerji ihtiyacı dolayısıyla enerji kaynakları her geçen gün insanlığın ihtiyacını karşılayabilmek konusunda daha da yetersiz kalmaktadır. Her ne kadar yenilenebilir enerji üzerine çalışmalar ve gelişmeler gerçekleştirilse bile, yatırım maliyetleri ve bazı durumlarda ihtiyaç duyulan enerjinin büyüklüğü sebebi ile yenilenebilir enerji sistemleri kullanılamamakta ya da yeterli olamamaktadır. Endüstrinin en önemli fonksiyonlarından biri olan enerji tüketimini düşürmek bu bağlamda önem arz etmektedir. Bu çalışmada, endüstriyel yakıcılarda enerji verimliliğini arttırmak adına, endüstride sıkça karşımıza çıkan 150 kW kapasiteli standart endüstriyel yakıcılar incelenerek özel bir yakıcı tasarımı üzerinde çeşitli uygun geliştirmeler yapılarak, yüksek alev hızlarına ulaştırılmıştır. Geliştirilen bu ürün endüstride kendisine yüksek hızlı brülör adıyla yer edinmiştir. Yüksek hızlı brülörlerde ortaya çıkan en büyük sorunlardan biri alev hızlarının yüksek olmasıdır. Bu durum, karışım anındaki hava ve gaz hızlarının da yüksek olması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla karışım anındaki kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için gerekli zamanı tanımamaktadır ve karışım performanslarını olumsuz etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda ve tasarım sürecinde Solidworks programından yararlanılmıştır.

Gerçekleştirilen tasarımlar hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile iç akış analizleri sonucunda elde edilen basınç, yoğunluk, hız ve sıcaklık konturları incelenmiştir. Uygun görülen konturlara ait geometrilerin daha sonra yanma analizleri gerçekleştirilmiş ve gerek alev hızları gerekse emisyon değerlerinde hedeflenen sonuçlara ulaşılmaya çalışılmıştır. Çalışmada araştırma ve geliştirilmesi yapılan ürünün, yukarıda bahsi geçen hedefleri yakalayabilmesi için karışım performansını arttıran bir türbulator tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, akışın tüm noktalarda maksimum homojenlikte olmasını sağlamak için hava ve gaz giriş bölgeleri ve debileri gerçekleştirilen analizler sonucunda en uygun şekilde tayin edilmiştir. Yapılan bu çalışmalar vasıtasıyla karışım performansları maksimum seviyelere çekilmiş ve dolayısıyla sisteme giren yakıtın maksimum miktarda yakılması sağlanmıştır. Burada elde edilen avantajlarla birlikte emisyon değerleri olması gereken standartları sağlamıştır. İdeal bir karışma ortamı oluşturulamazsa gaz yanamadan sistemi terk edebilir ve bu da baca atık gazında, istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmasına sebep olabilir. Karbon ve azot türevlerinin baca atık gazında standartlarca arzu edilen değerlerde olmaması çevreye ve insan sağlığına çok ciddi hasarlar verebilmektedir. Ayrıca bu gazlar sera etkisine, kükürt ve azot oksitler asit yağmurlarına neden olmaktadır. Havada bulunan karbon türevlerinin miktarı arttıkça, asidik oluşumlar artacak ve asit yağmurları daha çok görülecektir.

Anahtar Kelimeler: Brülör, endüstriyel yakıcı, alev hızı, emisyon, doğal gaz, bek, fırın

ABSTRACT

Experimental and Numerical Investigation of Combustion Emissions in Industrial Burners with High Speed Flame

Barkın KILIÇ

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Energy resources are becoming more and more inadequate to meet the needs of humanity, due to the rapid increase of the population worldwide and the increasing energy need with the developments in technology. Although studies and developments on renewable energy have been carried out, renewable energy systems cannot be used or are not sufficient due to investment costs and in some cases, the size of the energy needed. In this context, it is important to reduce energy consumption, which is one of the most important functions of the industry. In this study, to increase energy efficiency in industrial burners, various implementations were made on a standard industrial burner of 150 kW, which is frequently encountered in the industry, and high flame speeds were achieved. This product developed has gained a place in the industry with the name of high-speed burner. One of the biggest problems with high-speed burners is the high flame velocities. This means that the air and gas velocities at the time of mixing are also high. Therefore, it does not allow the time required for chemical reactions to take place at the time of mixing and adversely affects the performance of the mixture. SolidWorks program was used in the studies and design process. Computational fluid dynamics and pressure, density, velocity, and temperature contours obtained as a result of internal flow analysis were examined. Afterwards, burning analysis of geometries belonging to the appropriate contours were

performed and aimed results were tried to be achieved in both flame velocities and emission values. In the study, a turbulator design that increases the mixing performance of the product, whose R&D is made, has been realized to achieve the targets mentioned above. In addition, to ensure that the flow is at maximum homogeneity at all points, the air and gas inlet regions and flow rates have been determined in the most appropriate way because of the analyzes carried out. By means of these studies, the mixture performances were maximized and therefore the maximum amount of fuel entering the system was burned. With the advantages obtained here, the emission values have been drawn to the standards that should be. If an ideal mixing environment cannot be created, the gas may leave the system without burning and this may cause undesirable results in the flue waste gas. The fact that carbon and nitrogen derivatives are not at the desired values in flue waste gas by the standards can cause serious damage to the environment and human health. In addition, these gases cause greenhouse effect and sulfur and nitrogen oxides cause acid rain. As the amount of carbon derivatives in the air increases, acidic formations will increase, and acid rain will be seen more.

Keywords: Burner, industrial burner, flame velocity, emission, natural gas, burner, furnace

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Hamzaoğlu yüksek lisans tezinde dünya nüfusunun artması ve yarattığı enerji talebi nedeniyle verimli enerji kullanımı bir gerekliliğini vurgulamaktadır. Buna ek olarak, fosil yakıtların ve emisyon sorunlarının azaltılması, çevreyi etkilediği için bu konuda birçok çalışma ve uygulamaya yol açmaktadır. Kaynakları kullanmak ve egzoz gazı emisyonlarını azaltmak için daha verimli yollar geliştirmek, dünyadaki insan ve diğer canlı organizmaların sürdürülebilir geleceği için bilim ve mühendislik camiasında en önemli endişelerden ikisidir. Bu çalışmada yüksek verimliliğe sahip ve yüksek alev hızlı bir endüstriyel yakıcı geliştirilmektedir. [1]

Yanma konusunda pek çok teorik kitap yazılmaktadır, ancak endüstriyel yanma süreçleri hakkında çok az tartışma vardır.[2]–[5] Curran ve arkadaşları çalışmasında, hem sabit (öncelikle kazanlar ve yakma fırınları) hem de mobil kaynaklar (öncelikle kazanlar ve yakma fırınları) dahil olmak üzere uygulamalar hakkında kısa bir bölüm yazmıştır. [6] Barnard ve Bradley ise, endüstriyel uygulamalar hakkında kısa bir bölüme sahiptir. [7] Lisans ve lisansüstü yanma kursları için tasarlanmış olan Turns tarafından yazılan bir kitap, çoğu benzer kitaptan daha fazla pratik yanma ekipmanı tartışması içermektedir. [8]

Yanmanın daha pratik yönleri üzerine yazılmış birçok kitap da var. Griswold'un kitabı, yanma teorisinin önemli bir incelemesine sahiptir, ancak aynı zamanda çok pratik yönelimlidir ve gaz brülörleri, yağ brülörleri, stokerler ve toz kömür brülörleri, ısı transferi, fırın refrakterleri, tüp ısıtıcılar, proses fırınları ve fırınlar.[9] Baukal endüstriyel yanma hakkındaki kitabı, gerçek fırınlar ve havacılık uygulamaları, özellikle roketler hakkında bilgi içerir. [10] Kitapta alev uzunlukları, alev şekilleri, hız profilleri, tür konsantrasyonları, sıvı ve katı yakıt yanması, ısı transferi hakkında sınırlı miktarda bilgi ile. Endüstriyel yanma üzerine bir kitap, alev kimyası hakkında önemli tartışmalara sahiptir, ancak alevlerden kaynaklanan kirlilik hakkında çok az tartışma vardır. [11] Keating'in uygulamalı yanma hakkındaki kitabı motorlara yöneliktir ve endüstriyel yanma süreçlerini ele almaz. [12] Bormanand ve Ragland tarafından yazılan bir kitap, yanma üzerine teorik ve pratik kitaplar arasındaki boşluğu doldurur. [13] Bununla

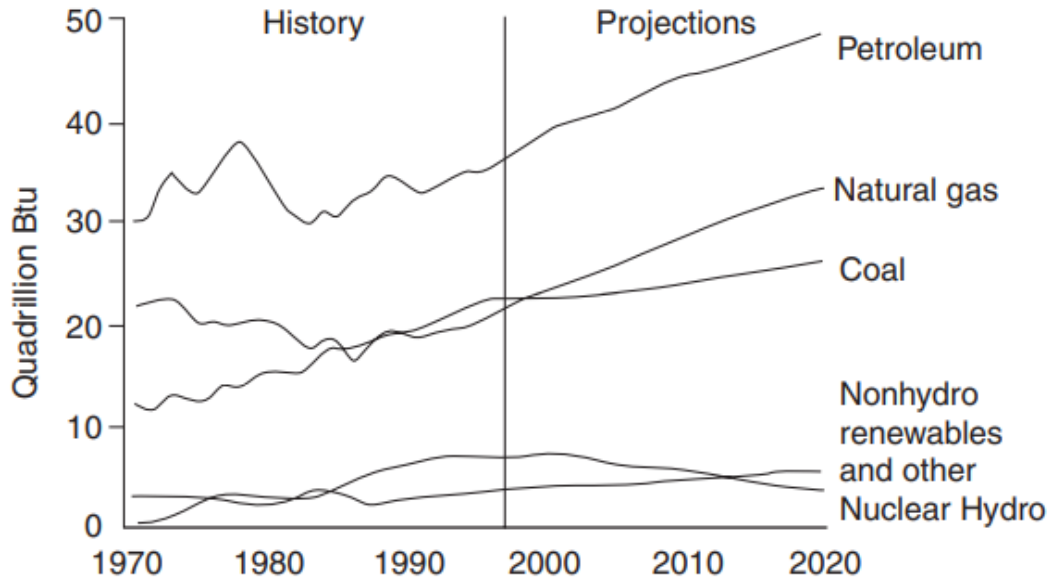
birlikte, kitapta burada ele alınan endüstriyel uygulama türleri hakkında çok az belge vardır. Yanma uygulamalarına ilişkin el kitaplarında bile endüstriyel yanma sistemleri hakkında derinlemesine bilgi mevcut değildir. [14]–[18] Şekil 1.1'de petrol rafinasyonu, orman ürünleri, çelik, kimya, cam, metal döküm ve alüminyum endüstrileri arasında yakma, buhar ve ısı sektörlerinin önemi gösterilmektedir.

	% Total Energy From (at the point of use)		
Industry	**Steam**	**Heat**	**Combustion**
Petroleum refining	29.6	62.6	92.2
Forest products	84.4	6.0	90.4
Steel	22.6	67.0	89.6
Chemicals	49.9	32.7	82.6
Glass	4.8	75.2	80.0
Metal casting	2.4	67.2	69.6
Aluminum	1.3	17.6	18.9

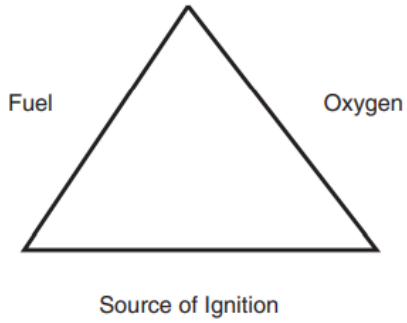
Şekil 1.1 Yakmanın endüstrideki önemi [19]

Şekil 1.2'de 1970-2020 yıllarında petrol, doğal gaz, kömür, hidro yenilenebilir olmayan ve diğer, hidro- nükleer enerji tüketimlerinin tarihsel ve tahmini değerleri gösterilmiştir.

Çoğu yakma proseslerinin meydana gelmesi için gerekli bileşenleri anlaşılabilmesi adına basit bir model olan yangın üçgeni veya yanma üçgeni Şekil 1.3'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2 Tarihsel ve öngörülen dünya enerji tüketimi [19]



Şekil 1.3 Yanma üçgeni [19]

Genel olarak, brülörler oksitleyici olarak hava ile beslenir ve ekzotermik kimyasal reaksiyonları başlatmak için hava yakıtla karıştırılır. Hava, depolama risklerini veya diğerlerine kıyasla maliyetleri göz önünde bulundurarak en ucuz oksitleyicidir. Saf oksijen, oksitleyici olarak havaya bir alternatif olarak da kullanılabilir. Öte yandan, dikkate alınması gereken daha yüksek alev sıcaklığı söz konusu olacaktır. Saf oksijende azotun bulunmaması nedeniyle brülörün çıkışından havaya göre daha az emisyon olacaktır. Fakat malzeme dayanıklılığı sebebi ile, oksitleyici olarak oksijen kullanıldığında, sistemin ve malzemelerin güvenliği ciddiye alınmalıdır.

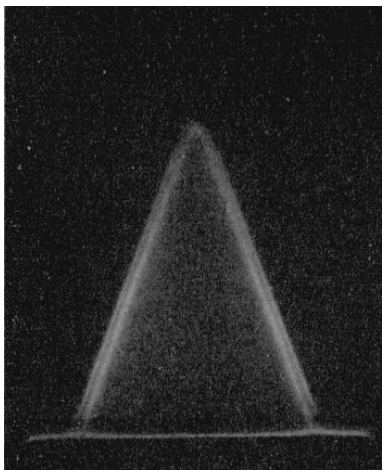
Alev stabilizasyonu yakıcılarda anahtar problemlerden biridir. [8] Sıcaklık, akış hızı ve reaksiyona giren girdilerin karışım oranı yanma ve ateşleme mekanizmasını etkiler. Alev

ateşlendiğinde, gelen girdilerin akış hızı ve karışım oranı yanma oranını kontrol eder. Alevi tutmak için çeşitli stabilizasyon mekanizmaları kullanılır. Uygun stabilizasyon mekanizması, girdilerin giriş hızına bağlıdır. Akış hızı laminer alev hızından çok daha yüksekse, alevi stabilize etmek için bir yöntem uygulanmalıdır. En yaygın yöntemlerden biri, her giriş akış koşulunda önceden karıştırılmış bir alev olan ve yanan bir pilot alev kullanmaktır. Diğer bir çözüm, bir sirkülasyon bölgesine neden olan bir blöf gövdesi kullanmaktır. Bu blöf gövdesi geometrisi, akışı yavaşlatan ve devridaimini sağlayan geometrinin arkasında bir sirkülasyona neden olur. Bu etki reaktanlara yanma için biraz zaman verir.

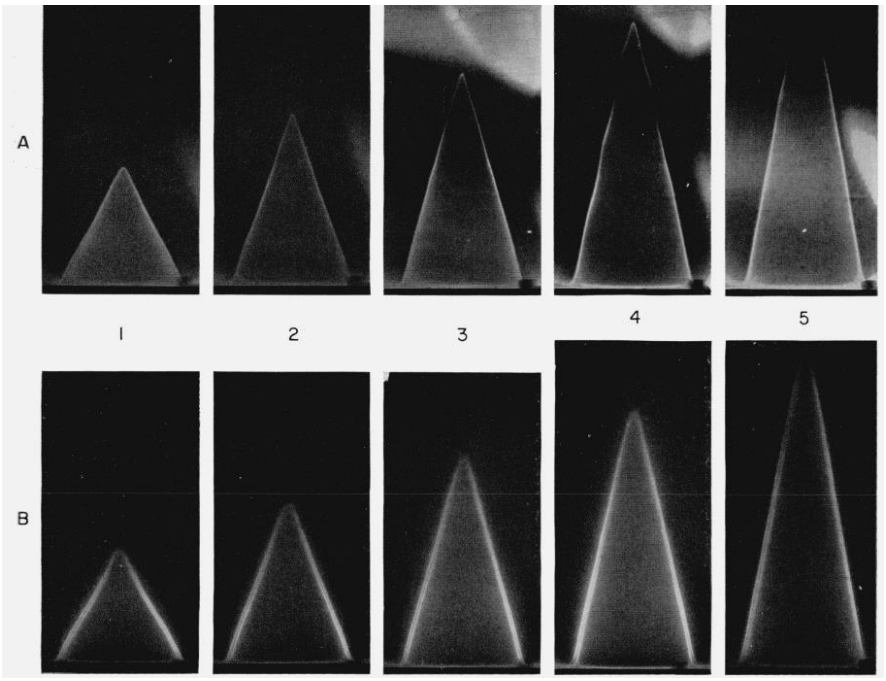
Ziyu Wang yüksek lisans tezinde laminer ve türbülanslı alev hızlarının farklı metotlar kullanılarak ölçülmüş ve verilerin değerlendirilerek alev formunun fiziksel ölçüleri ortaya konmuştur. Yüksek hızlı özel kameralar kullanılarak saniye de 40000 kare görüntü alınarak alev hızları ölçülmüştür. Ayrıca hava / gaz olayının alev formuna etkileri incelenir. Sabit alevler yöntemi, düz alevli brülörler, nozullu brülörler ve durgun alevler gibi alevleri kapsar. Düz alevli brülörlerde, sabit aleve bir yakıt akışı akar, bu nedenle yanmamış gazın kararlı alev brülörüne girme hızı, o yakıtın laminer yanma hızına eşittir. Düşük yanma hızı (0.15-0.20m/s) ile sınırlıdır. Bu nedenle, kayda değer enerji kayıplarını önlemek için hafif varyasyonlar kullanan düz alev yöntemleri geliştirilir. Araştırmacılar, farklı yakıt akış hızlarında gözenekli bir tapa üzerindeki alevi stabilize ederek soğutma kapağının sıcaklık artışını ölçebildiler. Daha sonra, adyabatik alev hızını belirlemek için hacimsel akış hızının alev disk alanına oranını tahmin ettiler. Nozul alevleri yöntemi, konik şekilli Bunsen brülör tipi alevleri kullanır ve çoğunlukla düz alevli brülörlerle aynı dezavantajlardan muzdariptirler. Konik alevin analizinde, alev yüzeyine dik hız bileşeni, o belirli konumdaki yanma hızıdır. Bununla birlikte, konik alev yönteminin, varsayılan özelliklerini her zaman karşılayamayacağı için birkaç belirgin dezavantajı vardır. Sonuç olarak herhangi bir yöntemle alevin gerçek geometrisini belirlemek çok zordur. Ek olarak, alevin geometrisi nedeniyle esneme etkisi ihmal edilemez.[21]

Carl Halpern alev çapının ve fiziksel özelliklerinin gaz hızı, metan- hava oranı, gibi değişkenlerle olan değişimleri grafikler halinde incelenmektedir. Ayrıca gazın çıkış hızı, karışımın çıkış hızı gibi etkenlerin de alev hızına etkileri aynı şekilde grafiklerle ele alınmıştır. Yanmamış gaz miktarının artmasının alev hızına etkileri yakıt hava karışım oranına göre farklı noktalarda incelenir. Şekil 1.4 brülörün nozulu üzerindeki tipik metan-hava karışımı yanması sonrası oluşan alev formunu içerirken ve Şekil 1.5 ise çeşitli gaz

hızları cps ve fps birimlerinde anlık elde edilen düzensiz alev görsellerini içermektedir. [22]



Şekil 1.4 Brülörün nozulu üzerindeki tipik metan-hava karışımı yanması sonrası oluşan alev formu[22]



Şekil 1.5 (a) 0.001 ve (b) 5 saniyelik sürede görselleri alınan düzensiz alevler. Gaz hızı=(l) 3 cps; (2) 4 cps; (3) 5 fps; (4) 6 fps; (5) 7 fps. [22]

Oystein Spangelo çalışmasında, girdap üreteçli bir brülör için brülörün geometrisindeki değişikliklerin NOx emisyonları ve yakıt besleme basıncı üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Deneysel, teorik ve sayısal çalışmalar yapılmaktadır. 20 kW kapasiteli brülörün 2 boyutlu hesaplamalı akışkanlar analizine hazır model kullanılmaktadır. Testler soğutmasız ve su soğutmalı bir yanma hücresinde 20 kW brülör ile yapılmaktadır. Türbülanslı akış k-ε türbülans modeli kullanılarak modellenmektedir. Yanma

modellemesi için Eddy Dissipation modeli, Equilibrium PDF modeli ve Flamelet PDF modeli kullanılmıştır. Flamelet PDF modeli, yanma modellemesi için en uygun model olarak bulunmuştur. Patentli brülör konseptinde yakıt olarak metan ve propan için %3 O2 referanslı düzeltilmiş emisyon değerlerine ulaşılmıştır. dahili gaz devridaimi, hızlı hava ve yakıt karışımı kullanılarak optimize edilmiş brülör, endüstriyel brülörlerde yaygın olarak kullanılan sabit hız ölçeklendirme kriterleri de kullanılarak başarıyla 200 kW ve 370 kW'a ölçeklendirilmektedir. [23]

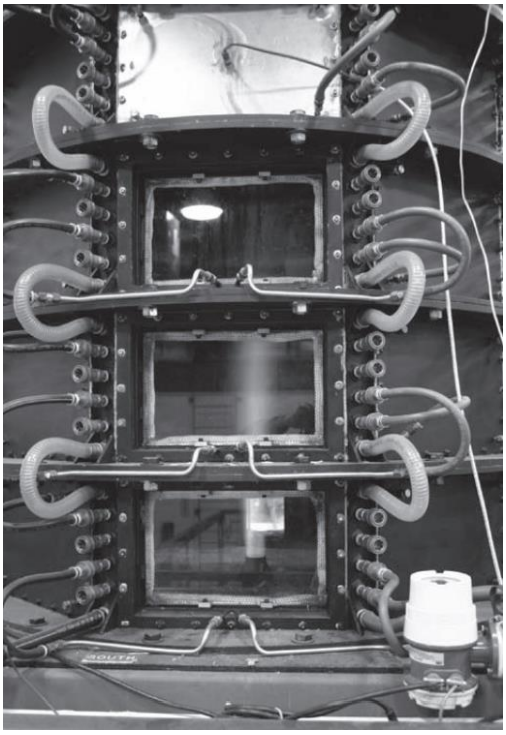
Saripalli çalışmasında, kazan verimliliğinin nasıl artırılacağını ve baca gazı emisyonlarının nasıl azaltılacağını belirlemek için endüstriyel bir buhar kazanı uygulaması için yanma ve termal akış davranışlarını incelemiştir. Yakıt olarak metan kullanılmıştır. 3 boyutlu hesaplamalı akışkanlar analizine hazırlanması istenilen geometri GAMBIT adlı HAD programında ağ örgüsü düzenlendikten sonra model nümerik çalışmalar için HAD çözücü yazılım ANSYS Fluent'e aktarılmıştır. Türbülanslı akış, k-ε türbülans modeli kullanılarak modellenmiştir. Sınır koşulu olarak hem yakıt hem de hava için kütlesel debi girişi kullanılmıştır. Kazanın dış kabukları için sabit duvar sıcaklığı tanımlanmıştır. Basınç çıkışı sınır koşulu tanımlanmıştır. Radyasyon, Rosseland radyasyon modeli kullanılarak modellenmiştir. Metanın yanması, sonlu hızlı kimya modelinin tek adımlı reaksiyonu ile modellenmiştir. Genel simülasyon, modellenen endüstriyel buhar kazanı hakkında kapsamlı bilgiler sağlanmıştır. Kazan verimliliğini artırmak ve termal gerilmeleri en aza indirmek için çeşitli fikirler oluşturulmuştur. [24]

Verissimo ve arkadaşlarının bu çalışmasında 10 kW laboratuvar ölçekli bir yakıcıda alevsiz yanmanın sağlanmasında giriş hava hızının önemini incelenmiştir. Giriş hava hızının değişimi için diğer tüm giriş parametreleri sabit tutulurken hava nozulu çapı değiştirilmiştir. Bu yakıcı çalışma koşullarında ince telli termokupllarla kaydedilen sıcaklık ve bir emisyon ölçüm cihazıyla yardımıyla ölçülen O2, CO2, yanmamış hidrokarbonlar, CO ve NOx konsantrasyonlarının lokal dağılımları da elde edilmiştir. Gaz türbinlerinde reaktanların önemli miktarda baca gazı ile seyreltilmesi yoluyla alevsiz yanma koşulunun oluşturulması önerilmektedir. [25]

Lezcano ve arkadaşları çalışmalarında, metan gazının yakıldığı ön karışımlı bir brülör HAD analizleri ile incelenmiştir. 2 boyutlu ve 3 boyutlu analizlerin arasında farklılıklara ulaşılmasının belirtilmesi amacıyla, giriş koşullarının 2 boyutlu eksenel simetrik analizlerinde elde edilen profiller olduğu bir 3 boyutlu analizleri yapılmıştır. Analizlerde türbülans için standart k-e modeli, radyasyon için P1 modeli ve yanma için basitleştirilmiş

2 adımlı reaksiyon mekanizmasına sahip Finite Rate /Eddy Dissipation modeli kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, 2 boyutlu asimetrik şekilde tanımlanan analizlerin sonuçları, 3 boyutlu model kullanılarak yapılan analizlerin sonuçlarına göre daha iyi bir yaklaşım sergilemektedir. [26]

Baukal brülör testleri üzerine yazılmış olduğu kitabında yanmanın temellerinden başlayan bu kitapta, yanma ile ilgilenen ve yanma sektörünün içerisinde yer alan herkes için referans olabilecek bilgiler mevcuttur. Kitap genellikle endüstriyel brülörleri ele almaktadır. Birçok yakıcı türünün ele alındığı bu kitap özellikle doğalgazlı yakıcılara odaklanmaktadır. Çünkü sektörde çoğunlukla kullanılan yakıcı tipi doğalgazlı yakıcılardır. Zorlanmış konveksiyon, ısıyı alevlerden bir yüke aktarmak için diğer baskın mekanizmadır. Örneğin, yüksek hızlı brülörler, özellikle radyant ısıtmanın, yükün içine çok daha az enerji girerek yüzeyi aşırı ısıtabileceği uygulamalarda özellikle yararlıdır. Radyant tüp içindeki dahili baca gazı devridaimi, radyant borunun yüzeyinde daha iyi bir sıcaklık homojenliğine yol açar ve yüksek hızlı brülörlerle bağlantılı olarak yanma ürünlerinin reaksiyon bölgesine devridaim etmesine yol açar. Şekil 1.6'da bir yanma hücresinde yüksek hızlı brülörün uzun alev formu gösterilmektedir. [27]

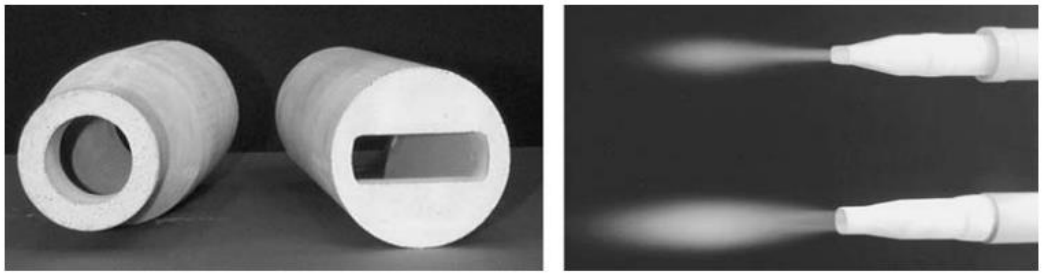


Şekil 1.6 Yanma hücresinde bulunan yüksek hızlı brülör alevi[27]

Baukal "Yüksek hızlı brülör" terimi, tipik olarak, içinden geçen yanma ürünlerine 91.44 m/s (300 ft/s)'yi aşan bir çıkış hızı sağlamak için boyutlandırılmış çıkış başlığına sahip,

endüstrideki nominal hız değerleri 121.92~152.4 m/s (400~500 ft/s) aralığında olan bir brülörü ifade etmektedir. Yüksek hızlı bir brülör sistemi, genellikle, brülörün çıkış başlığından yanma ürünlerinin yanma odasına tamamen reaksiyona girmiş şekilde sürüklemesine izin verecek şekilde üretilmektedir. Bu, yanma hücresindeki homojen ısı dağılımını ve ısı transferini arttırmak amacıyla yanma hücresi içindeki yanma ürünlerinin sirkülasyonunu desteklemektedir.

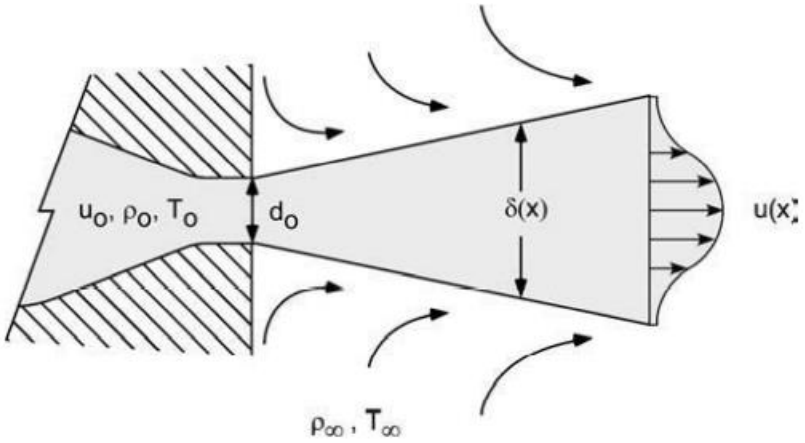
Yüksek hızlı brülör tasarımı, çeşitli tasarımlarla olabileceği gibi bu tasarımlar arasındaki tasarım farkları yüksek hızın nasıl elde edilmesi gerektiğine göre değişkenlik göstermesinden dolayı oluşmaktadır. Tüm yüksek hızlı brülörler, alevi kararlı halde tutabilecek şekilde tasarımları yapılmaktadır. Brülör başlığının çıkışını küçültmek o bölgedeki çıkış hızını da arttırmaktadır. Alev borusu içindeki reaksiyon ilerlemesi de çıkış hızını etkilemektedir. Yanma tamamlandıkça, gaz sıcaklığı yükselmektedir ve gaz hacmi de sıcaklık etkisi ile genişlemektedir. Bu nedenlerden dolayı çıkış hızını arttırmaktadır. Farklı malzemelerden yapılabilen brülör başlıkları endüstride mevcuttur ve Şekil 1.7 refrakter malzeme ile imal edilmiş olan iki farklı yüksek hızlı aleve sahip brülör başlıklarını ve test esnasındaki alev formlarının çıkış kesit şekline göre değişimi gösterilmektedir. [19]



Şekil 1.7 Yuvarlak ve yuva şekilli yüksek hızlı brülör çıkışları[19]

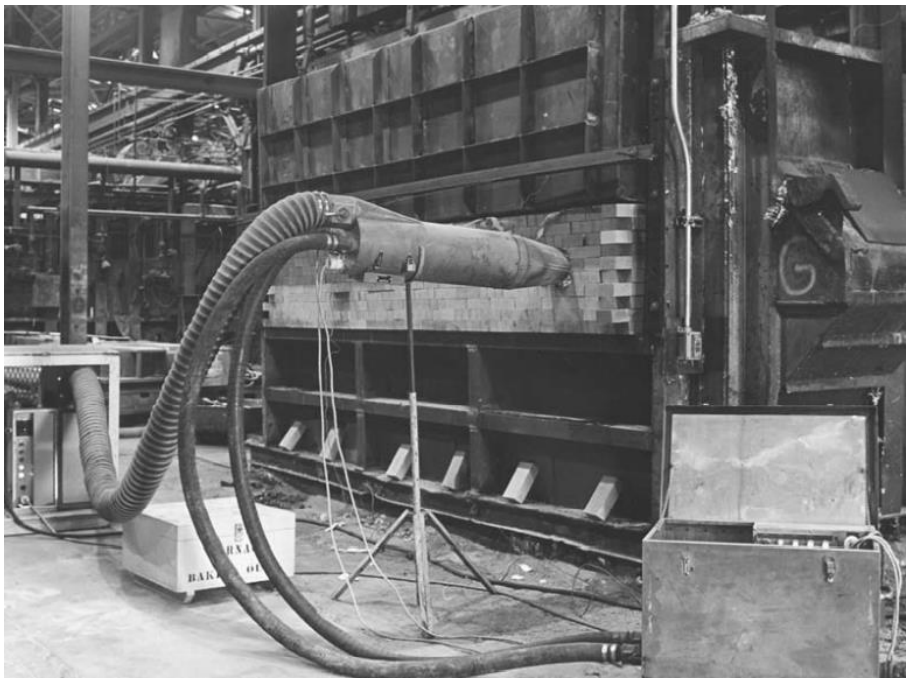
Tüm brülörler, yaktıkları yakıtın yanıcılık sınırları içinde çalışmalıdır. Gerçek ön karışımlı brülörler tek, dar bir alevlenebilirlik penceresinde çalışmak zorundayken, nozüllü karışım brülörleri karolarının yanma alanı içinde birçok yakıt/hava oranı bölgesine sahip olabilir, sadece ateşleme noktasındaki bölge içinde olması gerekir. yanıcılık sınırları. Yanabilirlik sınırları içindeki bölgelerden salınan ısı, bitişik yakıt/hava bölgelerinin sınırlarını genişleterek onların da yanmasına izin verir. Bu nedenle, brülöre sağlanan toplam yakıt ve havaya bağlı olarak, bir meme karışım brülörünün tedarik edilen

yakıtın normal yanıcılık sınırlarının dışında çalıştığı görünebilir. Serbest türbülanslı jet teorisi ile ilgili görsel Şekil 1.8'de genel hatları ile mevcuttur.[19]

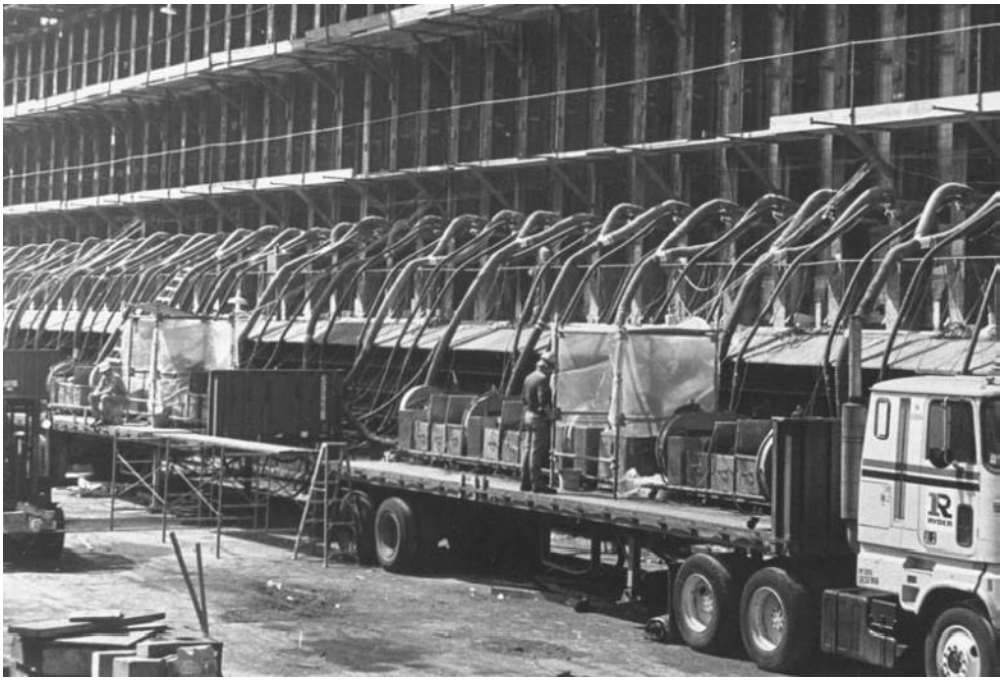


Şekil 1.8 Serbest türbülanslı bir jet [19]

Yüksek hızlı brülörler, bir tünel fırının giriş ucundaki düşük sıcaklıklı ön ısıtma bölgesinde de çok etkili olmaktadırlar. Bu brülörler, tipik olarak, ortaya çıkan gazlar ve tuğlalar arasında mümkün olan en düşük olası sıcaklık farkını elde etmek için yüksek hava oranlarında ateşlenebilmektedirler. Bu yaklaşım, tuğlaların, tüneldeki herhangi bir organik malzemenin kontrollü yanmasına elverişli oksitleyici bir ortamda eşit şekilde ısıtılmasını sağlamaktadır. Gaz depolama tankları, kimyasal proses ekipmanı ve basınçlı kaplar gibi büyük, fabrikasyon yapılar sıklıkla yerinde gerilim giderme gerektirmektedir. Yüksek hızlı brülörlerin kullanımı, rezistanslı ısıtıcıları dış yüzeye bağlamanın oldukça yoğun emek gerektiren ve pahalı elektrik yöntemine bir alternatif sunması ile de ön plana çıkmaktadır. Söz konusu yapı, geçici olarak dışarıdan yalıtılmıştır ve iç alana ateşlemek için bir veya daha fazla brülör yerleştirilmiştir. İnce duvarlı kapların ve yüksek sıcaklıklı işlemlerin bazı durumlarında, kabın çökmesini önlemek için yakma işleminin yarattığı iç basınç bilinçli olarak kullanılmaktadır. Bir alüminyum eritici ısıtmasında tek bir brülörün kullanımını gösterir ve bir çelik fabrikası kok fırını pilinin ısınmasında kullanılan birden fazla brülörü gösterir. Ağır sanayide ürün ısıtması ve ürün ergitmesi üzerine kullanılan iki farklı yüksek hızlı aleve sahip brülör Şekil 1.9 ve Şekil 1.10'daki gibidir. [19]



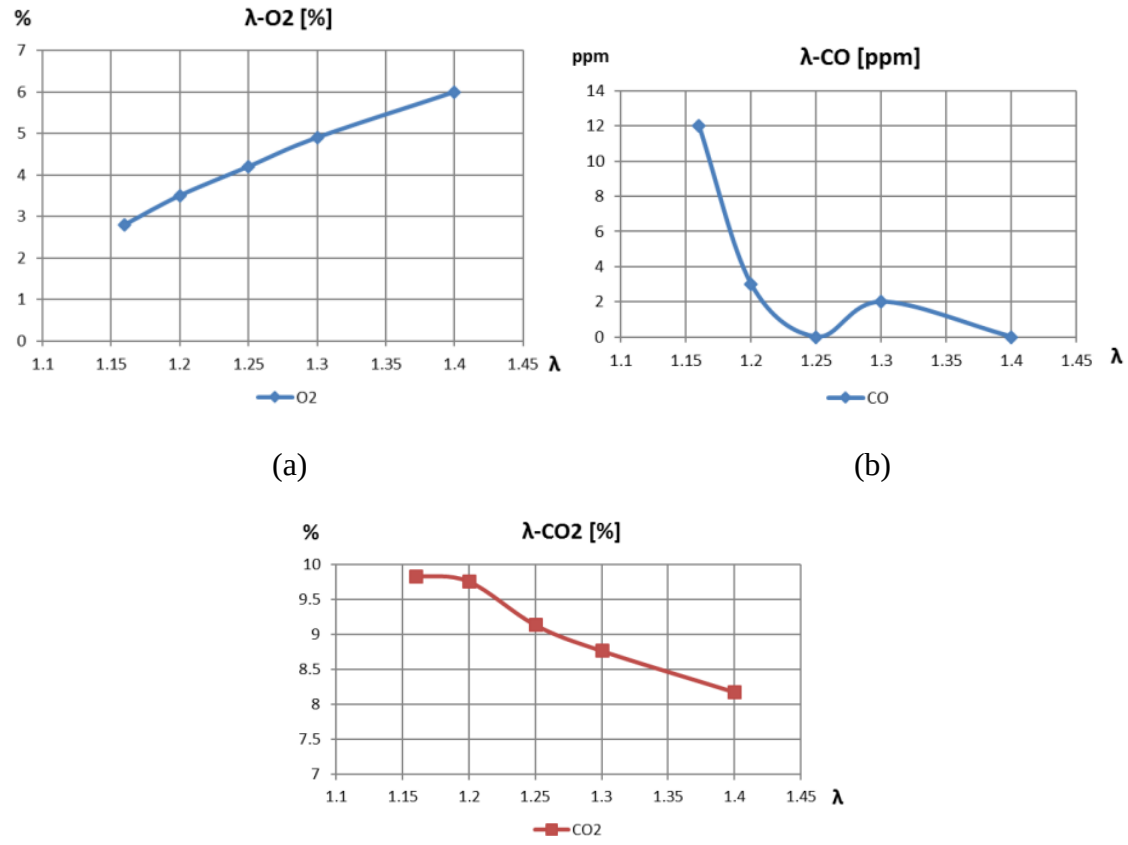
Şekil 1.9 Bir alüminyum eritici ısıtmasında tek bir brülörün kullanımı [19]



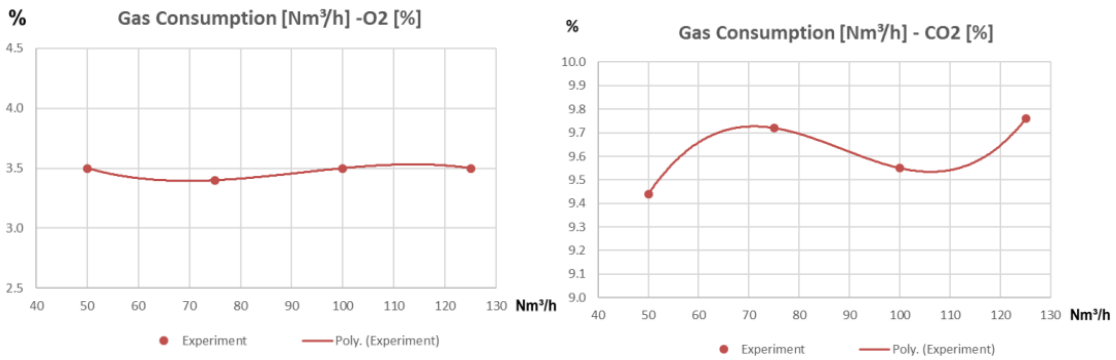
Şekil 1.10 Bir çelik fabrikası kok fırınının ısınmasında birden fazla brülörün kullanımı [19]

Uza yüksek lisans tez çalışmasında Ecostar yakma sistemleri laboratuvarında bulunan kazan ve fırın olmak üzere iki farklı yanma hücresinde ECO-45 adı verilen doğal gaz brülörü üzerinde çalışmalarını içermektedir. TSE EN 676:2000 standardında geçen düşük NOx emisyon değerlerine uygun olması için öncelikle hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz programı kullanılmıştır. Laboratuvar testlerinden önce HAD analiz programlarının

kullanılması ile hem tasarım sürecinin kısaltılması hem de daha doğru tahminler yapılabilmesi ile test esnasında oluşabilecek arzu edilmeyen durumların tahminleri sağlanmıştır. Detaylı bir şekilde ağ örgüsü çalışmaları yapılmıştır. Reaktif analiz çalışmalarında iki farklı yanma hücresi ve üç adet iyileştirme çalışmaları yapılmış brülör geometrileri analiz edilerek ilgili konturlar üzerinden karşılaştırılmıştır. NOx, CO2, O2 gibi emisyonların mol oranları, akışkan hızları, basınçları ve sıcaklıkları içeren konturlar ve grafikler nümerik analizlerin sonucunda incelenmiştir. Farklı hava fazlalık oranları ve brülör kapasiteleri hem nümerik hem de deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Test ve HAD analizlerinden elde edilen veriler Şekil 1.11, Şekil 1.12, Şekil 1.13 ve Şekil 1.14'te mevcuttur. [28]

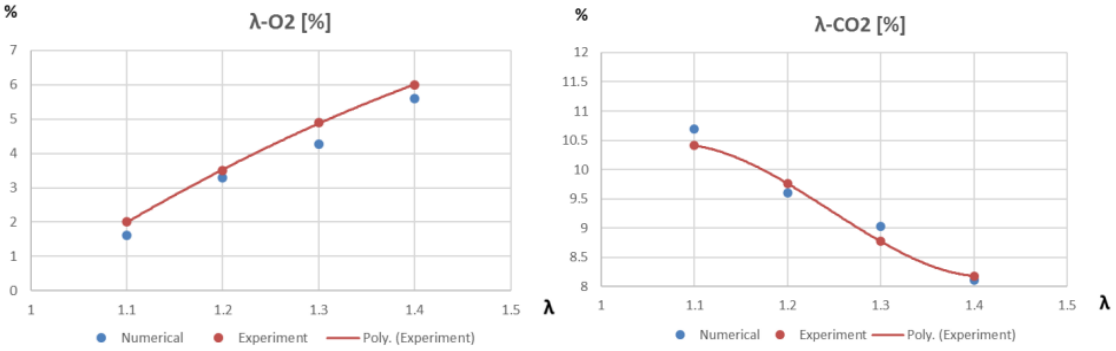


Şekil 1.11 Farklı lambda oranlarında yakma testi gerçekleştirilirken baca gazından ölçümü yapılan (a) oksijen, (b) karbonmonoksit ve (c) karbondioksit emisyonlarının deneysel verilerinin karşılaştırılması [28]



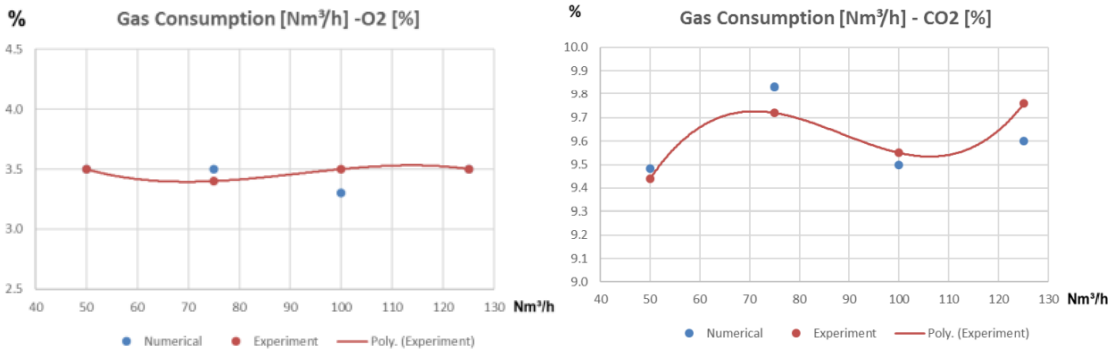
(a) (b)

Şekil 1.12 Farklı ısıl kapasiteler için kullanılan doğal gaz hacimsel debileri ile yakma testi gerçekleştirilirken baca gazından ölçümü yapılan (a) oksijen ve (b) karbondioksit emisyonlarının deneysel verilerinin karşılaştırılması [28]



(a) (b)

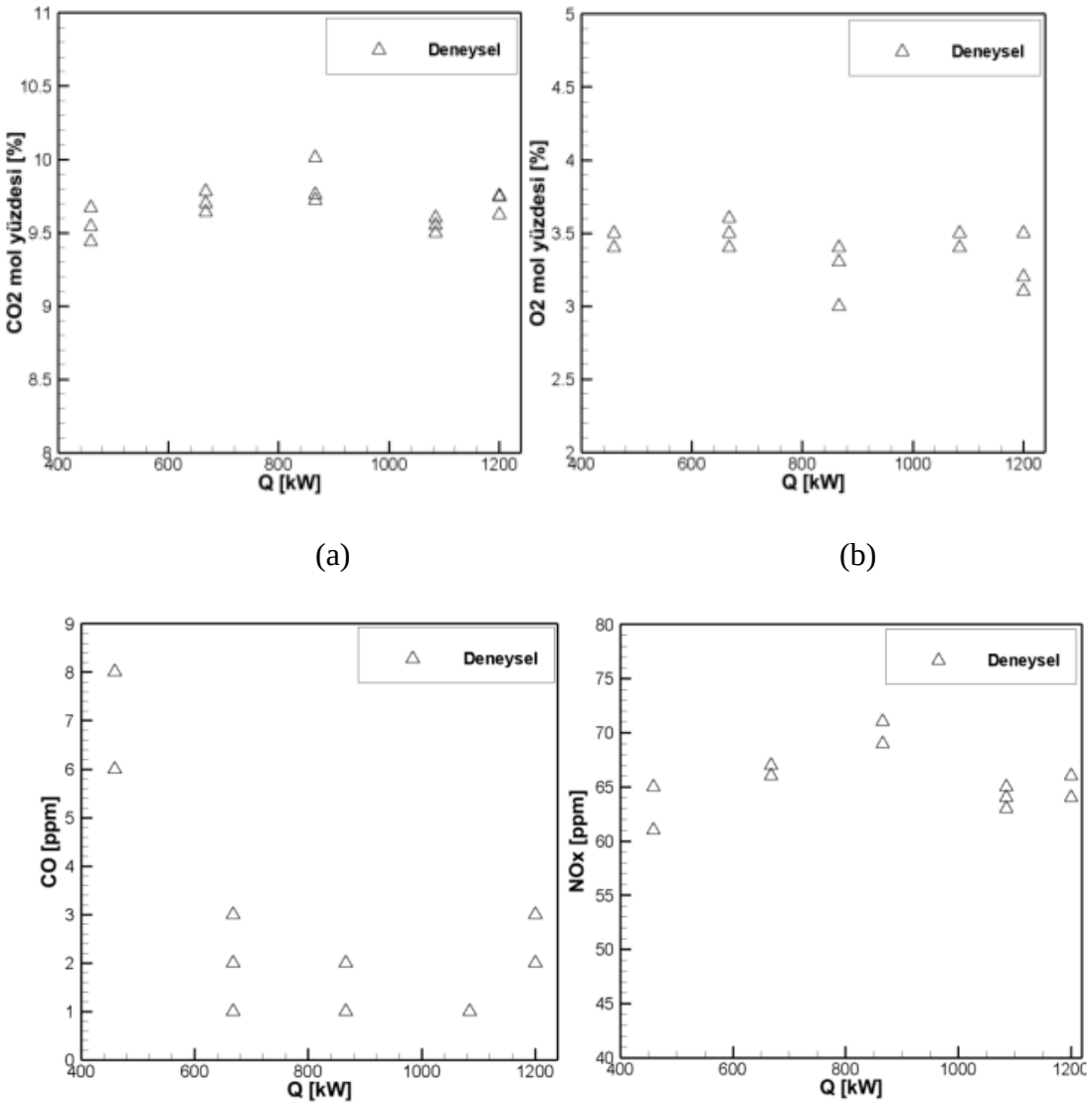
Şekil 1.13 Farklı lambda oranlarında yakma testi gerçekleştirilirken baca gazından ölçümü yapılan (a) oksijen ve (b) karbondioksit emisyonlarının deneysel verilerinin HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılması [28]



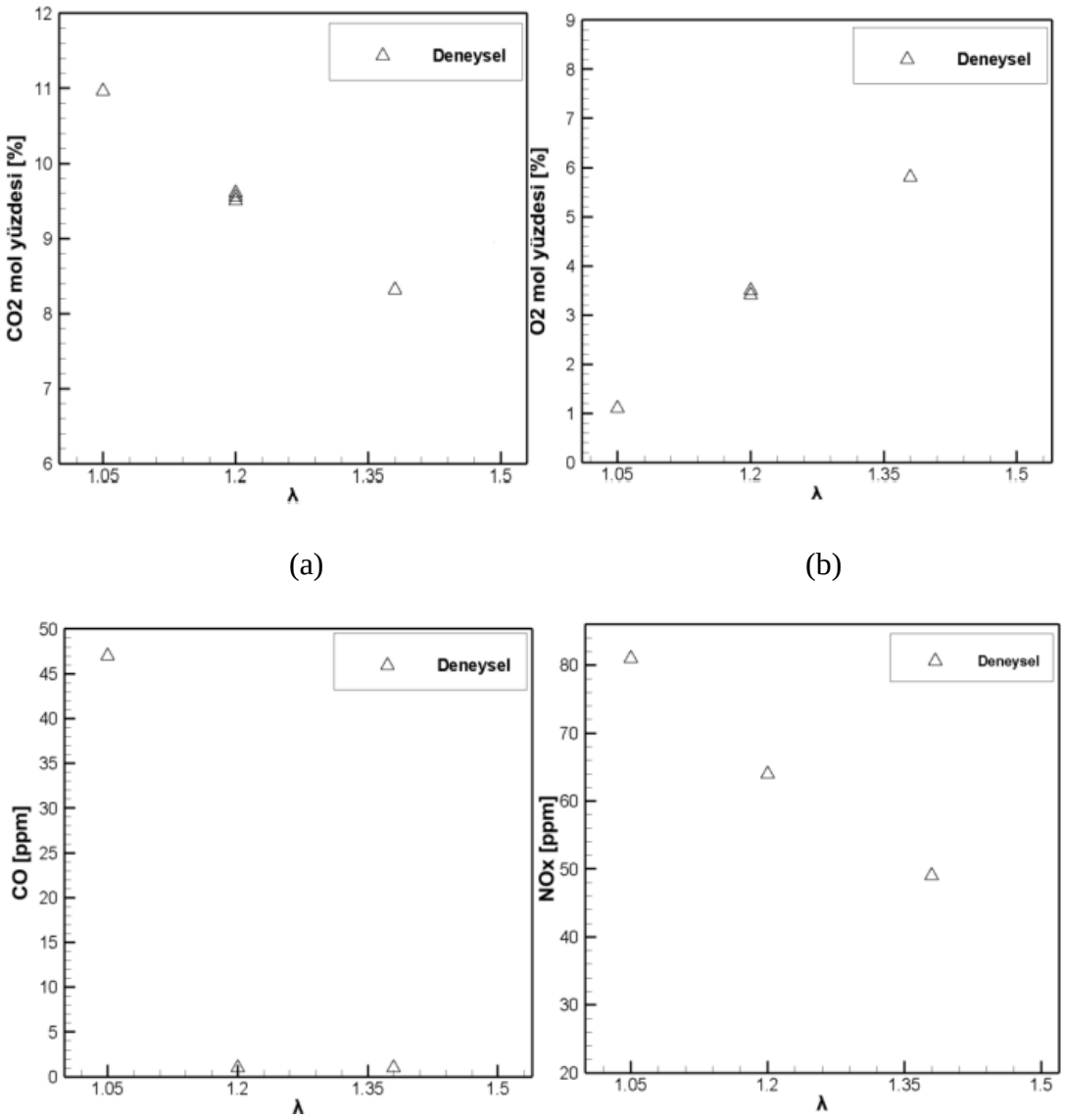
(a) (b)

Şekil 1.14 Farklı ısıl kapasiteler için kullanılan doğal gaz hacimsel debileri ile yakma testi gerçekleştirilirken baca gazından ölçümü yapılan (a) oksijen ve (b) karbondioksit emisyonlarının deneysel verilerinin HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılması [28]

Cellek doktora tez çalışmasında, endüstriyel bir yakıcı ve yanma hücresi çeşitli kapasitelerde, farklı lambda değerlerinde (λ=1.05, λ=1.38) ve kazan boylarında yanma emisyonlarını araştırmak için deneysel testler yapılmıştır. Brülör deneysel testlerinden elde edilen sonuçlar ile yanmanın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) geometrisi oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarla HAD analizlerinin sonuçlarının doğrulanması ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Doğal gaz, metan, doğal gaz hidrojen gaz karışımları ve saf hidrojenin yanma emisyonları ayrıca geometri üzerinde HAD analizlerinde kullanılmıştır. Yanma emisyonlarını iyileştirebilmek adına farklı kanat sayıları (7, 9, 11, 13, 15, 17) ve farklı kanat açılarında (15°, 20°, 25°, 30°) girdap üreteçleri tasarlanmıştır. HAD analizlerinin sonuçlarına göre doğal gaz yerine metan gazı analizlerde kullanılabileceğine ulaşılmıştır. Test ve HAD analizlerinden elde edilen veriler Şekil 1.15, Şekil 1.16, Şekil 1.17 ve Şekil 1.18'de mevcuttur. [29]



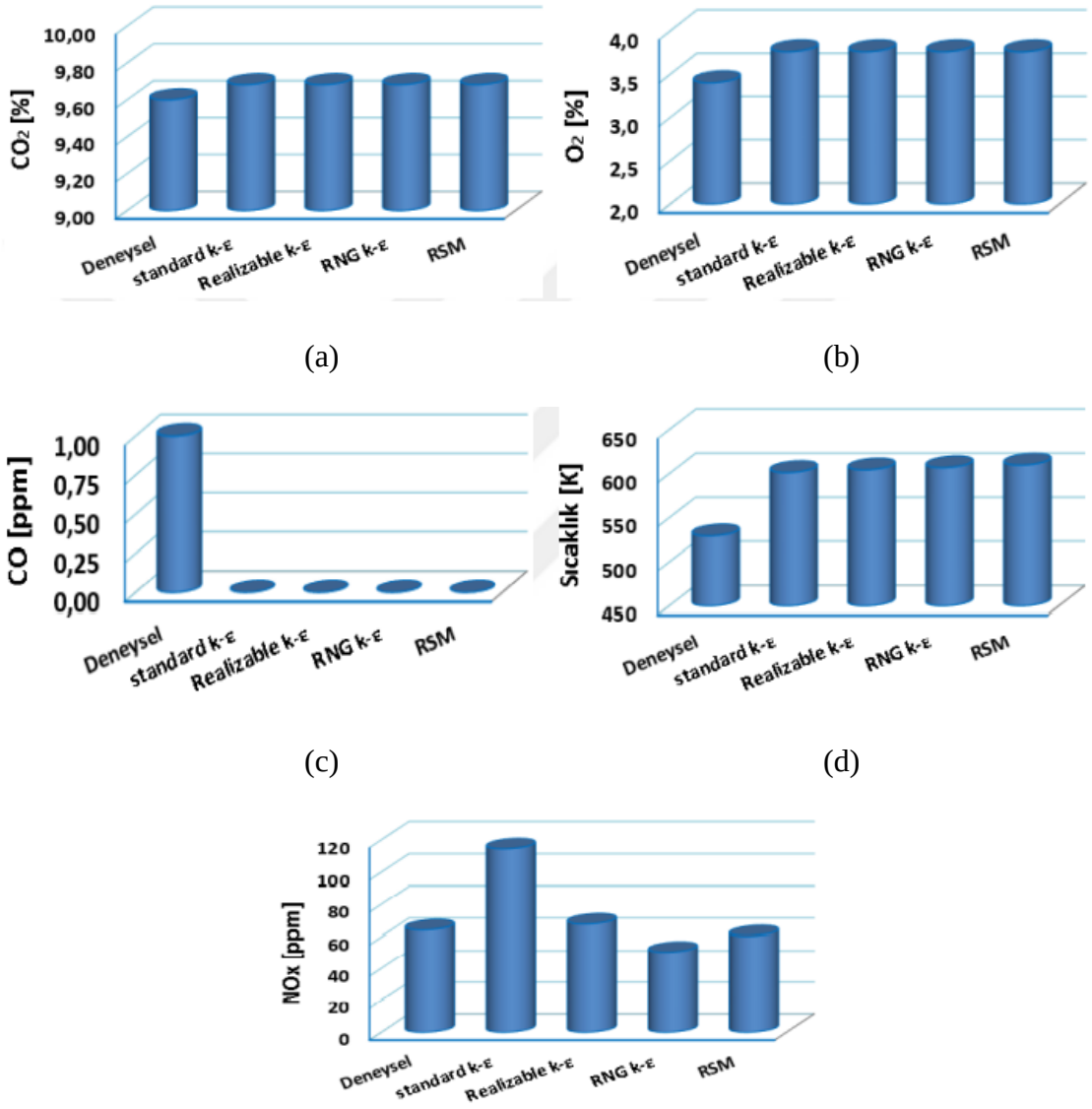
Şekil 1.15 Çeşitli brülör ısıl yükleriyle baca atık gazındaki (a) CO2, (b) O2, (c) CO ve (d) NOx değişimleri [29]



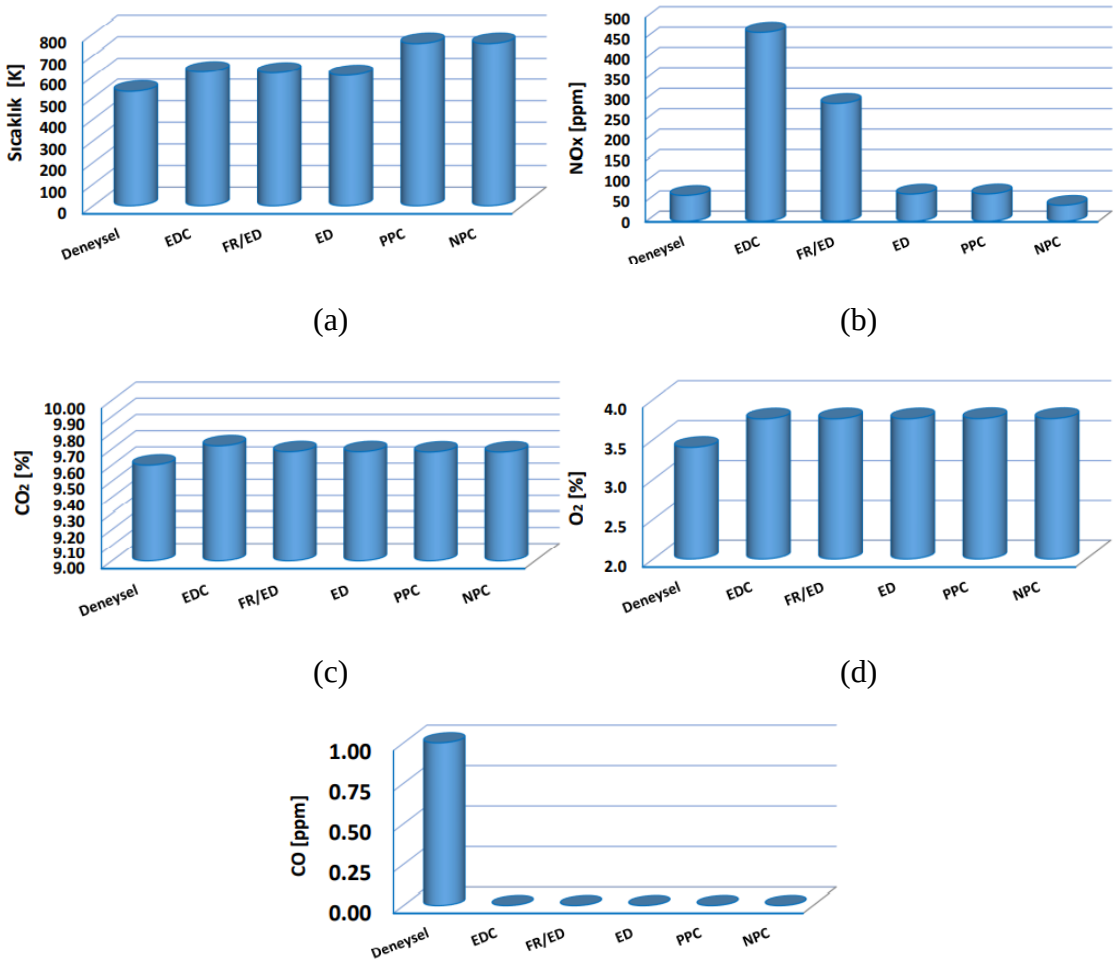
(a) (b)

(c) (d)

Şekil 1.16 Test esnasında kullanılan çeşitli lambda değerlerine karşı baca atık gazındaki (a) CO2, (b) O2, (c) CO ve (d) NOx değişimleri [29]

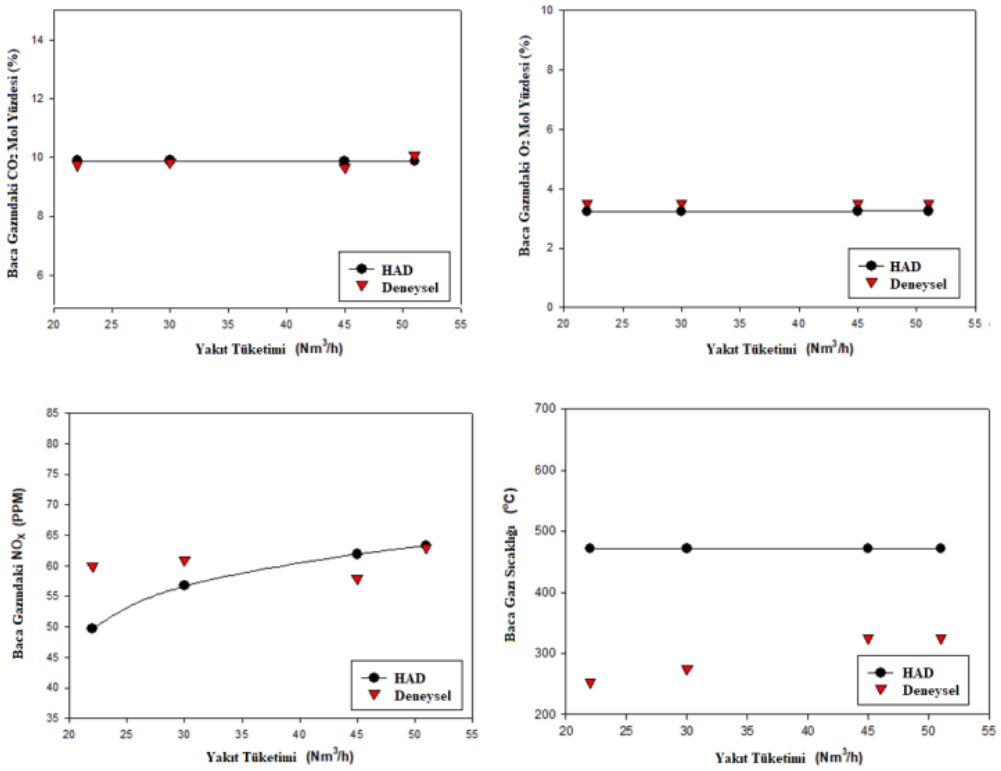


Şekil 1.17 Deneysel ve farklı türbülans modellerinin kullanıldığı HAD analizlerini içeren nümerik çalışmaların (a) CO2 (b) O2, (c) CO, (d) T ve (e) NOx karşılaştırılması [29]

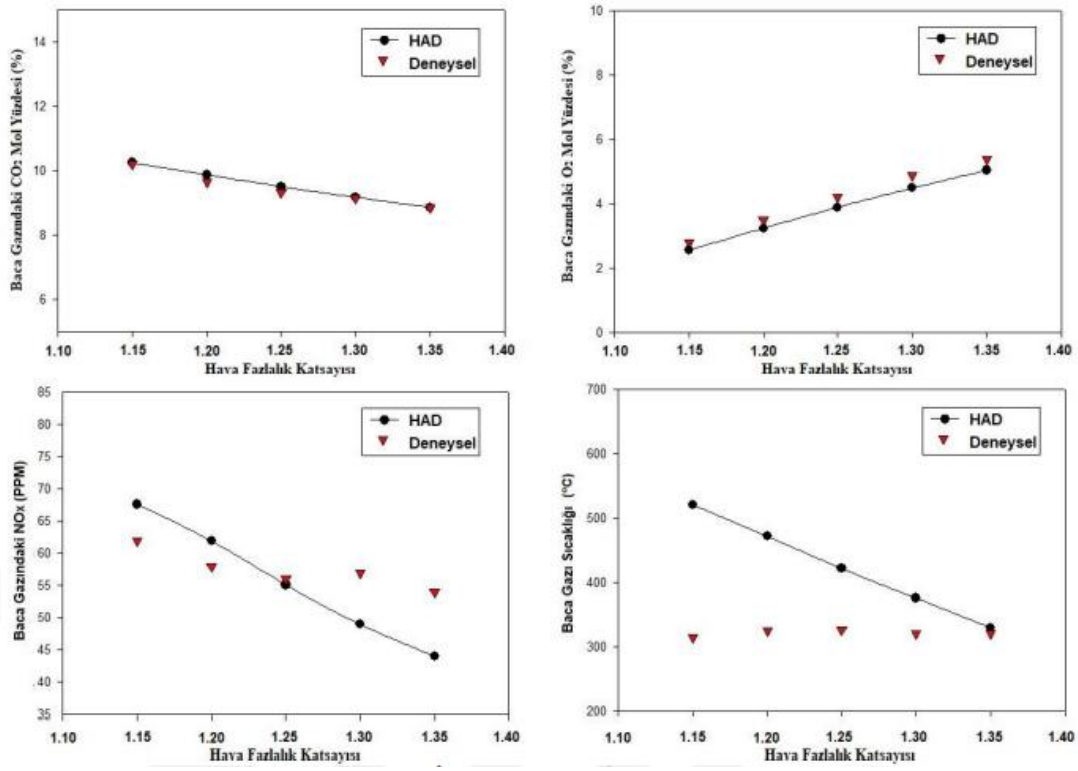


Şekil 1.18 Deneysel ve farklı yanma modellerinin kullanıldığı HAD analizlerini içeren nümerik çalışmaların (a) sıcaklık ve yanma emisyonları (b) NOx, (c) CO2, (d) O2 ve (e) CO karşılaştırılması [29]

Büyükakın doktora tez çalışmasında kare gaz brülörlerinin yanması sonucu oluşan emisyonların optimizasyonunu içermektedir. Testlerde ve analizlerde ön karışımsız bir doğal gaz brülörü ve karşı basınçlı yanma hücresi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar; brülör ısıl kapasitesi sabit tutulurken çeşitli hava fazlalık oranı katsayılarının denenmesi ve farklı ısı kapasitelerde sabit hava fazlalık oranı katsayısı sınır koşulları ile gerçekleştirilmiştir. HAD analizleri için ANSYS FLUENT kodu kullanılmıştır. Deneysel ve nümerik sonuçların doğrulanmasından sonra, turbulator üzerinde yapılan değişikliklerin difüzyon alevinin üzerindeki etkisi ve baca gazı emisyonlarının değerleri nümerik olarak incelenmiştir. Test ve HAD analizlerinden elde edilen veriler Şekil 1.19 ve Şekil 1.20'de mevcuttur. [30]



Şekil 1.19 Sabit hava fazlalık katsayısı değeri (1.2) için baca gazı emisyon ve sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması [30]



Şekil 1.20 Sabit yakıt tüketimi için (45 Nm3 /h) baca gazı emisyon ve sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması [30]

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışma, endüstride kendine yüksek alev hızlı brülör ismi ile yer bulmuş olan endüstriyel yakıcılara odaklanmaktadır. Endüstrideki bilgiler ile akademik bilgiler birleştirerek, literatürü destekleyebilmek için testlerin sonuçlarını ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerini kullanılarak hız, sıcaklık, göreceli basınç dağılımlarını ve emisyon değerlerini incelemeyi amaçlamıştır. Firma bünyesindeki mevcut ve mükerrer kapasitedeki ürünler incelerek bilgi dağarcığı arttırılacak ve HAD analizleri ile doğrulanan deney sonuçlarının çıktısı olan yüksek hızlı alev hızlı brülör firmanın ürün ailesine dahil olacaktır.

1.3 Hipotez

Literatürde yakıcılar ve yanma odaları hakkında birçok çalışma mevcuttur. Konuya farklı bir bakış açısı kazandırmak ve sanayide bulunan yüksek hızlı hızlarına sahip endüstriyel brülörler adına daha önce özellikle ulusal Dkaynaklarda çalışmalara rastlanmamıştır ve bu konuda endüstride elde edilen bilgi birikiminin literatüre farklı bir bakış açısı kazandırılması amaçlanmaktadır.

Bu çalışma, gelişen yakma teknolojisi ve HVAC-R sektöründeki ihtiyaç nedeniyle ümit ederim ki ileride bu konularda çalışmalar gerçekleştirecek araştırmacılar için önemli bir kaynak olacaktır.

Ek olarak Termo Isı Sistemleri A.Ş. bünyesinde bulunan Ar-Ge laboratuvarında yapılmış olan çalışmalar ile oluşturulmuş yüksek lisans ve doktora tezleri bu çalışmada kullanılmıştır, bu sebeple gerçekleştirilen çalışmaların gözden geçirilmesi ve geliştirilmesi ile devamı niteliğinde kabul edilebilir.

2
YANMANIN TEMEL KAVRAMLARI VE ELEMANLARI

2.1 Temel Kavramlar

Tarih boyunca birçok yakıt türü keşfedilmiştir ve araştırmalar halen devam etmektedir. Yakıtlar; katı yakıtlar, sıvı yakıtlar ve gaz yakıtlar olarak üç ana başlıkta sınıflandırılabilmektedir. Doğal gaz bu yakıt çeşitlerinden günümüzde en bol bulunan ve ulaşılması kolay olan gazlardan biridir. Yeraltı kaya katmanlarından elde edilen kaya gazı ve biyo kütleden elde edilen biyogaz en yeni gaz yakıtları olmasına rağmen, günümüzde gaz karışımlarından elde edilen yakıtlar da mevcut alternatif yakıtlar olarak kabul edilmektedir. Örneğin doğal gaza ilave edilebilecek diğer gaz, gazlar veya gaz karışımı ile karışımın tutuşma aralığı, havadaki difüzyonu, yanmasından elde edilebilecek ısı miktarı, yoğunluğu, yanma sonunda meydana gelecek gaz miktarını ve emisyonları önemli ölçüde etkilemektedir. Bu konuda güncel olarak geleceğin gazı olan hidrojen üzerinde akademik çalışmalar ve endüstriyel çalışmalar devam etmektedir. Ancak mevcut çalışmamda doğal gaz kullanılmıştır.

Çalışmanın daha anlaşılabilir olması için temel kavramlar başlıklar halinde özetlenmiştir:

Belirli bir yakıt ile yine belirli bir oksitleyici arasında uygun ve belirli bir sıcaklıkta kimyasal reaksiyon sonucu oluşan ısı ve kimyasal bileşenlere dönüşümüne yanma prosesi adı verilmektedir. En yaygın olarak kullanılan yakıtlar, Hidrojen (H) ve Karbon (C) elementlerinden oluşan hidrokarbonlar (C_nH_m) olarak adlandırılmaktadır. Örneğin; Metan (CH_4), Etan (C_2H_6), Propan (C_3H_8) vb. Hidrokarbonlar yakıt olarak kullanılırken, oksitleyici olarak genellikle hava kullanılmaktadır. Hava hacimce %21 O_2 içermektedir. Diğer oksitleyicilere Flor ve Klor örnek olarak verilebilmektedir.

Yakıtın yanması için gerekli minimum hava stokiyometrik hava olarak tanımlanmaktadır ve tam yanma olması durumunda yakıt stokiyometrik hava ile yanmaktadır. Tam yanmanın olması durumunda oksijenin tamamı tüketilerek, yanma ürünlerinde oksijene rastlanmamaktadır. Fakat eksik hava ile yanma olan proseslerde teorik tam yanma için gerekli hava miktarından daha az havayla yakma prosesi gerçekleştirildiğinden dolayı

yanma ürünlerinde yüksek miktarda karbonmonoksit (CO) bileşiğine, is ve kurum oluşumuna rastlanmaktadır. Fazla hava ile yanma prosesinde ise teorik olarak tam yanma oranını yakalamanınuygulamalardapekmümkün olmadığı zamanlarda kullanılır ve stokiyometrik hava miktarından fazlası sağlanmaktadır. Ancak bu durumda yanma ürünleri bir miktar oksijen içermektedir. Ayrıca bu tür yanma reaksiyonları, fazla hava ile veya hava fazlalığı ile yanma reaksiyonları olarak adlandırılmaktadır.

Tutuşma sıcaklığı, yakıt ve oksitleyicinin karıştığı lokal bölgelerde yanma prosesinin başlaması için her zaman yeterli olmamaktadır ama oksitleyici veya yakıttan en az biri tutuşmasıcaklığından yüksek bir sıcaklık değerinde değilse, ateşleyici gibi bir ısı kaynağı gerekmektedir. Reaksiyonun başlatılabilmesi için kullanılabilecek ısı kaynağı noktasal bir ısı kaynağı da olabilmektedir. Sözü edilen ısı kaynağı yakıtın ve oksitleyicinin tutuşma sıcaklıklarını sağlaması sonucunda yakıt- oksitleyici karışımında kimyasal reaksiyon başlatılmaktadır.

Tutuşma aralığı, yakıt/oksitleyici oranı yanmanın başlaması ve devam edebilmesi için bir başka önemli parametre olarak değerlendirilmektedir. Yakıt olarak doğal gazın yanması için oksitleyici-yakıt karışımdaki oran hacimsel olarak %5- 15 arasında olmalıdır. Yanma odasının sınırları ve dış çevre ile ısı alış verişi olmadığı Kabul edildiği proseslerde oluşan alevden elde edilebilecek teorik ve en yüksek alev sıcaklığına adiyabatik alev sıcaklığı denilmektedir. [31]

2.1.1 Yanma

Günden güne enerji tüketiminin ivmeli bir şekilde artması, enerji üretiminde fosil yakıt kullanımının artmasına neden olmaktadır. Bu durum insan ve çevre üzerinde istenmeyen etkilere neden olmaktadır. Enerjinin daha verimli kullanılması ve baca gazı emisyonlarının azaltılması son zamanlarda bilim ve mühendisliğin en önemli konuları arasındaki yerini almıştır.

Yanma, yakıt ile oksitleyici arasındaki reaksiyon sonucunda olan ısı ve enerji sağlayan kontrollü ekzotermik kimyasal bir reaksiyondur. Günümüzde enerji üretiminin çoğu, ulaşılabilme kolaylığı olan ve ayrıştırılmış organik maddelerden oluşan fosil yakıtlar kullanılarak yapılmaktadır. Yanma sürecini başlatabilmek için yakıtların belirli bir oksitleyiciye ve yine belirli bir ateşleme kaynağına ihtiyacı vardır. Endüstriyel uygulamalarda enerji üretiminde genel olarak kullanılan yakıtlar hidrokarbonlardır (CxHy). Hidrokarbonlar, moleküler yapılarında karbon ve hidrojen içeren organik

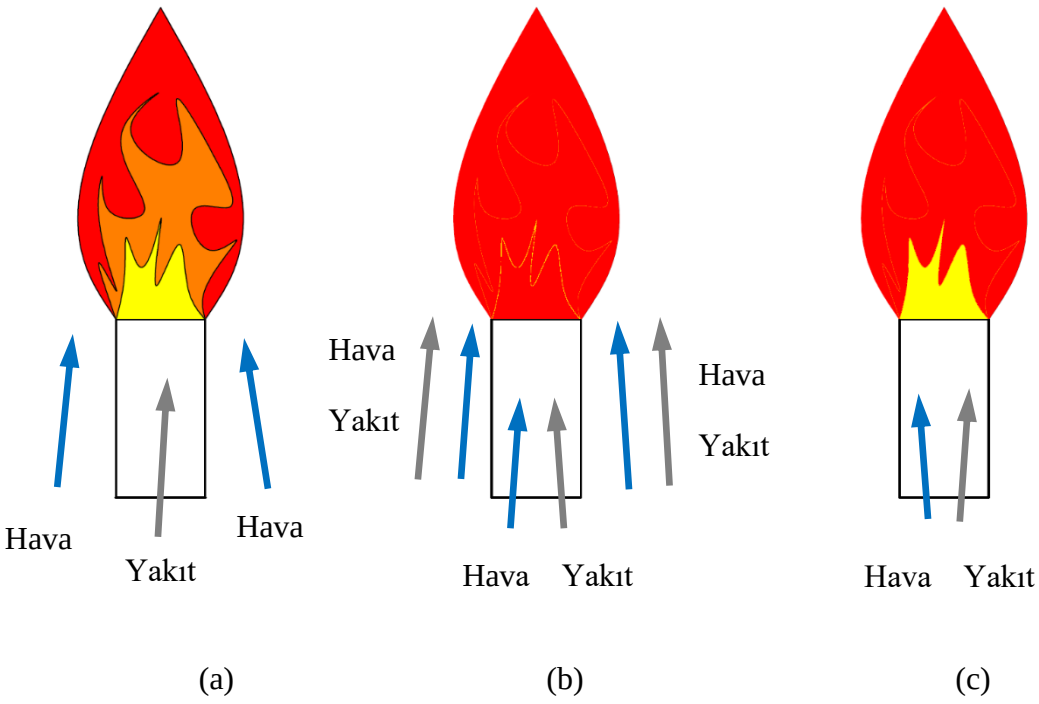
bileşiklerdir ve hidrokarbonlar doğada gaz faz, sıvı faz ve katı faz şeklinde bulunabilir. [32]

Bu çalışmanın amacı, endüstriyel bir talep için yüksek hızlı doğal gaz brülörü ile doğal gaz yanmasını incelemektir. Bu nedenle tezin ilerleyen bölümlerinde gazın yanması ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.1.2 Yanma Çeşitleri

Yanma, yakıtın ve oksitleyicinin nasıl karıştığına göre sınıflandırılır. Üç ana kategoriya ayrılan yanma modelleri ön karışımsız yanma, kısmi ön karışımlı yanma ve ön karışımlı yanmadır. Yanma türlerinin şematik çizimleri Şekil 2.1'de gösterilmektedir. [28]

Ön karışımsız yanma modeli, yakıt ve oksitleyici, yanma başlamadan önce ayrılmaktadır ve karıştırılmamaktadır. Bu yanma modelinde aleve, ön karışımsız veya difüzyon alevleri denir. Bu tür alevler daha uzundur ve ön karışımlı alevlere göre daha düşük sıcak bölgelerine sahiptir. Ön karışımlı yanma modeli, yakıt ve oksitleyici karıştırılmaktadır. Ön karışımlı alevler, kısmen ön karışımlı ve ön karışımsız alevlere göre daha kısa ve daha yoğun olarak görülmektedir. Kısmi ön karışımlı yanma modeli, yakıtın bir kısmı ve oksitleyici yanma başlamadan önce karıştırılmaktadır. Kısmen ön karışımlı alevler; ön karışımlı alevler ve ön karışımsız alevler arasında ölçülebilecek alev uzunluğuna ve sıcaklık dağılımına sahiptir. [33]



Şekil 2.1 Yanma tipleri: (a) ön karışımsız yanma, (b) kısmi ön karışımlı yanma ve (c) ön karışımlı yanma [28]

2.1.3 Kalorifik Değer

Yakıtın ısıl değeri, yanma sırasında sıvı yakıtlarda 1 kg sıvı yakıt için, gazlı yakıtlarda 1 Nm^3 gaz için açığa çıkan ısıl enerjidir. [28] Baca gazlarında suyun fazına bağlı olarak iki tip ısıtma değeri vardır:

Alt ısıl değer (LHV), yanma işleminin su içeriğinin yanma sonunda buhar durumunda olduğu varsayılarak yanma işlemi sırasında açığa çıkan ısı miktarını tanımlamaktadır. Üst ısıl değer (HHV), bir yanma sürecindeki tüm suyun bir yanma işleminden sonra sıvı halde olduğunu varsayıldığında elde edilen ısı miktarını tanımlamaktadır. Yanmanın tüm ürünleri yanmadan önceki sıcaklığa soğutulacak şekilde elde edilmektedir. HHV'yi LHV ile ilişki Denklem 2.1'deki gibidir:

$$HHV = LHV + H_w(\frac{n_{H_2O_o}}{n_{yakıt_i}}) \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de H_w ile suyun buharlaşma ısısı, n_{H2Oo} buharlaşmış suyun mol sayısı ve n_{fueli} ile yakılmakta olan yakıt mol sayısı belirtilmektedir.

Isıtma değerleri, kcal / Nm^3 gibi hacim bazında veya kcal / kg gibi bir kütle bazında sağlanabilir. Isıtma değerleri yakıt bileşimi ve türüne göre değişir. Yaygın yakıtların LHV ve HHV değerleri Tablo 2.1'deki gibi gösterilmektedir. [33-34]

Tablo 2.1 Yaygın kullanılan yakıtların LHV ve HHV değerleri

Yakıt	Birim	HHV	LHV
Doğal Gaz	kcal/Nm³	9155	8200
LPG	kcal/kg	11800	10600
AğırYağ	kcal/kg	10100	9400
HafifYağ	kcal/kg	10900	10100
Linyit	kcal/kg	5100	4800
Ahşap	kcal/kg	3800	3400

2.2 Gaz Yakıtlar

Doğada katı, sıvı ve gaz halindeki yakıtlarla karşılmaktadır. Gaz yakıtlar; doğal ve yapay yakıtlar olarak iki gruba ayrılabilir: Doğal gaz yakıtı olarak yer gazı (doğal gaz) ve hidrojen, yapay gaz yakıtı olarak asetilen, kömürün koklaştırılmasından ve gazlaştırılmasından kaynaklanan gazlar, ağır yağların kısmi oksidasyonundan ve kömürün hidrojenasyonundan kaynaklanan gazlar örnek olarak gösterilmektedir. Bu çalışmanın deneysel bölümünde doğal gaz ve HAD analizlerinde kullanılmıştır. [32]

2.2.1 Doğal Gaz

Doğal gaz, gözenekli kaya ve kabuk oluşumlarında doğal olarak sıkıştırılmış olarak oluşan kokusuz, renksiz, toksik olmayan bir gazdır. Kaynağından çekildiğinde gaz basıncı düşer. Genellikle petrol yataklarında veya yakın çevresinde bulunur. Kömür fazının uçucu bileşenlerinin ayrıldığı ve toplandığı yer gazı olarak da adlandırılır [32,35]. Doğal gaz, üretim bölgesine bağlı olarak farklı bileşenlere, kalorifik değerlere ve yoğunluğa sahip olabilir. Doğalgaz, kaynağından çıkarıldıktan hemen sonra kullanılan bir yakıt değildir. Kalorifik değerini düşüren su buharının yanı sıra korozif etkisi olan CO_2 ve toksik etkisi olan hidrojen sülfür (H_2S) ile az miktarda helyum da (He) bulunabilir. Doğal gaz yatağında 400 bar iken üretim sırasında 100 bara kadar düşer ve bu süre içinde su buharı ve diğer bazı maddeler yoğunlaşır ve bozunur. Ayrıca CO_2 ve kükürt içeren bileşenler doğal gaz bertarafı ile temizlenmektedir. Aksi takdirde H_2S varlığında korozyon meydana gelecektir. [35]

Sanayi ve yerleşim alanlarında kullanılan doğal gazın göze çarpan özelliklerinden biri, yandığında kül ve duman çıkarmamasıdır. Doğal gaz kaynağından boru hatları ile kullanım alanlarına taşınırken, uygun sıcaklık ve basınçta sıvılaştırılmış halde LNG olarak da taşınıp depolanmaktadır. [29]

2.2.2 Metan

Doğada yaygın olarak bulunan ve insanların bir takım faaliyetlerinin ürünü olan metan, renksiz ve kokusuzdur. Parafinik hidrokarbon serisinin en basit temsilcisi metandır. Kimyasal formülü CH_4 olan metan en güçlü sera gazlarından biridir. Atmosferdeki metan kaynakları ise, fosil yakıtlı enerji santralleri, verimli deniz yatağı, hidratlar ve klatratlar, insan ve hayvan atıkları, biyokütle kaynaklarının yakılması ve topraktır. [36]

Doğal gazın ana bileşeni CH_4 olduğu için birçok çalışmada doğal gaz metan olarak da ifade edilebilmektedir. Etan (C_2H_6) ve propan (C_3H_8), diğer iki önemli yüksek hacim oranı bileşenidir. Metan, tıpkı doğal gaz gibi renksiz, kokusuz, toksik olmayan bir gazdır. Yoğunluğu, oda koşullarındaki hava yoğunluğunun yaklaşık yarısı kadardır. Uygun havalandırma ile bir tehlike olmamakla birlikte, yetersiz havalandırmadan kaynaklanan gaz sızıntıları ortamdaki oksijenin yerini alabilir ve oksijen eksikliğinden dolayı boğulma gibi sağlık problemlerine neden olabilir. [29]

2.3 Gaz Yakıt Yanma Reaksiyonlari Ve Stokiyometri

Stokiyometrik bir yanma karışımı, belirli miktarda yakıt ve belirli miktarda oksitleyici içermektedir. Yanma tamamlandığında tüm yakıt ve oksitleyici tüketilmektedir ve yanma ürünlerini oluşturmaktadır. Bu ideal karışım yaklaşık olarak maksimum alev sıcaklığını vermektedir ve yanmadan açığa çıkan enerji, yanma sonucu oluşan ürünleri ısıtmak için kullanılmaktadır. [38-40]

Tam yanma reaksiyonlarında, oksitleyici yakıtla reaksiyona girmektedir ve yalnızca karbondioksit ve su üretilmektedir. Metanın tam yanma reaksiyonu aşağıdaki gibi örneklendirilmektedir:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \qquad (2.2)$$

Tamamlanmamış yanma reaksiyonlarında, oksitleyici bir hidrokarbon yakıtla reaksiyona girmektedir ve ana yanma ürünleri karbondioksit, su, karbon ve karbonmonoksittir. Ürünlerde bulunan karbonmonoksit nedeniyle tam yanmadan daha az enerji açığa çıkmaktadır ve karbonmonoksit zehirli bir gazdır. Metanın eksik yanma reaksiyonu

aşağıdaki reaksiyon denklemleri olan Denklem 2.3 ve Denklem 2.4 ile gösterildiği gibidir:

$$CH_4 + 1.5O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \quad (2.3)$$

$$CH_4 + O_2 \rightarrow C + 2H_2O \quad (2.4)$$

Metanın, hacimce %21 O2 ve %79 N2'den oluşan havanın stokiyometrik yanma reaksiyonu aşağıdaki Denklem 2.5 ve Denklem 2.6'da gösterildiği gibi kabul edilmektedir:

$$CH_4 + a\left(O_2 + \frac{79}{21}N_2\right) \rightarrow bCO_2 + cH_2O + dN_2 \quad (2.5)$$

$$CH_4 + 2(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52N_2 \quad (2.6)$$

Yukarıdaki kimyasal denklemlerde, birim metan hacmi için stoikiometrik yanmaya ulaşabilmek için iki hacim oksijene ihtiyaç duyduğu gösterilmektedir.

Teorik hava gereksinimi, tam yanma için gerekli hava miktarının stokiyometrik miktarı kadardır. Metanın stokiyometrik yanma reaksiyonundan, 1 Nm³ metan, yanmasını tamamlamak için 9.52 Nm³ hava gerektirmektedir. [28]

Eş değerlik oranı, gerçek yakıt-hava oranının, stokiyometrik yakıt-hava oranı olarak tanımlanmaktadır. [33,34]

$$\Phi = \frac{(Yakıt/Hava)_{gerçek}}{(Yakıt/Hava)_{stokiyometrik}} \quad (2.7)$$

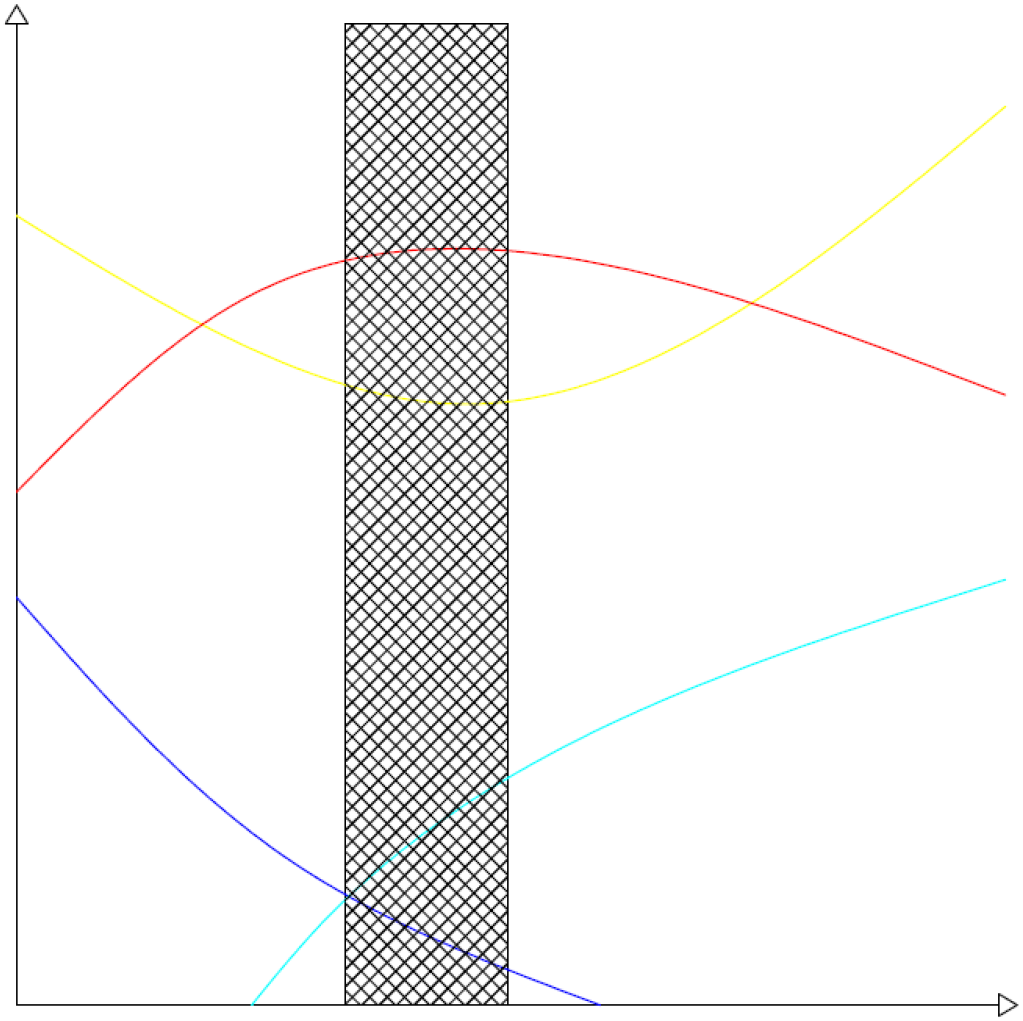
Φ> 1 oranı zengin karışıma, Φ <1 oranı zayıf karışıma ve Φ = 1 oranı ise kullanılmakta olan yakıtın stokiyometrik karışımına karşılık gelmektedir.

Fazla hava, stokiyometrik hava ihtiyacındaki yüzde artışı olarak ifade edilmektedir ve aşağıdaki şekilde Denklem 2.8 ile tanımlanmaktadır: [33,34,41,42]

$$Fazla\ Hava\ = \frac{\left(\frac{Yakıt}{Hava}\right)_{gerçek} - \left(\frac{Yakıt}{Hava}\right)_{stokiyometrik}}{\left(\frac{Yakıt}{Hava}\right)_{stokiyometrik}} x100 \quad (2.8)$$

Yanma sırasında oluşan ısının bir kısmı fazla havada depolanmaktadır. Bu nedenle fazla hava her zaman yanma işleminin verimini düşürmektedir. Fazla hava baca gazı ürününün

değişim grafiği Şekil 2.2'te gösterilmektedir. [33,34,41,42]



Şekil 2.2 Fazla hava baca gazı ürünleri [28]

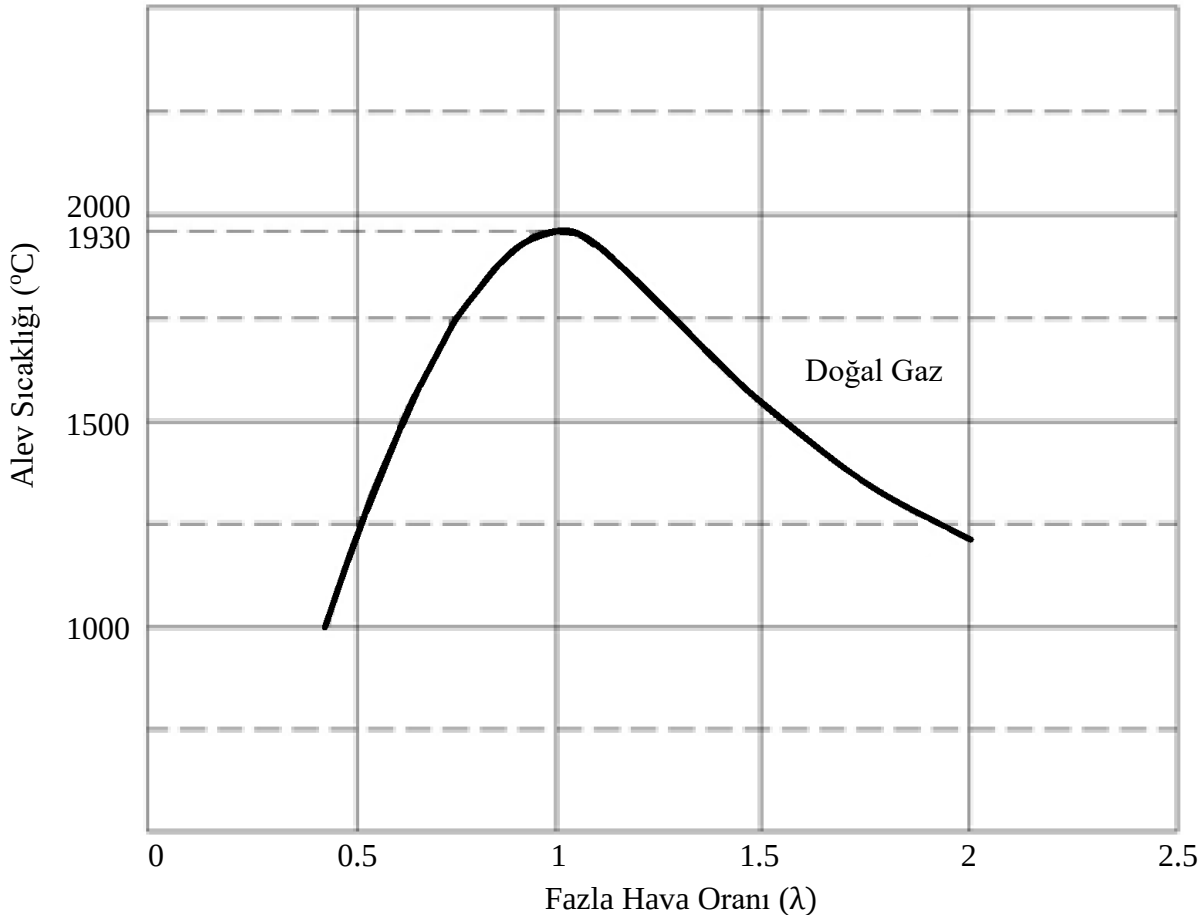
Lambda ($\boldsymbol{\lambda}$), gerçek hava yakıt oranının, stokiyometrik hava yakıt oranına oranlanmasıdır ve aşağıdaki Denklem 2.9 ile elde edilmektedir:

$$\lambda = \frac{(Yakıt/Hava)_{stokiyometrik}}{(Yakıt/Hava)_{gerçek}} = \frac{1}{\Phi} \qquad (2.9)$$

Yakıtta $\boldsymbol{\lambda}$> 1 fakir karışımı, yakıtta $\boldsymbol{\lambda}$<1 ise zengin karışımı ifade etmektedir. Fazla hava, alev sıcaklığını ve yanma odası sıcaklığını düşürmektedir. Fazla hava içeren bir yanma prosesinde, aynı enerji yükünü alabilmek için daha fazla yakıt yakmak gerekmektedir. [33,34,41,42]

Doğal gaz için lambda alev sıcaklık değişimleri grafiği Şekil 2.3'da gösterilmektedir: [5]

2500



Şekil 2.3 Lambda alev sıcaklık değişimleri grafiği [5]

2.4 Yanma Sonrası Emisyonlar

2.4.1 Yanma Ürünleri ve Emisyonları

Hidrokarbon yakıtların yanmasında, yanma ürünleri belirgin bir şekilde çevrede oluşacak olumsuz etkilerin kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Ana yanma ürünleri karbondioksit, hidrojenoksit, karbonmonoksit, nitrikoksit ve katı yakıtların kullanımı durumunda sülfüroksit olarak açığa çıkmaktadır. Ana emisyonlar nitrikoksit ve sülfüroksittir. Ancak son zamanlarda karbondioksit bile zararlı kabul edilmektedir ve atmosfer üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca küresel ısınmayı da desteklemesi nedeniyle karbondioksit salınımı üzerindeki endişe artmaktadır. [28]

Hidrokarbon gazın yanmasının ana ürünleri aşağıdaki bölümlerde anlatılmaktadır.

2.4.1.1 CO_2 Emisyonu

Karbondioksit (CO_2), hidrokarbon yanmasının ana ürünlerinden biridir. Yanma ürününde daha yüksek karbondioksit yüzdesi, yanma işleminden daha yüksek enerji çıkışı anlamına

gelir. Düşük CO_2 seviyesi, verimsiz yanma oluşumu nedeniyle daha yüksek yakıt tüketimine neden olmaktadır ve enerji üretim maliyetlerini arttırmaktadır.

Yakıtlardaki farklı hidrokarbonoranlarına bağlı olarak, CO_2 seviyeleri değişiklik göstermektedir.

Farklı yakıtlar için tahmini CO_2 değerleri Tablo 2.2'te gösterilmektedir. [39]

Tablo 2.2 Fan destekli brülörler için tahmini emisyon değerleri [39]

Yakıt	Birim	O_2	CO_2
Doğal Gaz	%	3-4	9.8-11
Hafif Yağ	%	3-5	12-14
Ağır Yağ	%	3-5	11.8-13
Katı Yakıt	%	5-6	12-14

2.4.1.2 O_2 Emisyonu

Baca gazı emisyonunda oksijen (O2) mevcudiyeti, yanmanın tamamlanması için yanma sürecine fazla havanın verilmesi anlamına gelmektedir. Daha yüksek oksijen konsantrasyonu verimde azalmaya neden olurken, daha düşük oksijen konsantrasyonu ise eksik yanmaya neden olabilmektedir.

Yakıtlardaki farklı hidrokarbon oranlarına bağlı olarak O2 seviyeleri değişebilmektedir.

Farklı yakıtlar için tahmini O2 değerleri de Tablo 2.2'de gösterilmektedir. [39]

2.4.1.3 CO Emisyonu

Karbonmonoksit (CO) eksik yanmanın göstergesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Hava ile hemen hemen aynı yoğunluğa sahiptir ve havaya kolayca karışabilmektedir.

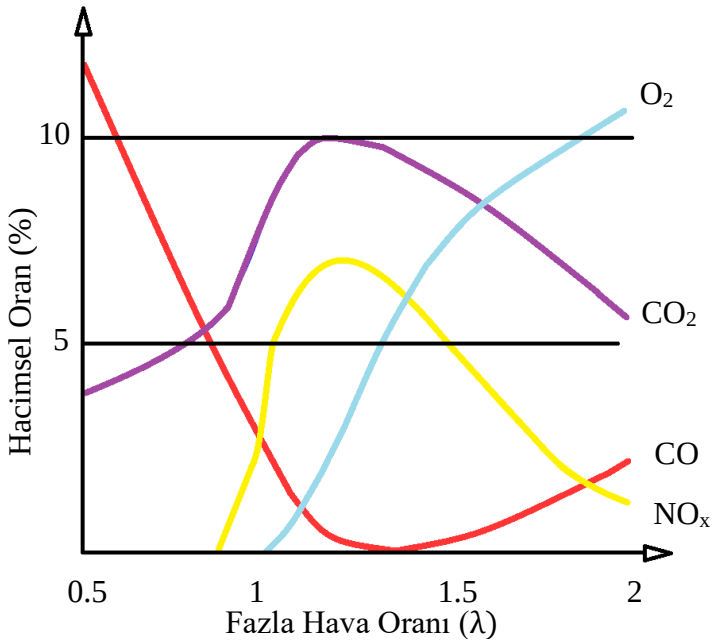
Sıvı yakıtların yanması için CO limitleri 110 mg/kWh olup, gaz yakıt yanması için de bu limit değeri 100 mg/kWh'tir. 110 mg/kWh karbonmonoksit ayrıca 93 ppm değerine eşittir. [43,44]

2.4.1.4 NO_x Emisyonu

NO_x emisyonlarının çoğu nitrikoksitten (NO) oluşur ve nitrikdioksit (NO_2) ve azotoksit (N_2O) içermektedir. 20. yüzyılın son yarısında, NO ve NO_2, fotokimyasal duman ve ozon

oluşumuna en büyük katkıda bulunan maddeler olmuşlardır. NOx, ozonun stratosferden çıkarılmasıyla bir zincirleme reaksiyona katılmaktadır ve bu da artan ultraviyole radyasyonun dünya yüzeyine ulaşmasına izin vermektedir. NO_x istenmeyen kirletici yanma ürünüdür ve aşağıda maddeler halinde belirtilen üç ana yoldan üretilebilmektedir: Bunlar ısıl NO_x emisyonu, ani NO_x oluşumu ve yakıt kaynaklı NO_x'tur.

Lambda'nın yanma ürünleri üzerindeki etkisi Şekil 2.4'te gösterilmektedir. [45]



Şekil 2.4 Yanma ürünleri (%) – Lambda [45]

2.4.2 CO ve NO_x Sınırları ve Yönetmelikler

Endüstrideki brülör üretici firmaların projelerinin ve literatür çalışmalarının hedeflerinin belirlenmesi için önemli olduğundan dolayı bu bölümde NO_x standartları ve yönetmelikleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

NO_x sınırlamaları, uygulama ve uygulama kapasitesine bağlı olarak değişmektedir.

EN 676: 2008, otomatik üflemeli gaz brülörleri için, terimleri, yapım ve çalışma için genel kuralları, kumanda ve güvenlik cihazları ile ilgili maddeleri ve deney işlemlerini kapsamaktadır. Bu brülörlerde yanma meydana geldiğinde, CO emisyonu için referans olarak 93 ppm (100 mg/kWh) belirlenmiştir ve Tablo 2.3'te gösterilmektedir. [45]

Tablo 2.3 EN 676: 2008 NOx sınırlamaları- emisyon sınıfı

SINIF	mg/kWh	mg/m³	ppm
1	170	169.59	82.56
2	120	119.71	58.28
3	80	79.1	38.85

Doğal gaz için NO_x ve CO emisyon değerlerinin dönüşümü Tablo 2.4'te gösterilmektedir. [46]

Tablo 2.4 Doğal gaz için NO_x ve CO emisyonlarının dönüşümü [28]

		G20		G25	
% 3 O_2	**Birimler**	**mg/kWh**	**mg/MJ**	**mg/kWh**	**mg/MJ**
NO	1 ppm	2.059	0.572	2.098	0.583
	1 mg/m³	1.002	0.278	1.021	0.284
CO	1 ppm	1.253	0.348	1.278	0.355
	1 mg/m³	1.002	0.278	1.021	0.284

Ülkemizde konut, sanayi ve benzeri yerlerde ısınma amaçlı kullanılan yakma tesisleri dış havaya atılan is, duman, toz, gaz emisyonları gibi kirleticilerin hava kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için denetlenmektedir. Hava kalitesi sınır değerleri "Isınmadan kaynaklanan hava kirliliğinin kontrolü yönetmeliği" hükmünce belirlenmektedir. Gaz yakıt yanma emisyonlarının kapasiteye göre minimum ve maksimum sınırları Tablo 2.5'te gösterilmektedir.

Tablo 2.5 Gaz yakıt yanmasında Azotoksit (NO_x), Karbonmonoksit (CO), hidrokarbon (C_xH_y) konsantrasyonu ve islilik derecesi [47]

İlgili Standart	IsılGüç (kW)		Azotoksit (NOx) (NO_2olarak) (mg/kWh)	Azotoksit (NOx) (NO_2-olarak) (ppm – %3 O_2)	Karbonmonoksit (CO) (mg/kWh)	Hidrokarbon (CxHy) (ppm) (CH4- olarak)
TS * veya EN*	70<IG≤1000		260	127	1070	20
	30<IG≤70	Sınıf 1**	260	127	-	20
		Sınıf 2**	200	95	-	20
		Sınıf 3**	150	73	-	20
		Sınıf 4**	100	48	-	20

(TS)* Türk Standartları Enstitüsüve

(EN)* Avrupa Birliğinin ilgili standartları

(Sınıf)** TS ve EN'de belirtilen sınıflar

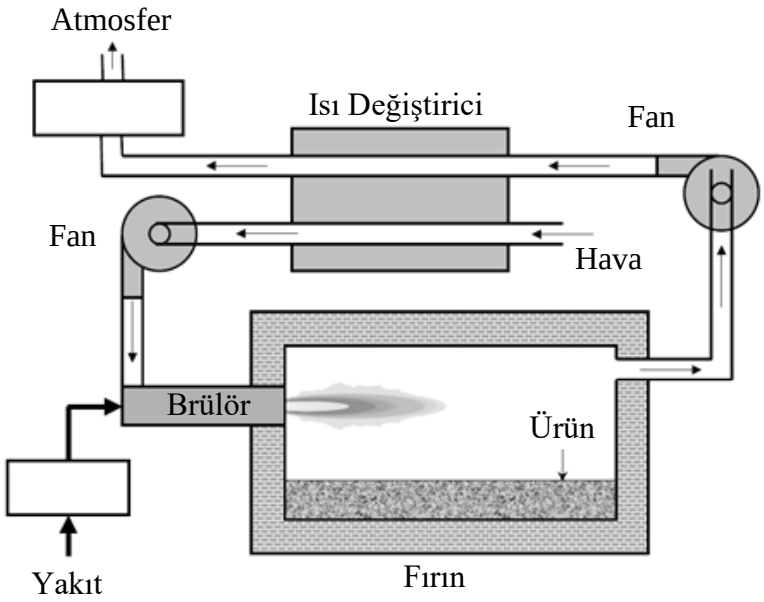
2.5 Yanma Odaları ve Brülörler

Yanma odaları ve brülörler detaylı olarak incelenmiştir.

2.5.1 Yanma Odaları

Yanma odaları, yakıtın kimyasal bağ enerjisinin açığa çıktığı ve brülörler kullanılarak ısı enerjisine dönüştürüldüğü cihazlardır. Çeşitli amaçlar için farklı tasarımları olan yanma odaları mevcuttur. Kazan yakma sisteminde kullanılan yakıtlar katı, sıvı ve gaz yakıtlar olabilmekte ve bazı yakma uygulamalarında farklı yakıtlar bir arada kullanılabilmektedir. Nozullar yardımıyla doğrudan brülörde gaz ve sıvı yakıtlar kullanılabilirken, kazan uygulamalarında herhangi bir aksama olmaması için kömür gibi katı yakıtların sıvı ve gaz yakıtlar gibi toz haline getirilmesi ve püskürtülmesi gerekir Yanma sonunda açığa çıkan atık gazların ısısı kazana aktarılır. Basınç ve sıcaklık değerleri kontrol altında tutularak yoğuşma sıcaklığının üzerinde sistemden tahliye edilir. Kazanlar farklı amaçlar için tasarlanıp kullanıldığından kazanlarda elde edilen ısı da belirlenen amaca göre değerlendirilir. Örneğin, sıcak su kazanı için tasarlanmış bir kazan üzerinden elde edilen ısı, şebeke suyunu ısıtmak için kullanılırken, buhar kazanlarında yanma ısısı buhar elde etmek için kullanılır. Ayrıca fırınlar da mevcuttur. Fırınların da amaçlarına göre çeşitleri mevcuttur. Örneğin, fırının içerisine arzu edilen ürünler veya ekonomizer gibi ısı

değiştiriciler konularak ısıyı transfer etmesi beklenmektedir ya da fırın içerisinde bulunan hava ısıtılarak baca çıkışından atılabilir. Şekil 2.5 kazan ve fırın örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Yanma hücresi örnek görselleri [48]

2.5.2 Brülörler

Brülörler yakıt ve oksitleyici ön karışımlı, yarı ön karışımlı veya ön karışımsız olarak yanma hücresine sevk ederek emniyetli bir şekilde yakmaya yarayan farklı tasarımları mevcut olan cihazlardır. Brülörler, yanması için kullanılan yakıta ve özelliklerine, kullanım amacına ve kullanım yerine göre farklılıklar göstermektedir. Belirli bir uygulama için özel olarak ve kullanılan yakıtın özellikleri dikkate alınarak üretilirler ve bu özellikler; yakıt ısıl değeri, yakıtın yanması için gerekli hava ihtiyacı, yakıt ve hava basınçları, yoğunluk oranları ve kimyasal kompozisyonudur. [49] Endüstride basit ve karmaşık konstrüksiyonlu brülörler de mevcuttur. Daha iyi anlaşılması için bu bölümde farklı brülör çeşitleri genel olarak anlatılmasından sonra firmadaki mevcut ürünler üzerinden brülörler hakkında bilgi verilecektir.

Gaz yakıt brülörleri; sıcak su ve buhar kazanlarında gaz yakıtları yakmaya yarayan cihazlardır. Genel olarak bir yardımcı fan ile birlikte kullanılırlar. Bu fan, dışarıdan emerek aldığı havayı fan çarkı vasıtasıyla iletir ve yanma kafasına gönderir. Burada yanma havası, girdap üreteci yardımıyla sistemden gelen yakıtla belirli bir oranda karıştırılarak yanma başlığından geçerek yanma odasına atılır. Bu sırada yakma başlığında ateşleme elektrodu ile yakıt-hava karışımı ateşlenir ve yakılır. Gaz brülörü,

genellikle döküm alüminyumdan yapılmış bir gövdeden oluşur. Ana elemanları hava ayar klapesi, fan, fan motoru, ateşleme kafası ve yanma kafasıdır. [50]

Çift yakıtlı brülörler brülör endüstrisinde kombine yakıcılar olarak da adlandırılırlar. Doğalgaz ve sıvı yakıtları yakabilen üflemeli brülör tipleridir ve tek yakıtlı brülörlerden daha kompakt şekilde tasarımı yapılmaktadır. Çift yakıtlı/ kombine brülörler 1000 kg/saat ve daha yüksek kapasitelerde olan proseslere çözüm sağlarken, termik santrallerde yakma için tercih edilmektedir. 500 kg/saatten daha düşük bir kapasiteye tercih edilmemelidirler bunun nedeni ise, verimliliğin arzu edilenden daha düşük, işletme ve bakım sorunları ile karşılaşma durumlarının fazla olması ön görüldüğündendir. [51]

Tek kazanda 700 kW ve üzeri ısıl kapasiteleri ile atmosferik brülörler yerine üflemeli brülör kullanmak daha ekonomiktir. Üflemeli brülörlerin bir fanı vardır ve bu fan, reaksiyon için gerekli yanma havasını sisteme sağlamaktadır. Ayrıca kazandaki yük kaybının bir kısmını da telafi etmektedir. Üflemeli brülörlerden gelen rahatısızlık verici ses seviyesini düşürebilmek için özel bir brülör susturucusu kullanılması veya baca çıkışına bir susturucu da takılması önerilmektedir. [51]

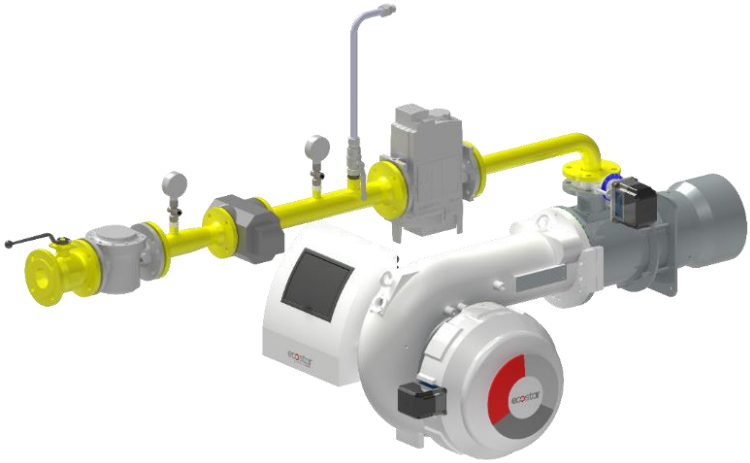
Atmosferik brülörlerde üflemeli brülörlerin aksine fan bulunmamakta ve yanma için gerekli olan oksitleyici hava ortamdan emilmektedir. Sıkıştırılmış doğal gaz, tesisten nozüle doğru genişledikçe, ortamdan birincil hava emilir. İkincil hava alevle termal olarak ısınarak yükselen gazlar yerine genellikle yakıcının aşağısında bulunan açıklıklardan emilir. Atmosferik brülörler basit ve kompakt bir tasarıma sahiptir ve yukarı yönlü alev oluşumu ile iyi bir yanma verimine sahiptir. Endüstride kullanımı yaygın olsa da atmosferik brülörlerin kazanlar sistemlerinde kullanımları da mevcuttur ve bu kazanlar özel tasarımlara sahiptirler. [51]

2.5.3 Brülörde Gaz Kontrol Hattı Ekipmanları

Brülöre şebeke sisteminden sağlanan yakıtın, brülörün gövdesine kadar güvenli bir şekilde beslenmesi için birçok prosese özel olarak gaz boru hattı ve yardımcı sistem ekipmanları Şekil 2.6'da gösterilen örnekteki gibi kullanılmaktadır. Bu sayede sürekli veya kademeli yanma gerçekleşirken yakma sistemi ve proses kontrol altında olur.

Gaz hattı işletim şartlarına göre; brülör kapasitesine ve işletme basıncına uygun olarak seçilmelidir. Sayaç, gaz kaçak cihazı gibi opsiyonel aksesuarlar ile demonte gaz hattı veya montajlı gaz hattı olarak tedarik edilebilir. Flanşlı ve dişli bağlantılar kapasiteye ve gaz basıncına göre farklılık gösterebilir. [52]

(a)



(b)

Şekil 2.6 (a) Yüksek ve (b) düşük gaz basıncı için gaz yolu ve kontrol hattı elemanları [52]

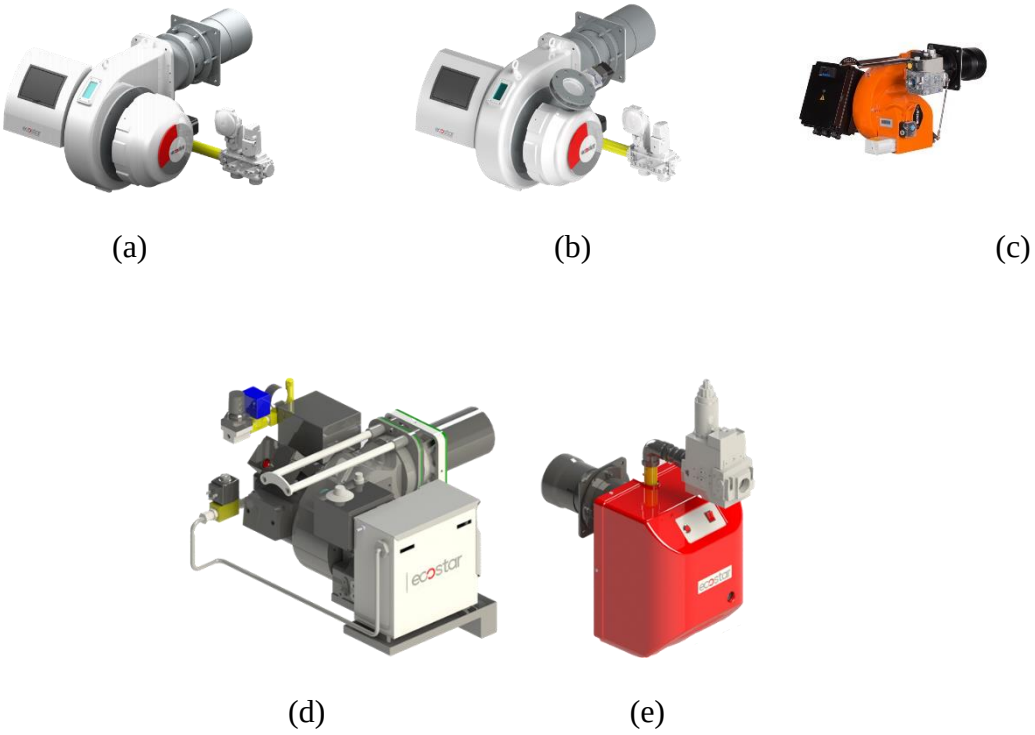
2.6 Prosese Özel Gaz Yakıtlı Brülörler

Termo Isı Sistemleri A.Ş. bünyesinde hali hazırda mevcut olan brülörler monoblok brülörler ve endüstriyel brülör olarak iki alt grupta incelenmektedir: [52]

2.6.1 Monoblok Brülörler

Tek kademeli, çift kademeli ve oransal olarak kontrol edilebilen ve çift yakıtlı brülör olarak da bilinen Ecostar monoblok brülörler; doğalgaz, LPG, LNG, CNG, biogaz, fuel-oil, motorin ve kombine yakıtlar ile kullanılabilmektedir. Sunmuş olduğu geniş güç kapasitesi ve yüksek yanma verimi sayesinde, başta sıcak su kazanları, buhar kazanları, kızgın yağ kazanları olmak üzere çeşitli ısı uygulamalarında başarı ile

kullanılabilmektedir. Termo Isı Sistemleri A.Ş. bünyesinde bulunan ECOSTAR markalı monoblok brülörler genel hatları ile Şekil 2.7'de gösterilmektedir. [52]



(a) (b) (c)

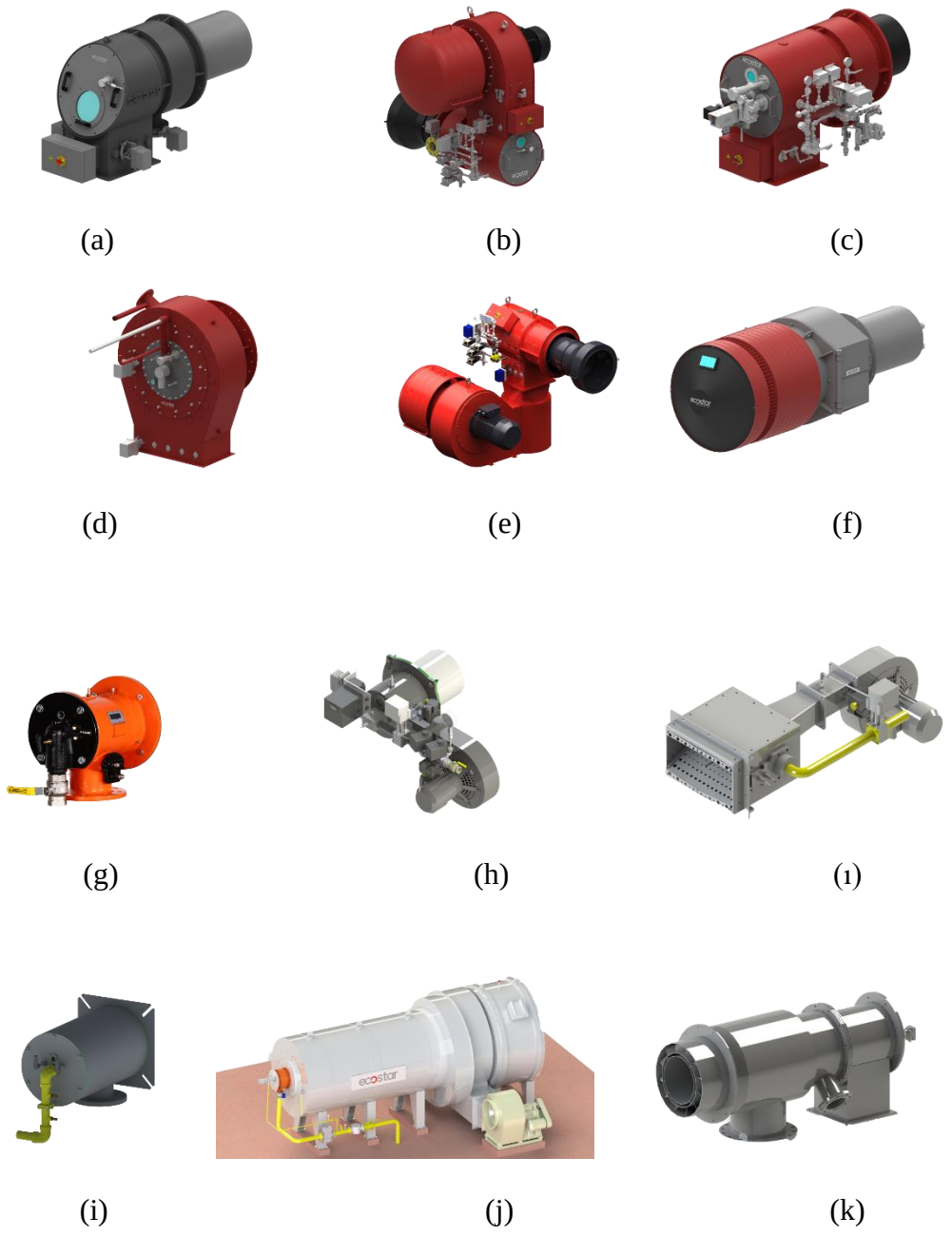
(d) (e)

Şekil 2.7 Monoblok brülör grupları olan (a) ECO NG LNX, (b) ECO NG LNX (FGR), (c) ECO (Turuncu), (d) ECO WO ve (e) ECO (Kare) [52]

2.6.2 Endüstriyel Brülörler

Ecostar Endüstriyel Brülörler; ECO, DSE, DIB, MIB, GIB serisi olmak üzere sanayi brülörleri, FPB, Yüksek Hızlı Bekler, Gazoram, Ecoflue, kanal brülörleri, fırın brülörleri, kömür brülörü, daldırma tip brülörler ve özel yakıcılar olmak üzere proses brülörleri ve sıcak hava jeneratörlerinden oluşmaktadır. Endüstriyel brülörler doğalgaz, LPG, fuel-oil, motorin ve kombine yakıtlar ile çalışabilmektedir. Sunmuş olduğu geniş güç kapasitesi ve yüksek yanma verimi sayesinde, sanayi kazanları, buhar kazanı, sıcak su kazanı, kızgın yağ kazanları, endüstriyel kazanlar, sıcak hava jeneratörleri, dönel kurutucular (asfalt plent gibi), akışkan yataklı ve ızgaralı kazanlarda start-up uygulamalarında kullanılabilmektedir. Endüstride önemli kullanım alanları asfalt plent brülörü gibi kurutma uygulamaları, endüstriyel fırın uygulamaları, çimento tesisleri, kağıt fabrikaları, şeker fabrikaları, ısıl işlem fırınları, ergitme potaları, seramik sektörü pişirme prosesleri, tekstil ve ağaç sanayi, gıda, toprak, kimya, gübre, metal endüstrisi, kağıt ve ambalaj sanayi, biyokütle enerji santralleri, termik santraller gibi oldukça geniştir. Termo Isı

Sistemleri A.Ş. bünyesinde bulunan ECOSTAR markalı endüstriyel brülörler genel hatları ile Şekil 2.7'de gösterilmektedir. [52]



Şekil 2.8 Endüstriyel brülör grupları olan (a) ECO, (b) MIB, (c) DIB, (d) DSE, (e) GIB, (f) CIB, (g) FPB, (h) GRM, (ı) T/HI, (i) DIP, (j)SHG ve (k) Start-up Brülörler [52]

3
YAPILAN DENEYSEL ve NÜMERİK ÇALIŞMA

Deneysel çalışma için gerekli olan brülörler, test fırını sistemi,yardımcı ekipmanlar, sıcaklık, basınç ve debi ölçüm aletleri ve emisyon ölçüm cihazı Termo Isı Sistemleri Ticaret ve Sanayi Anonim Şirketi firması tarafından sağlanmış olup,bu bölümü oluşturan deneysel testler ilgili firmanın Çorlu'daki tesislerinde kurulu bulunan deneysel test ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Testler için kullanılan doğal gaz,bileşenleri Çorlu'da gaz tedarikçisi olan ÇORDAŞ tarafından firmamıza aktarılmış olup, doğal gaz özellikleri testlerin yapıldığı zamanlar için temin edilmiştir. Ayrıca yeni ürün olması planlanmış yüksek hızlı aleve sahip olan brülörlerin geliştirilmesi hakkında yapılacak nümerik çalışma için genel bilgiler de bu bölümde yer almaktadır.

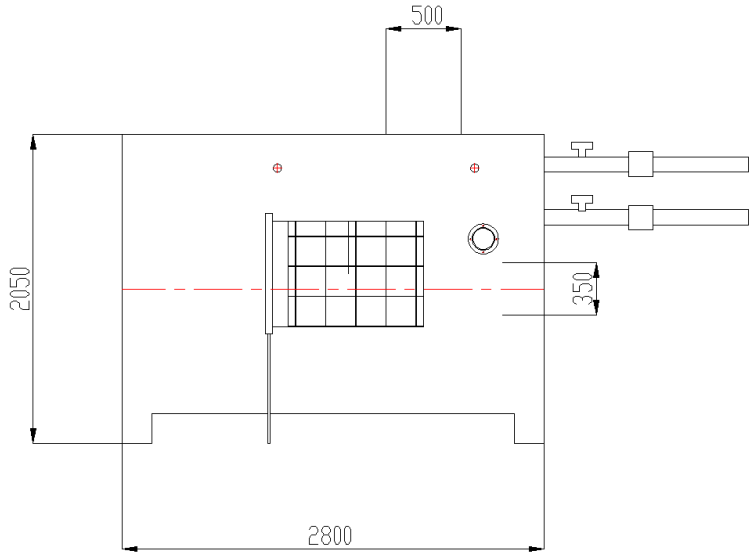
3.1 Deneysel Yöntem

Bu çalışmanın deneysel tesisatı brülör, test fırını, gaz yolu, yardımcı ekipmanları ve ölçüm aletlerinden oluşmaktadır. Ölçüm aletleri ile bir yakma sisteminde yakıt debisi, yakıt sıcaklığı, hava giriş sıcaklığı, gaz çıkış sıcaklığı, hava fazlalık katsayısı, kazan egzoz gazındaki O_2, CO_2, CO, NO_2, NO, NO_x ölçümleri yapılabilmektedir. Bu nedenle mevcut test ünitesinin imkân verdiği ölçüde test parametreleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar için kullanılan test ünitesinin iki boyutlu şematik resmi [52] Şekil 3. 1'de görülmektedir. Bu çalışmada, doğal gaz yanmasında yanma sonu emisyonları farklı test parametreleri değişimleri altında araştırılmıştır. Deneysel çalışma da üç farklı ısıl yükte (50 kW, 100 kW ve 150 kW) çalışılarak brülör yükünün emisyon değerleri üzerindeki etkisi, üç farklı hava fazlalık katsayısında (1.1~ 1.5) çalışılarak hava fazlalığının emisyon değerleri üzerindeki etkisi ile testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler ile yanma sonu gazları olan CO_2, O_2, CO, CH_4, NO_x NOVA plus marka ölçüm cihazı [52] ile ölçülerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.1.1 Deneysel Sistem ve Ekipmanları

Deney sistemi, birer adet Ecostar Combustion Systems markalı ECO 2, FPB 200 ve FUSE 2 oransal gaz brülörleri [52] ile gaz yolu ekipmanları, test fırını ile ekipmanlarından oluşmaktadır. Deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi amacıyla yakma sisteminde

kullanılan yakıt miktarı, sıcaklığı ve basıncı, brülör gövde basıncı, gazların giriş ve çıkış sıcaklıkları, yanma sonu gaz emisyonların ölçümleri için ölçüm cihazları kullanılmıştır. Sistemde kullanılan doğal gaz şebekeden alınıp brülöre ulaşmadan önce sırasıyla açma kapama vanası olan küresel vana ve filtreden geçerek toz vb. kirlerden temizlenir. 4 bar olan şebeke basıncı, gaz yolu ekipmanlarından olan basınç regülatörü yardımıyla 300 mbar düşürülür. Gaz daha sonra sırasıyla manometre, küresel vana, emniyet ventili, küresel vana, kompansatör ve selonoid valf ekipmanlarından geçerek brülörün gaz yakıt besleme bölümüne ulaşır. Gaz ventili ile doğal gazın basıncı yanma kalitesini arttırmak amacıyla control edilebilmektedir. Yakma sisteminde kullanılan oksitleyici hava ise brülör gövdesinde monteli bulunan radyal fan ile emilerek brülör içerisine basılır. Hava ve yakıtın brülör ağzında kıvılcım ateşlemeli elektrot kullanılarak tutuşturulması sonucu gaz yakıt yanması gerçekleşir. Yanma sonrası alev oluşur. Alev test fırın eksenine paralel olarak oluşur. Oluşan alev yüksek sıcaklıkta olması dolayısıyla kazan duvarları arasında bir ısı ışınımı söz konusudur. Sıcak egzoz gazı bünyesindeki enerjini ise fırından ayrılıp baca bağlantı borusu yardımıyla bacadan ortama atmaktadır. Bu arada test fırınının çıkışı ölçüm noktasında gaz çıkış sıcaklığı, hava fazlalık katsayısı, fırın egzoz gazındaki O_2, CO_2, CO, NO_x, CH_4 gaz ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Test fırınının iki boyutlu şekilde resmedildiği şematik görünüşü Şekil 3.1'de görülmektedir. İzolasyon amacıyla fırının iç kısmına yerleştirilmiş alev tuğlaları mevcuttur.



Şekil 3.1 Deneysel çalışmaların yapıldığı ve firmada kurulu bulunan test ünitesinin şematik görünüşü [52]

Sistemde dolaşan doğal gaz debisi, sıcaklığı ABB marka test ölçüm cihazları [53] kullanılarak ölçülmüştür. Yakma sisteminde kullanılan yakıtın şebekeden 300 mbar

basınçla alınıp, brülör uygulama basıncına düşürüldüğü basınç regülatörü Şekil 3.2'de görülmektedir. Basınç regülatöründen ayarlanan yakıt basıncı daha sonra gaz Şekil 3. 3'deki gaz debimetresinden geçerek gaz iletim borusuyla brülör gaz başlığına gelene kadar bir miktar daha basınç kaybederek brülörden püskürtülmektedir.

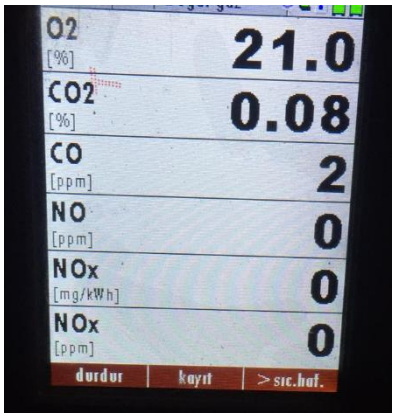
Şekil 3.2 Sisteme gelen doğal gazın 300 mbar basınç seviyesine düşürüldüğü regülatör gaz debimetresi [52]

Şekil 3.3 Doğal gaz debimetresinde debi ve sıcaklık ölçümlerinin görseli [52]

Test fırınında doğal gazın yanma sonucu gaz emisyonları, sıcaklığı ve hava fazlalık değeri ölçümü için kullanılan NOVA marka emisyon ölçüm cihazı Şekil 3. 4'te görülmektedir. Bu cihazın ölçüm probu fırın çıkışına yerleştirmiş olup ölçümler ölçüm cihazında

okunmaktadır. Ayrıca bu cihazdan Şekil 3.5'deki gibi anlık emisyon ölçümleri incelenebilir.

Şekil 3.4 Yanma sonucunda oluşan emisyon ölçümünde kullanılan cihaz [52]



Şekil 3.5 NOVA marka ölçme cihazında anlık emisyon ölçümlerin gösterimi

3.1.2 Test Brülörleri

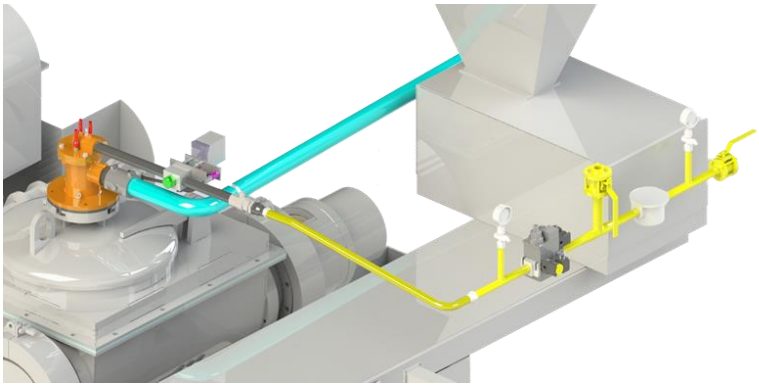
Testler için kullanılan brülör, Termo Isı Sist. Tic.ve San. A. Ş. firmasının testler için temin ettiği ve kendi imalatları olan "Ecostar Combustion Systems" markalı FPB 200, ECO 2

ve yeni geliştirilen FUSE 2 oransal brülörleridir. [52] Test brülörünün kapasite ve özellikleri alt başlıklarında anlatılacaktır.

3.1.2.1 FPB 200

ECOSTAR FPB serisi Proses Brülörleri sahip olduğu üstün tasarım ile ağır sanayi uygulamalarında dahi uyumlu çalışmaktadır. Kolay bağlantı imkânı sunan bağlantı flanşı ve opsiyonel alev borusu uzunluğu seçeneği ile dönüşümü yapılan sistemlere kolaylıkla adapte olmaktadır. Sistemlere özel tasarlanan kontrol ve kumanda panoları ile tekli ve çoklu bölgesel kontrollü sistemlerin ihtiyacına cevap vermektedir. Şekil 3.6'da FPB brülörü ve Şekil 3.7'de ise, FPB brülörünün sahada kullanımı gösterilmektedir.

Şekil 3.6 Deneysel çalışmalarda kullanılan ECOSTAR FPB serisinden temsili bir brülörün görseli [52]



Şekil 3.7 Saha şartlarında ECOSTAR FPB brülörünün kullanımını gösteren temsili görsel [52]

Isıl işlem amacıyla tavlama, yeniden billurlaştırma, normalizasyon, sementasyon, sertleştirme ve ıslah işlemlerinin yapıldığı fırın ve tuz banyolarında, alüminyum,

magnezyum, bakır gibi alaşımların ergitildiği potalar ve benzer fırınlarda, boya sektöründe boyanmış metal mamullerin fırınlanmasındaki boya kabinlerinde, çeşitli gıda maddelerinin kurutulması maksadıyla imal edilmiş endirekt sıcak hava üreticilerinde, porselen ve seramik ve benzeri malzemelerin pişirilmesinde kullanılan kamara, tünel, arabalı tip fırınlarda kullanılmaktadırlar. Tablo 3.6'de ise, FPB 200 brülörünün kapasitesi gösterilmektedir.

Tablo 3.6 FPB Proses Brülörleri (FPB 200) özellikleri [52]

FPB PROSES BRÜLÖRLERİ													
	KAPASİTE		KAPASİTE		Doğalgaz Tüketimi		LPG Tüketimi		Motorin Yakıt Tüketimi		Fuel-Oil Yakıt Tüketimi		FAN
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	DEBİ
	Kcal/h		kW		Nm^3/h		Nm^3/h		kg/h		kg/h		Nm^3/h
FPB 20	4.000	20.000	4,7	23,3	0,5	2,4	0,2	0,9	-	-	-	-	30
FPB 80	16.000	80.000	18,6	93,0	1,9	9,7	0,7	3,6	-	-	-	-	150
FPB 200	40.000	200.000	46,5	232,6	4,8	24,2	1,8	8,9	3,9	19,6	4,1	20,7	350

3.1.2.2 ECO 2

Tek kademeli, çift kademeli ve oransal olarak kontrol edilebilen Ecostar gaz brülörleri; doğalgaz, LPG, LNG, CNG yakıtlar ile çalışabilmektedir. Sunmuş olduğu geniş güç kapasitesi ve yüksek yanma verimi sayesinde, başta sıcak su kazanları, buhar kazanları, kızgın yağ kazanları ve olmak üzere çeşitli ısı uygulamalarında başarı ile kullanılabilmektedir. Şekil 3.8'de ECO 2 brülörü ve Tablo 3.7'de ise, ECO 2 brülörünün kapasitesi gösterilmektedir.

Şekil 3.8 Deneysel çalışmalarda kullanılan ECOSTAR ECO serisinden temsili bir brülörün görseli [52]

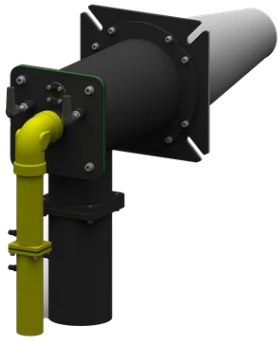
Tablo 3.7 ECO 2 Brülörleri özellikleri [52]

BRÜLÖR TİPİ	KAPASİTE		KAPASİTE		DOĞALGAZ TÜKETİMİ		LPG GAZ TÜKETİMİ		FAN MOTOR GÜCÜ	50 Hz te GERİLİM
	Min. kcal/h	Max. kcal/h	Min. kW	Max. kW	Min. Nm^3/h	Max. Nm^3/h	Min. Nm^3/h	Max. Nm^3/h	kW	VAC
ECO 2 G C 3	51.600	172.000	60	200	6,3	20,8	2,3	7,6	0,15	1N 230

Sıcak su, kızgın yağ ve buhar kazanlarında, direkt ve endirekt sıcak hava üreteçlerinde ve 600 ^{0}C'den düşük sıcaklık ile çalışan endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.

3.1.2.3 Yüksek Alev Hızına Sahip Brülör FUSE 2

Alev hızları ile ilgili endüstride kabul gören bazı sınır şartlarına göre; 90 m/s üzerindeki alev hızları yüksek alev hızları ve 60 ile 90 m/s arasındaki alev hızlarını ise orta seviye alev hızlarıdır. Bu çalışmada belirtilen parametrelere göre yüksek alev hızlı bir brülör tasarımı yapılmıştır. Şekil 3.9'da FUSE 2 brülörü gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Deneysel çalışmalarda kullanılan ECOSTAR FUSE serisinden temsili bir brülörün görseli [52]

Silisyum karbür başlıklı yüksek hızlı yakıcıdır. Çalışmamızda karşılaştırılmakta olan mükerrer kapasitedeki ürünlere göre ortam havası ya da ön ısıtılmış hava ile çalışabilme daha stabil çalışabilme, fazla hava kapasitesinde çalışabilme, arzu edilen kapasitelerde direkt ateşlenerek devreye girebilme özelliklerine sahiptir. Ayrıca daha zarif ve fonksiyonel olması için tasarlanmıştır.

Dövme prosesleri, yeniden ısıtma prosesleri, pota ısıtma prosesleri döküm teknesi ısıtma işlemleri, hurda ön ısıtma işlemleri, stres giderme prosesler, alüminyum ergitme prosesleri, termal sıvı ısıtıcıları, termal oksitleyiciler, refrakter kurutma üniteleri, cam tank ısıtma sistemleri, diğer tüm yüksek sıcaklık ve alev stabilitesi gerektiren ısıl işlemler ve proseslerde fiber örtü işleme fırınları, tünel veya araba fırınları, germe fırınları, seramik fırınları, elyaf yalıtımlı fırınlar gibi endüstriyel proseslerde kullanılmaktadır.

3.1.3 Yakıt İçeriği

Deneylerde kullanılan doğal gazın yakıt bileşim değerleri ilgili test tarihlerinde düzenli olarak ÇORDAŞ- Tekirdağ Gaz Şirketi'nden alınmıştır. Nümerik çalışmalarda ortalama değerler kullanılmıştır. Doğal gaz yakıt bileşimi ortalama %96'sı metandan oluşmaktadır. [54]

3.2 Ölçüm Cihazlarının Doğruluk-Belirsizlik Analizi

Test sisteminde elde edilen sonuçların doğruluğu, ölçümler için kullanılan cihazların uygunluğuna, cihazların kendi hassasiyetlerine ve birbirleriyle uyumluluğuna bağlıdır. Test sonucunu etkileyen ve istenen değerden farklı bir değer almasına neden olan herhangi bir faktör hata olarak kabul edilir. Deney sonuçlarını etkileyen hataların başında deneyi yapan araştırmacının ortaya koyduğu hatalar, ardından deney sisteminin hataları gelmektedir. Araştırmacının tecrübesi ilk hataları ortadan kaldırabilir, ancak bazen daha sonradan oluşan hataları ortadan kaldırmak mümkün olmayabilir. Daha sonra oluşan hatalar ise aletlerin ve cihazların imalatından kaynaklanan hatalar, kesin olarak bilinmeyen sabit hatalar deney ve deneylerde bulunan rastgele hatalar olarak görünmektedir. Bu hataların en aza indirilmesi veya hata oranlarının belirlenmesi, sonuçların doğru değerlendirilmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada deneysel testlerde kullanılan cihazlar ve bu cihazların çalışma aralığındaki belirsizlik değerleri Tablo 3.8'de verilmiştir. Ayrıca ölçüm sonuçlarından hesaplanan brülör ısıl yükü ve NO_x emisyonu sonuçları da aynı tabloda verilmiştir. Deneysel çalışmalarda hesaplanan brülör ısı yükünün, yakıtın kütle debisinin yakıtın alt ısıl değeri ile çarpımına eşit olduğu bilinmektedir. Doğal gazı oluşturan gaz bileşenleri, bu bileşenlerin yüzdeleri ve hesaplamalar sonucunda sabit bir değer olarak daha düşük ısıl değeri ÇORDAŞ [54] tarafından değerlendirilir, çünkü brülör ısıl yük belirsizliği gaz akışına eşittir. Öte yandan NO_x emisyonu, NO ve NO_2 emisyonlarının toplamına eşit olduğu için toplam NO_x belirsizliği Kline ve McClintock yöntemi kullanılarak aşağıdaki Tablo 3.8'deki gibi hesaplanmıştır: [55]

Tablo 3.8 Deneysel çalışmada yapılan ölçümlerin doğruluk- belirsizlik değerleri [29,30]

Ölçülenler	Ölçüm Cihazı	Ölçüm Aralığı	Birim	Doğruluk Hassasiyeti	Birim
$\dot{V}_{doğal\ gaz}$	Sensyflow iG	0-1300	Nm^3/h	< 0.2	%

O_2	NOVA plus	0-21	%	± 0.2	%
CO	NOVA plus	0-4000	ppm	± 10	ppm
CO_2	NOVA plus	0-30	%	± 0.3	%
NO	NOVA plus	0-300	ppm	± 2	ppm
NO_2	NOVA plus	0-200	Ppm	± 5	ppm
T_{hava}	NOVA plus	0-100	° C	± 1	° C
$T_{doğal\ gaz}$	NOVA plus	0-650	° C	± 2	° C
Hesaplananlar			Belirsizlikler		Birim
$\dot{Q} = \dot{m}H_u$			± 0.3		%
NO_x=NO+NO_2			± 5.38		ppm

3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Çalışması

Sıvı ve gaz akışkan akışlarında kütle, momentum ve enerji denklikleri korunum yasalarınca kısmi diferansiyel denklemler ile temsil edilir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), bu gibi kısmi diferansiyel denklem sistemlerini bir dizi cebirsel denklem ile değiştirerek dijital bilgisayarlar kullanarak çözme yöntemidir. [37] HAD akışkan akışlarını matematiksel modelleme (kısmi diferansiyel denklemler), sayısal yöntemler (ayrıklaştırma ve çözüm teknikleri) ve yazılım araçları (çözücüler, öncesi ve sonrası işlemler) vasıtasıyla niteliksel ve bazen de niceliksel tahminini sağlar. Kısacası HAD sanal akış laboratuvarında sayısal deneyler (bilgisayar simülasyonları) yapmayı sağlar. HAD akışkan akışının söz konusu olduğu aşağıdaki uygulamalarda kullanılabilmektedir. [37]

Nümerik yöntemler, yeni tasarım, tasarım optimizasyonu, ürün geliştirme ve mühendislik problemlerinin sonuca vardırılmaları için uygun maliyetli ve zaman kazandıran araçlardır. Modelleme için kullanılan sonlu farklar, sonlu hacim ve sonlu elemanlar yöntemleri gibi çeşitli nümerik çözüm teknikleri vardır. ANSYS-CFX, ANSYS-FLUENT, Star CCM gibi köklü HAD kodları sonlu hacim yöntemi kullanılmaktadır.

Türbomakineler, çevre mühendisliği, elektrik santralleri, deniz mühendisliği, mimarlık ve inşaat mühendisliği, aerodinamik mühendisliği, elektrik ve elektronik mühendisliği HAD kullanılarak çözümler üretilen sektörler adına örnek verilebilir. Bu ana başlıklar üzerinden genel uygulama alanları ise, içten yanmalı motorlar, brülörler ve gaz türbinleri,

açık deniz yapılarının yük analizi, dönen geçitlerin içindeki akış, uçak, araba tasarımı, gemilerin hidrodinamiği ekipmanların soğutulması, kirleticilerin ve atıkların dağıtımı, rüzgar yüklemesi ve HVAC olarak örneklendirilebilir.

Tez çalışmasındaki nümerik çalışmalarda ANSYS-Fluent ve Siemens FloEFD yazılımları kullanılmıştır. ANSYS-Fluent, momentum, enerji etkileşimi, kütlenin taşınım denklemi ve tür bileşiminin hesaplanması için sonlu hacim yöntemini kullanır. Ağırlıklı olarak HAD yazılımlarının üç ana aşaması mevcuttur ve bunlar ön işlem, ana işlem ve son işlemdir.

Ön işlem, bir akış probleminin girdisi ve akış alanının oluşturulmasıdır. Bir HAD problem çözümünün doğruluğu, doğrudan elaman sayısı ve ağ örgüsü kalitesi ile ilgilidir. Genellikle daha yüksek eleman sayısı ağ örgülerini daha iyi kaliteye ulaştırır ve daha yüksek doğruluğa sahiptir. Daha yüksek eleman sayısı daha iyi bilgisayar donanımı gerektirir ve nümerik çözümler daha uzun sürer. Tasarım süresini ve hesaplama maliyetini azaltmak için ağ örgülerinde bulunan eleman sayıları optimize edilmelidir.

Ön işleme; hesaplama alanını tanımlamak için geometrinin tanımı, akışkan hacminin ağ oluşumu, fiziksel ve kimyasal olayların modellenmesi, akışkan özelliklerinin tanımlanması, sınır koşullarının belirlenmesi gibi aşamalardan oluşmaktadır.

Ana işlem, HAD hesaplamalarının ikinci aşamasıdır. Ana işlem aşaması; korunum denklemlerin hesaplama alanına entegrasyonu, integral denklemlerin bir cebirsel denklem sistemine dönüştürülmesi, cebirsel denklemlerin yineleme yöntemiyle çözümü gibi aşamaları içermektedir.

Son işlem, HAD probleminin çözümünün veri görselleştirmesi haline getirildiği son aşamasıdır. Son işlem aşamaları iki boyutlu ve üç boyutlu yüzey çizimleri, kontur grafikleri ve vektör çizimlerinin oluşturulmaları, problem sonuçlarının animasyonu ve çözümlerin karşılaştırılmasıdır. [21]

3.3.1 Korunum Denklemleri

HAD hesaplamaları akışın korunum denklemleri tarafından belirlenmektedir. Kütle, momentum ve enerji için temel denklemler aşağıdaki gibidir: [21,30]

Kütle korunumu Denklem 3.1'de gösterilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . \rho U = 0 \tag{3.1}$$

Momentum korunumu Denklem 3.2'de gösterilmektedir.

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + (\nabla \mathrm{U}.\rho U) = -\nabla \rho + \nabla.\tau + \rho.g \tag{3.2}$$

Enerji korunumu Denklem 3.1'de gösterilmektedir.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\vec{\mathrm{v}}(\rho E + p)) = \nabla\left(k_{eff}\nabla \mathrm{T} - \sum_j h_j \vec{J}_j + \left(\bar{\bar{\tau}}_{eff}.\vec{\mathrm{v}}\right)\right) + S_h \tag{3.3}$$

3.3.2 Yanma Modelleri

Yanma; elektrik üretimi, çelik ve cam eritme fırınları, gaz alevleri ve havacılık mühendisliği gibi endüstriyel uygulamalarda önemli bir konudur. Ekipman verimliliğini tahmin etmek ve istenmeyen yanma ürünlerini azaltmak için doğru yanma modellemesinin yapılması önemlidir. Yanmayı gerçekçi bir şekilde analiz ederek yanmayı modellemek mümkündür. Yanma doğrudan yanmaya katılan bileşenlerin karıştırılmasına ve kimyaya bağlıdır. Kimyasal reaksiyonun bağıl hızı kritiktir ve kimyasal reaksiyon hızını belirtmek için Damköhler sayısı kullanılır.

Damköhler sayısı (Da), karakteristik türbülanslı karıştırma süresinin karakteristik kimyasal reaksiyon süresine oranını temsil eder. Damköhler sayı denklemi aşağıdaki Denklem 3.4'teki gibidir:

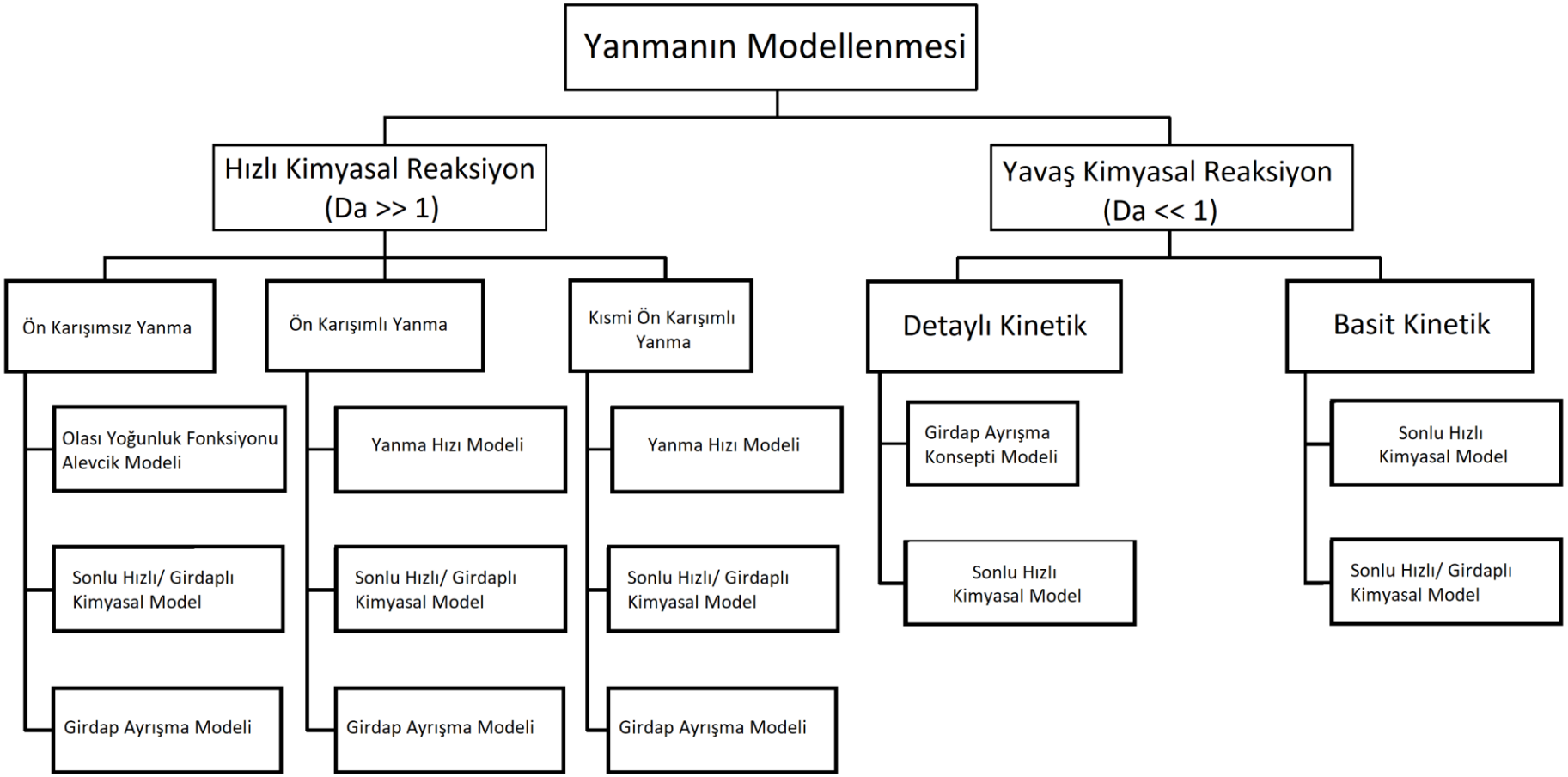
$$Da = \frac{Karıştırma\ Süresi\ Ölçeği}{Kimyasal\ Zaman\ Ölçeği} \sim \frac{\frac{L}{U}}{\frac{\rho_{ady}}{R_{yavaş}}} \sim \frac{\frac{k}{\varepsilon}}{\frac{\rho_{ad}}{R_{yavaş}}} \tag{3.4}$$

Denklem 3.4'te bulunan ρ_{ady} adyabatik alev yoğunluğunu ve $R_{yavaş}$ adyabatik bir T sıcaklığında ve stokiyometrik konsantrasyonlarda en yavaş reaksiyon hızını belirtmektedir.

Damköhler sayısı 1 değerinden yüksek olduğu durumlarda kimyasal reaksiyon hızları hızlıdır. Reaksiyonlar türbülanslı karıştırma ile sınırlıdır ve bu nedenle türbülans modelinin seçimi önem arz etmektedir. Fırınlarda, kazanlarda, gaz türbinlerinde, gazlaştırıcılarda ve yakma fırınlarında görülen yanma, hızlı yanmayı içeren kimyasal proses örnekleridir. Damköhler sayısı 1'e eşitse veya bu degere yakınsa, kimyasal reaksiyon hızları yavaştır. Reaksiyonlar kimya ve türbülans etkileşimleri ile sınırlıdır ve

bu nedenle reaksiyon mekanizmasının seçimi ve türbülans-kimya etkileşimlerinin önemi ön plana çıkmaktadır. Emisyonların oluşumu, kimyasal buhar birikimi ve hipersonik hızda hava ayrışması ile ilgili reaksiyonlar yavaş kimya örnekleridir. Yanma modelleri ve Damköhler sayısına bağlı olan kimyasal hıza bağlı olan yanma konuları Tablo 3.9'da gösterilmiştir. [22]

Tablo 3.9 Yanmanın modellenmesi [22]



Nümerik çözümlerde kullanılan yanma modelleri aşağıdaki gibi kısaca açıklanmıştır: [23]

Sonlu hızlı kimya modeli, türbülanslı dalgalanmaların etkisini yok sayar ve reaksiyon hızları Arrhenius kinetik ifadeleriyle belirlenir.

Girdap ayrışma modeli, gerçekçi sonuçlar için bir veya iki aşamalı ısı salma mekanizmaları kullanmaktadır. Arrhenius kimyasal kinetik hesaplamalarından kaçınılabilir ve girdap ayrışma modeli yanma modellemesinde uygun sürede sonuçlar verebilecektir.

Sonlu hızlı/girdap dağılım modeli, reaksiyon hızını her iki modele göre de değerlendirir ve en küçüğü seçilir.

Olası yoğunluk fonksiyonu daimi difüzyon alevciği modeli yalnızca yakıt ve oksitleyici olmak üzere iki şekilde giriş sınır koşulu tanımlı bir sisteme uygulanabilir. Momentum ve enerji denklemlerinin yanı sıra karışım oranı ve karışım oranı çeşitliliği miktarları da çözülmektedir.

4
BULGULAR VE TARTIŞMALAR

The Bu bölümde, öncelikle çalışmanın temellerinin atılmasını sağlayan iki farklı brülörün (ECO ve FPB tip) test fırınındaki performans testlerinin icra edilmesi ile başlamaktadır. Deneysel çalışmaların detaylarına yer verilmiştir. Bu performans testlerinde incelenen alev formları ve test sonuçlarını içeren raporlar ile yüksek hızlı brülör tasarımı için fikir sahibi olunmuştur. Alev formunun FloEFD HAD programı ile doğrulanması sonrasında elde edilen bilgiler ışığında FUSE yüksek hızlı brülör tasarımları da oluşturulmuştur. Bu tasarımları Ansys FLUENT HAD program ile analizinin yapılması ve arzu edilen değerlere ulaşılmasından sonra üretilip, performans testlerinin yapılması ile çalışma devam ettirilmiştir. Bu kısımda deneysel çalışmadan çıkarılan sonuçlar ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçları irdelenecektir. Çıkarılan bulgular, görseller, grafikler ve tablolar üzerinden gösterilerek daha kolay anlaşılması amaçlanmıştır.

4.1 Deneysel Çalışmalar

ECOSTAR Ar-Ge laboratuvarında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Baca gazı emisyonları ve yakıt tüketimleri PLC kontrollü ölçüm cihazları kullanılarak ölçülüp kayıt altına alınmaktadır. İlk yanma odası için ölçüm noktaları, ölçüm parametreleri ve test düzeneği Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Şekil 4.1 Test fırınının görseli [52]

İlk olarak fırında ECO-2, FPB 200 ve FUSE-2 brülör geometrileri ile iki farklı test yapılmıştır. Bu testlerden öncelikli olanı sırasıyla 50 kW, 100 kW ve 150 kW

seviyelerinde olan brülörlerin güçlerinde %3 oksijeni referans alınarak performans testlerinin gerçekleştirilmesidir. İkinci test ise, sırasıyla brülörler lambda 1.1~1.5 seviyelerinde ve 150 kW kapasitede sabit tüketim durumu için deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Ölçülen deneysel değerler daha sonra nümerik çalışmalarda kullanılacaktır. ECO 2 ve FPB 200 brülörlerinin ar-ge test fırınına montajlanmış durumları Şekil 4.2 üzerinden görülmektedir. Brülörler montajlandıktan sonra oluşması planlanan alevin ısısının, brülör- fırın montaj bölgelerinden dışarıya çıkmaması, testi gerçekleştiren çalışanların güvenliği için, brülörlerin alev borularının çevresinde Şekil 4.2'de görüldüğü gibi izolasyon malzemesi konumlandırılmaktadır.

(a) (b)

Şekil 4.2 Test fırınında (a) ECO 2 ve (b) FPB 200 brülörlerinin montajının yapılması [52]

FUSE 2 adlı ürün bu görselde patent ve fikri hakların korunumu nedeniyle çalışmada gösterilmemektedir. Ancak üç brülörün de %3 oksijen oranı referansında yanma oluşumu ve alev formları Şekil 4.3'teki gibi gözlemlenmiştir.

ECO 2 adlı brülör %3 oksijen referansında yanarken difüzyon alevi diye adlandırılan alev çeşidi meydana gelmektedir. Bu alev çeşidi mavi renkli aleve sahip yanma oluşumlarına göre dışarı ortama çok fazla ısı yaymaktadır. Eğer ki sisteme verilen havanın hacimsel debisi arttırılırsa, oksijen seviyesi artacak ve difüzyon alevi de mavi renkli ve göreceli olarak daha soğuk bir aleve dönüştürülebilir. FPB 200 ve FUSE 2 adlı brülörler Şekil 4.3'te görüldüğü gibi daha kararlı ve mavi alev yapısına sahiptirler. Ancak brülör gövdelerinin içerisinde bulunan türbulatorlarının tasarım farklarından dolayı FPB 200 ve FUSE 2 brülörlerinin alev formları birbirinden çok farklıdır. FPB 200 dalga üreteçli türbulator yapısı nedeniyle daha kısa ve yaygın formu bulunurken, FUSE 2 adlı brülörde ise, yüksek alev hızlarına ulaşabilen kararlı ve kaliteli yanmayı sağlayan özel patentli türbulator nedeniyle göreceli olarak daha uzun ve ince bir alev formu gözlemlenmektedir.

(a) (b)

(c)

Şekil 4.3 Test fırınında (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin performans testi esnasında alev formlarının incelenmesi [52]

Tablo 4.10 150 kW gaz tüketimi için farklı hava fazlalık değerleri için emisyon testi değerleri [52]

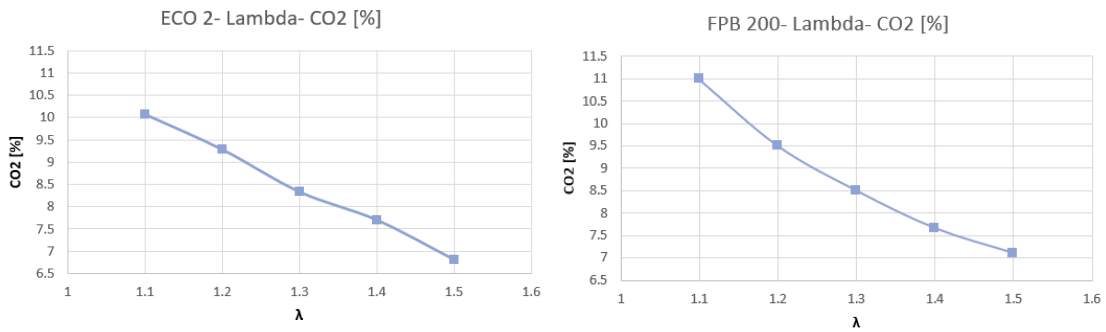
Lambda		**1.1**			**1.2**			**1.3**			**1.4**			**1.5**		
Özellik	Birim	FPB 200	ECO 2	FUSE 2	FPB 200	ECO 2	FUSE 2	FPB 200	ECO 2	FUSE 2	FPB 200	ECO 2	FUSE 2	FPB 200	ECO 2	FUSE 2
O_2	%	1.9	1.9	1.9	3.5	3.5	3.5	4.9	4.9	4.9	6.0	6.0	6.0	7.0	7.0	7.0
CO_2	%	10.99	10.07	10.24	9.50	9.28	9.67	8.50	8.33	8.89	7.66	7.70	8.74	7.10	6.81	7.58
CO	ppm	6	0	0	8	0	0	8	0	0	18	0	0	44	0	0
NO_x	ppm	42	47	53	41	51	54	34	52	52	25	50	49	24	46	46

150 kW ısıl kapasite sabit tutulurken hava fazlalık oranı olan lambdanın değerlerinin 1.1~1.5 değerlerinde değişimi üzerinden gerçekleştirilen deneylerin sonuçları Tablo 4.1'de yer almaktadır ve elde edilen deneysel ölçümler kullanılarak çizilen test sonuçları üzerinden çalışmada kullanılan brülör için grafikler haline getirilerek daha anlaşılır hale getirilmesi amaçlanmıştır.

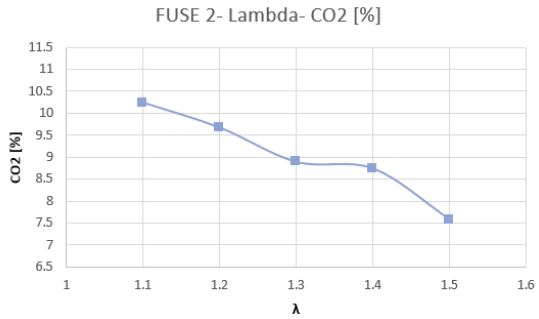
Atık baca gazı, fırın bacasından tahliye edilirken, ölçümler yine bacaya montajı olan bir emisyon ölçüm cihazı vasıtasıyla test sonuçlarına ulaşılmaktadır. Maksimum karbondioksit oranı yanmaya katılan gaz çeşidine göre değişmektedir ve bu oran endüstriyel uygulamalarda % 11.8~12.1 seviyelerinde karşılaşılmaktadır.

$$\lambda = \frac{CO_{2\,mak}}{CO_2} = \frac{O_{2\,mak}}{O_{2\,mak} - O_2} \tag{4.1}$$

Denklem 4.1 üzerinden görüldüğü gibi, hava fazlalık oranı olan lambda değerinin arttırılması durumunda maksimum karbondioksit değeri sabit olacağından dolayı, test sonuçlarından da görüleceği şekilde karbondioksit ölçüm değerlerinde azalma meydana gelecektir.



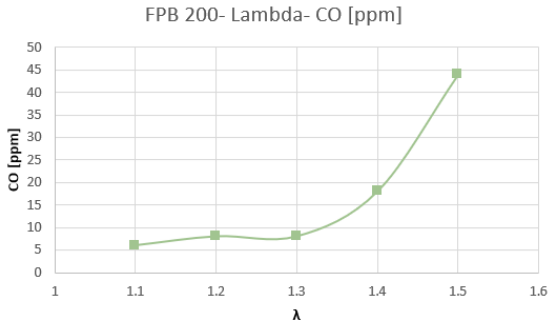
(a) (b)



(c)

Şekil 4.4 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin lambda değerleriyle karbondioksit yüzdesinin değişimi

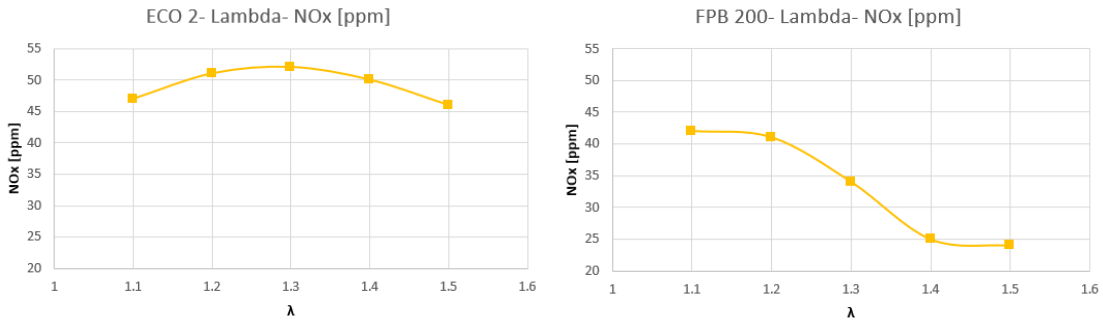
Tablo 4.1 üzerinden test esnasında ulaşılan karbonmonoksit değerleri incelenerek, Şekil 4.5'de tablo halinde hava fazlalık oranının artımına göre karbonmonoksit değerlerinin nasıl değiştiği FPB 200 adlı brülör için gösterilmektedir. ECO 2 ve FUSE 2 adlı brülörlerde karbonmonoksit değerlerine rastlanmadığından dolayı grafik halinde gösterilmemektedir. Az hava ile yanma durumunda oksijenin yetersiz olması nedeniyle karbondioksit yerine karbonmonoksit (CO) oluşmaktadir. Bu esnada karbon parçacıklari is ve kuruma dönüşerek, ısı transferini azaltmaktadır. Bu sebeple, tam yanmanın oluşabilmesi için teorik ihtiyaçtan daha fazla hava brülöre verilmesinin gerekliliği fazla hava oranı hakkında deneylerin yapılmasının önemini ortaya çıkarmıştır. [56]



Şekil 4.5 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre FPB 200 brülörünün lambda değerleriyle karbonmonoksit değerinin ppm biriminde değişimi

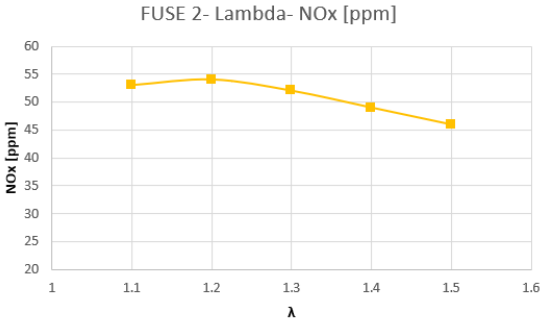
Şekil 4.6 incelendiğinde fazla hava oranının artması ile atık baca gazında karşılaşılan NO_x emisyon değerlerinin azalan eğimde olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin havanın artması ile brülörün merkezinde oluşan alevin soğutulmasıdır. Alev soğutulduğunda termal kaynaklı NO_x oluşumu azalmaktadır.

Zabetta ve arkadaşları çalışmalarında yakıt kademelendirme, hava kademelendirme ve seçici katalitik olmayan indirgeme (SNCR), kazanlardan ve motorlardan nitrojen oksitleri azaltmak için kullanılan teknikler olduğunu ve bu tekniklerin her birinin %50~70 oranlarında ölçülen NO_x değerlerinde azaltımının elde edildiği sınırlı bir uygulanabilirlik aralığına sahip olduğunu belirtmektedir. [57]



(a)

(b)



(c)

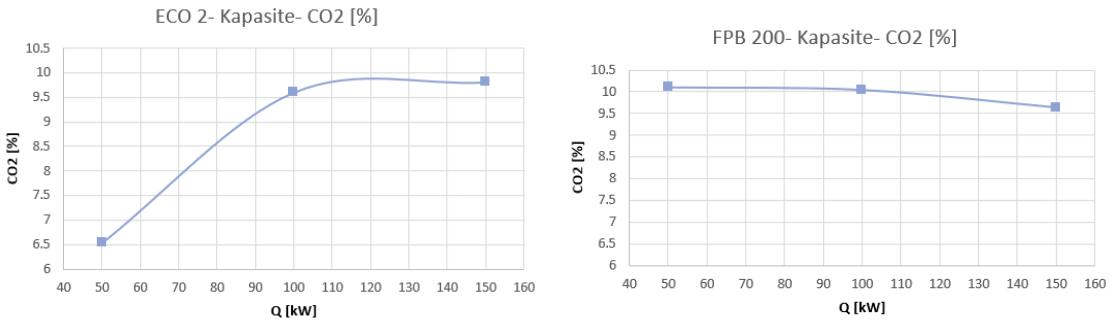
Şekil 4.6 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin lambda değerleriyle nitrojen oksit değerinin ppm biriminde değişimi

Brülörlerin mekanik olarak izin verdiği şekilde lambda değerleri sabit tutulurken ısıl kapasite değerlerinin 50, 100 ve 150 kW olarak değişimi üzerinden gerçekleştirilen deneylerin sonuçları Tablo 4.2'de yer almaktadır ve elde edilen deneysel ölçümler kullanılarak çizilen test sonuçları üzerinden çalışmada kullanılan brülör için grafikler haline getirilerek daha anlaşılır hale getirilmesi amaçlanmıştır. Bu testler gerçekleştirilirken ECO 2 adlı brülörde 50 kW kapasite ısıl güç test edilirken diğer brülörlerden farklı olarak %3 oksijen seviyesine ya da lambda 1.17 değerine düşürülemediği tespit edilmiştir. Bu durumun kök nedenine inildiğinde hava debisinin sağlandığı alanın hava klapesi ile tam kapatılamadığı gözlemlenmiştir.

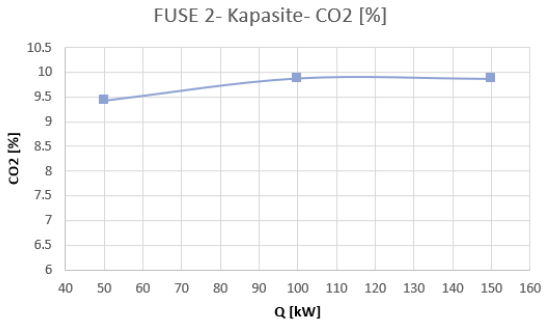
Tablo 4.2 Farklı kapasiteler için emisyon testi değerleri [52]

Kapasite:		50 kW			100 kW			150 kW		
Özellik	Birim	FPB 200	ECO 2	FUSE 2	FPB 200	ECO 2	FUSE 2	FPB 200	ECO 2	FUSE 2
O_2	%	3	8.1	3	3	3	3	3	3	3
CO_2	%	10.10	6.53	9.43	10.04	9.6	9.88	9.63	9.81	9.87
CO	ppm	0	0	10	6	0	0	7	0	0
NO_x	ppm	56	46	53	50	46	54	42	47	53
λ	-	1.17	1.64	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17

Şekil 4.7'de kapasite artışına bağlı olarak 50~150 kW seviyelerinde karbondioksit değişimi görülmektedir. Oksijen ve karbondioksit değerleri direk olarak lambda değerine Denklem 4.1'de görüldüğü gibi bağlıdır. Ancak deneysel veriler üzerinden incelendiğinde brülördeki yanma kalitesinin de karbondioksit seviyelerine etkisi olduğu saptanmıştır. %3 oksijen referansında yapılması planlanan testler için 50 kW, 100 kW ve 150 kW ısıl güçler için doğal gaz ve gerekli hava hacimsel debileri belirlenmiştir. Ancak standart ürünler olan FPB 200 ve ECO 2 brülör tasarımları ve yeni ürün olan FUSE 2 yüksek hızlı brülör tasarımı içerisindeki doğal gazın ve havanın yanmaya dahil olması adına çıktığı delikler ve açıklıklar sabittir. Bu nedenle ECO 2 adlı brülörün 50 kW ısıl güç testi hariç olmak üzere diğer ürünlerde yanmanın, seçilen üç adet farklı ısıl kapasitede de kaliteli şekilde yandığı Şekil 4.7'de görülmektedir.



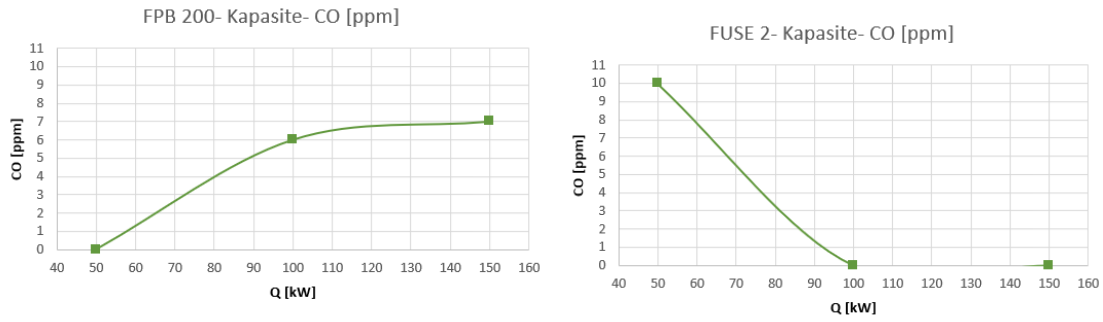
(a) (b)



(c)

Şekil 4.7 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin farklı ısıl kapasite değerleriyle karbondioksit yüzdesinin değişimi

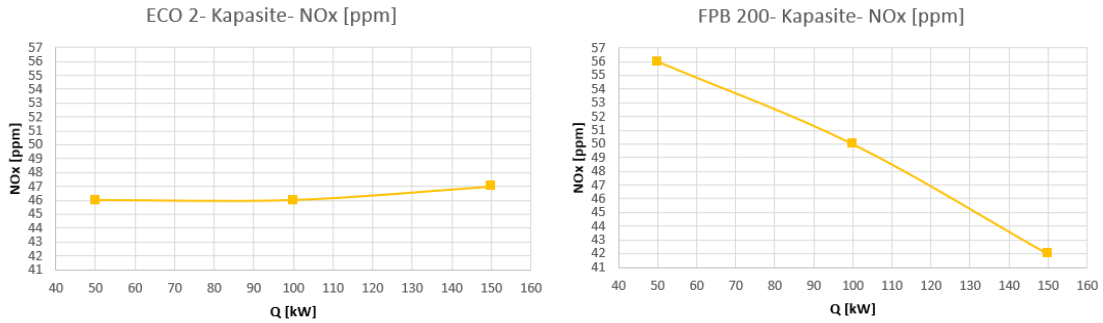
Şekil 4.8'de FPB 200 ve FUSE 2 adlı brülörlerde 50 kW ısıl kapasiteden 150 kW ısıl kapasiteye kadar testleri yapılması esnasında karbonmonoksit emisyonlarının düzensiz olduğu test sonuçları ile gösterilmiştir. ECO 2 adlı brülörde ise, ilgili kapasitelerde %3 oksijen seviyesinde karbonmonoksite rastlanmamıştır.



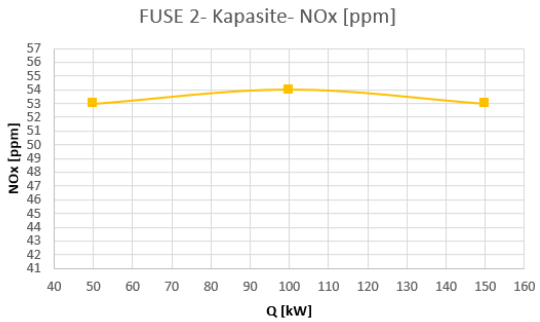
(a) (b)

Şekil 4.8 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre (a) FPB 200 ve (b) FUSE 2 brülörlerinin farklı ısıl kapasite değerleriyle karbonmonoksit değerinin ppm biriminde değişimi

Kapasite testleri yapılırken ECO 2 ve FUSE 2 adlı brülörlerde 50 kW ısıl kapasiteden 150 kW ısıl kapasiteye yükseltilmesi esnasında NOx emisyonlarında dramatik bir değişim olmazken, FPB 200 adlı brülörde 50 kW ısıl kapasiteden 150 kW ısıl kapasiteye yükseltilmesi esnasında NO_x emisyonlarında düşüş görünmektedir. FPB 200 adlı üründe ise kapasite arttıkça, doğal gaz ve hava karışım kalitesinin artması üzerine daha kaliteli yanmanın elde edilmesi ve NO_x emisyonlarının azaltılması ile ilgili sonuçlar Şekil 4.7'de görülmektedir.



(a) (b)



(c)

Şekil 4.9 Baca gazı emisyon sonuçlarına göre (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin farklı ısıl kapasite değerleriyle nitrojen oksit değerinin ppm biriminde değişimi

4.2 Nümerik Çalışmalar

Firma bünyesindeki lisanslı Siemens FloEFD ve ANSYS-Fluent HAD çözücüleri kullanılarak nümerik çalışmalar yapılmaktadır. Çözümler için geometriler firma bünyesindeki lisanslı SolidWorks'te geliştirilmiştir. Nümerik çalışmalar şu sırayla yapılmaktadır:

- Brülör ve fırın geometrileri SolidWorks'te modellenmiştir.
- Brülör ve fırın geometrileri, FloEFD tasarım modülünde kusursuz geometri haline getirilmiştir.
- FloEFD ileri modülünde ağ örgüsü atılıp, yanma analizleri yapılmıştır.
- ANSYS Design Modeler'a aktarılan geometriler üzerinden akışkan hacmi oluşturulmuştur.

- Oluşturulan akışkan hacmi ANSYS Mesh'e aktarılmıştır ve ardından ağ örgüsü oluşturulmuştur.
- Oluşturulan ağ örgüsü, ANSYS Fluent çözücüne aktarılır. ANSYS Fluent'te hesaplanan sınır koşulları ve deneysel veriler kullanılarak yanma analizleri yapılmıştır.

Tez çalışmasının bundan sonraki bölümünde, hesaplanan yakıt-hava oranları ve teorik yanma ürünlerinin hesaplamaları detaylı olarak anlatılacaktır.

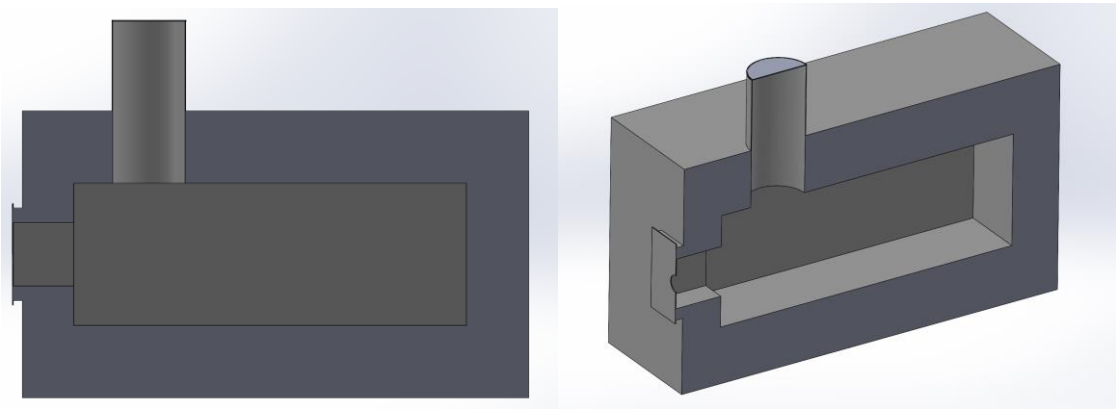
4.2.1 3B Brülör Geometrilerinin HAD Analiz Programlarına Hazırlanması

Brülör geometrisi, tasarımı ve çalışma prensibi nedeniyle karmaşık parçalara sahiptir. HAD analizi için brülör geometrisi basitleştirilmiştir. Geometride yapılan sadeleştirmeler aşağıdaki gibidir:

- Ateşleme elektrodu ve iyonizasyon elektrodu modellenmemiştir.
- Ateşleme elektrodu ve iyonizasyon elektrodu montaj parçaları modellenmemiştir.
- Vidalar ve bağlantı delikleri modellenmemiştir.
- Modellenen geometride brülör gövdesi ve diğer ekipmanlar kullanılmamaktadır.
- Difüzör kanatlarında geometrik sadeleştirmeler yapılmıştır.
- Alev borusu uzatmasının sabitleme plakası modellenmemiştir.

Brülör ve fırın geometrileri Solidworks yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Sadeleştirilmiş brülör ve fırın geometrileri aşağıdaki görsellerdeki gibidir:

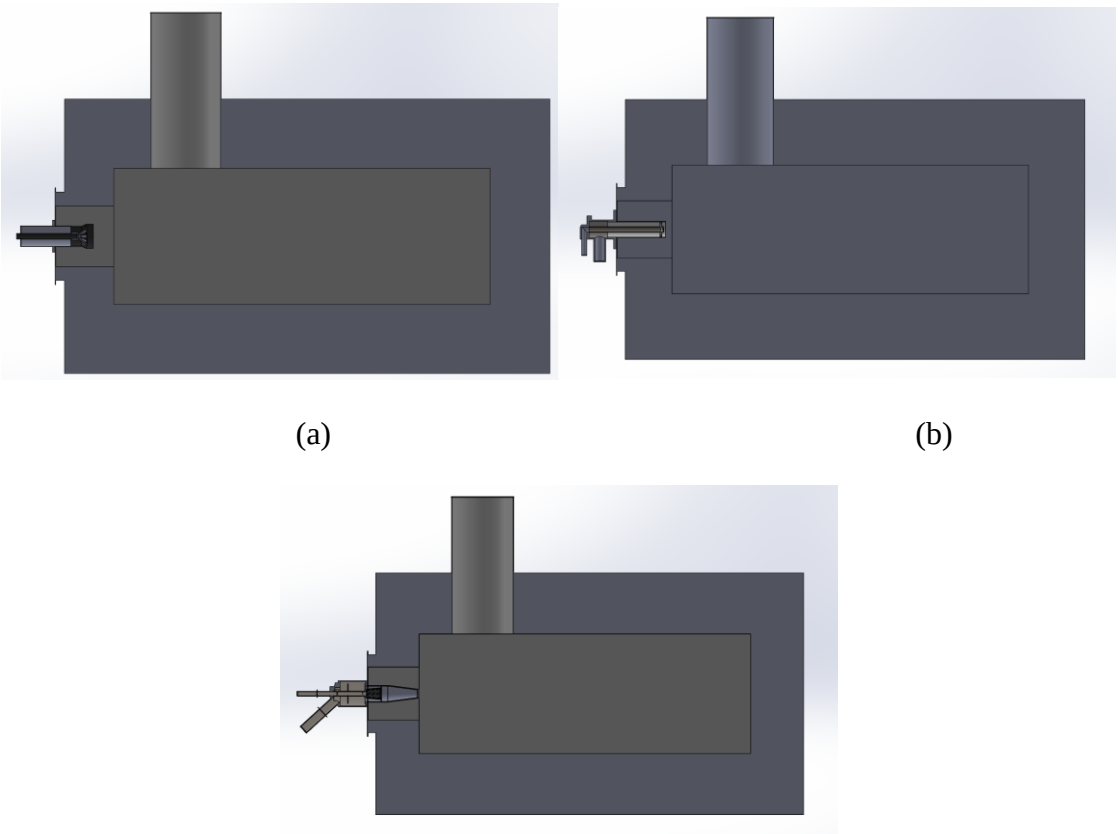
Ar-ge test fırın geometrisi Şekil 4.10'da, tez çalışmasında kullanılan brülörlerin 3B montaj geometrileri Şekil 4.11’de ve Şekil 4.12’de gösterilmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.10 Ar-Ge test fırınının HAD analizlerine hazır olan kusursuz geometrisinin (a) yandan ve (b) izometrik görünüşü

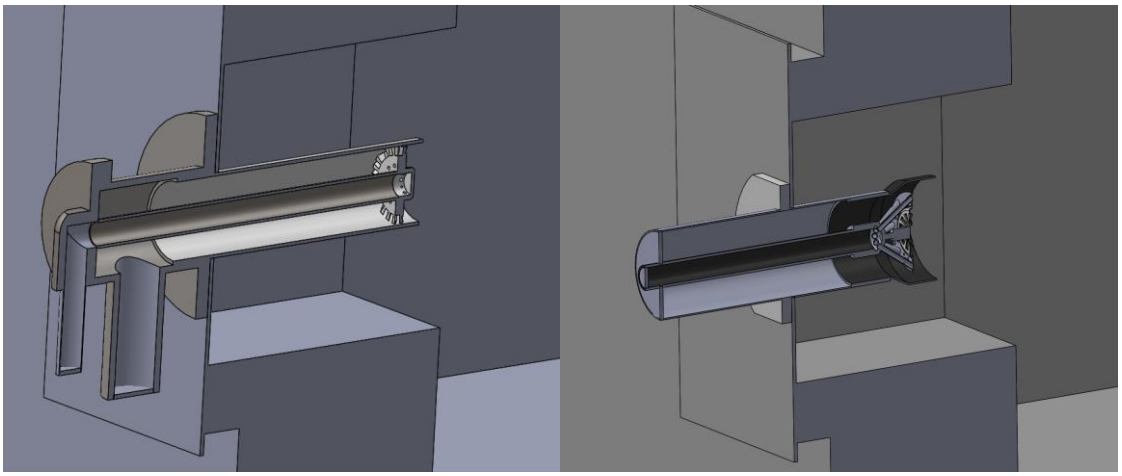
Brülör ve fırın geometrisi; geometri Şekil 4.11'de ve Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



(a) (b)

(c)

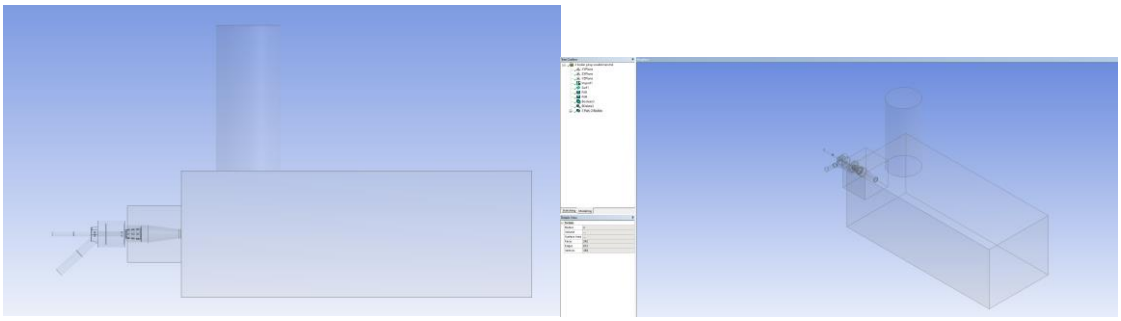
Şekil 4.11 Ar-Ge test fırınına montajlanmış olan (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin yandan görünüşleri



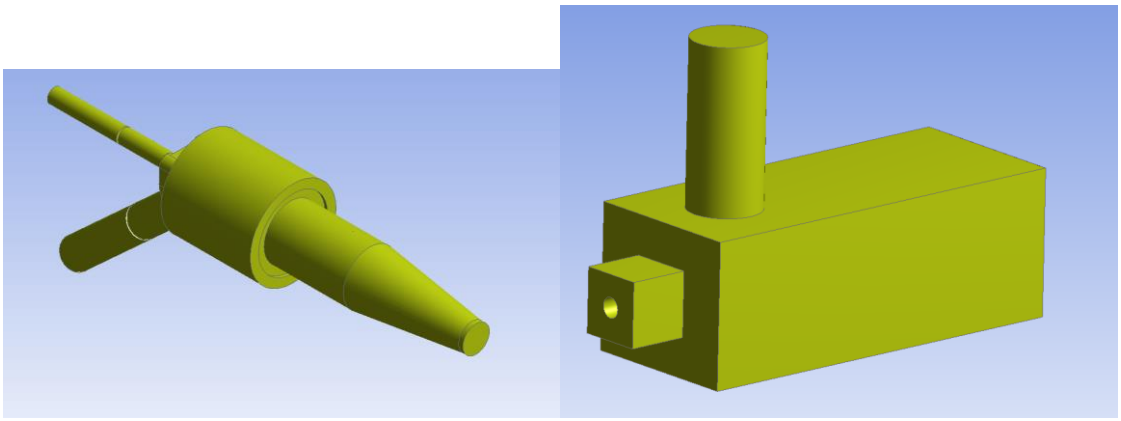
(a) (b)

Şekil 4.12 Ar-Ge test fırınına montajlanmış olan (a) ECO 2 ve (b) FPB 200 brülörlerinin izometrik görünüşleri

Basitleştirilmiş brülör ve fırın geometrileri SolidWorks'te hazırlanmış olan kusursuz geometri FloEFD HAD programında ağ örgüsüne doğrudan hazırlanmış olurken, Ansys FLUENT HAD programında ise, Ansys Design Modeler'a aktarılır, böylece ağ örgüsü ve HAD çözümleri için akışkan hacmi oluşturulmalıdır. Ansys FLUENT için alınan geometri Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



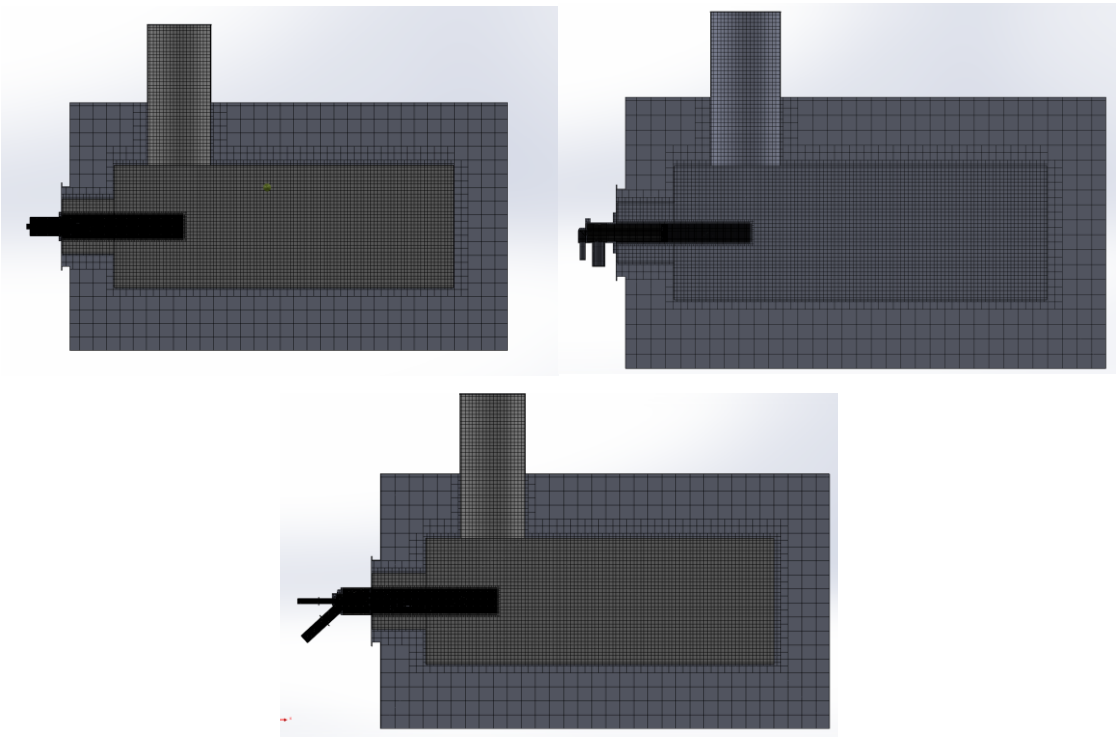
(a) (b)



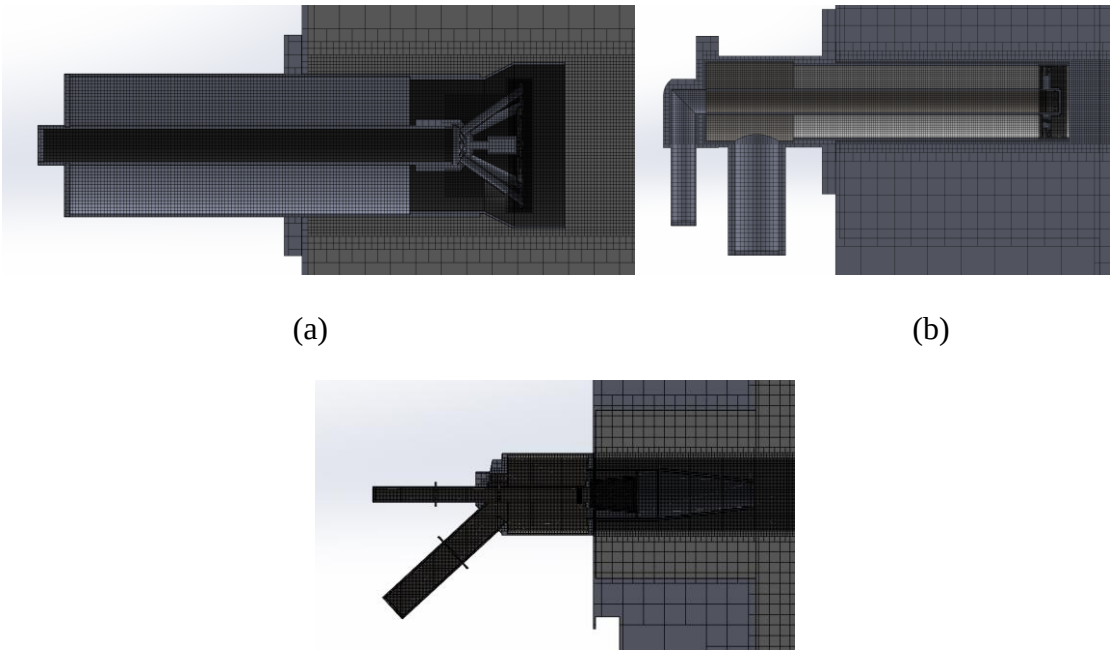
(c) (d)

Şekil 4.13 Design Modeler'da yapılan operasyonlar sonrasında Ansys- Meshing programına aktarılmaya hazır FUSE 2- fırın montajının kusursuz geometrisinin (a) yandan, (b) izometrik görünüşü, (c) FUSE 2 modeli izometrik görünüşü ve (d) test fırını ile brülörün ayrılmış geometrisinin izometrik görünüşü

Akışkan hacmi FloEFD'de oluşturulduktan sonra, ağ örgüsünün kalitesini arttırmak ve eleman sayısını azaltmak için ağ örgüsünün oluşturulmasından önce düzenlenmelidir. ECO 2, FPB 200 ve FUSE 2 yüksek hızlı brülör geometrileri nümerik çalışmaların akışkan hacimleri Şekil 4.14'de ve Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Ağ örgülerinin fırın montajı ile hazırlanmış olduğu (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin yandan görünüşleri (FloEFD)



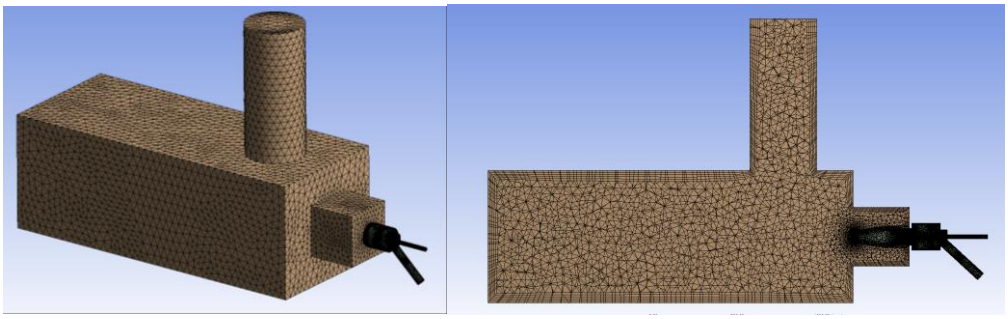
(a) (b)

(c)

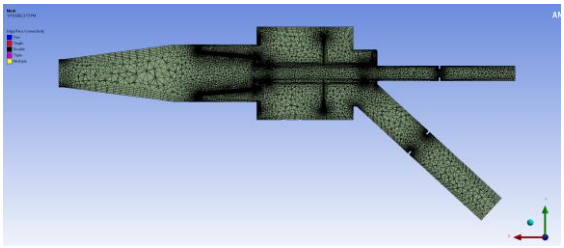
Şekil 4.15 Ağ örgülerinin hazırlanmış olduğu (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin yandan görünüşleri (FloEFD)

Akışkan hacmi ANSYS Design Modeler'da oluşturulur ve ağ örgüsünün kalitesini artırmak ve eleman sayısını azaltmak için ağ örgüsünün oluşturulmasından önce

düzenlenmelidir. Yüksek hızlı brülörün geometrisi nümerik çalışmaların akışkan hacimleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



(a) (b)



(c)

Şekil 4.16 Yüksek hızlı brülör ve fırın geometrisine ait sayısal ağ görseli (a)montaj izometrik görünüşü, (b) montaj yan görünüşü ve (c) sadece FUSE 2 brülörün görünüşü (ANSYS)

ANSYS 2012 satış konferansında bahsedildiği üzere ağ örgüsünün kalitesi eğer düşük ortogonal kalitesine veya yüksek çarpıklık değerlerine rastlanırsa ilgili ağ kalitesinin kullanılması önerilmemektedir. Genellikle minimum ortogonal kalitesi 0,1 değerinden yüksek veya maksimum çarpıklık 0,95 seviyesinden daha düşük olarak hesaplanması sonuçların yakınsaması için önerilmektedir. Ancak bu değerler hücrenin fiziğine ve bulunduğu yere göre farklılık gösterebilmektedir. Ağ bozuk hücreler içeriyorsa ANSYS FLUENT, negatif hücre hacimlerini bildirir. [40]

Statistics	
Nodes	785343
Elements	2588001
Mesh Metric	Skewness
Min	2.8237e-005
Max	0.8994
Average	0.27707
Standard Deviation	0.14403

(a)

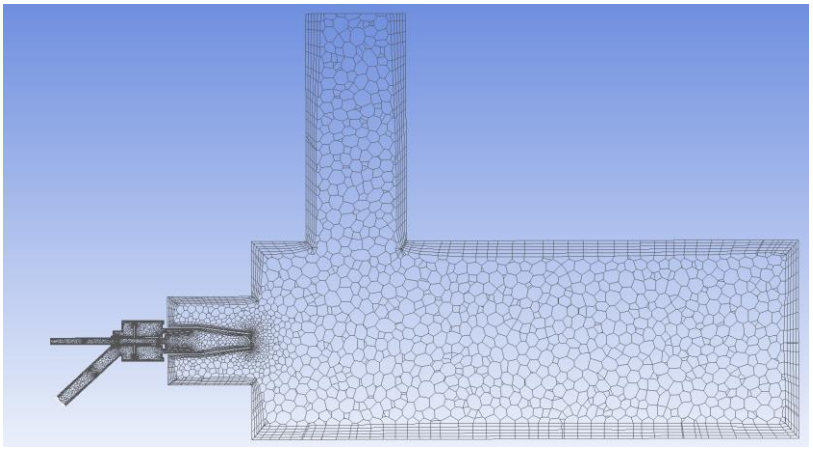
Statistics	
Nodes	785343
Elements	2588001
Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	0.1006
Max	0.99999
Average	0.84229
Standard Deviation	0.10255

(b)

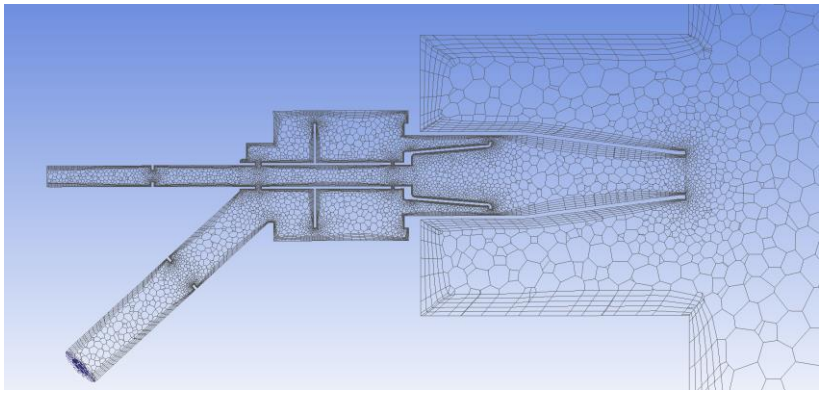
Şekil 4.17 Yüksek hızlı brülör geometrisine ait ağ kalitesinin (a) çarpıklık ve (b) orthogonal kalite olarak uygunluğunun gösterilmesi

Şekil 4.17'de mevcut ağ örgüsünün kalitesi hesaplanması sonucunda maksimum değerleri incelendiğinde çarpıklık 0,89 ve orthogonal kalitenin 0,99 olduğu görülmektedir. Bu nedenle ağ örgüsünün kaliteli ve kullanılabilir yapıda olduğu sonucuna varılmaktadır.

Hem kalitesiyle, hem çözümdeki hızıyla ve hem de karmaşık geometrileri en iyi ayrıştırılabilme özellikleri nedeni ile ön plana çıkan polyhedral eleman ağı yanma simülasyonlarında da kullanımı amaçlanmıştır. Çalışmanın ağ kalitesinin ve çözüm hızının arttırılması ile çözüm maliyeti değerlerinin azaltılması optimum ağ yapısı ile amaçlanmıştır. Çok yüzlü (polyhedral) ağ yapısının dört yüzlü (tetrahedral) ağ yapısına göre daha kaliteli olduğu tespit edilmiştir. Karmaşık geometriler için geliştirilmiş en gelişmiş ağ yapısı olan polyhedral ağ yapısının bu çalışmada kullanılan karmaşık brülör modeline uygulanması en optimum sonucu vermiştir. [41] Çalışmada kullanılan ağ örgüsü Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 üzerinden incelenebilir.



Şekil 4.18 Yüksek hızlı brülör ve fırın geometrisine ait sayısal ağ görseli (ANSYS)



Şekil 4.19 Yüksek hızlı brülör geometrisine ait sayısal ağ görseli (ANSYS)

4.2.2 Sınır Koşulları

HAD analizlerinin başlatılabilmesi ve test sonuçlarına daha yakınsayabilen sonuçlara ulaşılabilmesi için sınır koşullarının doğru bir şekilde tanımlanması önemlidir. FloEFD HAD analizi programı ile yapılan nümerik çalışmalar sırasında hem yakıt girişi hem de hava girişi için hacimsel akış giriş debilerinin sınır koşulları kullanılmıştır. Egzoz için atmosferik basınç çıkış sınır koşulu tanımlanmıştır. ECO 2, FPB 200 ve FUSE 2 geometrileri için hazırlanan analizlerin sınır koşulları için Çordaş gaz dağıtım firmasından doğal gaz karışım verileri alınmıştır. Alınan ve testlerde kullanılmış olan doğal gaz karışımının yoğunluğu, içeriği, LHV ve HHV hesaplamaları Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

YOĞUNLUK	SPESİFİK GRAVİTE	GAZ DEĞERLERİ - 2	Metan	Etan	Propan	i-Butan	n-Butan	i-Pentan	n-Pentan	Hekzan	N2	CO2	TOPLAM	ÜST ISIL(GC)	ALT ISIL(GC)
0.7109	0.5802		96.08390	2.15210	0.64230	0.09710	0.09440	0.01780	0.01290	0.00860	0.71110	0.17990	100.00010	9233.3291	8319.6699
0.7112	0.5804		96.03300	2.19040	0.65040	0.10050	0.09760	0.01900	0.01380	0.00990	0.70280	0.18270	100.00010	9239.8389	8325.3584
0.7114	0.5805		96.02010	2.20640	0.65520	0.09900	0.09530	0.01920	0.01410	0.01040	0.69680	0.18360	100.00010	9241.5859	8326.8184
0.7113	0.5805		96.00000	2.21460	0.66040	0.10040	0.09690	0.01850	0.01350	0.01080	0.70130	0.18360	100.00000	9242.8379	8327.8857
0.7113	0.5804		96.04200	2.20820	0.65810	0.09960	0.09520	0.01840	0.01340	0.01090	0.67420	0.17990	99.99990	9244.3828	8329.1846
0.7110	0.5802		96.04980	2.20850	0.65270	0.09970	0.09520	0.01860	0.01330	0.01130	0.67170	0.17910	99.99990	9244.1445	8328.8496
0.7111	0.5803		96.03900	2.21460	0.65780	0.10060	0.09570	0.01850	0.01320	0.01110	0.67110	0.17850	100.00010	9245.4902	8330.1602
0.7111	0.5803		96.05410	2.20950	0.65440	0.09820	0.09310	0.01790	0.01290	0.01140	0.67000	0.17850	100.00000	9243.6445	8328.3438
0.7111	0.5803		96.04440	2.22100	0.65670	0.09970	0.09460	0.01770	0.01260	0.01700	0.66410	0.17850	100.00630	9245.5000	8330.2627
0.7105	0.5798		96.06950	2.19200	0.64780	0.09800	0.09350	0.01800	0.01280	0.01100	0.67960	0.17780	100.00000	9240.6602	8325.7061
0.7109	0.5801		96.07650	2.19540	0.64850	0.09780	0.09280	0.01740	0.01240	0.00970	0.67160	0.17790	100.00000	9240.8027	8326.2080
0.7104	0.5798		96.05400	2.22020	0.66100	0.10000	0.09500	0.01760	0.01250	0.00980	0.65030	0.17970	100.00010	9246.9473	8331.8584
0.7103	0.5797		96.10820	2.18260	0.65260	0.09920	0.09390	0.01700	0.01200	0.00950	0.64960	0.17550	100.00010	9242.9199	8328.1650
0.7103	0.5796		96.10840	2.18130	0.65070	0.09930	0.09360	0.01730	0.01230	0.00970	0.65140	0.17590	99.99990	9242.5967	8327.8057
0.7106	0.5799		96.12680	2.15850	0.64140	0.09880	0.09410	0.01770	0.01270	0.00940	0.66720	0.17330	99.99990	9238.6777	8319.4951
0.7106	0.5799		96.12820	2.15790	0.64130	0.09810	0.09350	0.01790	0.01270	0.00910	0.66830	0.17300	100.00000	9238.2344	8323.9600
0.7108	0.5801		96.13160	2.16460	0.64910	0.09890	0.09460	0.01780	0.01300	0.00950	0.65240	0.16860	100.00010	9242.1377	8327.4268
0.7111	0.5803		96.07590	2.19780	0.66270	0.10170	0.09840	0.01850	0.01360	0.00970	0.65110	0.17060	100.00000	9247.9678	8332.8018
0.7108	0.5801		96.09220	2.19900	0.65150	0.09880	0.09460	0.01840	0.01350	0.00930	0.65000	0.16870	99.99600	9244.8818	8330.0527
0.7109	0.5801		96.08920	2.19320	0.65750	0.09980	0.09550	0.01770	0.01280	0.01060	0.64950	0.17100	99.99680	9245.6680	8330.3994
0.7112	0.5804		96.07510	2.21200	0.65800	0.09960	0.09480	0.01790	0.01290	0.01010	0.64560	0.16930	99.99530	9247.1357	8331.9004
0.7109	0.5802		96.09200	2.19780	0.65660	0.09930	0.09420	0.01770	0.01260	0.00980	0.64740	0.17260	100.00000	9245.4922	8330.4766
0.7113	0.5805		96.08700	2.19290	0.65090	0.09890	0.09360	0.01780	0.01260	0.00930	0.66370	0.17350	100.00020	9242.4678	8327.8398
0.7116	0.5807		96.01860	2.23520	0.66280	0.09990	0.09470	0.01810	0.01310	0.01020	0.66700	0.18040	100.00000	9247.0068	8331.8408
0.7115	0.5807		96.00260	2.23990	0.66290	0.10130	0.09690	0.01840	0.01330	0.01040	0.67250	0.18170	99.99990	9247.6826	8332.4248

Şekil 4.20 Çordaş gaz dağıtım firmasından alınan ve testlerde kullanılmış olan doğalgaz karışımının LHV ve HHV hesaplamaları

Teorik hava-yakıt ve yanma ürünleri, geliştirilmiş bir MS-Excel kodları ile hesaplanır. Lambda (λ) değerleri 1~1.5 ve %100 metan için de doğal gaz karışımı için hesaplamalar yapılmıştır. 1 m^3/h metan gazı yanma için toplam hava talebi hesaplamaları referans verilen kaynak kullanılarak yapılmıştır ve Tablo 4.3'te 1 m^3/h hacimsel debisindeki metan gazı yanması için gerekli hava hacimsel debisinin değerinin 9.52 m^3/h olduğu görülmektedir. Bu hesaplama sonucunda Tablo 4.4'te gösterildiği gibi 1 m^3 metan yanması için hava talebi, oksijen değeri, fazla hava yüzdesi ve lambda (λ) değerlerine ulaşılmıştır. [23] Doğal gaz yoğunluk hesabı %100 metan için yapılır ve daha sonra hesaplanan değer teorik hava ve yanma ürünleri hesaplamaları için kullanılır. Referans

sıcaklığı 15°C olarak seçilmiştir ve referans basınç 1.01325 bar'dır. %100 metanın hesaplanan yoğunluğu 0,68 kg/m³'tür.

Tablo 4.3 %100 metanın 1~1.5 λ değerleri için teorik hava/gaz oranı, oksijen oranı ve fazla hava oranları hesapları [23]

% 100 Metan (CH_4) için Yanma Hesapları (Lambda (λ) = 1)		
$1\ CH_4 + 2\ (1\ O_2 + 3.8\ N_2) = 1\ CO_2 + 2\ H_2O + 7.52\ N_2$		
Toplam Hava Talebi	9.52	m_3/h

Tablo 4.11 Yüksek hızlı brülörde yakıt ve hava kütle akış girişi için sınır koşulu hesaplamaları ile ulaşılan değerler

Hava Gaz Oranı	**Oksijen (O_2)**	**Fazla Hava**	**Lambda (λ)**
-	[%]	[%]	-
9.52	0	0	1
10.47	1.90	10	1.1
11.14	3.04	17	1.17
11.42	3.48	20	1.2
12.38	4.82	30	1.3
13.33	5.97	40	1.4
14.28	6.97	50	1.5

1 m³ metan yanması için toplam hava ihtiyacı hesaplanmıştır. λ = 1 için; 1 m³/h metan teorik olarak 9.52 m³/h havaya ihtiyaç duyarken λ = 1.5 için; 1 m³/h metan teorik olarak 14,28 m³/h havaya ihtiyaç duymaktadır.

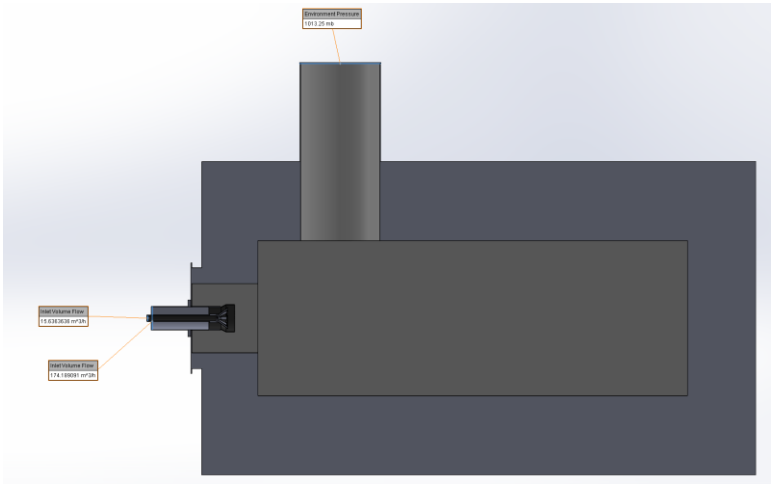
Hidrolik çap, dairesel olmayan boru ve kanal akışlarını ele almak için yaygın olarak kullanılan bir karakteristik uzunluktur. Hidrolik çap hesabında; d_h hidrolik çapı, A yanal alanı ve p çevresini belirtmekte olunan Denklem 4.2 kullanılır ve Tablo 4.12'de değerler gösterilmiştir:

$$d_h = 4 * \frac{A}{p} \tag{4.2}$$

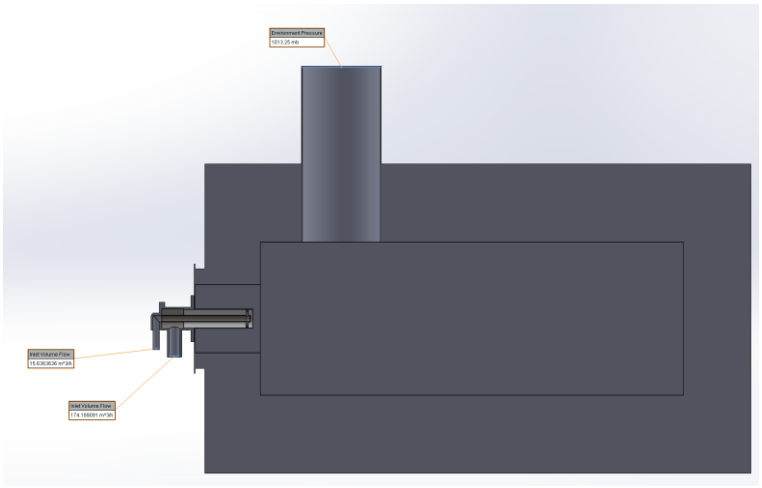
Tablo 4.12 Yakıt ve hava kütle akışı giriş sınır koşulları için hesaplanan hidrolik çap

Yüksek Alev Hızlı Brülör İçin Sınır Şartları			
Kapasite		150	kW
	Hacimsel Debi	Kütlesel Debi	Hidrolik Çap
Doğal Gaz	0.004343	2.910101	0.083566
	m^3/h	kg/s	m
Hava	0.002206	59.27268	0.1665
	m^3/h	kg/s	m
Baca Çıkışı			1.2566
			m

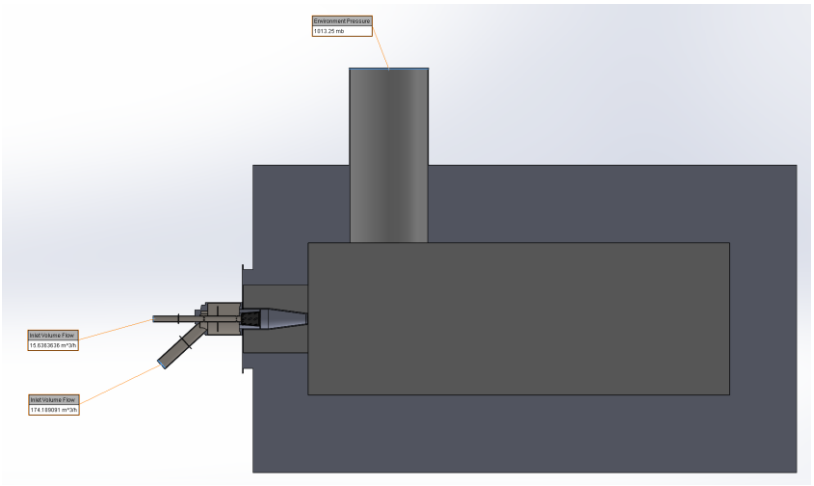
Şekil 4.21'de FloEFD HAD analiz programında sınır şartları gösterilmiştir. Hava ve yakıt girişleri için tanımlanan hacimsel debileri ve baca çıkışı için tanımlanan atmosferik şartlar görülmektedir.



(a)



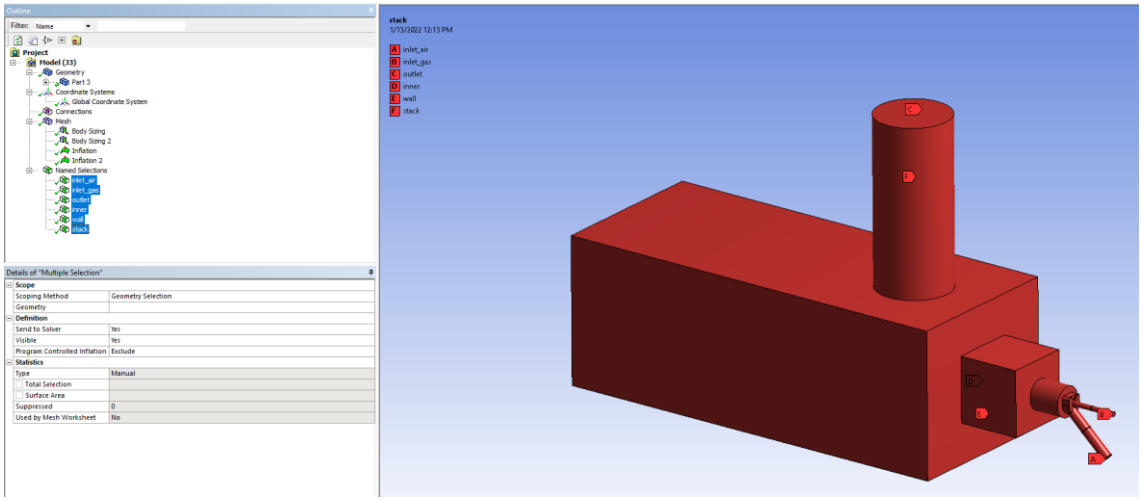
(b)



(c)

Şekil 4.21 Ağ örgülerinin fırın montajı ile hazırlanmış (a) ECO 2 , (b) FPB 200 ve (c) FUSE 2 brülörlerinin sınır koşulları seçimi ve tanımlanan değeleri (FloEFD)

Nümerik çalışmalar sırasında hem yakıt girişi hem de hava girişi için kütle akış giriş debilerinin sınır koşulları kullanılmıştır. Baca borusunun dış kısmı hava ile temas ettiğinden dolayı duvar sıcaklık sınır koşulu tanımlanmıştır. Baca çıkışı için atmosferik basınç çıkış sınır koşulu tanımlanmıştır. Yüksek hızlı brülör geometrisi için sınır koşullarının belirlenen isimleri Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22 Yüksek hızlı brülör geometrisi için adlandırılmış sınır koşulları seçimi (ANSYS)

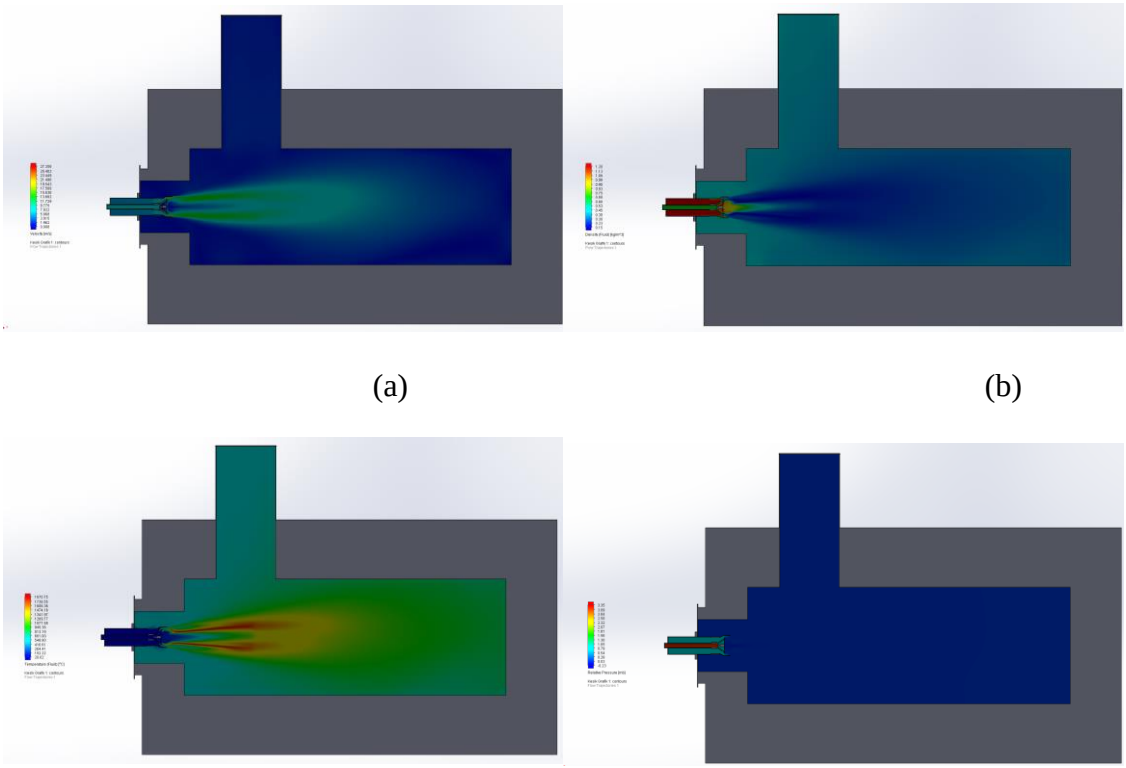
ANSYS FLUENT HAD analiz programında daha farklı sınır koşullarında tanımlanmıştır: Doğal gaz ve hava giriş değerlerinin tanımlanması için kütlesel akış debileri sırasıyla 2.91 g/s ve 59.27 g/s değerleri girilmiştir. Türbülans bölümü ise, doğal gaz için %5 türbülans yoğunluğu, 83.566 mm hidrolik yarıçap ve hava için %10 türbülans yoğunluğu, 166.5 mm hidrolik yarıçaptır. Ayrıca baca çıkışı için atmosferik şartlar tanımlanmıştır. Baca çıkışında %5 geri dönüş türbülans yoğunluğu ve 1256.6 mm hidrolik yarıçap tanımlanmıştır. Bacanın dışarıda kalan kısmına sıcaklık sınır şartı laboratuvar sıcaklığı olan 20 ^{o}C olarak tanımlanmıştır. Geri kalan yüzeyler izolasyonlu olduğundan dolayı duvar olarak tanımlanmıştır.

Doğal gaz ve hava giriş sınır koşulu için sıcaklıkları 15 ^{o}C ve baca çıkışı 1026.85 ^{o}C (1300 K) toplam geri dönüş sıcaklığı olarak kabul edilmiştir.

4.2.3 Reaktif Analizler

ECO 2 ve FPB 200 brülörleri üzerinde yapılan FLOEFD analizleri sonucunda bu iki brülörün de ar-ge test fırınındaki yanma esnasındaki alev formları, yoğunluk, sıcaklık, hız ve göreceli basınç konturları Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'teki gibidir. Bu konturlar

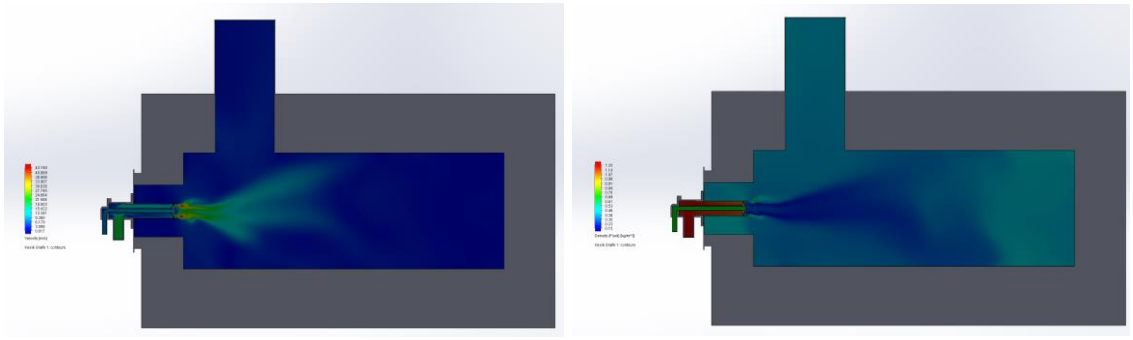
incelenerek bilgi birikimi arttırılmıştır ve tez konusu olan yüksek hızlı brülör için temel fikirler oluşturulmuştur.



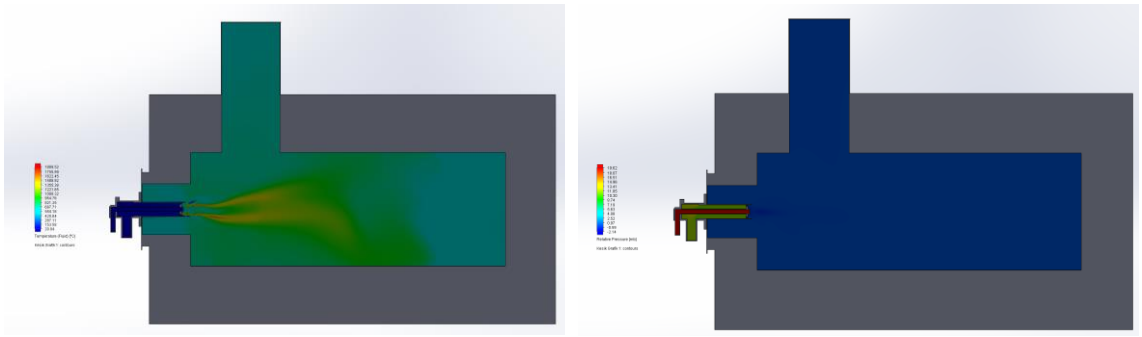
(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.23 150 kW kapasite için ECO 2 brülörü FloEFD reaktan analizlerinin konturların karşılaştırılması (a) hız, (b) yoğunluk, (c) sıcaklık ve (d) göreceli basınç



(a) (b)



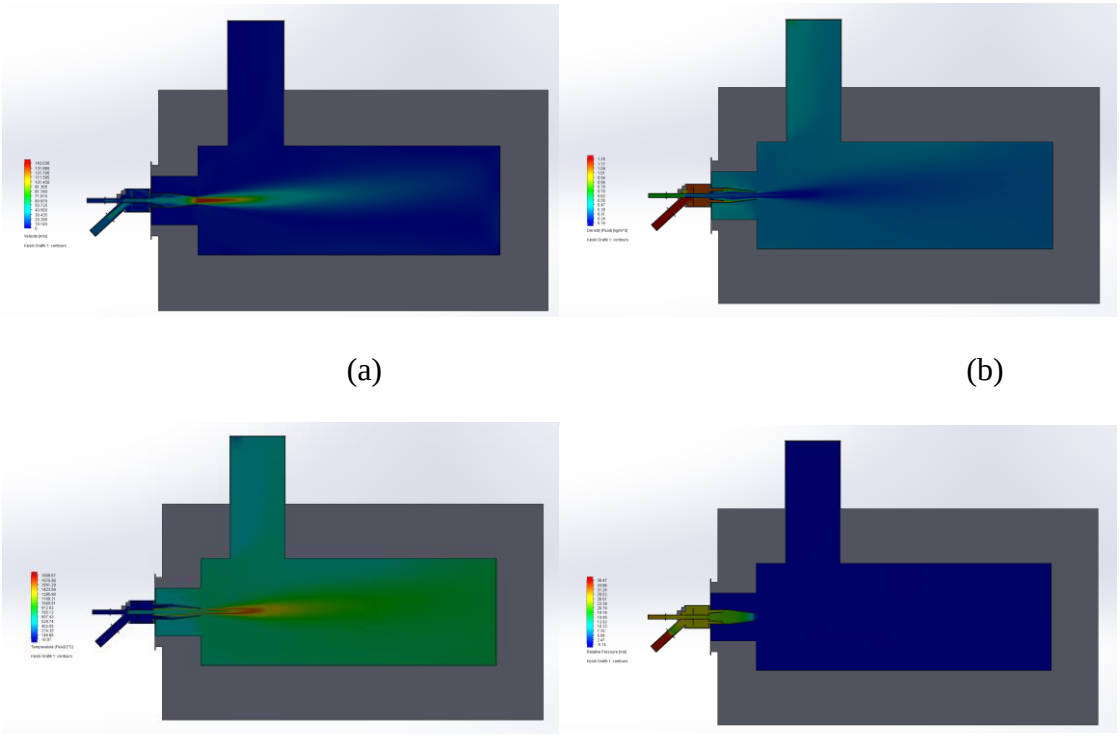
(c) (d)

Şekil 4.24 150 kW kapasite için FPB 200 brülörü FloEFD reaktan analizlerinin konturların karşılaştırılması (a) hız, (b) yoğunluk, (c) sıcaklık ve (d) göreceli basınç

Şekil 4.3 üzerinden incelenilen alev formları ile Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 FloEFD HAD analiz sonuçlarının benzerlik gösterdiği görülmektedir. Hız konturları incelendiğinde ECO 2'nin alev formunun daha geniş ve orta uzunlukta olduğu ve FPB 200'ün alev formunun düzensiz şekilde keskin hatları olarak daha kısa olduğuna erişilmektedir. FUSE 2 yüksek alev hızlı brülörlerin alev formunun optimizasyonu için bu iki brülör incelenmiştir. FloEFD HAD analizleri ve performans testleri sonrasında daha basit konstrüksiyonlu, basınç kaybı daha az, alev hızını yükseltebilecek bir alev borusu çıkış çapı gibi özellikler optimize edilerek yine FLOEFD HAD analizlerinde incelenmesi adına hazırlanmıştır.

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te anlatılan iki farklı analiz ve Şekil 4.3'te gösterilen performans testleri üzerinden edinilen bilgiler ışığında yüksek hızlı brülör için 3B geometri çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda firma bünyesindeki lisanslı SolidWorks program kullanılmıştır. Arzu edilen hız standartlarını sağlayabilen ve testlerde kullanılmış olan

yüksek hızlı brülör FUSE 2 FloEFD analiz sonuçları aşağıdaki Şekil 4.25'teki konturlardaki gibidir:



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.25 150 kW kapasite için FUSE 2 brülörü FloEFD reaktan analizlerinin konturların karşılaştırılması (a) hız, (b) yoğunluk, (c) sıcaklık ve (d) göreceli basınç

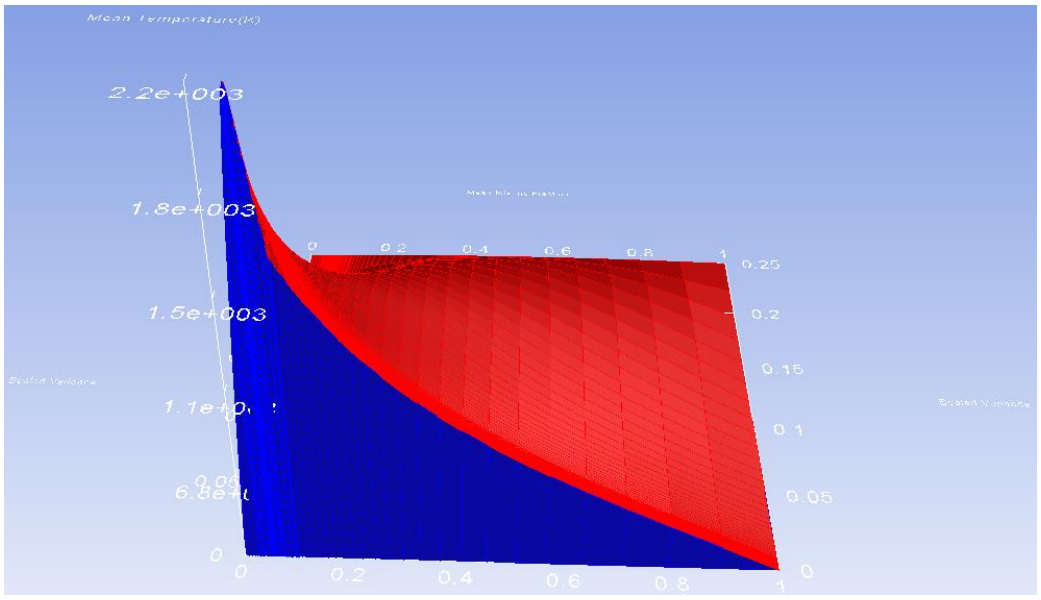
Şekil 4.25'teki hız konturu incelendiğinde alev borusu çıkışından sonra ortalama 90 m/s alev hızının üzerinde değerlere ulaşıldığı görülmektedir. Yoğunluk, sıcaklık ve göreceli basınç konturları incelendiğinde ise, fırın ve brülör sisteminin güvenliğini tehlikeye atabilecek bir durum gözlemlenmemiştir.

Firma bünyesinde üretilen yeni ve inovatif ürünler üzerine ar-ge laboratuvarında performans testleri yapılmadan önce ikinci validasyon sağlanması amacıyla ANSYS FLUENT üzerinden de HAD analizleri gerçekleştirilmektedir.

Yüksek hızlı brülör geometrisinin yanma odası geometrisine montajı için reaktif analizler yapılmıştır. Yanma odası geometrisi izolasyonlu bir fırın olması nedeniyle (baca hariç), termal yükler ve sıcaklık sınırlamaları nedeniyle soğutulmaz, sadece düşük yük koşulları için deneyler yapılabilmektedir.

Türbülanslı akış, k-ε türbülans modeli kullanılarak modellenmiştir. Nümerik çalışmalarda ön karışımsız yanma (non-premixed combustion) modeli ve olasılık yoğunluk fonksiyonu

(probability density function) gibi kimya ile türbülans arasındaki ilişki modeli ve ayrık ordinatlar (DO) radyasyon modeli kullanılmıştır. Hem yakıt hem de hava giriş koşulları için kütlesel debiler kullanılmıştır. Ar-ge test fırınının dış çeperi izolasyonlu olarak tanımlanmıştır. Baca borusu için ise, sabit duvar sıcaklığı dış ortam hava sıcaklığı tanımlanmıştır. Baca çıkışı için atmosferik sınır koşulu olan çıkış basıncı tanımlanmıştır. Analizin kurulumu sırasında olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) kimya ile türbülans arasındaki ilişkiyi aşağıdaki Şekil 4.26'daki grafiğe uygun olacak şekilde sağlamaktadır.

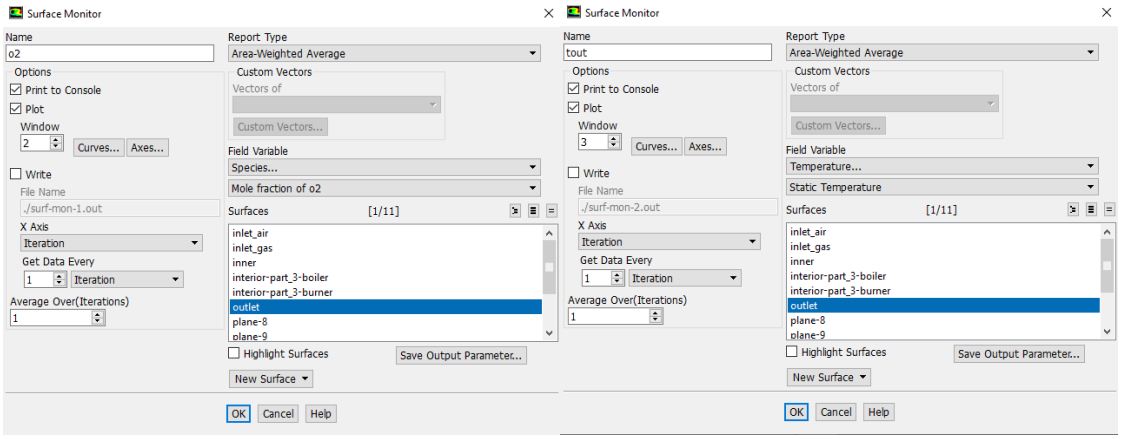



```
Maximum of Mean Temperature(K) is 2.234556e+03 and occurs at  Mean Mixture Fraction = 5.652954e-02 and Scaled Variance = 0.000000e+00.
Minimum of Mean Temperature(K) is 2.881500e+02 and occurs at  Mean Mixture Fraction = 1.000000e+00 and Scaled Variance = 0.000000e+00.
```

Şekil 4.26 Kullanılan Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (Probability Density Function) kimya ile türbülans arasındaki ilişkiyi gösteren modelin grafiği

Yüksek hızlı brülör reaktif analiz vaka çalışmaları, 150 kW ısıl kapasite için % 3 oksijen seviyesi veya hava oranı 1.17 değeri referans alınarak, yapılmıştır. Analiz sınır şartlarında doğal gaz yerine HAD analiz sonuçlarını fazla değiştirmemesi nedeniyle %100 metan kullanılmıştır. [29]

Yakınsama kriterleri olan oksijenin molar seviyesi ve baca çıkış sıcaklığına bağlı olarak HAD analizi sonlandırılmıştır. Bunun nedeni hata fonksiyonlarının düşüşüne göre analizlerin sonlanmasındansa sonuçların arzu edilen şekilde yakınsaması ile tatmin edici sonuçlara ulaşılmaktadır. Baca çıkışındaki oksijenin mol oranı ve baca çıkışındaki atık gaz sıcaklığı tanımlanarak her iterasyonda gözlemlenebilecek şekilde ayarlanmıştır. Bu iki kriter ar-ge test fırınlarında da kullandığımız referanslar olduğundan dolayı yakınsamaları ile sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.27'de yakınsama kriterleri ve Ansys FLUENT üzerinden yüzey monitörleri gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.27 Yakınsama kriterlerinin seçimleri için baca gazındaki ölçülmesi adına (a) mol oksijen oranı ve (b) atık baca gazındaki sıcaklık

Doğal gaz yanması için yaygın olarak kullanılan referans fazla hava değeri (λ) olan 1.17 ve %3 oksijen oranı ile 150 kW ısıl kapasite için uygun sınır şartları tanımlanması ile ilgili geometri için endüstriyel uygulama örneği olan brülör- fırın sisteminde yanmanın sonuçları Şekil 4.28'de ve Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Şekil 4.28'de gaz girişi, hava girişi ve baca gazı çıkışı yüzeylerinden alınan alan ağırlıklı ortalama değerleri incelenmiştir. Bu alan ağırlıklı ortalama değerleri; statik basınç, yoğunluk, hız, statik sıcaklık, metanın mol oranı, oksijenin mol oranı, su mol oranı, karbonmonoksit mol oranı ve karbondioksit mol oranıdır. Yüzeylerden alınan bu değerlerin yanında prosesin daha iyi anlaşılabilmesi adına Şekil 4.31'de ise, çalışma ilgili değerlerin konturlarının görsel haline getirilmesi ile desteklenmiştir.

Area-Weighted Average Static Pressure	(pascal)
inlet_air	3148.3585
inlet_gas	2645.2462
outlet	0
Net	64.723386

(a)

Area-Weighted Average Density	(kg/m3)
inlet_air	1.220186
inlet_gas	0.67849937
outlet	0.30189654
Net	0.31908663

(b)

Area-Weighted Average Velocity Magnitude	(m/s)
inlet_air	22.94726
inlet_gas	8.0434709
outlet	1.8222948
Net	2.207309

(c)

Area-Weighted Average Static Temperature	(k)
inlet_air	288.15005
inlet_gas	288.14999
outlet	1133.8981
Net	1115.9338

(d)

Area-Weighted Average Mole fraction of ch4	
inlet_air	0
inlet_gas	1
outlet	0
Net	0.0042738621

(e)

Area-Weighted Average Mole fraction of o2	
inlet_air	0.21008004
inlet_gas	0
outlet	0.030618899
Net	0.033532942

(f)

Area-Weighted Average Mole fraction of h2o	
inlet_air	0
inlet_gas	0
outlet	0.16240071
Net	0.15895119

(g)

Area-Weighted Average Mole fraction of co	
inlet_air	0
inlet_gas	0
outlet	1.0998926e-08
Net	1.07653e-08

(h)

Area-Weighted Average Mole fraction of co2	
inlet_air	0
inlet_gas	0
outlet	0.08120088
Net	0.079476109

(ı)

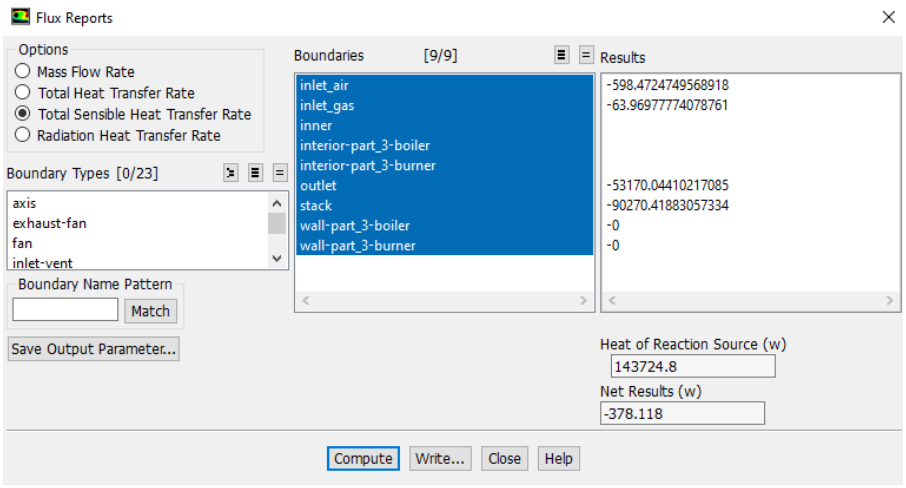
Şekil 4.28 Yapılan HAD analizi sonrasında ortalama sonuçların değerlendirilmesi (a) statik basınç, (b)yoğunluk, (c) hız, (d) sıcaklık, (e) metan, (f) O_2, (g) H_2O , (h) CO ve (ı) CO_2

Denge sınır tabakaları ve tam gelişmiş akışlar için geçerli olan logaritmik yasa, duvarlara yakın hücre merkezleri ile duvarlar arasındaki kabul edilebilir mesafede üst ve alt sınırlar sağlar. Mesafe genellikle y^+ gibi boyutsuz birimle ölçülür. Ağ, duvara bitişik hücrelerin en yakın katmana yerleştirilmesini önlemek için mümkün olduğunca kaba veya yeterince ince yapılmalıdır. Standart duvar fonksiyonları için logaritmik yasa katmanı içinde yer alması y^+ değerinin 30 ile 300 değerleri arasında olmasına işaret etmektedir. Alt sınırda y^+'ın en çok arzu edilen değeri yaklaşık 30'dur. [57]

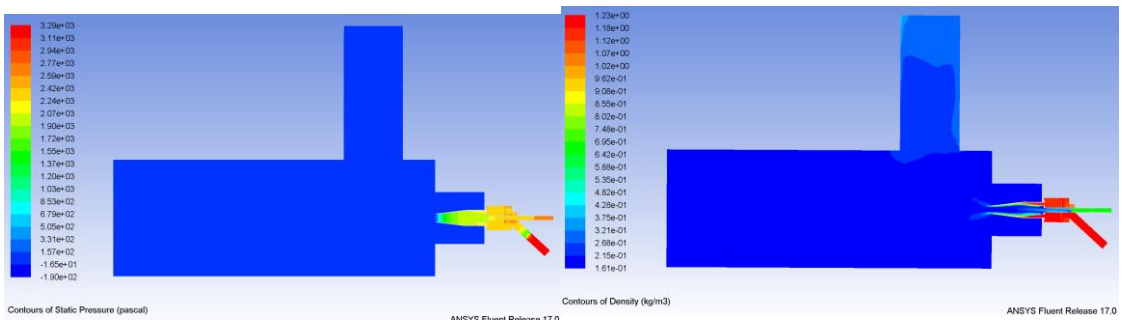
Area-Weighted Average Wall Yplus	
inlet_air	0
inlet_gas	0
inner	0
interior-part_3-boiler	0
interior-part_3-burner	0
outlet	0
plane-8	1.0263517
plane-9	0.96230046
stack	16.920977
wall-part_3-boiler	26.54622
wall-part_3-burner	30.427727
Net	1.6815956

Şekil 4.29 Yapılan HAD analizi sonrasında ortalama y+ sonuçlarının değerlendirilmesi

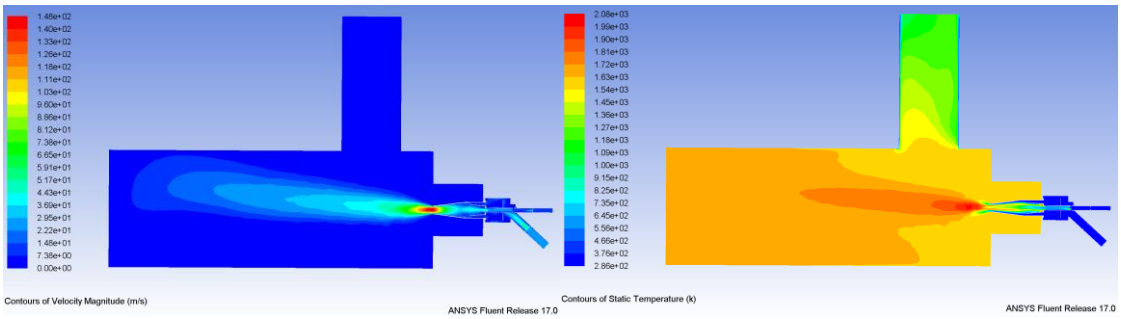
Ansys FLUENT HAD programının raporlama bölümünde Şekil 4.30'da gösterilen HAD analizi sonucu olan ortalama reaksiyon kaynak ısısı görülmektedir. 150 kW ısıl kapasite için sınır şartları düzenlenmiş olan analizin sonucu olarak açığa çıkan reaksiyon ısısına 143.72 kW olarak ulaşılmıştır. Bu durum kayıpların da olduğunu göstermektedir.



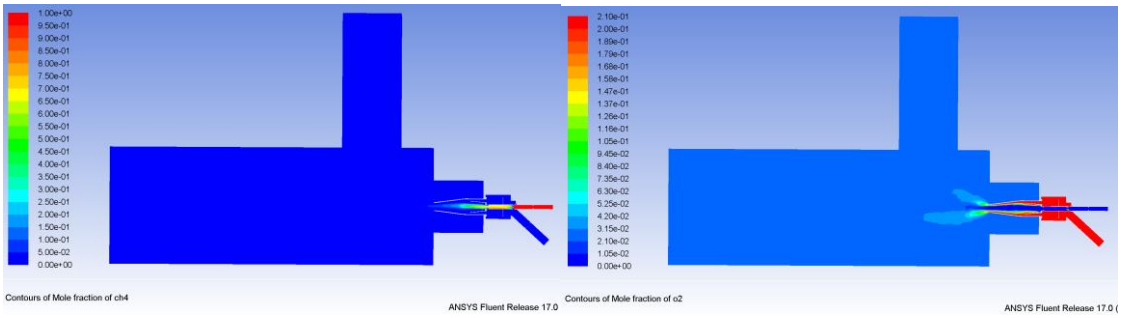
Şekil 4.30 Yapılan HAD analizi sonrasında ortalama ısı



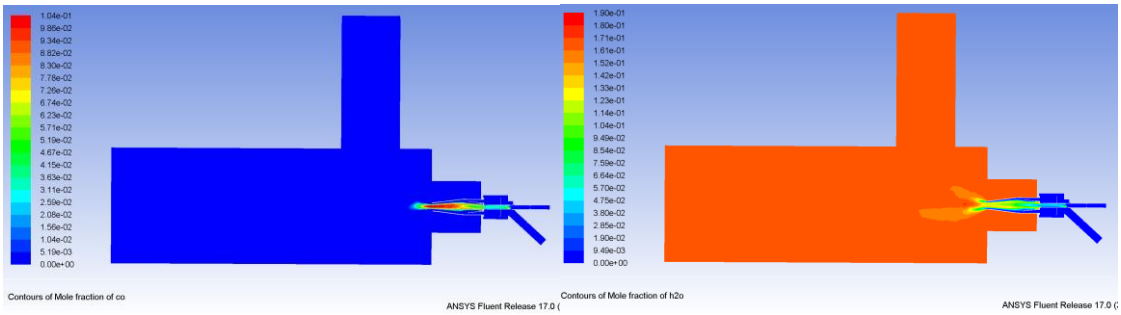
(a) (b)



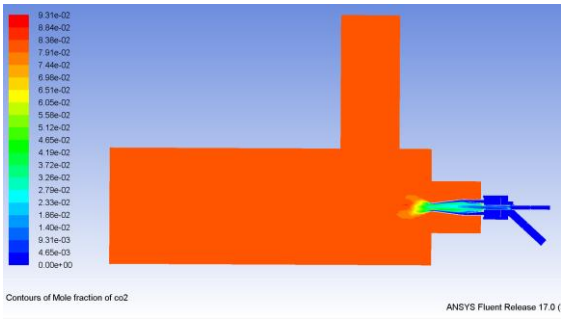
(c) (d)



(e) (f)



(g) (h)



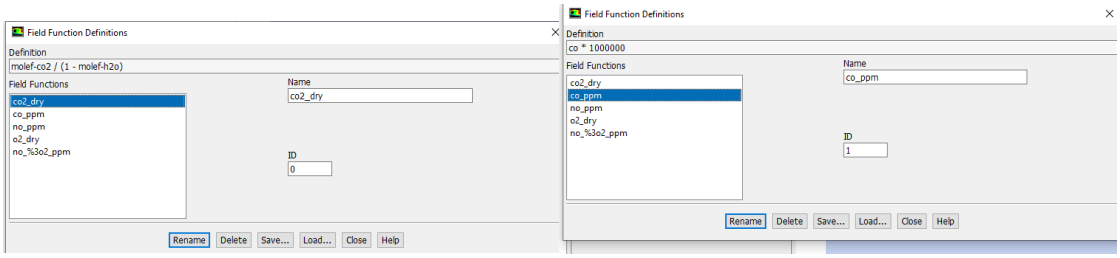
(ı)

Şekil 4.31 Yapılan HAD analizi sonrasında ortalama sonuçların değerlendirilmesi (a) statik basınç, (b)yoğunluk, (c) hız, (d) sıcaklık, (e) metan, (f) O_2, (g) H_2O , (h) CO ve (ı) CO_2

Şekil 4.31'deki hız konturu incelendiğinde alev borusu çıkışından sonra ortalama 90 m/s alev hızının üzerinde değerlere ulaşıldığı Ansys FLUENT HAD analiz programının sonucunda görülmektedir. FloEFD HAD analiz programının sonuçlarını içeren Şekil 4.25 ve Ansys FLUENT HAD analiz programının sonuçlarını içeren Şekil 4.31 incelendiğinde sonuçların büyük ölçülerde paralellik gösterdiğine erişilmiştir. Hem ulaşılan değerler hem de konturlar üzerinden incelenen akış formlarının benzerliği görülmektedir. İlgili konturların Ansys HAD analiz program ile yapılan ikinci doğrulaması ile incelendiğinde ise, fırın ve brülör sisteminin güvenliğini tehlikeye atabilecek bir durum olmadığına kanaat getirilirilmiştir.

4.3 Nümerik ve Deneysel Çalışmaların Karşılaştırılması

%100 metan kullanılarak gerçekleştirilen reaktif analiz çalışmaları için nümerik ve deneysel çalışmaların karşılaştırması Tablo 4.13'de gösterilmiştir. Deneylerde ve sayısal çalışmalarda farklılıklar ΔO_2 [%], ΔCO_2 [%], ΔCO [ppm], Δlambda, ΔSıcaklık [°C] ve ΔIsıl Kapasite [W] olarak bulunmuştur. Bu karşılaştırma çalışması ile nümerik değerlerin deneyler esnasında ölçülen değerlere yakın olduğu gösterülmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.32 Yapılan HAD analizi sonrasında (a) CO2 (kuru) ve (b) CO [ppm] hesapları

$$CO_{2,kuru}[\%] = \frac{CO_{2,ıslak}[\%]}{(1 - H_2O)[\%]} \quad (5.1)$$

$$CO\ [ppm] = CO * 1000000 \quad (5.2)$$

Yüksek hızlı aleve sahip brülör olan FUSE 2 150 kW ısıl kapasitede %3 oksijen seviyesi için yapılan deneysel çalışmalar ve HAD analizlerini içeren nümerik çalışmalar Tablo 4.13'te karşılaştırılarak hata yüzdelerine ulaşılmıştır. Tablo 4.13'teki veriler oluşturulurken, Şekil 4.32'deki karbondioksit (kuru) ve karbonmonoksit ppm birimine dönüşümü için hesaplarda Denklem 5.1 ve Denklem 5.2 kullanılmıştır. Sonuç olarak oksijen, karbondioksit, karbonmonoksit, hava gaz oranı (lambda), baca çıkışındaki atık

gaz sıcaklığı ve ulaşılan ısıl kapasite karşılaştırılmıştır. Hata oranlarının % 8'den daha düşük olduğu görülmüştür.

Tablo 4.13 150 kW ısı kapasiteli yüksek hızlı brülör olan FUSE 2 deneysel ve nümerik çalışmaların %3 oksijen ve 1.17 lambda referansında elde edilen değerlerin karşılaştırılması

FUSE 2	Birim	Deneysel	Nümerik	Hata Yüzdesi
Özellik		Değer	Değer	%
O_2	%	3	3,062	-2.067
CO_2	%	9.87	9.695	1.77
CO	Ppm	0	0.011	1.1
Lambda	-	1.17	1.172	-0.171
Sıcaklık	^oC	860.7481	800	7.06
Isıl Kapasite	W	150000	143724.8	4.18

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında firma bünyesinde geliştirilmiş ve ürün ailesinde mevcut olan iki adet standart olarak proseslerde kullanılabilen brülör geometrilerinin deneysel ve nümerik çalışmaları yapılmıştır. Bu brülörler ECO 2 ve FPB 200 adlı ürünlerdir. Bu çalışma ile ürünlerin ar-ge test fırınında hem deneysel çalışmaları desteklemek adına performans testleri tekrarlanmıştır hem de nümerik çalışmaları desteklemek için Siemens FloEFD programı ile hesaplamalı akışkanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

50,100 ve 150 kW ısıl kapasitelerde ve 1.1, 1.17, 1.2, 1.3, 1.4 ve 1.5 hava oranlarında (lambda) ECO 2 ve FPB 200 brülörleri deneysel çalışmada kullanılmıştır. Doğal gaz yakılacak yakıt ve hava oksitleyici olarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Alev formları, basınçlar ve sıcaklıkların yanı sıra baca gazı analiz cihazı ile emisyon değerleri incelenmiştir. Bu emisyon değerleri baca gazı analiz cihazının özel rapor çıktısı olarak incelenmiştir ve yüksek lisans tez çalışmasını desteklemesi için oksijen, karbondioksit, karbonmonoksit ve nitrikoksit emisyon değerleri özel olarak incelenmiştir. Bu emisyon değerleri farklı kapasitede ve farklı hava oranlarında yapılan testlerin sonuçları not alınmış ve daha anlaşılır olması adına grafikler haline getirilmiştir.

Hava fazlalık oranı olan lambda değerinin arttırılması durumunda maksimum karbondioksit değeri sabit olacağından dolayı, test sonuçlarından da görüleceği şekilde karbondioksit ölçüm değerlerinde azalma meydana geleceği gösterilmiştir.

Hava fazlalık oranı olan lambda değerinin arttırılması ile atık baca gazında karşılaşılan NO_x emisyon değerlerinin azalan eğimde olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin havanın artması ile brülörün merkezinde oluşan alevin soğutulmasıdır. Alev soğutulduğunda termal kaynaklı NO_x oluşumu azalmaktadır.

50, 100 ve 150 kW ısıl kapasitelerde testleri yapılan ECO 2 ve FPB 200 adlı ürünler için karbondioksit emisyon değerleri neredeyse sabit kalırken, NO_x emisyon değerleri farklı eğilimlerdedir. Isıl kapasite arttırılırken, ECO 2 adlı ürün için NO_x emisyonları sabit kaldığı ancak FPB 200 adlı üründe NO_x emisyonlarının dramatic şekilde düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Bu bilgiler ışığında farklı brülör tasarımlarının önemi ortaya çıkmaktadır çünkü farklı kapasitelerde yine birbirinden farklı kalitelerde yanma elde edilmektedir.

Deneysel çalışması yapılan ECO 2 ve FPB 200 adlı ürünlerin FloEFD reaktan analizlerinin konturlarının karşılaştırılması hız, yoğunluk, sıcaklık ve göreceli basınç için yapılmıştır. Deneysel çalışmada gözlemlenmiş olan alev formlarının özellikle hız konturlarındaki gibi olduğu bilgisine ulaşılmıştır.

İlgili brülörlerin test ve nümerik sonuçlarından yola çıkılarak yüksek hızlı aleve sahip brülör tasarımları yapılmıştır. Bu tasarımlar yine FloEFD HAD analiz programında diğer ürünlerdeki gibi incelenilerek endüstrinin de beklediği alev formuna ve hızına sahip ürün haline optimize edilerek FUSE 2 adıyla üretimi gerçekleştirilmiştir.

Üretiminden önce FloEFD HAD programında yapılan tam kapasite analizleri ile üç brülörün de alev formları hakkında görseller elde edilmiştir ve kendi içlerinde karşılaştırma imkanı bulunmuştur. Yüksek hızlı brülör tasarımlarından arzu edilen standartları sağlayabilen geometri çalışmada yer almaktadır ve bu geometri ikinci bir doğrulama elde edilmesi adına Ansys FLUENT HAD programında da analiz edilmesi için hazırlanmıştır. Oluşturulan ve optimize edilen ağ, çarpıklık ve orthogonal kalite ile incelenerek nümerik çalışmalar için uygun eleman sayısında hazırlanmıştır. Daha sonra bu ağ ile reaktif analiz çalışmaları yapılmıştır. Reaktif vaka çalışmaları test fırını geometrisine montajı yapılmış olan yüksek hızlı brülör geometrisi ile icra edilmiştir. Reaktif çalışmaların sonuçları, static basınç, yoğunluk, hız, sıcaklık ve metan, oksijen, karbonmonoksit, karbondioksit gibi emisyonların oranlarını içeren görseller ile incelenmektedir.

Deneysel sonuçlar ile nümerik çözümler karşılaştırıldığında hata oranı % 8'den daha düşük olarak bulunmuştur.

Nümerik çalışmalarda, ölçülen duvar sıcaklığı duvar sıcaklığı sınır koşulu olarak tanımlandığında, sayısal çalışma sonuçları deneysel değerlerle karşılaştırıldığında daha doğrudur.

Deneysel ve nümerik çalışmaları yapılan, firma bünyesinin mevcut ürün ailesinde yer kazanan FUSE 2 adlı brülör için yüksek alev hızlarına erişilmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir. 90 m/s üzeri alev hızları yüksek alev hızları olarak adlandırılmaktadır ve nümerik olarak incelendiğinde ortalama 140 m/s alev hızına kadar elde edildiği görülmektedir. Alev formu diğer iki brülörde elde edilen alev formlarına göre daha kararlıdır. Ulaşılan yüksek hız nedeniyle test fırının içerisinde endüstride beklenildiği gibi daha homojen bir sıcaklık dağılımına rastlanılmaktadır. Bu çalışma ile ortaya çıkarılan

ürünün gelecekte firma içerisinde ve çalışmadan yararlanacak birçok araştırmacı ve ar-ge mühendislerine yararlı bir kaynak olacaktır.

KAYNAKÇA

[1] F. Hamzaoğlu, "Ramöz makinelerinde verim arttırma yöntemleri ve ekonomizer uygulaması," Yüksek lisans tezi, Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji, Trakya Univ., Edirne, TURKEY, 2019.

[2] W. Bartok and A. F. Sarofim, *Fossil fuel combustion : a source book*. New York: Wiley, 1991.

[3] B. Lewis and G. von Elbe, "Combustion, flames, and explosions of gases," p. 739, 1987.

[4] S. E. Forman and A. Williams, "Combustion Science and Engineering Series".

[5] R. Strehlow, *Fundamentals of combustion*. Scranton Pa.: International Textbook Co., 1968.

[6] H. J. Curran *et al.*, "Combustion: the formation and emission of trace species," *SAE Technical Papers*, Jan. 1977, doi: 10.4271/2001-01-0653.

[7] J. A. Barnard, J. N. Bradley, and J. N. Bradley, "Flame and combustion," p. 308, 1985.

[8] S. R. Turns, "An introduction to combustion : concepts and applications," p. 732.

[9] J. Griswold, *Fuels, combustion, and furnaces*, 1st ed ... New York ;London: McGraw-Hill Book Company, 1946.

[10] C. E. Baukal, "Industrial Flames," *A Gallery of Combustion and Fire*, pp. 107–139, Jun. 2020, doi: 10.1017/9781316651209.007.

[11] Edmond. Perthuis, "La combustion industrielle," p. 212, 1983.

[12] E. L. Keating, "Applied combustion," p. 575.

[13] G. L. Borman and K. W. Ragland, *Combustion engineering*. Boston : McGraw-Hill, 1998.

[14] Industrial Heating Equipment Association. Combustion Division., *Combustion technology manual.*, 5th ed. Arlington Va.: Combustion Division of the Industrial Heating Equipment Association, 1994.

[15] R. J. (Richard J. Reed and North American Mfg. Co., “North American combustion handbook : a basic reference on the art and science of industrial heating with gaseous and liquid fuels”.

[16] R. Pritchard, J. J. Guy, and N. E. Connor, *Handbook of industrial gas utilization : engineering principles and practice*. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1977.

[17] American Gas Association., “Gas Engineers Handbook : Fuel engineering practices.,” 1965.

[18] R. D. H. Reed, “Furnace operations,” p. 230, 1981.

[19] C. E. Baukal, *Industrial burners handbook*. CRC Press, 2004.

[20] J. B. (Of the M. I. of T. Heywood, “Internal combustion engine fundamentals,” p. 1028.

[21] Z. Wang, “MEASUREMENT OF LAMINAR BURNING SPEED AND FLAME INSTABLITY STUDY OF SYNGAS/OXYGEN/HELIUM PREMIXED FLAME,” 2016.

[22] C. Halpern, “Measurement of flame speeds by a nozzle burner method,” *undefined*, vol. 60, no. 6, p. 535, Jun. 1958, doi: 10.6028/JRES.060.053.

[23] O. Spangelo, “Experimental and Theoretical Studies of a Low NOx Swirl Burner,” 2004.

[24] R. Saripalli, “Simulation of Combustion and Thermal Flow inside an Industrial Boiler,” *undefined*, 2004.

[25] A. S. Veríssimo, A. M. A. Rocha, and M. Costa, “Importance of the inlet air velocity on the establishment of flameless combustion in a laboratory combustor,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 44, pp. 75–81, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2012.05.015.

[26] J. C. Lezcano-Benítez, D. Correa-Restrepo, A. A. Amell-Arrieta, and F. J. Cadavid-Sierra, “Numerical simulation of high pressure burner with partially premixed flame,” *CTyF - Ciencia, Tecnologia y Futuro*, vol. 4, no. 4, pp. 89–104, 2011, doi: 10.29047/01225383.231.

[27] “Charles E Baukal - Industrial combustion testing (2011, Taylor & Francis)”.

[28] E. Uza, “Numerical and experimental investigation of a domestic natural gas burner and analysis of modifications to achieve low nox emissions,” M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Marmara Univ., Istanbul, TURKEY, 2017.

[29] M. S. Cellek, “Sanayi tipi brülör-kazan sisteminde yanma emisyonlarinin incelenmesi,” Doktora tezi, Makine Mühendisliği, Yıldız Teknik Univ., Istanbul, TURKEY, 2017.

[30] M. K. Büyükakın, “Kare gaz brülör-kazan sistemlerinde yanma ile emisyon analizleri ve optimizasyon,” Doktora tezi, Makine Mühendisliği, Trakya Univ., Edirne, TURKEY, 2019.

[31] Cecchetto, F., (2015) “Combustione e Formazione Di Inquinanti Laminar Flame Speed and Sensitivity Analysis, Exam of Combustione e Formazione Di Inquinanti-Prof.A.Frassoldati”,https://www.docsity.com/it/laminar-flame-speed-and-sensitivity-analysis/616742/, 24.01.22

[32] Telli Z.K., (1998). Yakıtlar ve Yanma, Üçüncü Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.

[33] Charles E.B., (2013) The John Zink Hamworthy Combustion Handbook Fundamentals Vol.1, 2nd Edition, CRC Press, Oklahoma

[34] Riello S.p.A (2001) Forced Draught Burner Handbook, 1st Edition, Riello S.p.A, Legnago

[35] Onat, K., Genceli, O.F. ve Arısoy A., (1998). Buhar Kazanlarının Isıl Hesaplamaları, Genişletilmiş 3. baskı, Teknik Yayıncılık Tanıtım A.Ş., İstanbul.

[36] Encyclopædia Britannica, Methane Chemical Compound, https://www.britannica.com/science/methane, 24 Ocak 2022.

[37] Yılmaz, İ., (2006). Model Bir Yakıcıda Hidrojen-Metan Karışımının Yanmasının Sayısal Ve Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

[38] Johnston M., (2009) Incomplete Combustion, Tehnical Services Newsletter 1-800- 944-2840, Beaulieu of America

[39] Bilgin A., (2001) Kazanlarda Baca Gazı Analizlerinin Değerlendirilmesi İç Soğuma Kayıplarının İrdelenmsi, 5. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, TMMOB, İzmir

[40] Chu H., Stoichiometriic Calculations, National Cheng Kung University Lecture Notes, Tainan City

[41] Basu P., Kefa C., Jestin L. (2000) Boilers and Burners Desig and Theory, 1st Edition, Springer, New York

[42] Strehlow R.A., (1993) Combustion Fundamentals, 1st Edition, Krieger Pub Co.

[43] EN 676:2008 Automatic Forced Draught Burners for Gaseous Fuel

[44] EN 267:2011 Forced Draught Oil Burners - Definitions, Requirements, Testing,Marking

[45] Özsarfati R., Marg B.S.Z., Yanma Temelleri ve Brülörler, Denko Isı Kontrol Tekniği A.Ş, Istanbul

[46] Determination of emissions from appliances burning oil and gaseous fuels during type-testing Annex-1, 1998, 6th Edition

[47] Mevzuat bilgi sistemi. https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7265&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5, 24.01.2022

[48] Park, C. ve Liu, S.T, (1998). "Performance of A Commercial Hot Water Boiler", Report NISTIR 6226, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg.

[49] Akçaoğlu, A., (2005)."Yüksek Kapasiteli Endüstriyel Sıvı Yakıtta Rotatif Tip Brülörler", TESKON2005, Doğal gaz Semineri, 127–141.

[50] TMMOB Makina Mühendisleri Odası., (2001). Periyodik kontrol mühendis el kıtabı-II Basınçlı kaplar.pdf, Yayın No: MMO/2001/272-2, Özkan Matbaacılık Ltd. Şti., Ankara.

[51] Küçükçalı, R., (1993). Isısan Çalışmaları No. 70 Kalorifer Tesisatı, Isısan Isıtma ve Klima Sanayii A.Ş Yayınları.

[52] Termo Isı Sistemleri San. ve Tic. A.Ş., (2022).

[53] ABB Automation Products GmbH, http://new.abb.com/products/measurementproducts/flow/thermal-mass-flowmeters/sensyflow-fmt500-ig, 24 Ocak 2022.

[54] ÇORDAŞ Çorlu Doğalgaz Dağıtım Anonim Şirketi, 2022.

[55] Kline S, McClintock F. Describing uncertainties in single-sample experiments. Mech Eng 1953.

[56] A. F. Savaş ve C. Kocabaş, "Endüstriyel Kazanlarda Yanma Veriminin Süreç Geliştirme Teknikleri Kullanılarak İyileştirilmesi," 2019.

[57] ANSYS Inc. (2009). ANSYS Fluent User's Guide-Release 12.0.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. KILIÇ B., HAMZAOĞLU F.,KORKMAZ S., DALKILIÇA.S., Yüksek Alev Hızlarına Sahip Endüstriyel Yakıcılarda Yanma Sonucu Oluşan Emisyonların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizleri İle İncelenmesi, 3. Uluslararası Mühendislik Ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, 16-17Nisan 2020.