GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Gazi

1926

HERMETİK TİP BİRLEŞİK GAZ YAKICI CİHAZLARDA BİYOGAZ YAKITININ KULLANILABİLİRLİĞİNİN SAYISAL VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Ahmet Haşim TOSLAK

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet Haşim TOSLAK

23/10/2024

HERMETIK TİP BİRLEŞİK GAZ YAKICI CİHAZLARDA BİYOGAZ YAKITININ KULLANILABİLİRLİĞİNİN SAYISAL VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Ahmet Haşim TOSLAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Yenilenebilir, farklı tip yakıtların ısıtma sistemlerinde kullanılabilmesinin dünya enerji kaynaklarının yönetimine önemli katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Bu kapsamda biyogazın özellikle ısıtma sistemlerinde kullanılabilirliğinin araştırılması gerekmektedir. Literatür incelendiğinde doğalgaz veya LPG ile çalışan hermetik tip gaz yakıcı cihazlarda biyogazın yakıt olarak kullanılabilirliğine ilişkin çalışma görülmemiştir. Bu tezin, doğalgaz ile çalışan ısıtma sistemlerinin biyogazla da çalıştırılabildiğini göstermesi beklenmekte ve literatüre önemli katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, bu çalışmada hermetik tip gaz yakıcı cihazlarda biyogazın kullanılabilirliği sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmalarda, hacimce %60 CH_4 - %40 CO_2, %70 CH_4 - %30 CO_2, %80 CH_4 - %20 CO_2 ve %90 CH_4 - %10 CO_2 karışımlı biyogazlar kullanılmış, sıcaklık ve NOx dağılımları elde edilmiştir. Sayısal analizde türbülans modeli olarak eddy-viskozite modeli olarak da bilinen standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Hem sayısal hem de deneysel çalışmalar için eşdeğerlik oranı olarak 0,75 kullanılırken, deneysel çalışmalarda 13 kW güç, sayısal modellemelerde ise hem 31 kW hem de 13 kW güç için sonuçlar elde edilmiştir. Sayısal çalışmalarda farklı giriş sıcaklıkları ve farklı O_2 oranları ile de sıcaklık ve NOx dağılımları elde edilmiştir. Çalışmalar sonucunda yakıt karışımındaki CH_4 konsantrasyonunun alev sıcaklıkları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yakıt karışımındaki CH_4 konsantrasyonu azaldıkça alev sıcaklıklarının azaldığı ve bunun sonucunda NOx miktarının düştüğü görülmüştür. Ayrıca, hava ön ısıtmanın ve oksijen oranın da alev sıcaklıklarını önemli oranda etkilediği sonucu elde edilmiştir.

Bilim Kodu	:	92801
Anahtar Kelimeler	:	Biyogaz, yanma, kombi, HAD, emisyon
Sayfa Adedi	:	77
Danışman	:	Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE USABILITY OF BIOGAS FUEL IN HERMETIC TYPE COMBINED GAS BURNERS

(Ph. D. Thesis)

Ahmet Haşim TOSLAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

It is considered that the use of different types of renewable fuels in heating systems will make a significant contribution to the management of the world's energy resources. In this context, the usability of biogas, especially in heating systems, needs to be investigated. When the literature is examined, there is no study on the usability of biogas as a fuel in hermetic type gas burner devices operating with natural gas or LPG. This thesis is expected to show that natural gas-powered heating systems can also be operated with biogas and is considered to make a significant contribution to the literature. In this context, in this study, the usability of biogas in hermetic type gas burners is investigated numerically and experimentally. In the studies, biogas mixed with 60% CH4 - 40% CO2, 70% CH4 - 30% CO2, 80% CH4 - 20% CO2 ve 90% CH4 - 10% CO2 by volume were used and temperature and NOx distributions were obtained. The standard k-ε turbulence model, also known as the eddy-viscosity model, was used as the turbulence model in the numerical analysis. While 0.75 was used as the equivalence ratio for both numerical and experimental studies, results were obtained for 13 kW power in experimental studies and for both 31 kW and 13 kW power in numerical modeling. In numerical studies, temperature and NOx distributions were also obtained with different inlet temperatures and different O2 rates. As a result of the studies, it was observed that the CH4 concentration in the fuel mixture has a significant effect on flame temperatures. It has been observed that as the CH4 concentration in the fuel mixture decreases, flame temperatures decrease and as a result, the amount of NOx decreases. Additionally, air preheating and oxygen content in the oxidizer significantly affect flame temperatures.

Science Code	:	92801
Key Words	:	Biogas, combustion, domestic boiler, CFD, emission
Page Number	:	77
Supervisor	:	Assoc. Prof. Halil İbrahim VARİYENLİ

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca yardımı ve değerli katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ'ye, çalışmamın her anında hoşgörü ve sabırla bana yardımcı olan Prof. Dr. Serhat KARYEYEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan başta hayat arkadaşım Ayşe Gül TOSLAK olmak üzere tüm değerli aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel düzeneklerin hazırlanmasında 123M232 Proje Numarası ile TÜBİTAK tarafından verilen mali destek için teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel düzeneklerin hazırlanmasında FDK-2022-7645 Proje Numarası ile Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) biriminin vermiş oldukları mali destekten dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

3. BİYOGAZ VE YANMA 11

3.1. Biyogaz Oluşumu 11

3.2. Biyogaz Üretiminde Etkili Olan Faktörler 13

3.2.1. Reaktör sıcaklığı 13

3.2.2. pH 13

3.2.3. C/N oranı 13

3.2.4. Organik yükleme hızı 14

3.2.5. Bekletme süresi 14

3.3. Biyogaz İçeriği 14

3.4. Yanma 16

3.5. NOx Oluşum Mekanizmaları 19

4. KOMBİ SİSTEMLERİ 23

4.1. Bacalı Kombiler 24

4.2. Hermetik Kombiler 24

Sayfa

4.3. Yoğuşmalı Kombiler 26
4.4. Kombi Yanma Odası 27
5. SAYISAL MODEL 29
5.1. Temel Denklemler 29
5.2. Türbülans Modelleri 31
5.2.1. Standart k-ε türbülans modeli 31
5.2.2. Realizable k-ε türbülans modeli 32
5.3. Modelleme 33
5.4. Ağ Bağımsızlaştırma 35
5.5. Türbülans Modeli 37
6. DENEY DÜZENEĞİ 39
7. BULGULAR VE TARTIŞMA 45
7.1. Sayısal Analiz Sonuçları 45
7.1.1. Metan içeriğinin etkisi 45
7.1.2. Hava ön ısıtmanın etkisi 50
7.1.3. Oksijen konsantrasyonun etkisi 55
7.2. Deney Sonuçları 59
7.2.1. Sıcaklık sonuçları 60
7.2.2. NO_x emisyonları 62
7.3. Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması 63
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 69
KAYNAKLAR 71
ÖZGEÇMİŞ 77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Biyogazın içeriği ve enerji eşdeğeri 15

Çizelge 3.2. Biyogaz ve doğalgazın içerikleri 16

Çizelge 5.1. Element sayısı 76308'de ağ yapısı kalitesi 36

Çizelge 6.1. Deneyde kullanılan cihazların özellikleri 43

Çizelge 7.1. Deneyler sırasındaki koşullar ve debiler..... 60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. 2023 yılı konut abonelerinin doğal gaz tüketimlerinin kullanım türüne göre dağılımı (%) 2

Şekil 3.1. Anaerobik bozunma 11

Şekil 3.2. Hidroliz reaksiyonu ile küçük moleküllerin oluşumu 12

Şekil 3.3. NO formasyonlarının gösterimi 20

Şekil 3.4. Yanma sıcaklığının farklı NOx türlerinin oluşumuna etkisi 21

Şekil 4.1. Bacalı tip kombi bileşenleri 24

Şekil 4.2. Hermetik tip kombi bacası şematik görünümü 25

Şekil 4.3. Hermetik tip kombi bacası 25

Şekil 4.4. Yoğuşmalı kombinin çalışma şekli 26

Şekil 5.1. Hermetik tip kombi yanma odası 34

Şekil 5.2. Ağ yapısı genel görüntü 34

Şekil 5.3. Ağ yapısı detay görüntü 35

Şekil 5.4. Element sayısına göre sıcaklık değerleri 36

Şekil 5.5. Türbülans modellerinin karşılaştırılması 37

Şekil 6.1. Deney setinin şematik gösterimi 39

Şekil 7.1. 31 kW güç için metan içeriğinin alev sıcaklığına etkisi 46

Şekil 7.2. 13 kW güç için metan içeriğinin alev sıcaklığına etkisi 46

Şekil 7.3. Yakıt karışımına göre oluşan sıcaklık konturları 47

Şekil 7.4. Yanma odası boyunca sıcaklık değişimi 48

Şekil 7.5. 31 kW güç için yakıt karışımına göre NO_x değişimi 49

Şekil 7.6. Yanma odası boyunca NO_x değişimi 50

Şekil 7.7. Farklı ön ısıtma havaları ile yanma sonu sıcaklıklarının değişimi 51

Şekil 7.8. %60 CH_4 oranlı yakıt için farklı ön ısıtma havaları ile oluşan sıcaklık konturları 52

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.9. %60 CH_4 – %40 CO_2 karışımı için hava ön ısıtmanın yanma odası boyunca sıcaklık profili üzerinde etkisi 53

Şekil 7.10. Farklı ön ısıtma havaları ile NO_x değişimi 54

Şekil 7.11. Hava ön ısıtmanın %60 CH_4 – %40 CO_2 yanması için yanma odası boyunca NO_x emisyonu üzerinde etkisi 55

Şekil 7.12. Farklı hacimsel O_2 konsantrasyonlarının alev sıcaklıklarına etkisi 56

Şekil 7.13. %60 CH_4 oranlı yakıt için farklı hacimsel O_2 konsantrasyonları ile oluşan sıcaklık konturları 57

Şekil 7.14. Oksijen konsantrasyonun %60 CH_4 – %40 CO_2 yanması için yanma odası boyunca sıcaklık üzerinde etkisi 57

Şekil 7.15. Farklı hacimsel O_2 konsantrasyonlarının NO_x oluşumuna etkisi 58

Şekil 7.16. Oksijen konsantrasyonun %60 CH_4 – %40 CO_2 yanması için yanma odası boyunca NO_x emisyonu üzerinde etkisi 59

Şekil 7.17. Yakıt karışımlarının ölçüm noktalarındaki alev sıcaklıkları 60

Şekil 7.18. Mesafeye göre sıcaklık değişimleri 61

Şekil 7.19. Farklı yakıt karışımlarına göre NO_x değişimi 62

Şekil 7.20. Sayısal ve deneysel olarak yanma odası boyunca sıcaklıklar 64

Şekil 7.21. Farklı karışımlı yakıtlar için sayısal ve deneysel olarak elde edilen sıcaklıklar 64

Şekil 7.22. Ölçüm noktası-1 için farklı karışımlı yakıtların karşılaştırılması 65

Şekil 7.23. Ölçüm noktası-2 için farklı karışımlı yakıtların karşılaştırılması 66

Şekil 7.24. Ölçüm noktası-3 için farklı karışımlı yakıtların karşılaştırılması 66

Şekil 7.25. Ölçüm noktası-4 için farklı karışımlı yakıtların karşılaştırılması 67

Şekil 7.26. Farklı karışımlı yakıtlar için sayısal ve deneysel olarak elde edilen NO_x değerleri 67

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. Yanma odası 27

Resim 6.1. Kombi genel görünüm 40

Resim 6.2. Yanma odası ve sıcaklık ölçüm noktaları 41

Resim 6.3. Baca gazı ölçümü 41

Resim 6.4. Deney düzeneği 42

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
CH_4	Metan
CO	Karbon monoksit
°C	Celcius
CO_2	Karbondioksit
G	Türbülans kinetik enerjisi üretimi
h	Entalpi
H_2O	Su buharı
H_2S	Hidrojen sülfür
k	Türbülans kinetik enerjisi
K	Kelvin
kcal	Kilokalori
kg	Kilogram
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-saat
L	Litre
m^3	Metreküp
MJ	Megajoule
N_2	Azot
NO_x	Azot oksit
NO	Azot monokoksit
O_2	Oksijen
OH	Hidroksil
Q	Isı transferi
SO_2	Kükürt dioksit
T	Sıcaklık

Simgeler	Açıklamalar
ρ	Yoğunluk
μ	Vizkozite
ε	Yayılıma oranı
ϕ	Eşdeğerlik oranı

Kısaltmalar	Açıklamalar
BEPA	Biyokütle Potansiyel Atlası
BG	Beygir gücü
EDC	Eddy dissipation concept
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
LFG	Landfill gas
LHV	Lower heating value
LNG	Liquefied natural gas
LPG	Liquefied petroluem gas
ppm	Parts per million
RNG	Renormalization group theory
TEP	Ton eşdeğer petrol

1. GİRİŞ

Ülkelerin ekonomik, sosyal ve toplumsal kalkınmasında enerji en önemli kaynaktır. Enerji; hızlı nüfus artışı, sanayideki önemli gelişmeler, şehirleşme, kaynakların plansız kullanılması ve globalleşme sonucunda değişen üretim ve tüketim metodolojisi nedeniyle önemini artırarak korumakta ve günümüzün en önemli sorunlarından biri haline dönüşmektedir. Yeni teknolojiler, yenilik ve Ar-Ge çalışmaları sonucu hayatımıza giren farklı ve yeni ürünler ve yeni alışkanların sayısında son günlerde ciddi bir artış olması ve mevcut enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanılamaması gibi sebepler yoğun enerji tüketimini ciddi şekilde etkilemektedir. Gelişmekte olan ülkeler için enerjinin önemi bu sebeplerle artmakla birlikte özellikle ülkelerin ekonomik ve teknolojik alanlarda stratejik planları önemli oranda etkilenmektedir. Çünkü petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıt rezervleri hızla tükenmekte, ozan tabakası incelmekte ve sera gazı emisyonları insan hayatını tehdit eder duruma gelmektedir. Bu durum mevcut kaynakların verimli şekilde kullanılmasını, yeni kaynak-yöntem arayışına ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeye zorunlu kılmıştır. Enerji sorunlarının giderek arttığı ancak kaynakların tükendiği bir dünyada enerjinin verimli kullanılması önem kazanacaktır. Kullanımı artarak devam eden kömür, petrol ve doğalgaz tüketimi CO2 yayılımını arttırmakta olup sera etkisine ve küresel ısınmaya neden olmaktadır [1]. Bütün bunların yanında enerji arz güvenliğine ilişkin geçmişte yaşanan sorunlar dikkate alındığında özellikle gelişmekte olan ülkemizin kendi enerji kaynaklarına yönelmesi, bu kaynakların yenilebilir olması önem arz etmektedir.

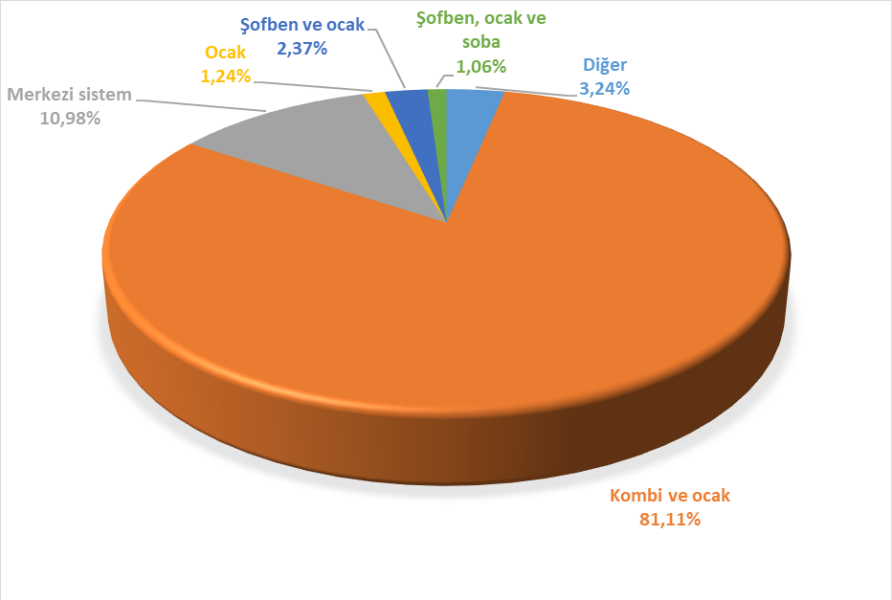
Türkiye, büyük oranda ithal girdili ve yüksek maliyetli enerji kaynaklarına bağımlı bir enerji piyasasına sahiptir. Türkiye, Jeopolitik açıdan yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek bir ülke olmakla birlikte cari açığının büyük bir kısmının enerji ithalatından kaynaklanıyor olması dikkat çekicidir. Bu noktada özellikle yenilenebilir enerji kaynakları kullanımına uygun olan ülkemizde elektrik tüketimine ilişkin alternatif kaynak kullanımına ilişkin çalışmalar yapılması ve ithal ikamenin azaltılması yönünde adımlar atılması önemlidir.

Bu doğrultuda biyogaz, çevresel kirliliğe yol açmaması, sürdürülebilirlik sağlaması açısından dikkat çekmektedir. Her yerde elde edilebilmesi, özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olması nedeniyle uygun ve önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Biyogaz için mısır, buğday gibi özel olarak yetiştirilen bitkiler, otlar,

yosunlar, denizdeki algler, hayvan dışkıları, gübre ve sanayi atıkları, evlerden atılan tüm organik çöpler (meyve ve sebze artıkları) kaynak oluşturmaktadır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından biyokütle yatırımlarına destek olmak ve ülkemiz biyokütle potansiyelini ortaya koymak amaçlı Türkiye Biyokütle Potansiyel Atlası (BEPA) hazırlanmıştır. BEPA'ya göre Türkiye'de işlenebilecek biyokütle atıklarının teorik enerji eşdeğeri toplam 34 milyon TEP/yıl olarak görülmektedir. Türkiye, sahip olduğu teknoloji, teknolojinin kullanım alanları ve atık durumuna göre mevcut biyokütle potansiyelinin %78–%90'ını değerlendirmemektedir [2]. Biyogazın ülkemizde enerji kaynağı olarak ciddi potansiyeli olduğu görülmekle birlikte yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili ulusal politikalar belirlenirken, biyokütlesel kaynaklara rüzgâr, güneş ve hidroelektrik kadar önem verilmemektedir [3]. Türkiye'nin TEİAŞ verilerine göre Ekim 2024 tarihi itibari ile 386 adet biyokütle tesisi bulunmaktadır. Bu sayının aylar geçtikçe artması, bitkisel, hayvansal ve evsel atık miktarlarının yüksek olması, enerji üretim girdisinin yerli olması gibi avantajlar, biyokütle kullanım ve uygulamalarının üzerine fazla çalışma yapılması gerektiğini göstermektedir. Bu kaynağın enerji üretim ve tüketim sistemine dahil edilmesi ve bu yönde araştırmalar yapılması önem arz etmektedir.

Ülkemizde enerji tüketiminin büyük bir kısmı konutlarda ısınma ve sıcak su temini için kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. 2023 yılı konut abonelerinin doğal gaz tüketimlerinin kullanım türüne göre dağılımı (%) [4].

Doğalgaz abonelerinin 2023 yılında gerçekleştirdikleri tüketim miktarlarına bakıldığında kombi ve ocak tüketimlerinin oranının yüksek olduğu Şekil 1.1'de görülmektedir. Bu durum, doğalgaz ile çalışan ısıtma sistemlerinin yerli ve yenilenebilir kaynakla çalıştırılabilmesi durumunda ciddi miktarda tasarruf sağlanacağını göstermektedir.

Enerji ve emisyon sorunlarının giderek arttığı, kaynakların tükendiği bir dünyada yeni ve yenilenebilir kaynaklara ilgi artmakla birlikte bu kaynakların mevcut yakma sistemlerinde kullanılabilirliği hususu da önem arz etmektedir. Yapılan literatür çalışmasında, biyogazın konut tipi kombilerde kullanılabilirliğine ilişkin çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Bu kapsamda, bu çalışmada hermetik tip gaz yakıcı cihazlarda biyogazın kullanılabilirliği sayısal ve deneysel olarak araştırılmaktadır. Modellemelerde, hacimce %60 CH_4 - %40 CO_2, %70 CH_4 - %30 CO_2, %80 CH_4 - %20 CO_2 ve %90 CH_4 - %10 CO_2 karışımlı biyogazlar kullanılmış, sıcaklık ve NOx dağılımları elde edilmiştir. Sayısal analizde türbülans modeli olarak eddy-viskozite modeli olarak da bilinen standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Hem sayısal hem de deneysel çalışmalar için eşdeğerlik oranı olarak 0,75 kullanılırken, deneysel çalışmalarda 13 kW güç, sayısal modellemelerde ise hem 31 kW hem de 13 kW güç için sonuçlar elde edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Biyogazın yakıt olarak kullanımı ile ilgili olarak literatürde çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalar biyogazın farklı yakma sistemleri ile kullanılmasına yönelik olup özellikle bu tezin de konusu olan ev tipi kombilerde kullanımına yönelik çalışma yok denebilecek sayıdadır.

Ma ve diğerleri, düşük kalorifik değerli biyogazlarda CO_2 oranının; alev yanma sıcaklığı, alev yayılma hızı ve azot oksit oluşumuna etkisini ANSYS CHEMKIN-PRO ile sayısal olarak incelemişlerdir [5]. CO_2 oranı artışıyla yanma alev sıcaklığı ve alev yayılma hızının düştüğü görülmüştür. Yanma işlemi kimyasal dengeye ulaştıktan sonra CO_2 oranı artışıyla NO oluşumu azalmıştır. NO_2 için ise düzenli bir değişim görülmemekle birlikte CO_2 oranı %33,6 iken en yüksek NO_2 değeri elde edilmiştir.

Zuo ve diğerleri, düşük kalorifik değerli biyogaz için farklı ön ısıtma sıcaklıkları ve eşdeğerlik oranları ile yanma karakteristiklerini araştırmışlardır [6]. Ön ısıtma sıcaklığı arttığı zaman alev hızının, alev sıcaklığının ve NO miktarının arttığı görülmüştür. Eşdeğerlik oranı 1 olduğu zaman en yüksek alev sıcaklığı elde edilmiş, eşdeğerlik oranı 1.1 olduğu zaman ise yanma sonunda en yüksek NO miktarı elde edilmiştir.

Jiao ve diğerleri, 350 kW nominal güce sahip önkarışımlı su soğutmalı biyogaz brülörü tasarlamışlar, hava fazlalık katsayısı, yakıt içeriğindeki CO_2 oranı, ısıl yük ve soğutma suyu sıcaklığı gibi girdilerin etkilerini anlamak için deneysel ve sayısal araştırmalar yapmışlardır [7]. Yapılan çalışmalarda hava fazlalık katsayısı artışının, yakıt içeriğindeki CO_2 oranının artışının sıcaklıkları düşürdüğü görülmüştür.

Anggono ve diğerleri, metana karbondioksit ekleyerek yapay biyogaz elde ederek buji ateşlemeli ön karışımlı yanmada biyogaz için CO_2 oranının ve karışım başlangıç basıncının laminer yanma hızı üzerindeki etkisini incelemişlerdir [8]. Hem deneysel hem sayısal olarak yapılan çalışmalar sonucunda CO_2 oranı ve karışım başlangıç basıncı artışıyla laminer yanma hızının düştüğü sonucu elde edilmiştir.

Şahin, biyogaz reaktöründen elde edilen %55 CH_4 - %45 CO_2 oranlı ve %45 CH_4 - %55 CO_2 oranlı iki farklı biyogaz yakıtının yanma ve emisyon karakteristiklerini deneysel olarak

çalışmıştır [9]. Deneyler sonucunda CH_4 oranı fazla olan biyogaz yakıtı için alev bölgesi sıcaklık seviyelerinin daha yüksek olduğu, yanma odası sonlarına doğru sıcaklıkların düştüğü ve dağıtılmış yanma koşullarına benzer bir yanma odası dağılımının olduğu görülmüştür. Emisyonlar için de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Zeng ve diğerleri, eşdeğerlik oranı 0.7-1.4, giriş basıncı 0.1 MPa-0.5MPa, giriş sıcaklığı 290K-380K ve metan içeriği %47, %55.5, %59 olacak şekilde sabit hacimli bir yanma odasında çöp gazının alev yayılma özellikleri, alev kararlığı ve laminer alev hızı incelenmiştir [10]. Giriş basıncı yükseldikçe ve metan içeriği azaldıkça laminer yanma hızının azaldığı görülmüştür. Yine giriş basıncı arttıkça alev kalınlığının azaldığı görülmüştür. En yüksek laminer yanma hızı eşdeğerlik oranı 1.1 iken elde edilmiştir.

Greco ve diğerleri, laminer tek boyutlu ön karışımlı alevde yakıt bileşiminin biyogaz yanması üzerindeki etkilerini araştırmıştır [11]. Metan içeriğinin yanma davranışında çok etkili olduğu ve metan içeriğinin artışıyla alev hızının arttığı görülmüştür.

İlbaş ve diğerleri, 10 kW güce sahip doğalgaz brülöründe hava fazlalık katsayısı 1.2 olacak şekilde farklı gaz bileşenleri içeren biyogazların yanma performansları ve emisyon özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir [12]. Deneyler sonucunda, kullanılan biyogazların sıcaklıklarının metan sıcaklığına yakın olduğu görülmüş ve bu sonuçla biyogazın, herhangi bir sistemsel düzenleme yapılmadan doğalgaz yakma sistemlerinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Cohé ve diğerleri, farklı basınç ve CO_2 oranlarında yakıtça fakir CH_4-CO_2-hava karışımı için ön karışımlı laminer ve türbülanslı alevin yayılma hızı ve alev yüzey yoğunluğu üzerine deneysel ve sayısal çalışma yapmışlardır [13]. CO_2 oranı arttığında alev yayılma hızının düştüğü, yanma yoğunluğunun ise hem basınç hem de CO_2 oranı artışıyla yükseldiği görülmüştür.

Hinton ve diğerleri, farklı sıcaklık ve basınç koşulları ile farklı oranlarda CH_4-CO_2 yakıt karışımının yanması ile laminer yanma hızındaki değişimi incelemişlerdir [14]. Yüksek basınçlarda yanma hızının düştüğü, sıcaklık artışıyla yanma hızının arttığı görülmüştür. Yakıt karışımındaki CO_2 oranı artışı ile yanma hızının arttığı ve en yüksek yanma hızı noktasının fakir karışım bölgesine doğru kaydığı görülmüştür.

Anggono ve diğerleri, buji ateşlemeli ön karışımlı yanmada biyogaz-hava karışımının laminer yanma hızı ve tutuşabilirlik özellikleri ile ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır [8]. Karşılaştırma metan-hava karışımı alevi ile gerçekleştirilmiştir. Yanma hızı farklı eşdeğerlik oranları (ϕ) için çalışılmıştır. Metan için alev yayılımı $0.6<\phi<1.3$ aralığında, biyogaz için $0.6<\phi<1.2$ aralığında gerçekleşmiştir. Metan ile karşılaştırıldığında yanıcı bölge biyogaz için özellikle CO_2 sebebiyle daha dardır. Laminer yanma hızı ise $\phi=1$ iken elde edilmiştir.

Chan ve diğerleri, CO_2 (%0-15) ilavesinin metan-hava karışımının laminer alev hızına etkisini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır [15]. Yapılan çalışmalar sonucunda CO_2 ilavesi ile karışımın laminer alev hızının ve alev sıcaklığının azaldığı görülmüştür.

Lafay ve diğerleri, metan ve biyogaz (%61 CH_4, %34 CO_2, %5 N_2) için kararlı yanma alanlarını ve alev yapısını deneysel olarak karşılaştırmışlardır [16]. Her yakıt için yüksek eşdeğerlik oranlarında kararlı alev elde edilmiş, eşdeğerlik oranı azaldıkça alev kararsızlaştığı görülmüştür. Aynı eşdeğerlik oranı için yakıttaki CO_2 oranı arttıkça reaksiyon/yanma yoğunluğunun düştüğü, CO_2 ilavesinin alev yapısı üzerinde kararsızlaştırma etkisi olduğu sonucu elde edilmiştir.

Amez ve diğerleri, konvansiyonel doğalgaz yakıcı cihazda biyogaz-hidrojen karışımının yanma performansını incelemişlerdir [17]. Deneylerde; 70-30 CH_4:CO_2, 60-40 CH_4:CO_2 ve 50-50 CH_4:CO_2 oranlarında biyogazlar kullanılmıştır. Daha sonra biyogaza %5'den %25'e kadar hidrojen eklenerek yeni karışımlarla çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarda, karışımdaki CO_2 oranı arttıkça yanma veriminin düştüğü, %40 üzerindeki CO_2 oranlarında tutuşma sorunları yaşandığı görülmüştür. Hidrojen ilavesiyle yanma veriminde artış görülmüş olsa da doğalgaz ile elde edilen verimler elde edilememiştir. Deneyler sonucunda biyogazın yüksek güçlü yakma sistemlerine uygun olmadığı görülmüştür.

Nonaka ve diğerleri, CH_4-CO_2 karışımının adyabatik laminer yanma hızı üzerine sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir [18]. CO_2 oranı %50'ye kadar olacak şekilde beş farklı karışım çalışılmıştır. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu, CO_2 oranı arttıkça yanma hızının düştüğü, maksimum yanma hızının stokiyometrik noktadan fakir karışım tarafına kaydığı görülmüştür.

Ghenai ve diğerleri, gaz türbininde; doğalgaz, biyogaz, çöp gazı ve doğalgaz-biyogaz karışım yakıtları için HAD ile yanma analizlerini gerçekleştirmişlerdir [19]. Bu çalışmada, biyogaz yakıt bileşiminin ve yakıt ısıtma değerlerinin; alev şekli, alev sıcaklığı, CO_2, CO ve NO_x emisyonlarına etkisi belirlenmiştir. Analizler sonucunda yakıt bileşimindeki CO_2 miktarı arttıkça alev sıcaklığının, yanma hızının ve NO_x miktarının düştüğü görülmüştür.

Devi ve diğerleri, gözenikli radyal yakıcı (GRY) ile konvansiyonel yakıcıda (KY) biyogaz kullanarak termal ve yanma verimleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [20]. GRY ile fakir karışımlarda kararlı alev elde edilirken KY ile zengin karışımlarda elde edilmiştir. Emisyonlarda da GRY ile daha düşük değerler elde edilmiştir.

Leonov ve diğerleri, yaptıkları çalışma ile, biyogaz bileşiminin ve fazla hava oranının yanma sıcaklığı ve yanma ürünlerinin hacmi gibi yanma parametreleri üzerindeki etkisini teorik olarak incelemişlerdir [21]. Belirtilen ısıl gücün sağlanması koşuluyla değişken bileşimdeki biyogazın yakılmasının hava akışında bir değişiklik gerektirmediği yalnızca içindeki metan içeriğine bağlı olarak biyogaz akışında bir değişiklik gerektiği görülmüştür. Karışımdaki metan oranının azalmasıyla yanma sonu sıcaklıkların düştüğü de görülmüştür.

Şahin, düşük O_2 konsantrasyonları ile biyogazın yanma karakteristiklerini sayısal olarak araştırmıştır [22]. Oksitleyicideki oksijen konsantrasyonu azaldığında NO_x ve CO seviyeleri sıfıra yaklaşırken, sıcaklık değerlerinin de düştüğü görülmüştür. Ayrıca, oksijen konsantrasyonu azaldığında yanma odasında daha homojen bir termal alan elde edilmiştir.

Zhen ve diğerleri, yaptıkları çalışmada, stokiyometrik biyogaz ve hidrojen karışımı alevi, yanma karakteristikleri ve ısıl performansları değerlendirilmiştir [23]. Yakıt özelliği ve akış aerodinamiği değişimi açısından alev kararlılığının hidrojen oranına ve CO_2 konsantrasyonuna bağımlılığı analiz edilmiştir. Çalışmada biyogaz, saf CO_2 ve metan karışımı ile elde edilmiştir. Yapılan testlerde saf biyogaz alevinin kararlı şekilde oluşmadığı görülmüştür. CO_2 oranı yüksek olan biyogazlarda alev kararlılığının oluşması için hidrojen oranının diğerlerine göre yüksek olması gerektiği görülmüştür. CO_2 oranı arttıkça alevin kararlı olduğu çalışma koşul sayısı azalmaktadır. Hidrojen oranı arttıkça alev sıcaklığının da artmakta olduğu görülmüştür. Aynı H_2 oranlarında CO_2 oranı arttıkça, CO_2'nin inert özelliğinden ve yanma işleminden çıkan ısıyı absorbe etmesinden dolayı, alev sıcaklığı düşmektedir.

Zhao ve diğerleri, yaptıkları çalışmada, konut tipi merkezi kalorifer sisteminde biyogaz kullanımının işletme performansı üzerinde etkisini araştırmışlardır [24]. Çalışmada; ateşleme performansı, alev sönmesi, alev geri tepmesi, brülör sıcaklığı ve emisyonlar incelenmiştir. CO_2 bakımından zengin yakıtın ısı yayılımının, brülör çıkışındaki alevi tutamayacak kadar düşük olduğu görülmüştür. CO_2 miktarı arttıkça sıcaklığın ve NO_x değerinin düştüğü, CO ve yanmamış HC miktarının da arttığı görülmüştür.

Lee ve diğerleri, yaptıkları çalışmada çöp gazı (LFG) ve LFG-karışık yakıtların alev kararlılığını LPG ile karşılaştırmışlardır [25]. Yaklaşık 1.1 eşdeğerlik oranında bütün yakıtlar için en yüksek yanma hızları görülmüştür. Bütün yakıtların (saf LFG hariç) yaklaşık olarak benzer alev kararlılığı bölgesine sahip olduğu görülmüştür. LFG-karışık yakıtlar, cihazda herhangi bir değişiklik yapılmadan LNG yerine kullanılabilir şeklinde bir değerlendirme yapılabilmiştir. LFG neredeyse hiç alev oluşturamadığı için deneme yapılamamıştır. Bu, LFG'nin tek başına, pratik ev tipi yanma cihazlarında kullanılamayacağı yorumuna sebep olmuştur.

Kiedrzyznska ve diğerleri, yaptıkları çalışmada, doğalgaz ve sentez gazı karışımı yanmasının, brülör tasarımına etkisi ve alev kararlılığı ve emisyonlar üzerindeki etkileri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir [26]. Sayısal çalışmalarla farklı tasarımlar oluşturulmuş ve deneysel çalışmalarla yeni bir tasarım yapılmıştır. Modifiye edilmemiş doğalgaz brülörü ile yapılan testlerde %10 oranlı karışımda önemli bir farklılık görülmemekle birlikte %40 oranlı karışımda girişteki ve yakıt kanalı çıkışındaki ortalama hızların ve basıncın çok fazla arttığı dikkat çekmiştir. Bu sonuçlar, %10 oranlı karışımın, brülörde değişiklik yapılmadan kullanılabileceğini göstermiştir. Brülör üzerine ek nozullar açılarak gerçekleştirilen testlerde ise bütün karışımlar için kararlı alev elde edilmiştir.

Decker ve diğerleri, yaptıkları çalışma ile ev tipi bir biyogaz yakıcısı için alev port geometrisi tasarımına ilişkin yaklaşım sunulması hedeflenmiştir [27]. Yapılan simülasyonlarda en yüksek performans gösteren 3 tasarım, üretilip karşılaştırma yapmak için test edilmiştir. Yakıt olarak %60 CH_4 ve %40 CO_2 içeriğine sahip biyogaz kullanılmıştır. Üretilen brülörlerle 15°C başlangıç sıcaklığı ile 5 L su ile 10’ar dk’lık testler gerçekleştirilmiştir. Referans seçilen üç farklı tasarım için sonuçlar incelendiğinde ısıl verimlerin yükseldiği görülmüştür.

Dong ve diğerleri, yaptıkları çalışmada, farklı oranlarda CO_2 ekleyerek metanın laminer yanma özelliklerini ve NO_x emisyonu üzerine etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir [28]. Eşdeğerlik oranının artmasıyla laminer yanma hızının önce arttığı sonra azaldığı görülmüştür. Herhangi bir eşdeğerlik oranında, karışımdaki CO_2 oranın artışı ile laminer yanma hızının ve alev sıcaklığının azaldığı görülmüştür.

Leonov ve Trubaev farklı metan karışımlı yakıtların sayısal olarak sınırlı (kapalı) ve sınırsız (açık) şartlarda yanma özelliklerini incelemişlerdir [29]. Sınırlı (kapalı) şartlarda alev sıcaklığının sadece metan oranına göre değiştiği, metan oranının değiştirilerek doğalgazla çalışan yakma sistemlerinde değişiklik yapılmadan biyogazın kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Bandara ve diğerleri, farklı eşdeğerlik oranlarının biyogaz yanmasında NO_x emisyonları ve alev sıcaklıkları üzerine etkisini deneysel verilerle doğrulanmış sayısal model ile incelemişlerdir [30]. Eşdeğerlik oranının değiştirilerek alev sıcaklığının artırılabileceği ve NO_x emisyonlarının kontrol edilebileceği sonucu elde edilmiştir. Düşük emisyon ve yüksek sıcaklık elde edebilmesi için optimum eşdeğerlik oranı aralığının 0,85–1,1 olması gerektiği çalışmada ifade edilmektedir.

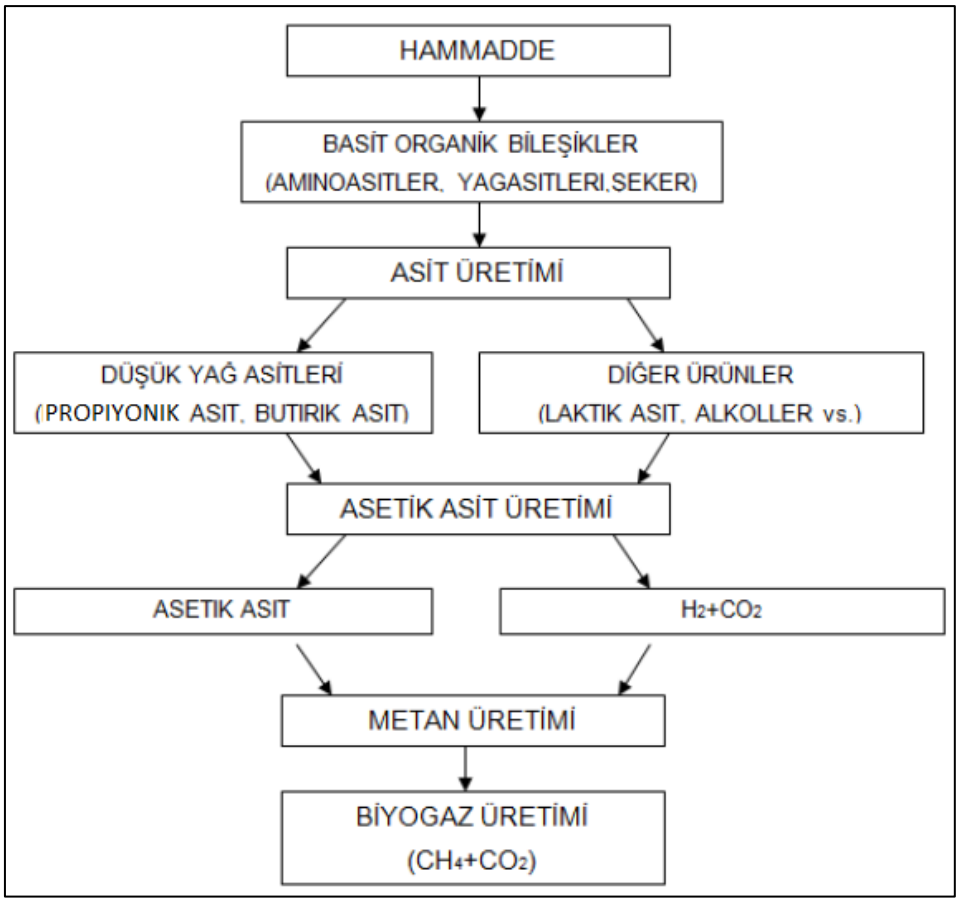
Khaleghi ve diğerleri, yaptıkları araştırmada, biyogaz alevinin özelliklerini aynı eşdeğerlik oranı ile girdaplı yanmada farklı karışım oranları için deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir [31]. Karışımdaki CO_2 oranı arttıkça alev boyunun kısaldığı, alev sıcaklığının azaldığı, buna bağlı olarak NO_x emisyonunun da azaldığı sonucu elde edilmiştir.

3. BİYOGAZ VE YANMA

3.1. Biyogaz Oluşumu

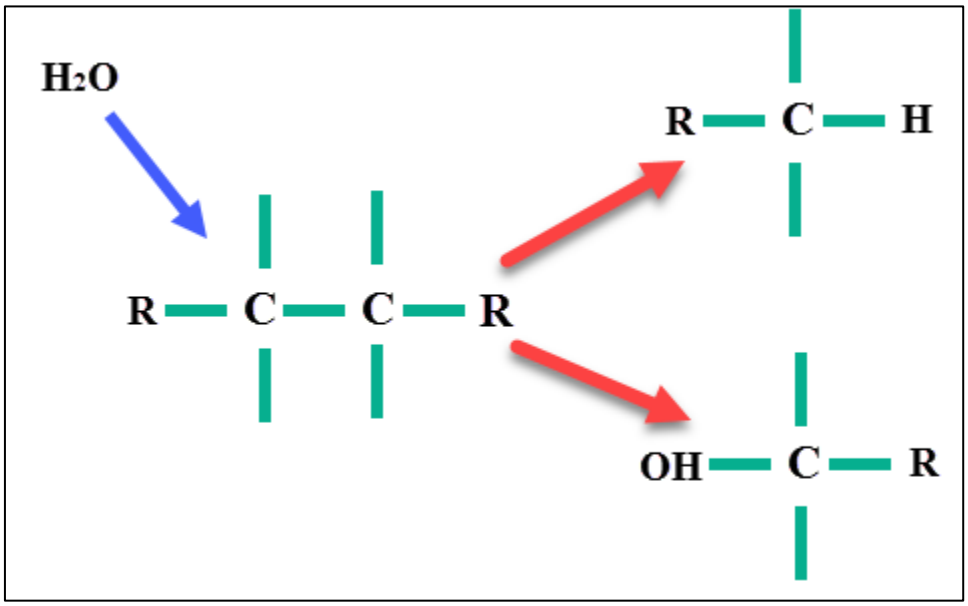
Biyogaz; organik kökenli, evsel, hayvansal, bitkisel vb. atıkların oksijensiz ortamda fermantasyonu sonucu ortaya çıkan CO_2 ve az miktarda diğer gazlardan oluşan bir gaz karışımıdır [32]. Oksijensiz ortamda bozunma mekanizması tabiatta da sık şekilde görülebilmekte olup buna örnek olarak; bataklıklarda, deniz tabanlarında, sıvı dışkı çukurlarında oluşan bozulmalar verilebilir.

Anaerobik işlem süreci, devasa organik maddelerin oksijensiz bir ortamda bırakılarak çeşitli mikro organizmalar aracılığı ile farklı bir maddeye dönüştürülme sürecidir. Bu mikro organizmalar; hidroliz bakteriler, molekülü düşük olan bakteriler, metan ve asit içeren bakteriler olarak ifade edilebilir [33].



Şekil 3.1. Anaerobik bozunma [34]

Anaerobik bozunma; hidroliz, asitojenez (asit üretimi), asetojenez (asetik asit üretimi) ve metanojenez olarak dört aşamada gerçekleşmektedir. “Hidroliz” aşaması esnasında hammaddenin çözünebilir halde olmayan yapıları (karbonhidratlar, yağlar vb.) daha basit ve çözünebilir organik yapılara (aminoasitler, şeker, yağ asitleri vb.) dönüştürülür. Bu aşama, anaerobik fermentasyonun hızını da belirleyen bir basamaktır [35]. Bu aşama ile organik atıkların büyük kısmı suda çözünür hale gelmektedir. Şekil 2.2’de hidroliz aşamasında gerçekleşen reaksiyon görülebilmektedir.



Şekil 3.2. Hidroliz reaksiyonu ile küçük moleküllerin oluşumu [35]

Bu aşamaya katılan hidrolitik bakteriler, malzemeyi biyokimyasal olarak parçalayan enzimleri serbest bırakırlar. Birinci aşamada oluşan ara ürünler asit oluşumu aşamasında fermente edici bakteriler tarafından düşük yağ asitlerine (asetik, propiyon ve bütrik asit), karbondioksit ve hidrojene ayrıştırılır. Bu ürünler asetojenik bakteriler tarafından biyogazın öncül maddelerine (asetik asit, hidrojen ve karbondioksit) dönüştürülür. Biyogaz oluşumunun son aşaması olan “metanojenez” de öncelikle asetik asitler, hidrojen ve karbondioksit, mutlak anaerobik metanojenik mikroorganizmalar tarafından metana dönüştürülür. Anaerobik bozunmanın bütün aşamaları eş zamanlı olarak tek basamaklı bir proseste gerçekleşir [36]. Her aşamanın bakterileri farklı olup, bu bakteriler pH değeri, ısı vb. gibi farklı ortam özelliklerine ihtiyaç duydukları için optimum şartların oluşturulması önem arz etmektedir.

3.2. Biyogaz Üretiminde Etkili Olan Faktörler

Biyogaz oluşumu farklı ortam etkenlerine bağlı olan biyolojik bir süreçtir. Biyogaz üretiminin en yüksek verimde gerçekleşebilmesi için ortam koşullarının uygunluğu önem arz etmektedir. Bu etkenler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

- Reaktör sıcaklığı
- pH
- C/N oranı
- Organik yükleme hızı
- Karıştırma
- Bekletme süresi
- Basınç

3.2.1. Reaktör sıcaklığı

Metanojenler çok düşük ve çok yüksek sıcaklık koşullarında aktif olmazlar. Metan oluşturan bakteriler (metanojenler) sıcaklık değişikliklerine karşı hassastırlar. Biyokimyasal reaksiyon sürecinde biyo-reaktörlerde bakteri türlerine göre sıcaklık değerleri bulunmaktadır. Bu değerler; psikofilik için 12-20°C, mesofilik için 20°C - 40°C, termofilik için 40-65°C şeklindedir.

3.2.2. pH

Metan oluşturan bakteriler (metanojenler) nötr veya hafif alkali ortamda yaşarlar. Metan oluşturucu bakteriler pH düşüşünden olumsuz olarak etkilenmektedir. Biyoreaktördeki pH değerinin 6,7'nin altına inmesi halinde, metanojenlerde toksik oluşmaktadır. Anaerobik arıtmada en uygun pH aralığı 6,8-7,8 şeklindedir.

3.2.3. C/N oranı

Biyogaz üretiminde kullanılan gübrelerin, atıkların vb. bütün kaynakların içeriğinde belirli oranlarda karbon, oksijen ve azot bulunmaktadır. Anaeorobik bakterilerin enerji ihtiyaçları olup bunun için gübre, atık vb. organik maddelerde yer alan karbonu kullanmaktadırlar.

Bunun dışında, azot ve fosfor da önemli besi kaynaklarıdır. Besi maddesi içeriğindeki azot; amino asitlerin, proteinlerin ve nükleik asitlerin sentezi için gerekli ihtiyacı karşılamakta, ayrıca amonyağa dönüşen azotun uçucu yağ asitlerini engelleyerek pH değerini korumaktadır.

C/N oranı metabolik işlemlerde bakteriler için uygun aralıkta olmalıdır. Örneğin; 23/1'den büyük C/N oranı optimum çürüme için yeterli olmayıp 10/1'den küçük olması da bakterilerin aktifliğini engelleyici olmaktadır.

3.2.4. Organik yükleme hızı

Biyoreaktörlerin birim hacim başına (m^3) günlük eklenen organik madde miktarı organik yükleme hızı olarak ifade edilmektedir. Yüksek hızlar biyoreaktör içerisinde asit birikimine yol açar ve bu da pH değerinin düşmesine ve metanojenlerin etkinliklerinin olumsuz etkilenmesine sebep olur. Bu sebeple organik yükleme hızı anaerobik fermantasyonda optimum şekilde korunmalıdır.

3.2.5. Bekletme süresi

Bekletme süresi, reaktöre hammadde girdisinin sağlanmasından ilk gaz üretimine kadar geçen zaman olarak tanımlanmaktadır. Biyogaz tesislerindeki bekletme süreleri tesislerdeki sıcaklıkla da ilişkili olarak 20-120 gün arasında değişebilmektedir. Sıcaklık bekletme süresini belirleyen en önemli etkendir.

3.3. Biyogaz İçeriği

Biyogaz havadan daha hafif olup, içeriğinde yer alan metan oranına göre de değişmekle birlikte havaya göre yoğunluğu 0,94 kg/m^3, alev sıcaklığı 870 °C ve ısıl değeri 5,96 kWh/m^3 olan bir gaz karışımıdır [37].

Biyogazın bileşiminde kaynağın türüne göre değişmekle birlikte; metan %50-70, karbondioksit %30-40, hidrojen %5-10, azot %1-2, su buharı %0,3 ve az miktarda hidrojen sülfür bulunur. Biyogaz içeriği ve enerji eş değerleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Biyogazın içeriği ve enerji eşdeğeri [38]

Biyogaz Bileşimi			Biyogaz Enerji Eşdeğeri	
Gaz	Simge	Oran (%)	Uygulama	1 m^3 Biyogaz Eşdeğeri
Metan	CH_4	53-70	Aydınlatma	60W-100W gücünde ampul ile 6 saat aydınlatabilir.
Karbondioksit	CO_2	30-47	Pişirme	5-6 kişilik bir aile için 3 öğün yemek pişirilebilir.
Hidrojen	H_2	5-10	Yakıt	0,7 kg petrol
Azot	N_2	1-2	Şaft Gücü	Motoru (1 BG) 2 saat çalıştırabilir.
Su Buharı	H_2O	0,3	Elektrik	1,25 kWh elektrik üretebilir.
Hidrojen Sülfür	H_2S	Çok az		

Çizelge 3.1'de görüldüğü üzere biyogazın içeriği ve bileşenlerin oranları değişiklik gösterebilmektedir. Bu farklılık; hammadde türü, fermantasyon işlem süreçleri (sıcaklık, bekleme süresi vb.) ve mikrobiyolojik değişikliklerden dolayı oluşmaktadır.

Biyogaz üretiminde hammadde olarak:

- Hayvan dışkıları (büyükbaş ve küçükbaş hayvancılık, tavukçuluk)
- Zirai atıklar
- Yenilenebilir hammaddeler
- Orman ve endüstriyel atıklar
- Kâğıt endüstri atıkları
- Gıda endüstri atıkları (Sebze, meyve, yağ endüstrisi vb.)
- Bahçe atıkları
- Şeker endüstri atıkları
- Evsel katı atıklar
- Atık su arıtma tesisi çamurları

kullanılabilmektedir [3].

Biyogazın sahip olduğu enerji değeri içeriğindeki metan gazından kaynaklanmaktadır. Biyogaz yapısı bakımından doğalgazla benzerlik göstermektedir. Biyogaz ve doğalgaz içerikleri Çizelge 3.2'de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Biyogaz ve doğalgazın içerikleri [39]

Bileşim ve Özellik	Birim	Doğal Gaz	Biyogaz
Metan	Hacim %	87	53-70
Karbondioksit	Hacim %	1.2	30-47
Azot	Hacim %	0.3	0.2
Oksijen	Hacim %	0	0
Hidrojen sülfat	ppm	1-2	0-10000
Alt ısıl değeri	MJ/m^3	40	23
Alt ısıl değeri	kwh/m^3	11	6.5
Yoğunluk	kg/m^3	0.84	1.2
Yüksek Wobbe endeksi	MJ/m^3	55	27
Metan sayısı	-	70	>135

1 m^3 biyogazın ısıl değeri içerisindeki metan oranına bağlı olarak 4700 ile 5700 kcal arasında değişir. 1 m^3 biyogaz 0,75 litre benzin, 0,66 litre motorin, 0,25 m^3 propan, 0,2 m^3 bütan gazı, 1,46 kg odun kömürü, 3,47 kg odundan sağlana enerjiye eşdeğerdir [36]. Biyogaz, sadece enerji kaynağı olarak önemli olmayıp, bunun yanında ekolojik olarak zarar verme potansiyeli olan organik kökenli atıkların giderilmesi için de önemlidir. Bunun yanı sıra, biyogaz üretim prosesi sonucunda ortaya çıkan fermente gübre de tarımsal aktivitelerde kullanılabilmektedir. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının aksine biyogaz, coğrafi kısıtlamalara ve karmaşık teknoloji isterlerine gerek duymamaktadır. Biyogaz kalitesinin iyileştirilmesinin ardından doğalgaz ile çalışan cihazlarda bazı modifikasyonlar ile kullanılabilir hale getirilebilir.

Biyogaz içeriğinde yer alan hidrojen sülfatın biyogaz üretim ünitelerinde yoğuşması sonucunda aşındırıcı asitler oluşabilmektedir. Ocak vb. yanma olayının gerçekleştiği yerlerin dökme çelikten veya yüksek yoğunluktaki emayeden olması gerekmektedir [40].

3.4. Yanma

Yanma, oksijenin sıvı, katı ve gaz yakıtlardaki karbon, hidrojen, sülfür ve bunların bileşimleri ile hızlı reaksiyona girmesidir. Oksijen kaynağı ve buna benzer bazı özel uygulamalar dışında yanma için gerekli olan oksijen havadan temin edilir. Hava içeriği:

$$1\ kmol\ O_2 + 4.76\ kmol\ N_2 = 4.76\ kmol\ hava$$

şeklindedir. Normal yanma sıcaklıklarında azot yanma açısından etkisiz bir gaz olup emisyonlar açısından dikkat edilmesi gerekmektedir [41].

Eğer yeterli oksijen varsa, bir hidrokarbon yakıt tamamen oksitlenebilir, karbon karbon dioksite (CO_2) ve hidrojen suya (H_2O) dönüşür [42].

Yanmanın tam olarak gerçekleşebilmesi için hava ile yakıtın optimum düzeyde karışmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Tam olarak yanma için ihtiyaç duyulan minimum hava miktarına stokiyometrik hava denilmektedir. Söz konusu işlem de stokiyometrik yanma olarak adlandırılmaktadır. Yanma sırasında kullanılan hava, hava fazlalık katsayısı olarak λ şeklinde ifade edilebilmektedir.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{hava,gerçek}}{\dot{m}_{hava,stokiyometrik}} x100$$

Yanma işlemi; stokiyometrik, fazla hava ile veya eksik hava ile gerçekleşebilmektedir. Yakıtın teorik olarak tam yanma işlemi stokiyometrik veya teorik yanma olarak ifade edilmektedir. Yanma ürünlerinde serbest oksijen bulunmaz. Stokiyometrik yanmada hava fazlalık katsayısı λ=1'dir. Stokiyometrik yanmadakinden daha fazla hava olduğunda (λ>1) fazla hava ile yanma gerçekleşir. Stokiyometrik yanmanın gerçekleşebilmesi için gerekli olan en az hava miktarından da az miktarda hava ile gerçekleşen yanma eksik yanma olarak ifade edilir. Yanma işleminin tam olmaması durumunda yanma ürünlerinde C, CO, H_2 ve OH bulunabilmektedir.

Genel bir hidrokarbonun $C_\alpha H_\beta$ hava ile komple reaksiyonu:

$$C_\alpha H_\beta + \alpha(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow bCO_2 + cH_2O + dN_2$$

şeklindedir.

$$C_\alpha H_\beta + (\alpha + \frac{\beta}{4})(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow \alpha CO_2 + \frac{\beta}{2} H_2O + 3.76(\alpha + \frac{\beta}{4})N_2$$

Bu eşitlik yakıt ve hava için stokiyometrik oran/eşitlik olarak ifade edilmektedir. Bir yakıtın hava ile tamamen yanması yukarıda da ifade edildiği şekilde stokiyometrik yanma olarak

isimlendirilmektedir. Yakıt-hava karışımının stokiyometrik havadan daha fazla (hava fazlalığı) hava ile yanması fakir yanma, daha az hava ile yanması zengin yanmadır [43].

Biyogazın stokiyometrik yanma denklemi aşağıdaki gibidir.

$$(0.6CH_4 + 0.0025H_2S + 0.3975CO_2) + 1.204O_2 + 3.76(1.204)N_2 \rightarrow 0.9975CO_2 + 1.2025H_2O + 0.0025SO_2 + 4.5261N_2$$

Bu eşitliğe göre bir mol biyogaz için gerekli hava miktarı; 1,20375O_2 + 4,5261N_2 = 5,73 mol olarak hesaplanmaktadır [35].

Ancak, çalışma kapsamında metana karbondioksit eklenerek biyogaz elde edilecektir. Bu doğrultuda, karbondioksit eklenen metan-hava yanması için genel denklem:

$$(1-\beta)(CH_4 + (2+x)(O_2 + 3.76N_2)) + \beta CO_2 \rightarrow CO_2 + 2(1-\beta)H_2O + 7{,}56(1-\beta)N_2 + x(1-\beta)(O_2 + 3.76N_2)$$

şeklindedir [13]. Burada; β yakıt içerisindeki CO_2 mol kesrini, x fazla hava oranını ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında metana karbondioksit eklenerek biyogaz elde edileceğinden debilerin elde edilmesi için farklı her yakıt karışımının alt ısıl değerlerin hesaplanması gerekmektedir.

Tepkiyenlerin toplam karışımda kütlesel oranları:

$$Y_{CH4} = \frac{X_{CH4}W_{CH4}}{\sum X_i W_i}$$

$$Y_{CO2} = \frac{X_{CO2}W_{CO2}}{\sum X_i W_i}$$

ifadeleri ile elde edilir.

Toplam yakıt karışım kütlesi ise:

$$\sum X_i W_i = X_{CH4}W_{CH4} + X_{CO2}W_{CO2}$$

şeklindedir.

Bu işlemlerin ardından yakıt karışımının alt ısıl değeri:

$$LHV_{yakıt} = LHV_{CH4} x Y_{CH4}$$

ifadesi ile elde edilmektedir [44]. CO_2 yanıcı bir gaz değildir.

Bir yakıttan, stokiyometrik oranda hava ile reaksiyona girdiğinde maksimum miktarda ısı açığa çıkar ve yakıtın içerdiği tüm hidrojen ve karbon CO_2 ve H_2O ya dönüşür. Bu maksimum enerji yanma ısısı veya birim kütle başına verilen ısıl değer olarak adlandırılmaktadır.

Yanmanın üç önemli ayağı vardır (3T):

- Yanma sıcaklığı (Temperature)
- Türbülans (Turbulance)
- Zaman (Time)

Ortamda sadece oksijen ve yanıcı gaz bulunması yanma için yeter şart değildir. Yanıcı karışım sıcaklığının tutuşma (yanma) sıcaklığı üzerine çıkarılması gerekmektedir. Gerek düşük sıcaklıkta (eksik yanma, alev sönmesi vb.) gerekse yüksek sıcaklıktaki (NO_x oluşumu vb.) yanmalar olumsuz sonuçlar meydana getirebilmektedir. Aynı şekilde, yanmanın verimli gerçekleşebilmesi için homojen karışımın (türbülans) ve yanma için yeterli sürenin sağlanması önemlidir.

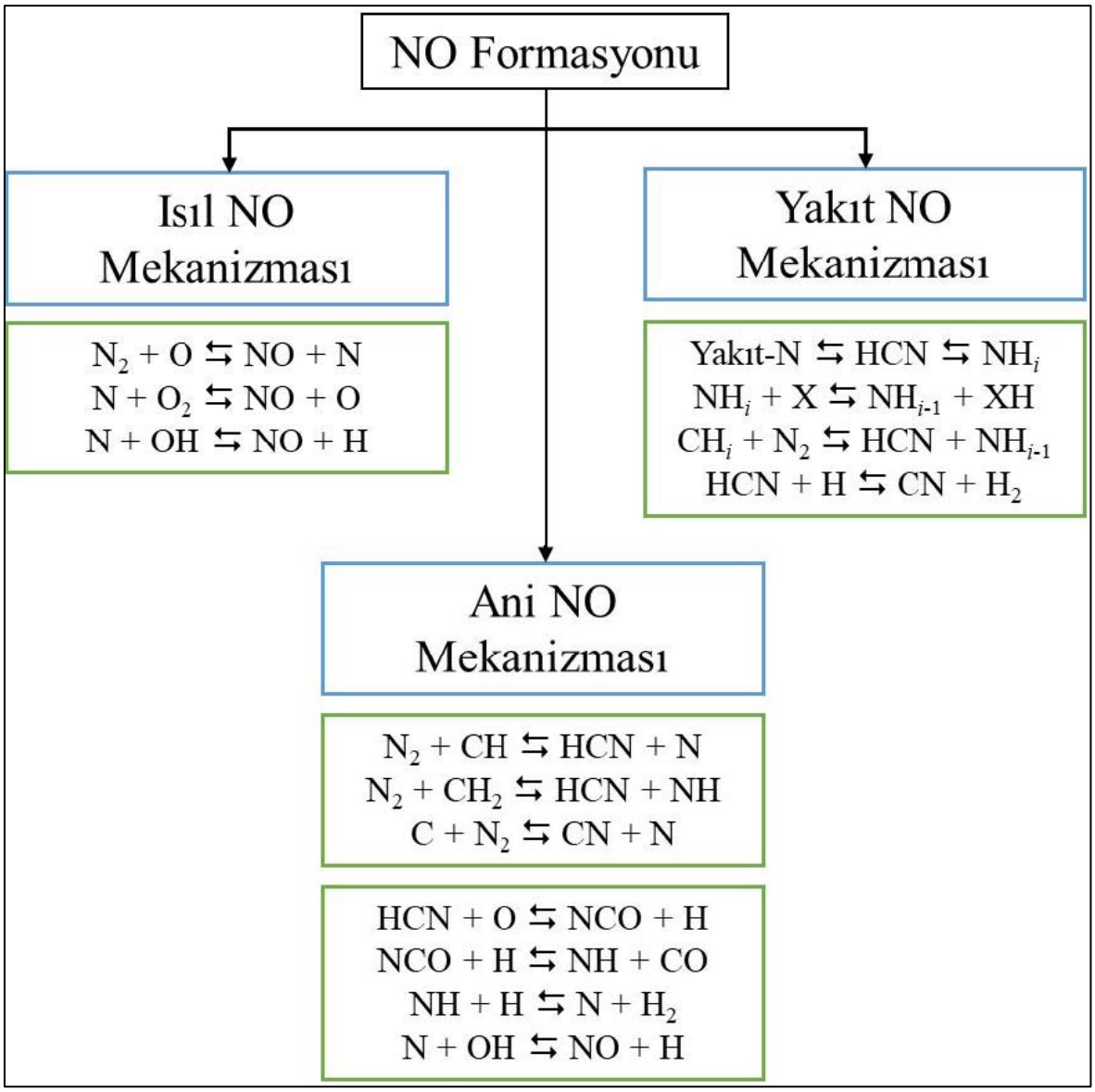
3.5. NOx Oluşum Mekanizmaları

Azot oksitler kükürtdioksitlerle birlikte en yaygın kirleticilerdendir. Azotoksitler yanma sonucu, hem NO hem de NO_2 formunda çıkmaktadır. Bu yüzden NO_x olarak isimlendirilmektedir.

Diğer birçok emisyonun aksine, NO oluşumunu ve emisyonunu tamamen kinetik değerlendirmelerle tahmin etmek neredeyse imkansızdır. NO oluşumu için genellikle üç farklı yol vardır ve bunların önemi sıcaklık, alev ve alev sonrası bölgelerdeki serbest

radikallerin konsantrasyonu, yakıt türü, hava-yakıt karışım oranı, gaz akışı ve karışım özellikleri gibi konulara bağlıdır [45]. NO_x oluşumu farklı mekanizmalarla gerçekleşmektedir:

- Termal NO,
- Ani (prompt) NO
- Yakıt NO



Şekil 3.3. NO formasyonlarının gösterimi [46]

Azot ve oksijen atmosferde birbirleriyle reaksiyona girmeden bir arada bulunmasına rağmen, yüksek sıcaklıklarda genel reaksiyonla birleşerek NO'yu oluştururlar.

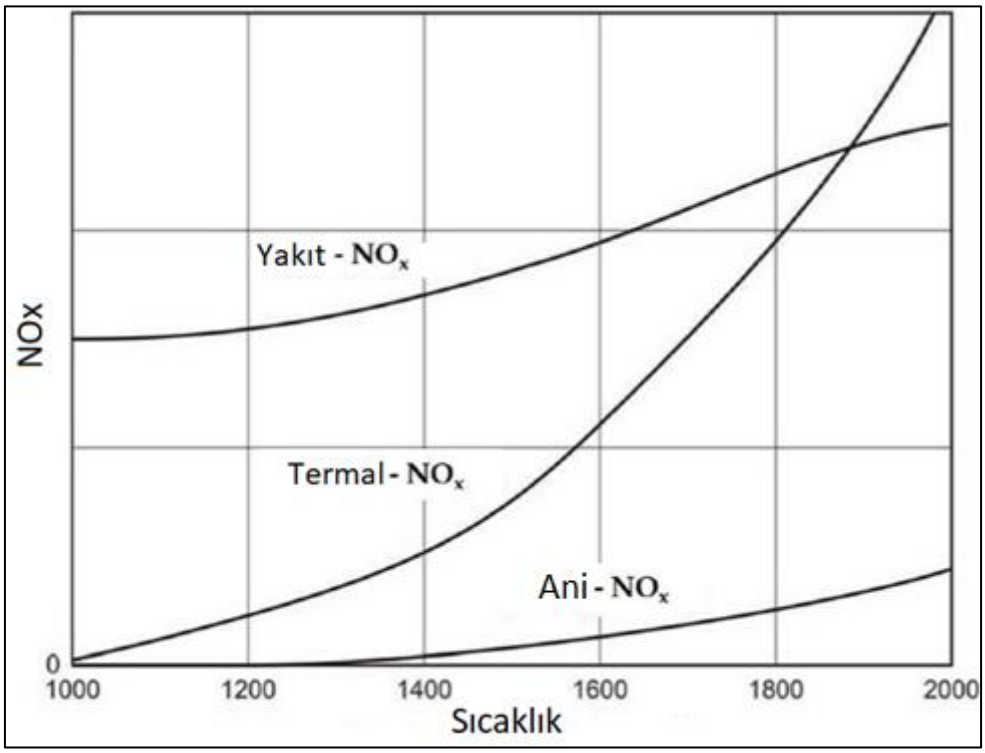
$N_2 + O_2 \leftrightarrows 2NO$

Moleküler nitrojen üçlü bağı nedeniyle reaktif değildir. Termal nitrojen, yüksek sıcaklıktaki yanma proseslerinde (1600°C'nin üzerinde) belirgin bir şekilde ortaya çıkar. Termal NO oluşumu, Zeldovich mekanizması adı verilen bir dizi yüksek sıcaklığa bağlı zincirleme reaksiyonla belirlenir.

$N_2 + O \leftrightarrows N + NO$

$N + O_2 \leftrightarrows O + NO$

Her iki reaksiyonun aktivasyon enerjileri çok yüksektir. Bu nedenle oluşum hızları düşük sıcaklıklarda ihmal edilebilir düzeyde olup, yüksek sıcaklıklarda önemli ölçüde artmaktadır. Şekil 3.3'te sıcaklığın NO_x oluşumuna etkisi görülebilmektedir.



Şekil 3.4. Yanma sıcaklığının farklı NOx türlerinin oluşumuna etkisi [47]

Ani (prompt) NO, nitrojen moleküllerinin hidrokarbonların yanmasından üretilen bir dizi serbest radikalle reaksiyonunun bir sonucu olarak alev cephesinde oluşur. Hidrokarbon yakıt bozunmasının yüksek olduğu yakıt açısından zengin bölgelerde yakıt NO_x'tan ziyade ani

(prompt) NO_x oluşumu önemlidir. Oluşan NO miktarı büyük ölçüde yakıt-hava oranına bağlıdır. En yüksek NO_x oluşumu yakıt açısından zengin bölgede meydana gelir. Genel olarak kabul edilen ani (prompt) NO oluşum yöntemi aşağıdaki gibidir [48]:

$$CH + N_2 \leftrightarrows HCN + N$$
$$N + O_2 \leftrightarrows NO + O$$
$$HCN + OH \leftrightarrows CN + H_2O$$
$$CN + O_2 \leftrightarrows NO + CO$$

Ani (prompt) NO_x oluşumunda olduğu gibi yakıt içeriğinde yer alan azottan da NO_x (yakıt NO_x) oluşabilmektedir. Yakıtın ayrışması ile birlikte ortaya çıkan HCN radikalleri, ilerleyen reaksiyonlar sonucunda NO'ya dönüşmektedir. Ancak, bu işlem yakıtın azot içeriğine bağlımlıdır [47].

4. KOMBİ SİSTEMLERİ

Kombiler konut, ofis gibi kapalı alanlarda ısıtma ihtiyacını karşılamak ve kullanım sıcak suyu konforunu sağlamak amacıyla kullanılan, doğal gaz veya LPG yakan ısıtma cihazlarıdır [49]. Sessiz çalışmaları, boyutlarının küçük olması ve duvara asılabilmeleri nedeniyle daha az yer kaplamaları gibi sebeplerle, konut, ofis gibi küçük ölçekli alanlarda sıcak su ve ısıtma için uygundur.

Kombiler atık gazı sistemden uzaklaştırma ve yanma için gerekli oksijeni dış ortamdan temin etme şekillerine göre temelde bacalı ve bacasız olarak ikiye ayrılmakla birlikte, uygulama alanı, özellik, donanım gibi farklı şekillerde sınıflandırılabilmektedir [50].

1. Teknoloji bakımından

a. Bacalı Kombiler
b. Hermetik Kombiler
c. Yarı Hermetik Kombiler
d. Yoğuşmalı Kombiler
e. Yarı yoğuşmalı Kombiler

2. Eşanjör türüne göre

a. Monotermik
b. Bitermik
c. Alüminyum

3. Yakıt türüne göre

a. Doğalgaz
b. LPG

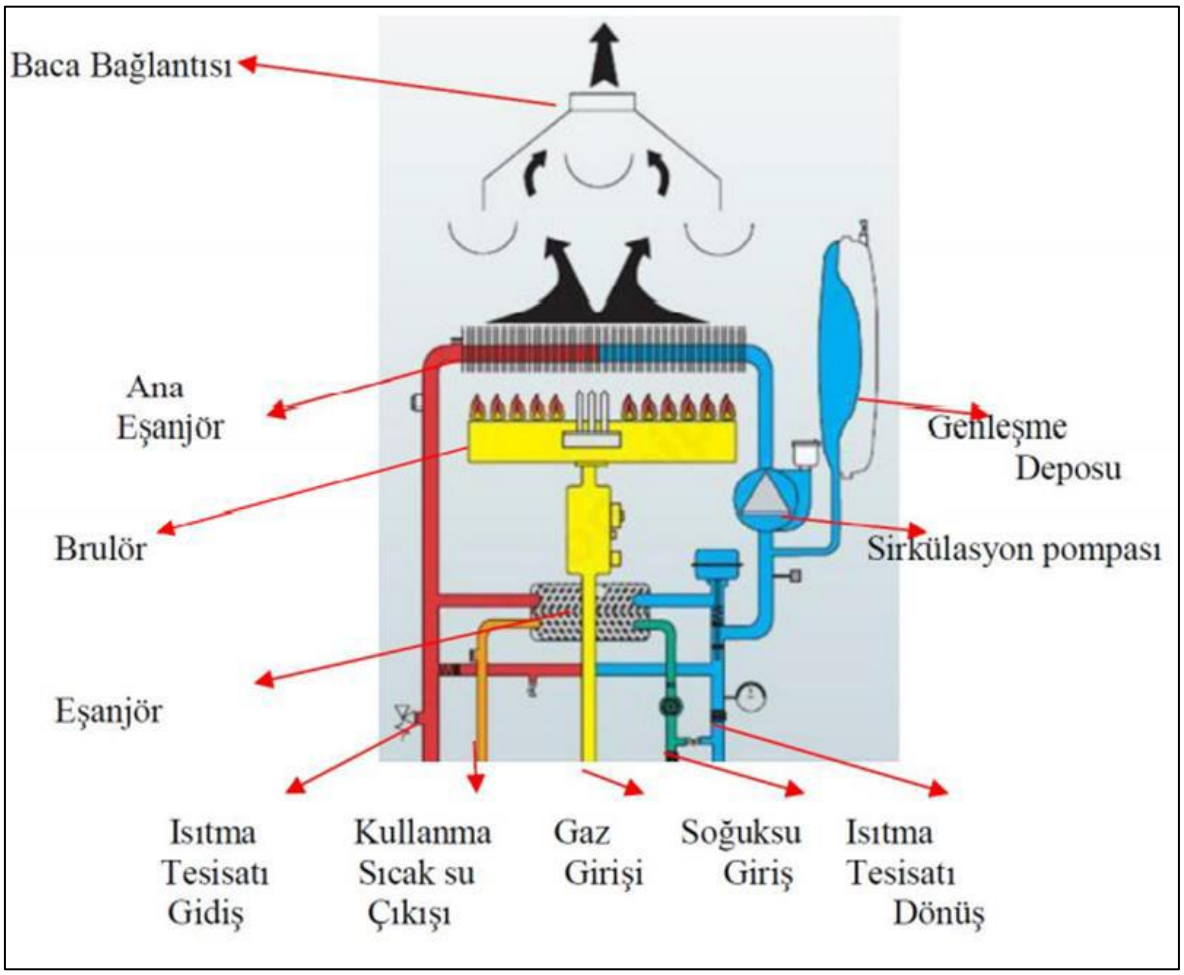
4. Brülör türüne göre

a. Ön karışımlı
b. Atmosferik
c. Modülasyonlu

Son dönemde yoğuşmalı kombi teknolojileri tercih edilmektedir. Yoğuşmalı kombiler, bacadan atılan atık gaz içerisindeki su buharını yoğuşturarak buhar içerisinde bulunan gizli ısıyı sisteme ön ısıtma olarak aktaran sistemlerdir.

4.1. Bacalı Kombiler

Atmosferik çalışan brülöre sahip, yanma odası bulunduğu ortama açık olan, yanma havasını bulunduğu ortamdan sağlayan ve bacaya bağlanarak kullanılan kombilerdir. Elektronik fan sistemi olmayan bu kombilerde yanma sonrası oluşan atık gazlar baca vasıtasıyla dışarı atılır. Bu sebeple atık gazın tehlike oluşturmaması adına, bacalı kombilerin bacasının monte edileceği yerin sızdırmaz olması ve baca çekişinin kuvvetli olması gerekmekte ayrıca monte edildiği ortamın sürekli ve yeterli şekilde havalandırılması gerekmektedir. Şekil 4.1'de bacalı tip kombinin temel bileşenleri gösterilmiştir.



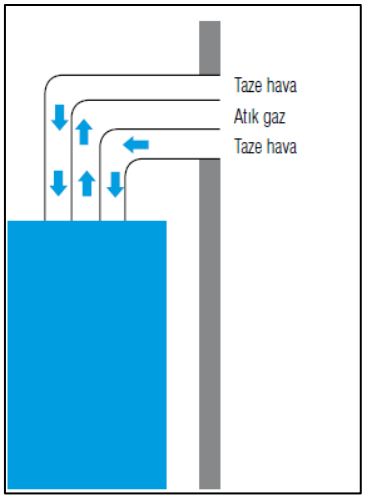
Şekil 4.1. Bacalı tip kombi bileşenleri [50]

4.2. Hermetik Kombiler

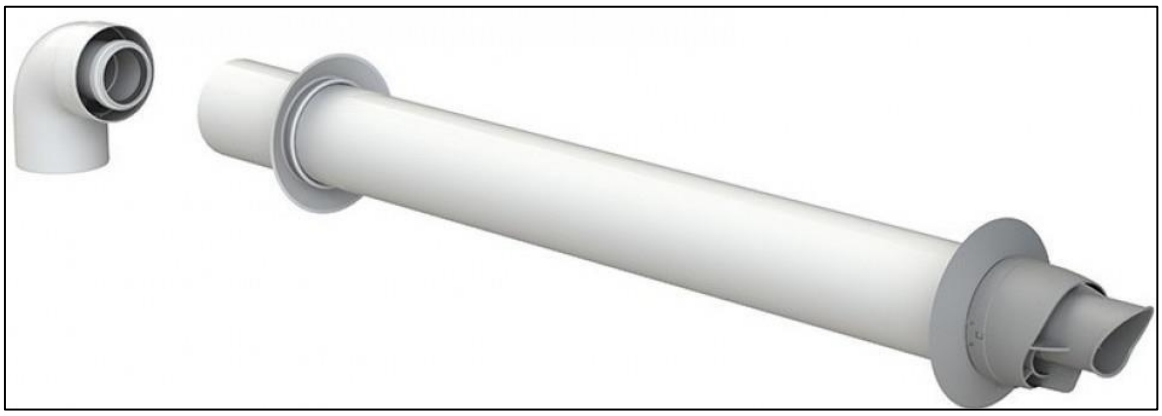
Hermetik kelimesi, Fransızca kökenli bir sözcük olup yalıtımlı anlamına gelmektedir. Yanmanın gerçekleştiği oda bulunduğu ortamdan yalıtılmış olup ihtiyaç duyulan hava baca

yardımıyla dış ortamdan temin edilir. Yanma sonucunda ortaya çıkan gazlar da bulunduğu ortama değil baca vasıtasıyla bulunduğu ortam dışına atılır. Söz konusu yöntemle, dışarıdan yalıtılmış olarak çalışan kombiler hermetik kombi olarak ifade edilmektedir.

Yanma ürünü gazlar, kombide yer alan fan ile birlikte dışarı atılmaktadır. Bu şekilde kombinin bulunduğu ortam gaz bakımından temiz kalmaktadır.



Şekil 4.2. Hermetik tip kombi bacası şematik görünümü [51]



Şekil 4.3. Hermetik tip kombi bacası [50]

Hermetik kombilerde kullanılan baca hem temiz havayı yanma odasına almak hem de atık gazı dışarı atmak için iç içe geçmiş iki borudan oluşmaktadır. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te görüleceği üzere iç içe geçmiş olan iki bacalı bağlantıya sahip baca aparatları sayesinde, yanma için ihtiyaç duydukları taze havayı dış ortamdan temin eder ve atık gazı da aynı

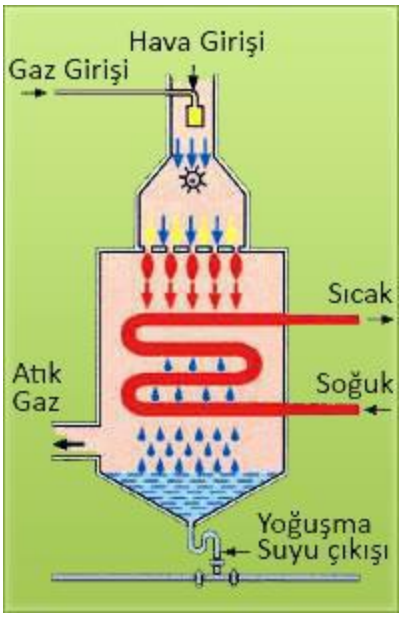
şekilde dış ortama atarlar. Yani doğalgaz kombisi ister mutfağın içinde olsun isterse balkon ya da başka bir yerde ortamın hava kalitesini etkilemez [52].

Tez kapsamında deneysel çalışmalar hermetik tip kombi ile gerçekleştirilmiştir.

4.3. Yoğuşmalı Kombiler

Bu kombiler; yanma ürünü olan gazların gizli ısısından faydalanmaktadır. Bu kombilerde, baca vasıtasıyla atılmakta olan gazın sıcaklığının ısı değiştiricisi aracılığıyla yoğuşma sıcaklığına indirilmesi ile gaz içinde bulunan su buharının gizli ısısı kullanılmakta ve yüksek termal verim elde edilmektedir [50].

Yanma sonucu ortaya çıkan atık gaz içerisinde su buharı da yer almaktadır. Yoğuşmalı kombiler, atık baca gazının içerisinde bulunan su buharının yoğuşturularak ortaya çıkan ısıyı tesisata içine aktarmak üzere tasarlanmış cihazlardır. Şekil 4.4'te yoğuşmalı kombinin çalışma şekli gösterilmiştir. Yoğuşma ısısını atık gazdan elde ettikleri için konvansiyonel cihazlara göre daha verimli çalışırlar [46].



Şekil 4.4. Yoğuşmalı kombinin çalışma şekli [46]

Baca gazı sıcaklıkları konvansiyonel kombilerde 200–250 °C olurken yeni nesil yoğuşmalı kombilerde 50-60 °C'dir. Standart kombilere göre daha sessiz çalışma özelliğine sahiptir.

4.4. Kombi Yanma Odası

Kombi yanma odası Şekil 4.5'te gösterildiği gibi kapalı bir hücre şeklindedir. Yanma için ihtiyaç olan havayı bir fan aracılığıyla dış ortamdan alır ve yanma sonucunda meydana gelen atık gazları atmosfere verir.

Resim 5.1. Yanma odası [46]

Yanma işlemi hava ile yakıtın karışım şekline bağlı olarak; ön karışımlı, ön karışımsız ve kısmi ön karışımlı olarak incelenebilir [50].

Ön karışımlı brülörler; hava ile yakıtın yanma odasına alınmadan karıştırıldığı brülörlerdir. Çoğunlukla tam yoğuşmalı olan kombilerde bu tip brülörler kullanılmaktadır. Ön karışımlı brülörlerde diğerlerine göre daha yüksek yanma verimliliği ve daha düşük emisyon değerleri elde edilebilmektedir.

Ön karışımsız brülörler; yakıt ve havanın yanma odasına ayrı ayrı alındığı, yanma işleminin başlangıcında karıştıkları brülörlerdir. Konvansiyonel ve yarı yoğuşmalı kombi modellerinde bu tip brülörler tercih edilir.

Kısmi ön karışımlı brülörler; yakıt ile havanın gaz girişinde belirli oranda kontrolsüz olarak karıştığı tipteki brülörlerdir.

5. SAYISAL MODEL

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkan davranışının, dinamiğinin etkin olduğu problemlerin, bilgisayar yardımı ile sayısal yöntem ve algoritmalar kullanılarak çözülüp analiz edilmesini sağlar. Maliyet etkinliği ve zaman kazandırması gibi avantajları ile günümüz koşullarında araştırma-geliştirme faaliyetleri sırasında birçok işlem ve cihazların simülasyonunda zaman ve maliyet olarak avantajlı imkânlar sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında FLUENT yazılımı ile kombi yanma odası modellenmiştir.

5.1. Temel Denklemler

Simülasyonda kullanılan matematiksel model, kütle, momentum ve enerji için taşınım denklemlerinin sayısal çözümüne dayanmaktadır [3]. Biyogazın yanma işlem sırasında gerçekleşen süreçleri tanımlayan kısmi diferansiyel denklemler aşağıda sunulmaya çalışılmıştır [53].

Kimyasal türler için korunum denklemlerini çözmek amacıyla, i'ninci tür için konveksiyon-difüzyon denkleminin çözümü yoluyla her türün yerel kütle oranı (Y_i) tahmin edilir. Bu korunum Eş. 5.1'de gösterildiği genel formdadır:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla.(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla.\vec{J_i} + R_i + S_i \tag{5.1}$$

R_i, i türünün kimyasal reaksiyon yoluyla net üretim hızıdır. S_i, dağınık faz ve kullanıcı tanımlı herhangi bir kaynaktan ekleme yoluyla oluşturulma oranıdır. Bu denklem N-1 tür için çözülecektir. Burada N, sistemde mevcut olan akışkan fazdaki kimyasal türlerin toplam sayısıdır. Türün kütle kesrinin toplamının bir olması gerektiğinden, N'inci kütle kesri, çözülmüş N-1 kütle kesirlerinden bir eksisinin toplamı olarak belirlenir. Sayısal hatayı en aza indirmek için N'inci tür genel olarak en yüksek kütle oranına sahip tür olarak seçilmelidir.

Türbülanslı akışlarda kütle difüzyonu Eş. 5.2'de gösterildiği biçimde hesaplanır.

$$\vec{J_i} = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\nabla Y_i - D_{T,i}\frac{\nabla \mathrm{T}}{T} \tag{5.2}$$

Sc_t Schmidt sayısı olup varsayılan değeri 0,7'dir. μ_t türbülans viskozitesi ve D_t ise türbülans yayınımıdır.

Birçok çok bileşenli karışım akışı için tür difüzyonundan kaynaklanan entalpinin taşınması:

$$\nabla.\left[\sum_{i=1}^{n} h_i \vec{J}_i\right]$$

şeklindedir.

Entalpi alanı üzerinde, entalpinin taşınması önemli bir etkiye sahip olabilir. Bu durum göz önünde bulundurularak herhangi bir tür için Lewis sayısının 1'den uzak olduğu durumlarda bu husus analizde ihmal edilmemelidir.

Basınca dayalı çözücü için, türlerin girişlerde taşınması hem konveksiyon hem de difüzyon bileşenlerinden oluşur. Konveksiyon bileşeni, hesaplama yapan tarafından belirlenen giriş türü kütle oranı ile sabitlenir. Ancak, difüzyon bileşeni girişte hesaplanan tür alanının eğimine bağlıdır.

Eşitlik 5.1'de kaynak terimlerden olan reaksiyon hızı (R_i) için Eddy-dissipation modeli kullanılmaktadır. Bu modelde reaksiyon hızlarının türbülans tarafından kontrol edildiği varsayılmakta olup Arrhenius kimyasal kinetik hesaplamalarından kaçınılabilmektedir.

r reaksiyonu nedeniyle i türünün net üretim oranı R_i, Eş. 5.3 ve Eş. 5.4'ten küçük olanı ile verilmektedir.

$$R_{i,r} = v'_{i,j} M_{w,i} A\rho \frac{\varepsilon}{k_R^{min}} \left(\frac{Y_R}{v'_{i,r} M_{w,R}}\right) \tag{5.3}$$

$$R_{i,r} = v'_{i,j} M_{w,i} AB\rho \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\sum_P Y_R}{\sum_j^N v_{j,r}^n M_{w,j}}\right) \tag{5.4}$$

Y_P herhangi bir çıkan (ürün) türün kütle oranını, Y_R ise herhangi bir reaktant türün kütle oranını ifade etmektedir. A ve B deneysel sabitler olup sırasıyla 4 ve 0,5'e eşittirler. ε türbülans yayınım oranını, k kütle başına türbülans kinetik enerjisini ifade etmektedir.

Eş. 5.3 ve Eş. 5.4'te kimyasal reaksiyon hızı, büyük girdaplı karıştırma süresi ölçeğine (k/ε) göre yönetilmektedir. Türbülans mevcut oldukça (k/ε>0) yanma devam etmektedir ve yanmayı başlatmak için bir ateşleme kaynağına gerek yoktur.

5.2. Türbülans Modelleri

Türbülanslı akış söz konusu olduğunda karmaşık olayların artarda oluştuğu bilinmektedir. Bu süreçte akış davranışı, kontrolsüz ve karmaşıktır. Türbülanslı akışta akış özellikleri devamlı değişken şekildedir. Bu karmaşıklık nedeniyle türbülanslı akışlarda bir noktadaki hız, ortalama ve değişen bileşenlerinin toplamı olarak hesaba katılmalıdır [3].

Bu çalışmada gerçekleştirilen sayısal analizlerde FLUENT programında yer alan türbülans modelleri arasından realizable k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. k-ε modeli içerisinde yer alan bütün alt modeller türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerji yayılma hızına dayalı hesaplama yapmaktadır. Tam gelişmiş türbülanslı akışlarda iyi sonuçlar elde edilebilmektedir.

Realizable k-ε modeli yanında; standart ve RNG (renormalizasyon grup teorisi) türbülans modelleri de program içerisinde mevcuttur. Bu modellerin karşılaştırıldığı analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur.

5.2.1. Standart k-ε türbülans modeli

Bu model, özellikle genel amaçlı analizler için kararlı ve sayısal olarak sağlam olduğu kanıtlanmış ve iyi kurulmuş bir tahmin yeteneği rejimine sahiptir.

Türbülans kinetik enerjisi (k) ve onun yayılma hızı (ε) için taşıma denklemlerine dayanan yarı deneysel bir modeldir. Modelin türetilmesinde, akışın tamamen türbülanslı olduğu ve moleküler viskozitenin etkilerinin ihmal edilebilir olduğu varsayımı vardır.

Türbülans kinetik enerjisi, k;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial_k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \tag{5.5}$$

Yayılma hızı, ε;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial_\epsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}(G_k + C_{3\epsilon}G_b) - C_{2\epsilon}\rho\frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \tag{5.6}$$

eşitliklerinden elde edilir [48].

Burada G_k ortalama hız gradyenti sebebiyle türbülans kinetik enerjisi üretimini, $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$ deneysel olarak elde edilen sabitleri, σ_k ve σ_ε Prandtl sayılarını göstermektedir.

Türbülans vizkositesi μ_t;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{5.7}$$

şeklinde ifade edilmektedir. C_μ, deneysel bir sabit olup, bu model için bu değer 0,09 şeklindedir.

5.2.2. Realizable k-ε türbülans modeli

Standart k-epsilon modeli ile karşılaştırıldığında iki açıdan önemli fark görülmektedir [48].

- Model, türbülanslı viskozite için yeni bir yöntem içermektedir.
- Dağılım hızı için yeni bir taşıma denklemi olan epsilon, ortalama kare girdap dalgalanmasının taşınması için tam bir denklemden türetilmiştir.

"Realizable" terimi, modelin, türbülanslı akışların fiziği ile tutarlı olarak Reynolds gerilimleri üzerindeki belirli matematiksel kısıtlamaları karşıladığı anlamına gelir. Realizable k-epsilon modelinin faydası, hem düzlemsel hem de yuvarlak/oval jetlerin yayılma oranını daha doğru bir şekilde tahmin etmesidir. Ayrıca; rotasyon, güçlü ters basınç değişimleri altındaki sınır katmanları, ayırma ve sirkülasyon içeren akışlar için de üstün

performans sağlamaktadır. Modeller karşılaştırıldığında temel farkın enerji yayılma hızı (ε) denkleminde olduğu görülmektedir.

Türbülans kinetik enerjisi, k;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial_k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \tag{5.8}$$

Yayılma hızı, ε;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial_\epsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S\epsilon - C_2\frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu\epsilon}} + C_{1\epsilon}C_{3\epsilon}\frac{\epsilon}{k}G_b + S_\epsilon \tag{5.9}$$

eşitliklerinden elde edilir [48].

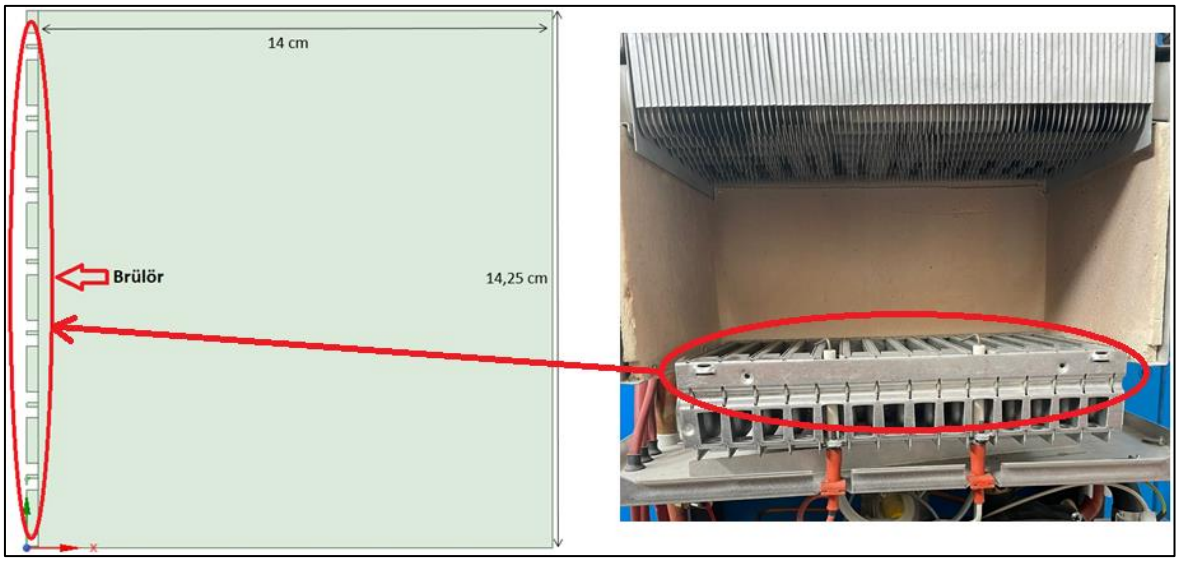
Eşitlik 5.7’de ifade edilen türbülans vizkositesindeki Cμ deneysel sabiti bu model için;

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s\frac{k}{\varepsilon}U^*} \tag{5.10}$$

şeklindedir.

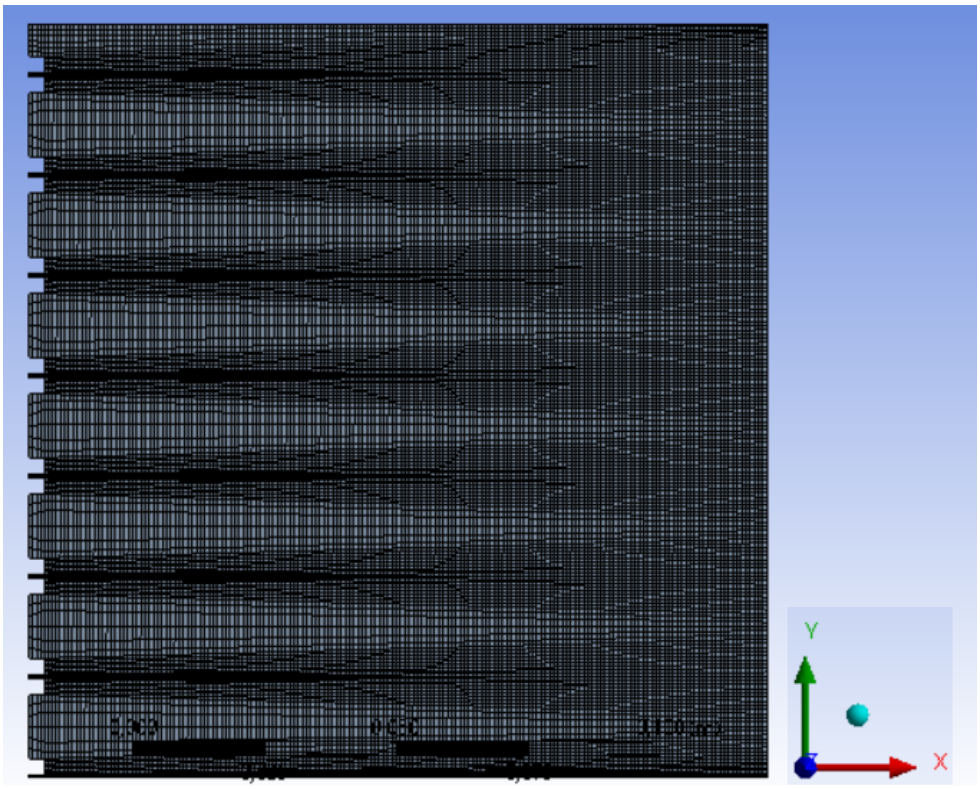
5.3. Modelleme

Deneysel ve sayısal modellemelerin yapıldığı tipik bir yoğuşmalı hermetik tip kombi yanma odası ve 2 boyutlu geometrik modeli Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Yakıt enjektör çapı 1 mm’dir.

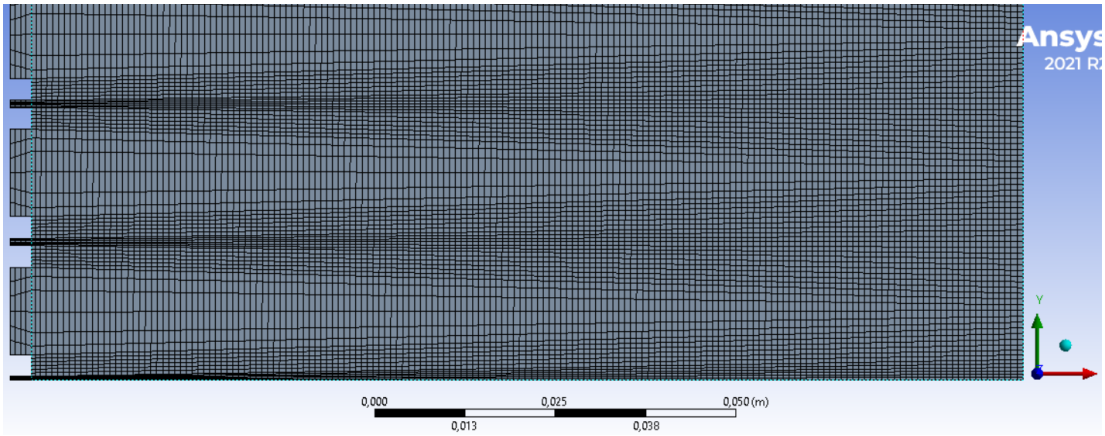


Şekil 5.1. Hermetik tip kombi yanma odası

Simetrik yapıdan yararlanmak, hesaplama yükünü azaltmak ve hesaplama hızını artırmak için, sıfır kalınlıkta iki boyutlu düz bir yüzeye sahip bir yanma bölgesi tasarlanmıştır.



Şekil 5.2. Ağ yapısı genel görüntü

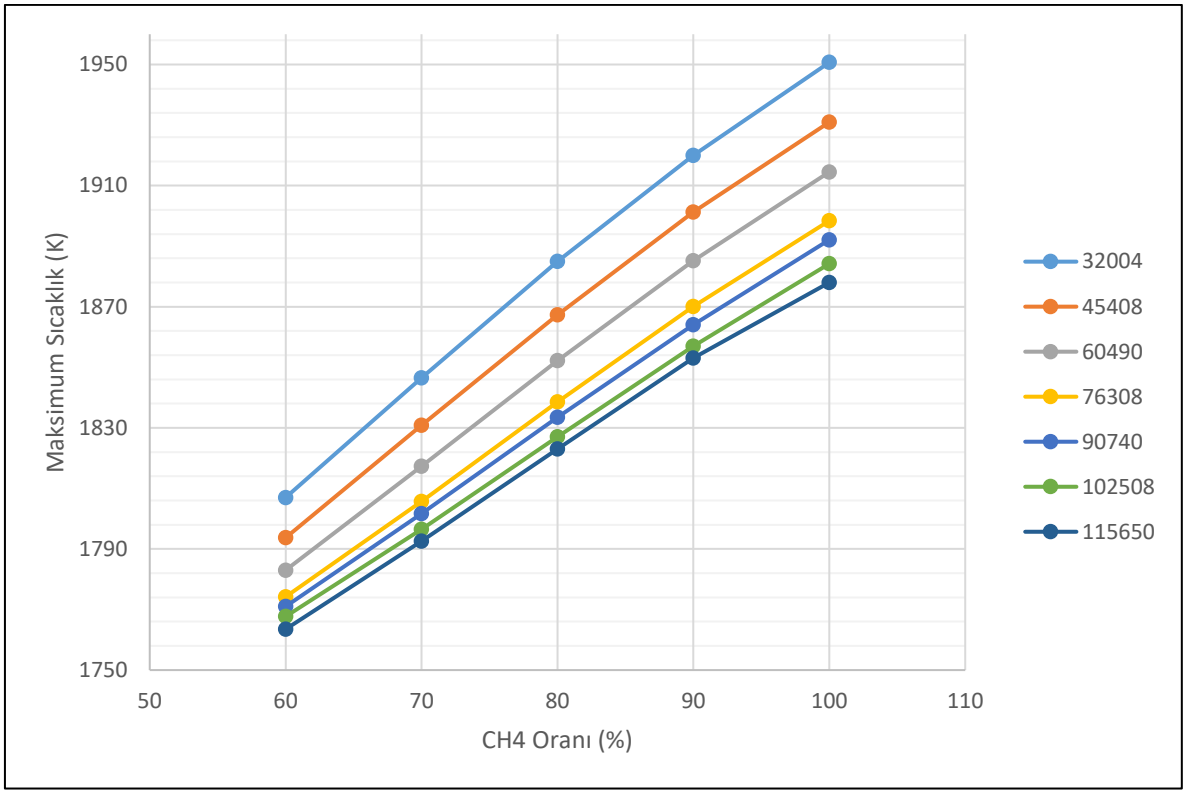


Şekil 5.3. Ağ yapısı detay görüntü

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te yer verildiği şekilde bir ağ yapısı (mesh) oluşturulmuştur. Burada verilen görseldeki ağ yapısı 32004 hücreden oluşmaktadır.

5.4. Ağ Bağımsızlaştırma

Sayısal çözümlemelerde; kullanılan bilgisayarın perfomans yetersizliği, zaman problemi gibi bazı sorunlardan kaçınmak adına kullanılan ağ yapısındaki hücre sayısından bağımsızlaştırma işlemi yapmak bilinen faydalı bir yöntemdir. Bu kapsamda, bu çalışmada da ağ yapısı ile ilgili bağımsızlaştırma çalışması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.4. Element sayısına göre sıcaklık değerleri

Bağımsızlaştırma çalışması için; 32004, 45408, 60490, 76308, 102508 ve 115650 element sayılı farklı ağ yapıları ile analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere 76308 element sayısından sonra sıcaklık sonuçlarının yakınsadığı görülmüştür. Bu ağ yapısındaki element sayısından daha fazla element sayısı kullanmak, çözüm için gerekli zamanı uzatacağından, modellemeler için en uygun ağ yapısı olarak 76308 element sayılı ağ yapısı seçilmiştir.

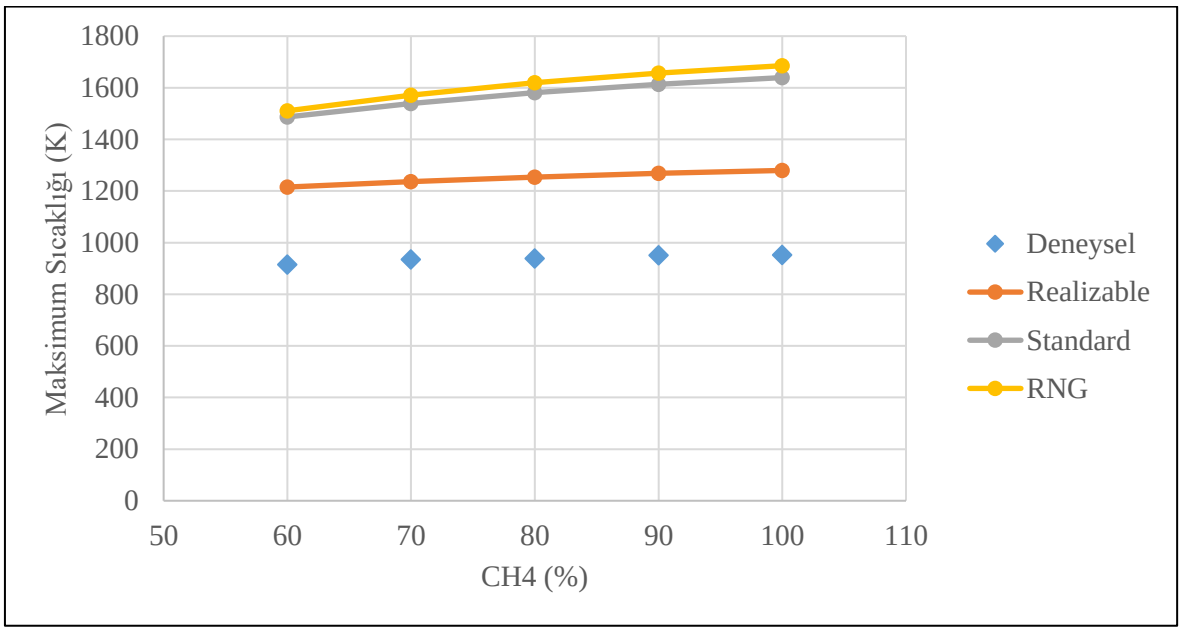
Çizelge 5.1. Element sayısı 76308'de ağ yapısı kalitesi

	Min	Max	Average
Skewness	3,48E-04	0,2837	1,31E-02
Orthogonal Quality	0,9025	1	0,99928
Aspect Ratio	1,0002	15,238	2,4243

Mesh kalitesine ilişkin veriler Çizelge 5.1'de görülmekte olup oluşturulan ağın analizler için yeterli kalitede olduğu anlaşılmaktadır.

5.5. Türbülans Modeli

Çalışma kapsamındaki sayısal analizlerde türbülans modelleri arasından realizable k-ε türbülans modeli ile analizler gerçekleştirilmiştir.



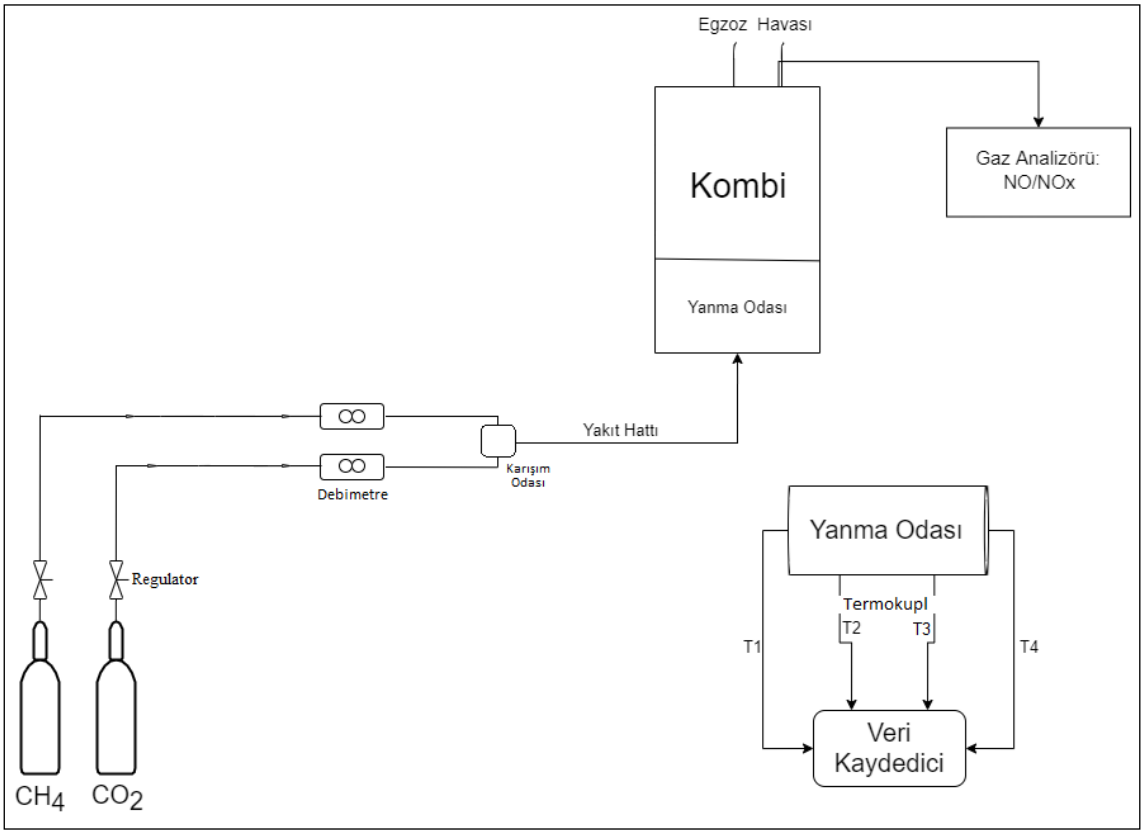
Şekil 5.5. Türbülans modellerinin karşılaştırılması

k-ε türbülans modelinin, standart, RNG (renormalizasyon grup teorisi) ve realizable olmak üzere üç farklı versiyonu bulunmaktadır. Bu versiyonlardan deneysel sonuçlara en yakın olanı çalışma kapsamında tercih edilmiştir. Şekil 5.5'te görüldüğü üzere realizable k-ε türbülans modeli deneysel sonuçlara en fazla yakınsayan model olmuştur.

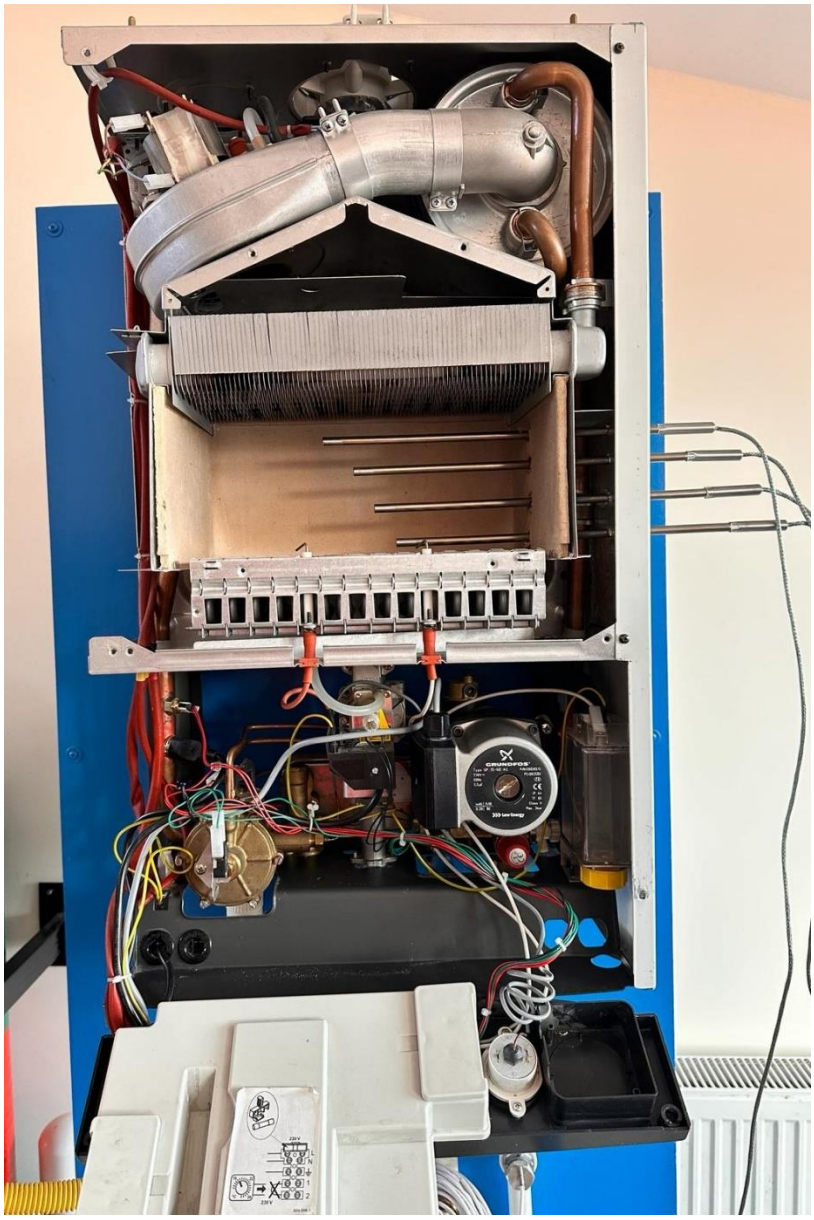
6. DENEY DÜZENEĞİ

Tez çalışmasında deney düzeneği Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Biriminden destek alınan “FDK-2022-7645” kodlu proje ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumundan (TÜBİTAK) destek alınan “123M232” kodlu projeler ile oluşturulmuştur.

Deney düzeneğinin genel çizimi Şekil 6.1'de şematik olarak gösterilmiştir. Deney düzeneği; yanma odasına gaz (CH_4 ve CO_2) girişlerini sağlayan kütle akış kontrol cihazları, Resim 6.2’de görüldüğü gibi yanma odasında 3’er cm aralıklarla ölçüm alan termokupllar, Resim 6.3’te görüldüğü gibi NO_x ölçümünü sağlayan baca gazı analizörü ve Resim 6.1’de görülen kombiden oluşmaktadır.



Şekil 6.1. Deney setinin şematik gösterimi



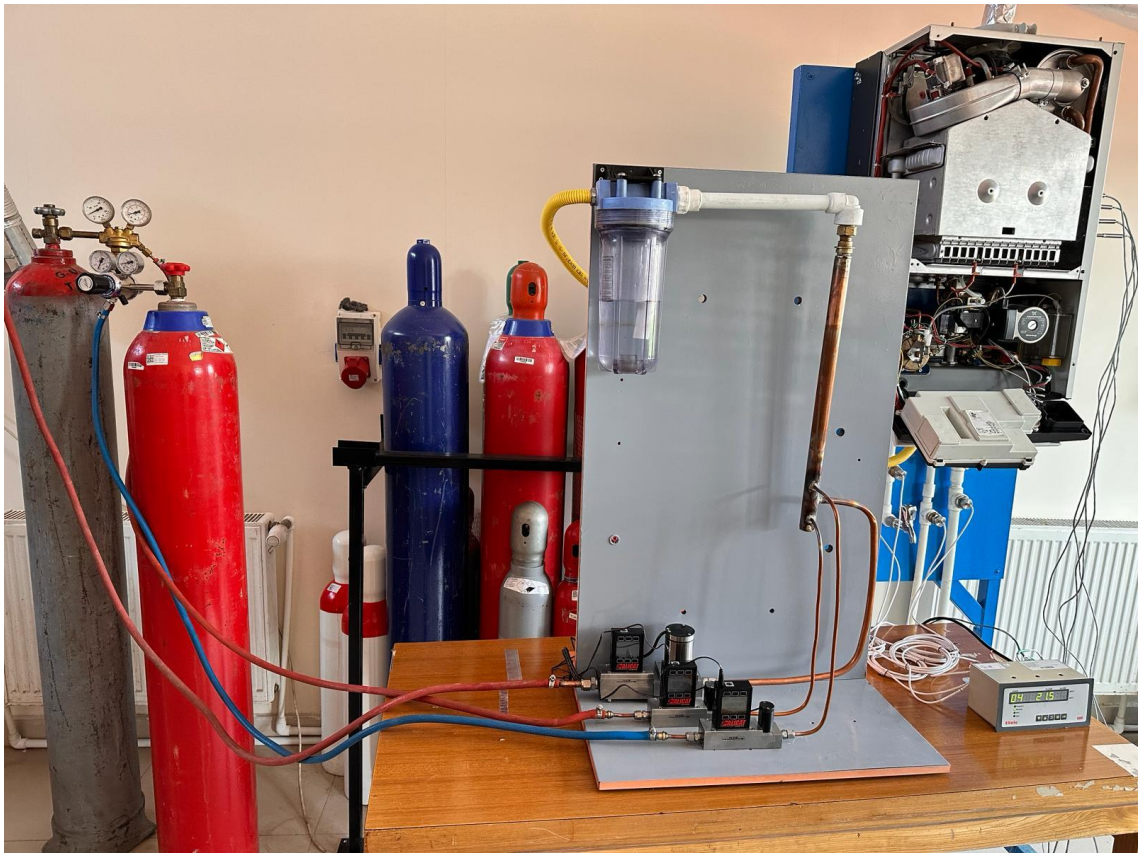
Resim 6.1. Kombi genel görünüm

Yüksek basınçlı CH_4 ve CO_2 silindirleri ve bunların her bir regülatörü (basıncı düzenlemek ve neredeyse atmosferik olan yanma basıncına düşürmek için) her bir gazı yanma odasına sağlamak üzere sisteme dahil edilmiştir. Yakma sistemi biri CH_4, diğeri CO_2 için olmak üzere iki ayrı gaz hattından oluşmaktadır. Yanma odasına verilmeden önce yakıt hattında CH_4 ve CO_2'nin daha iyi karıştırılması için bir karıştırma odası yer almaktadır.

Resim 6.2. Yanma odası ve sıcaklık ölçüm noktaları

Resim 6.3. Baca gazı ölçümü

Daha önce de belirtildiği gibi her biyogaz karışımı CH_4 ve CO_2'nin karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Deneyler, 13 kW'lık bir güce karşılık gelen 20 slpm'lik (standard liter per minute) bir CH_4 akış hızıyla gerçekleştirilmiştir. Toplam gücü 13 kW'da sabit tutmak için, 20 slpm CH_4 akışı sağlanarak her bir biyogaz karışımını elde etmek için farklı akış hızlarında kütle akış kontrol cihazı aracılığıyla CO_2 eklenerek (CO_2 %0'dan %40'a %5 aralıklarla) karışım yanma odasına alınmıştır. Akış hızları, yakıt karışımındaki CH_4 ve CO_2 konsantrasyonlarına göre hızlarında kütle akış kontrol cihazı aracılığıyla ayarlanmış ve daha sonra karıştırma odasında karıştırılmıştır. Resim 6.2'te gösterilen yanma odası 14 cm x 28,5 cm boyutlarında dikdörtgen bir yapıya sahiptir. Deneyler sırasında alev de gözlenmiştir (haznenin ön kasası deneyler sırasında kapatılmıştır). Resim 6.4'te yukarıda detayları verilen deney düzeneğinin son hali görülebilmektedir.



Resim 6.4. Deney düzeneği

Kütle akış kontrol cihazlarının, baca gazı analiz cihazının, termokuplların ve veri kaydedicinin özellikleri ve bunların ölçüm aralıkları ile belirsizlikleri Çizelge 6.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.1. Deneyde kullanılan cihazların özellikleri

Ölçüm	Ölçüm Cihazı	Ölçüm Aralığı ve Belirsizlik
Sıcaklık	K Tipi Termokupl (Düz ve mineral yalıtımlı)	- 200 ºC ~ 1300 ºC ± 4 ºC
Debi	Kütle Akış Kontrol Cihazı	50 L/m ve 250 L/dk ± (0,8% Okuma + 0,2% Tam Ölçekli)
Data	Datalogger E-680	± 0,5
NO_X	Baca Gazı Analizörü	0 – 1000 ppm NO için 0 – 200 ppm NO_2 Hassasiyet: ±5 ppm

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sayısal ve deneysel çalışmaların sonuçları ve karşılaştırılması bu bölümde sunulmaktadır. Elde edilen sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

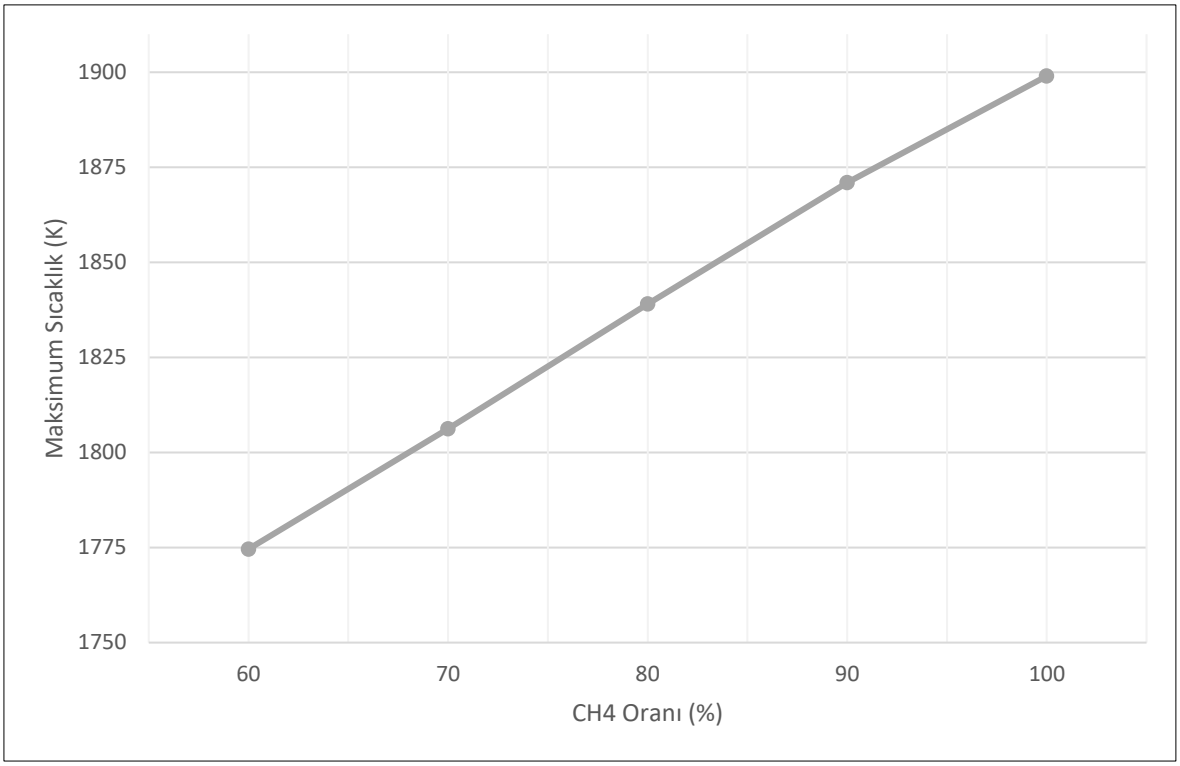
Sayısal çalışmalarda 13 kW ve 31 kW güç için analizler yapılırken deneysel çalışmalarda 13 kW güç ile sonuçlar elde edilmiştir. Tüm çalışmalarda alev sıcaklıkları ve NO_x değerleri elde edilmiştir.

7.1. Sayısal Analiz Sonuçları

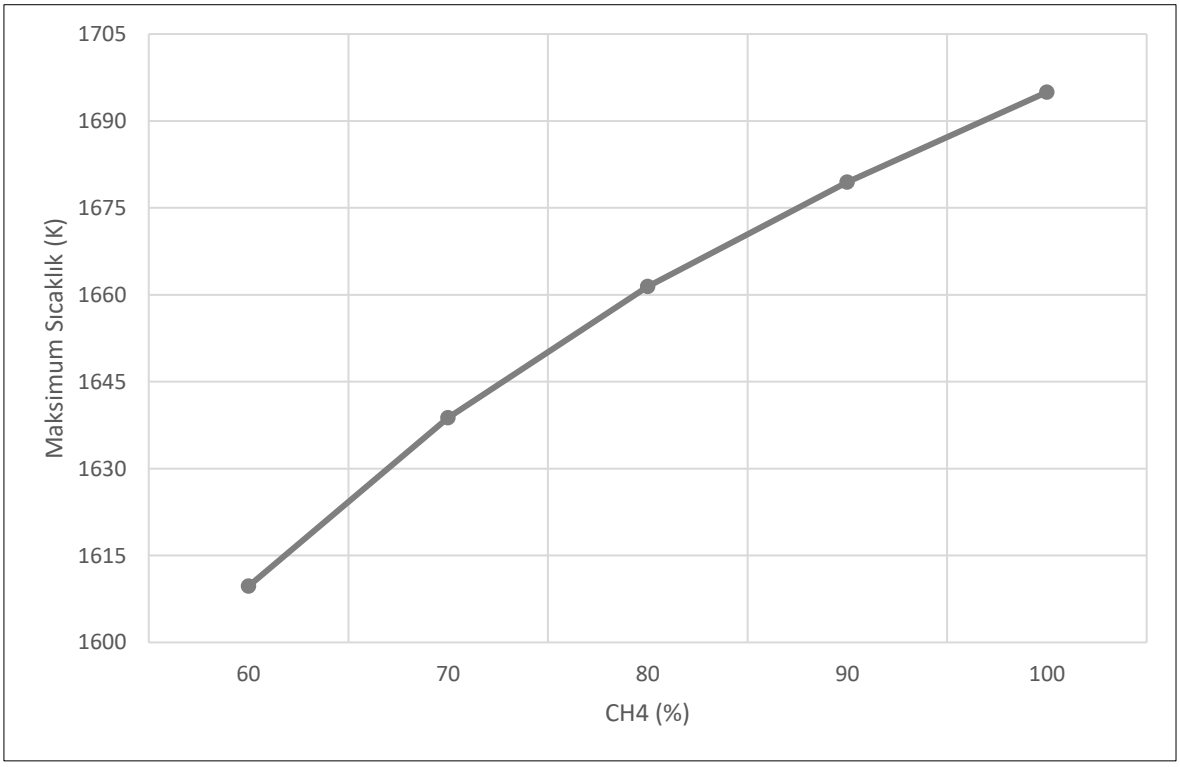
Realizable k-Ɛ türbülans modeli, türbülans modellerinin karşılaştırılması sonucu deneysel verilere daha yakınsadığı için sayısal analizlerde tercih edilmiştir. Kararlı durum koşulları altındaki simülasyonlarda basınca dayalı çözücü kullanılmıştır. Modellemelerde, hacimce %60 CH_4 - %40 CO_2, %70 CH_4 - %30 CO_2, %80 CH_4 - %20 CO_2 ve %90 CH_4 - %10 CO_2 karışımlı biyogazlar modellenmiş, eşdeğerlik oranı 1 olacak şekilde; farklı giriş hava sıcaklıkları ve farklı O_2 konsantrasyonları ile sıcaklık ve NO_x dağılımları elde edilmiştir.

7.1.1. Metan içeriğinin etkisi

Yanma sonu maksimum sıcaklıklar; giriş gazlarının bileşiminden ve sıcaklığından, yanma ürünü gazların bileşiminden, biyogazın ısıl değerinden ve debilerden etkilenmektedir.



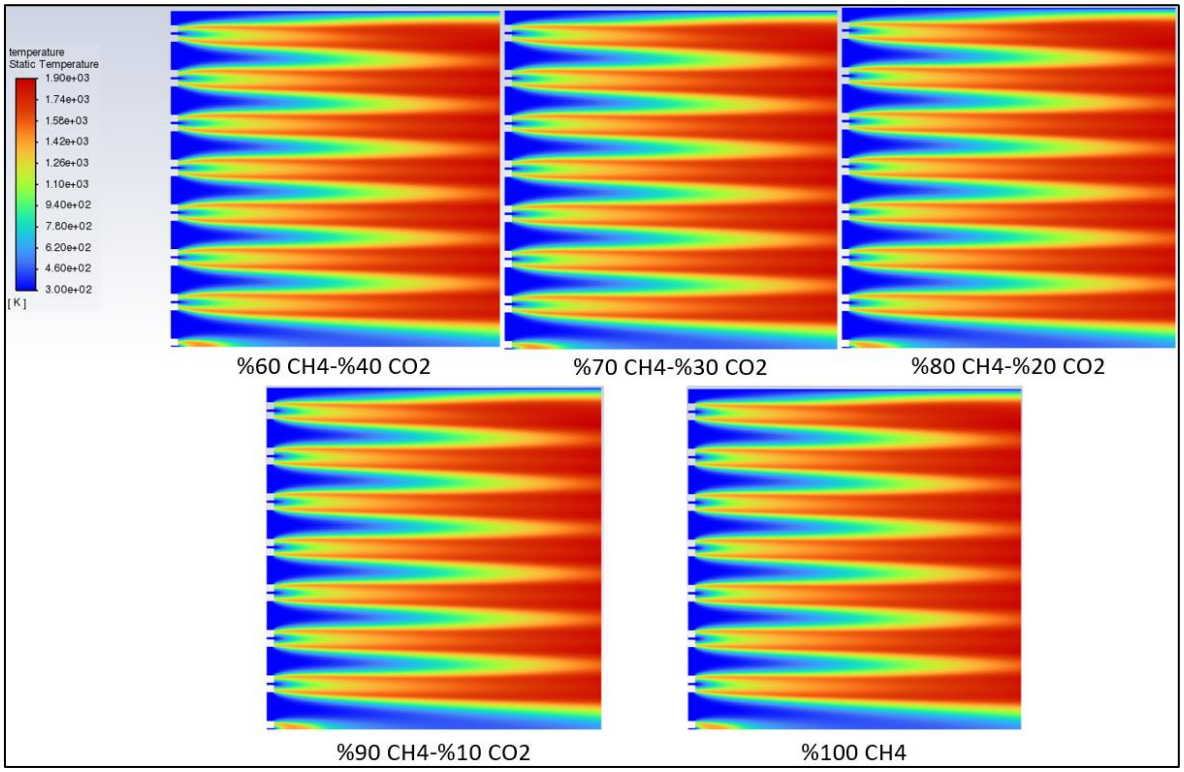
Şekil 7.1. 31 kW güç için metan içeriğinin alev sıcaklığına etkisi



Şekil 7.2. 13 kW güç için metan içeriğinin alev sıcaklığına etkisi

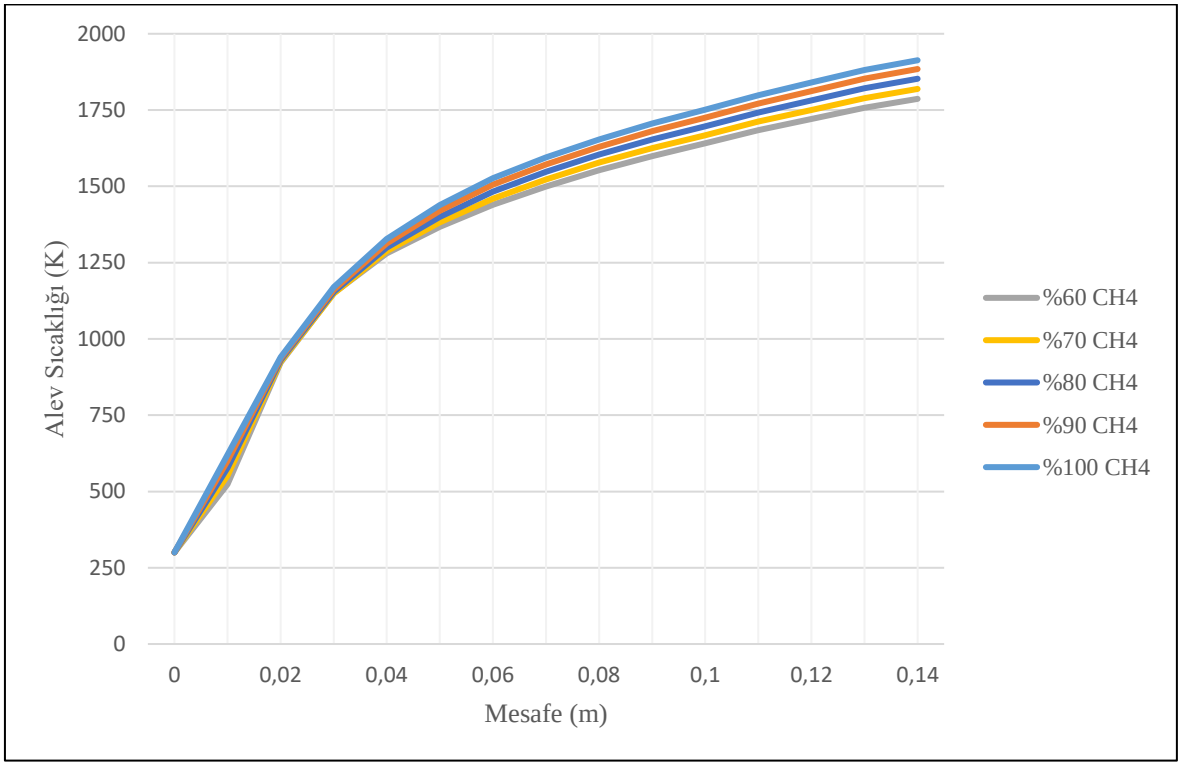
CO_2 ilavesinin karışımın termodinamik özellikleri üzerindeki etkisi temel olarak yoğunluğun ve molar ısı kapasitesinin artmasıyla ilgilidir ve bu da alev sıcaklığını düşürme eğilimindedir [5]. Alevdeki H, O ve OH gibi küçük moleküler ara maddelerin konsantrasyonu, CO_2 konsantrasyonu arttıkça azalır ve maksimum alev sıcaklığı, CO_2 artışıyla düşer. Bu seyreltme etkisi, yakıt-hava karışımında reaktif türlerin konsantrasyonun azaltarak yakıt oksidasyon reaksiyon prosesinde bimoleküler reaksiyonların hızının daha düşük olmasına yol açmaktadır.

Metanın kalorifik değeri nedeniyle yanması sırasında 31 kW güç için maksimum alev sıcaklığı 1899 K, 13 kW güç için 1695 K olarak görülmektedir. Ancak, yakıt içerisindeki yanıcı olmayan CO_2 miktarı arttıkça, biyogazların alev sıcaklıkları düşmektedir. Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de görüldüğü üzere yakıt karışımında CO_2 miktarı arttıkça alev sıcaklığı literatürle de uyumlu şekilde azalmaktadır. %60 CH_4 - %40 CO_2 oranlı yakıt için 31 kW güçte sıcaklık değeri 1774,6 K, 13 kW güçte ise sıcaklık 1610 K olarak elde edilmektedir. CO_2 miktarının artması, karbondioksiti (CO_2) karbon monoksit (CO) ve oksijene (O_2) ayrıştırmak için gereken enerjinin de artmasına neden olmaktadır.



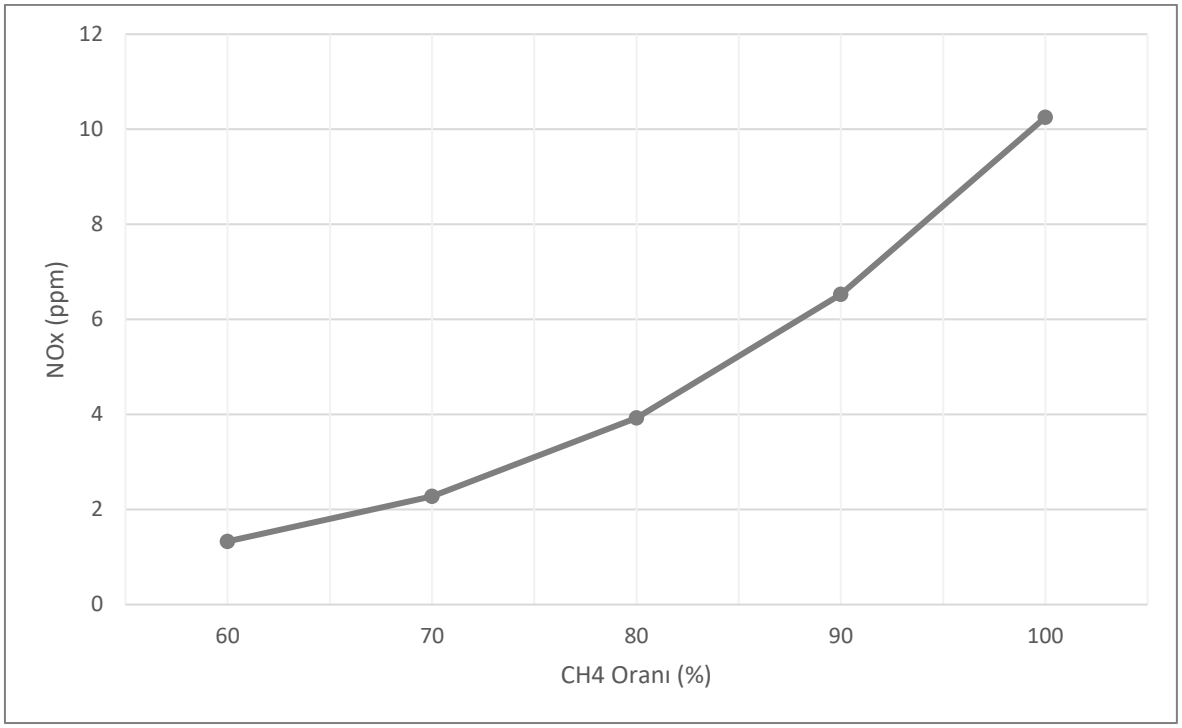
Şekil 7.3. Yakıt karışımına göre oluşan sıcaklık konturları

Yanma modelleme çalışmalarında alev yayılımını incelemek için sıcaklık konturları aranabilir. Şekil 7.3'te farklı karışımlı yakıtlar ile yapılan analizler sonucu oluşan sıcaklık konturları görülmektedir. Görsellerde sol taraflar girişleri temsil etmektedir. Sağ taraf ise yanma ürünlerinin bir ısı eşanjörüyle buluştuğu ve çıkan ısının kullanım suyuna aktarıldığı yanma odası çıkışını göstermektedir. Alev yapılarında önemli bir değişiklik olmamasına rağmen, konturlar alevin yapısı hakkında fikir vermekte ve her durumda alevlerin önceden karışmış olduğu görülmektedir.



Şekil 7.4. Yanma odası boyunca sıcaklık değişimi

Şekil 7.4 farklı karışımlı yakıtlar için yanma odasındaki sıcaklık değişimini göstermektedir. Şekil 7.3 ve Şekil 7.4 birlikte değerlendirildiğinde reaksiyonun başlaması nedeniyle yanma odasının giriş kısmına yakın bir yerde alevlerin oluşmaya başladığı görülmektedir. Daha sonra yanma odasının orta bölgesine doğru alevler gelişerek yanma odasının içine yayılmaktadır. Alevlerin termal etkisi belirgin ve çıkışa kadar uzanmaktadır. Yakıt ve oksitleyici girişleri tamamen simetrik olduğundan yanma odası içindeki tüm alev yapıları birbiriyle aynıdır.

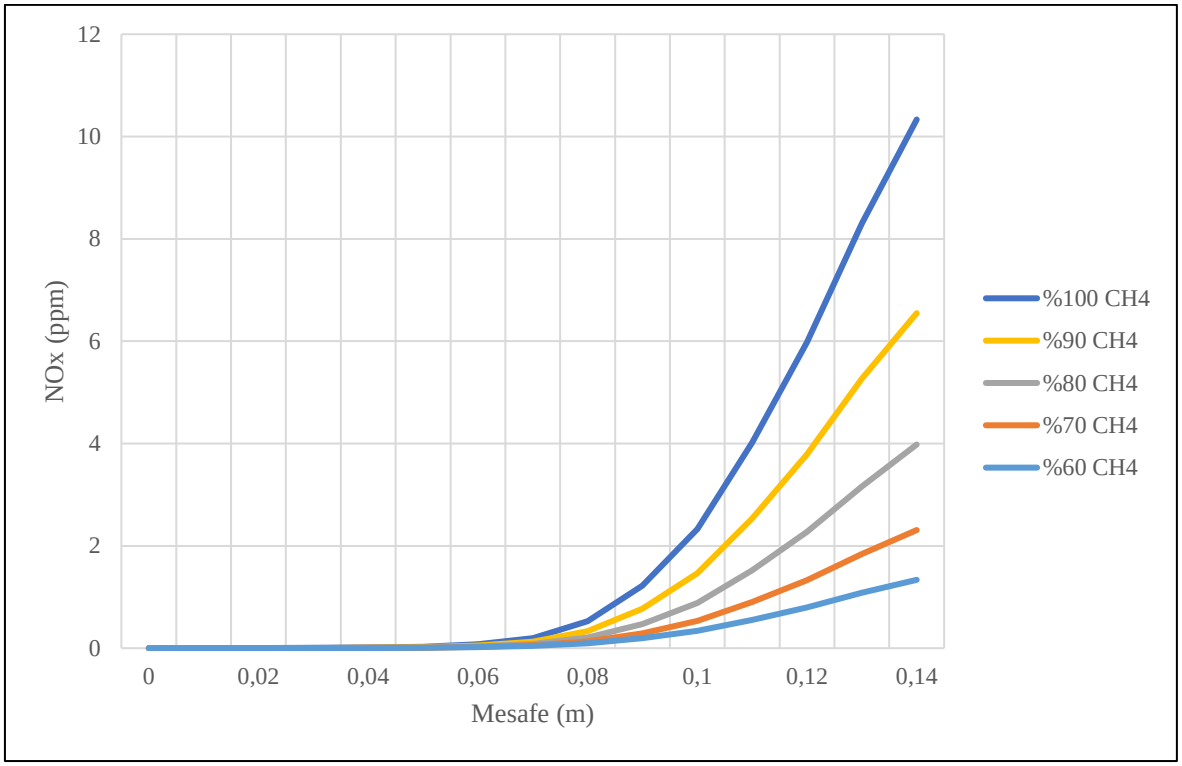


Şekil 7.5. 31 kW güç için yakıt karışımına göre NO_x değişimi

Azot oksit emisyonu, küçük kapasiteli kazanlarda dikkate alınması gereken bir sorundur, çünkü herhangi bir fosil yakıtın yanması sonucu oluşan azot oksitler, hava kirliliğinin önemli nedenleri olan asit yağmurlarının oluşmasına yol açacaktır [54].

Alev içindeki yüksek sıcaklık bölgeleri, havadaki nitrojen moleküllerinin ayrılarak oksijenle birleşmesine neden olmakta ve bu da NO_x oluşumuna yol açmaktadır. Özellikle 1600°C üzerinde NO_x oluşumu hızlanmaktadır [45].

Biyogaz bileşimindeki karbondioksit gibi yanıcı olmayan bileşenlerin varlığı, alevin sıcaklığını düşürmekte ve dolayısıyla NO_x miktarı da azalmaktadır. Şekil 7.5'te görüldüğü şekilde yakıt karışımında CO_2 miktarı azaldıkça alev sıcaklığı artmakta olduğundan NO_x miktarı da artmaktadır. %60 CH_4 - %40 CO_2 oranlı yakıt için 1,33 ppm olan NO_x değeri %100 CH_4 ile 10,25 ppm değerine yükselmektedir. Bu sonuçlarla, konut ısıtma sistemlerinde CH_4-CO_2 yakıt karışımının NO_x emisyonunu düşürmek için kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

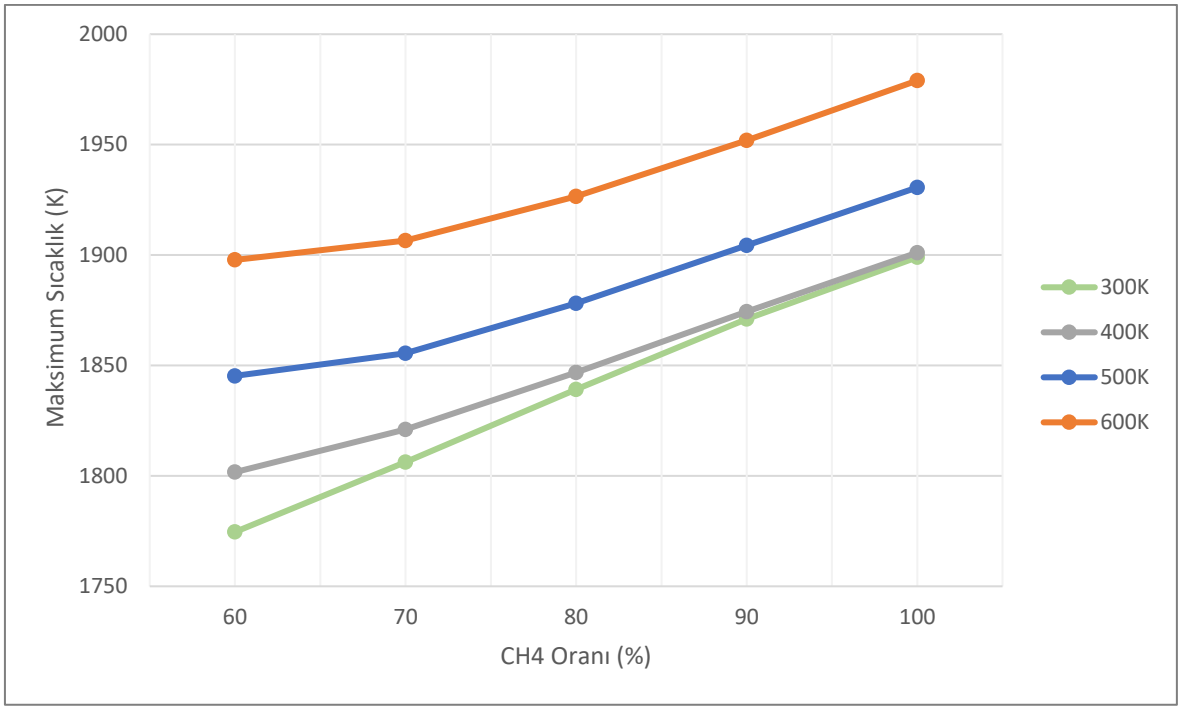


Şekil 7.6. Yanma odası boyunca NO_x değişimi

Belirtildiği gibi, termal NO_x reaksiyonları yüksek derecede sıcaklığa bağlıdır. Dolayısıyla alev sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, o kadar fazla NO_x oluşmaktadır. Şekil 7.6'da görüldüğü gibi yanma odasının orta bölgesinden itibaren sıcaklık değeri arttıkça her yakıt karışımı için NO_x miktarları da artmaktadır. Yukarıda belirtildiği gibi yüksek sıcaklıkların NO_x oluşumunu doğrudan etkilediği dikkate alındığında beklenen sonuçlar elde edilmiştir.

7.1.2. Hava ön ısıtmanın etkisi

Çalışmada yanma havası ön ısıtmaya tabi tutularak bu durumun alev sıcaklıklarına etkisi de araştırılmıştır. 31 kW güçte farklı yakıt oranları için ve 300 K, 400 K, 500 K ve 600 K ön ısıtma havaları ile analizler gerçekleştirilmiştir.



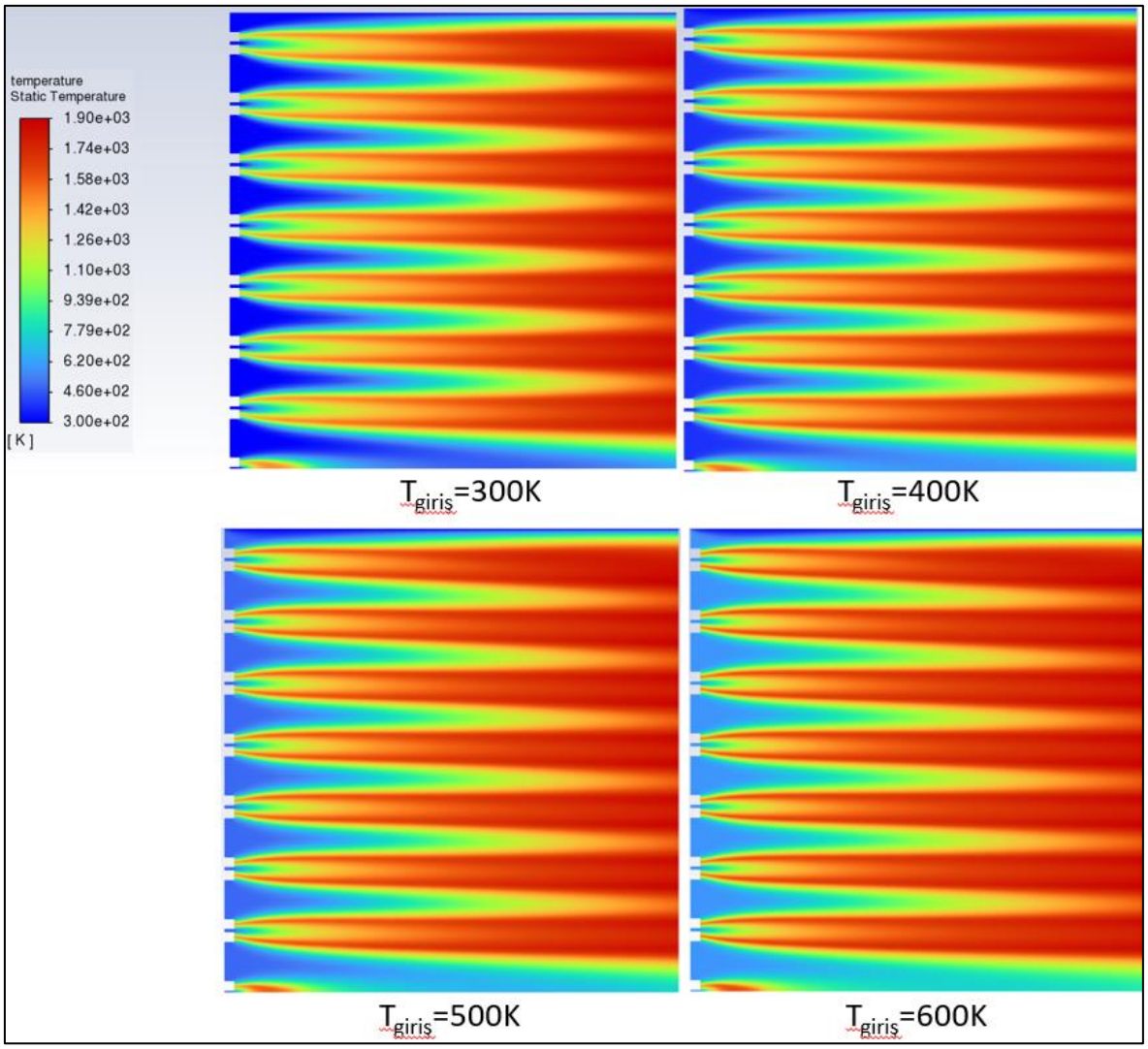
Şekil 7.7. Farklı ön ısıtma havaları ile yanma sonu sıcaklıklarının değişimi

Şekil 7.7'de görüldüğü üzere ön ısıtma değeri arttıkça yanma sonu sıcaklıkları da artmaktadır. Bunun nedeni, artan hava sıcaklığının yanma reaksiyon hızını tetiklemesidir. Alev yayılma hızı ile ön ısıtma sıcaklığı arasında ikinci dereceden bir fonksiyon ilişkisi vardır [6].

$$V_f = 19.32607 - 0.12247 \times T_p + 3.2319\ E - 4 \times T_p^2$$

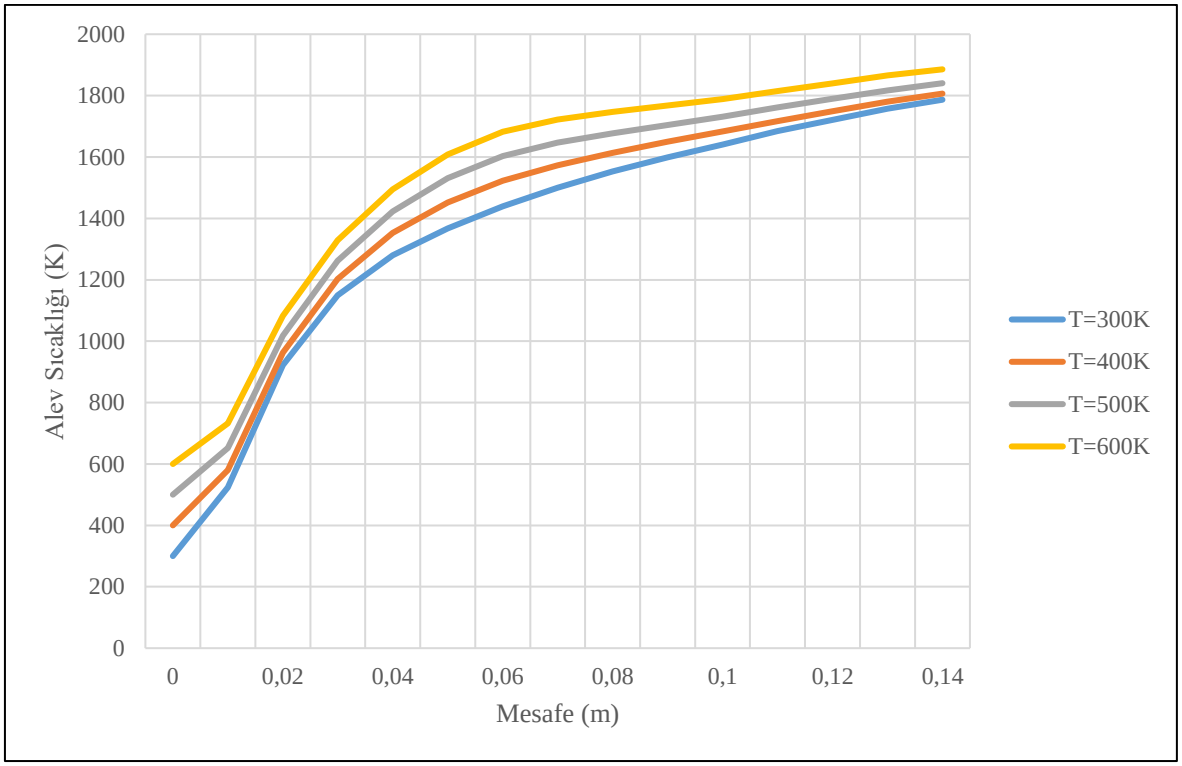
Daha yüksek alev hızı, yanma odasındaki ısı salınım oranının artmasına neden olur, bu durum da hızlı sıcaklık artışı meydana getirmektedir [55]. Giriş sıcaklığı 600 K ve %100 CH_4 için yanma sonu sıcaklığı 1979 K olarak elde edilirken giriş sıcaklığı 300 K ve %100 CH_4 için yanma sonu sıcaklığı 1899 K olarak elde edilmektedir. Bunun ana sebebi ön ısıtmanın reaksiyon hızını arttırmasıdır.

Ön ısıtma, oksitleyicinin entalpisini ve dolayısıyla alevin enerji girdisini artırmaktadır. Bunun yanında yakıt-hava karışımının daha hızlı şekilde homojen olarak karışmasına yardımcı olmaktadır. Bu durumda da daha yüksek yanma sıcaklığı elde edilmektedir.



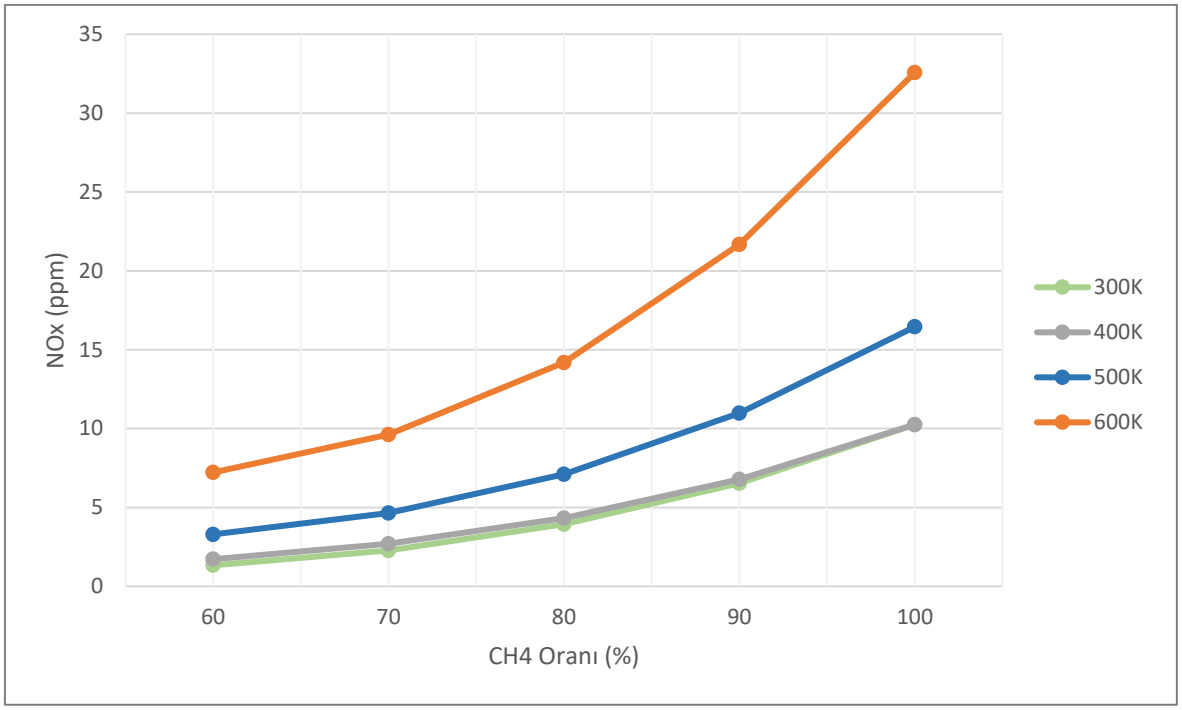
Şekil 7.8. %60 CH_4 oranlı yakıt için farklı ön ısıtma havaları ile oluşan sıcaklık konturları

Şekil 7.8'de %60 CH_4 oranlı yakıt için farklı ön ısıtma havaları yapılan analizler sonucu oluşan sıcaklık konturları görülmektedir.



Şekil 7.9. %60 CH_4 – %40 CO_2 karışımı için hava ön ısıtmanın yanma odası boyunca sıcaklık profili üzerinde etkisi

Ön ısıtma ve %60 CH_4 – %40 CO_2 karışımlı yakıtla yanma ile yanma odası boyunca elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 7.9'da görülmektedir. Giriş sıcaklığının artması alev sıcaklığını arttırsa da yüksek giriş sıcaklıklarında özellikle brülöre yakın bölgedeki sıcaklık artış hızı daha düşük görünmektedir. Şekil 7.8'de de görüldüğü gibi alev, yanma odasının orta bölgesine doğru gelişmektedir. Kombi yanma odası, açığa çıkan en yüksek enerjiyi bir eşanjör aracılığıyla kullanım suyuna aktarmak üzere tasarlandığından yanma odasının sonuna doğru en yüksek sıcaklık değerine ulaşmaktadır.



Şekil 7.10. Farklı ön ısıtma havaları ile NO_x değişimi

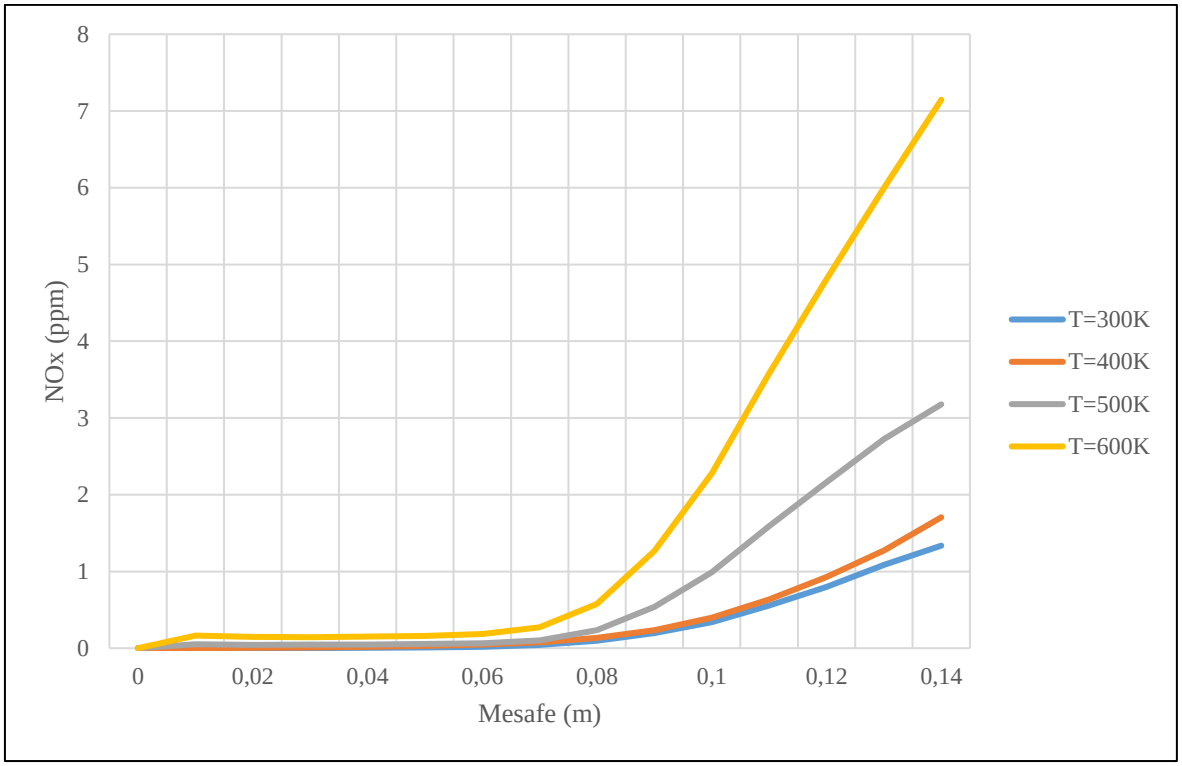
Şekil 7.10'daki NO_x seviyelerinin elde edilen alev sıcaklıklarıyla tutarlı olduğu görülmektedir. Daha yüksek hava giriş sıcaklığının daha yüksek alev sıcaklığına yol açtığını ve bunun da NO_x oluşumunu hızlandırdığını belirtmekte fayda vardır. Çünkü NO_x oluşumunda termal NO_x mekanizması önemli bir rol oynamaktadır.

Ön ısıtma sıcaklığı ile NO_x miktarı arasında da ikinci dereceden bir fonksiyon ilişkisi vardır [6].

$$n(NO)\% = 2.93128E-4 + 2.89742\,E-7 \times T_p + 2.13244\,E-9 \times T_p^2$$

Burada T_p ön ısıtma sıcaklığını ifade etmektedir. Şekil 7.10'da ön ısıtma sıcaklığının artmasıyla NO_x miktarının artmakta olduğu görülmektedir.

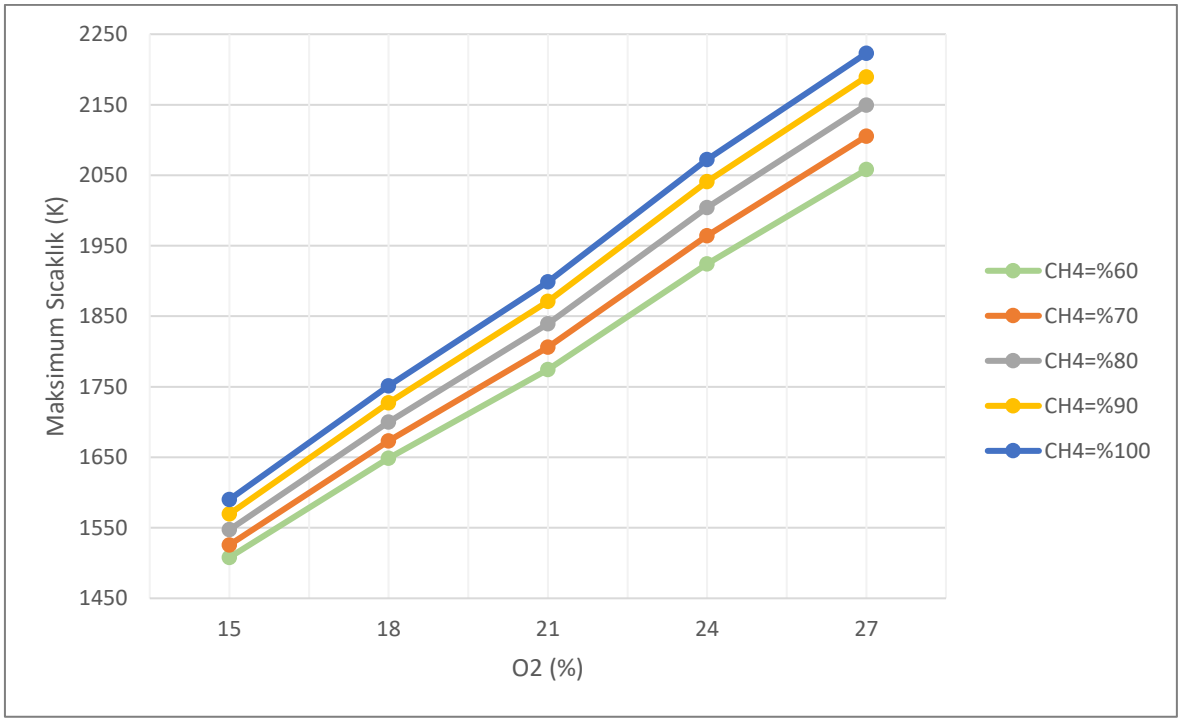
Şekil 7.11'de yanma odası boyunca elde edilen NO_x emisyonlarında da benzer sonuçlar görülebilmektedir.



Şekil 7.11. Hava ön ısıtmanın %60 CH_4 – %40 CO_2 yanması için yanma odası boyunca NO_x emisyonu üzerinde etkisi

7.1.3. Oksijen konsantrasyonun etkisi

Çevresel kısıtlamalar ve tükeniyor olması nedeniyle doğalgaz yerine daha düşük ısıl değere sahip birçok alternatif gaz yakıt olarak tercih edilmelidir. Ancak düşük ısıtma değerleri nedeniyle son kullanıcının ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılamak için açığa çıkan ısı yoğunluğunun arttırılması gerekebilmektedir. Bu nedenle oksijen zenginleştirmesi bu noktada uygulanabilecek yöntemlerden birisidir. Benzer şekilde çevresel kısıtlamalar nedeniyle, kirletici emisyonları azaltmak için oksitleyicideki oksijen konsantrasyonun azaltılması da tercih edilebilir. Bu doğrultuda çalışma kapsamında farklı hacimsel O_2 konsantrasyonlarının alev sıcaklıklarına etkisi de incelenmiştir. Hava giriş sıcaklığı 300 K olacak şekilde ve 31 kW güç için, %15, %18, %21, %24 ve %27 oranlarında hacimsel oksijen konsantrasyonları ile farklı karışım oranları için analizler gerçekleştirilmiştir.

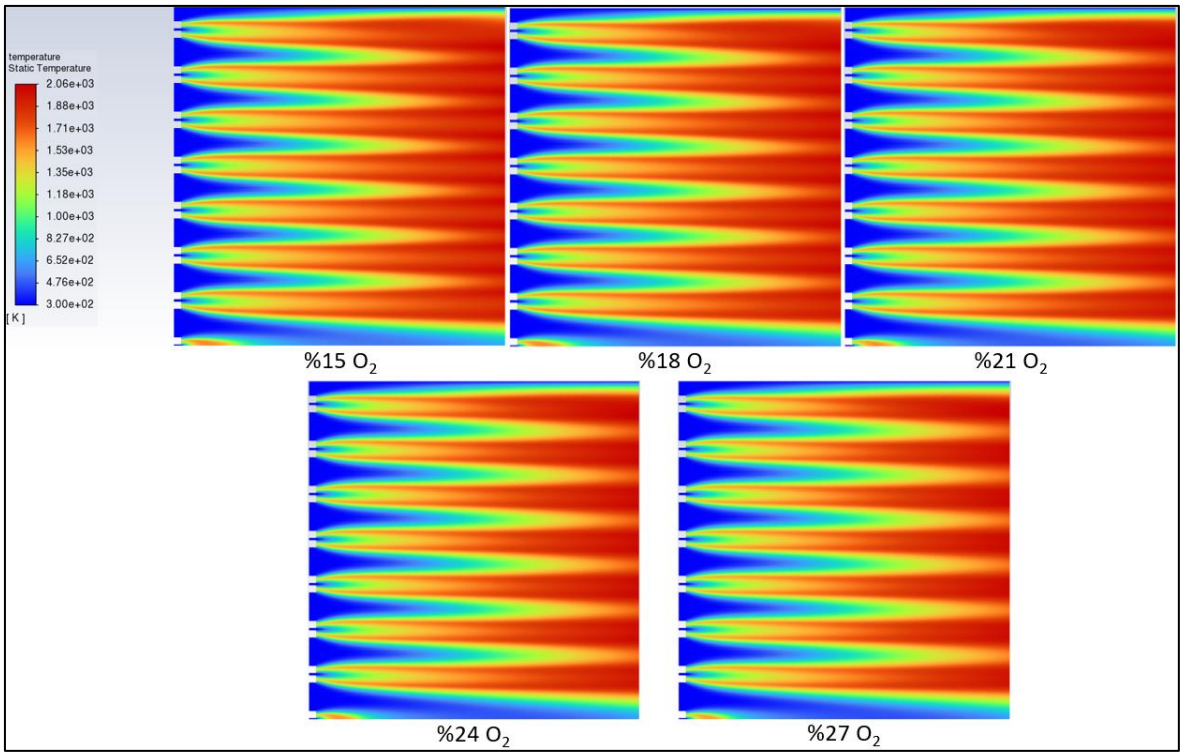


Şekil 7.12. Farklı hacimsel O_2 konsantrasyonlarının alev sıcaklıklarına etkisi

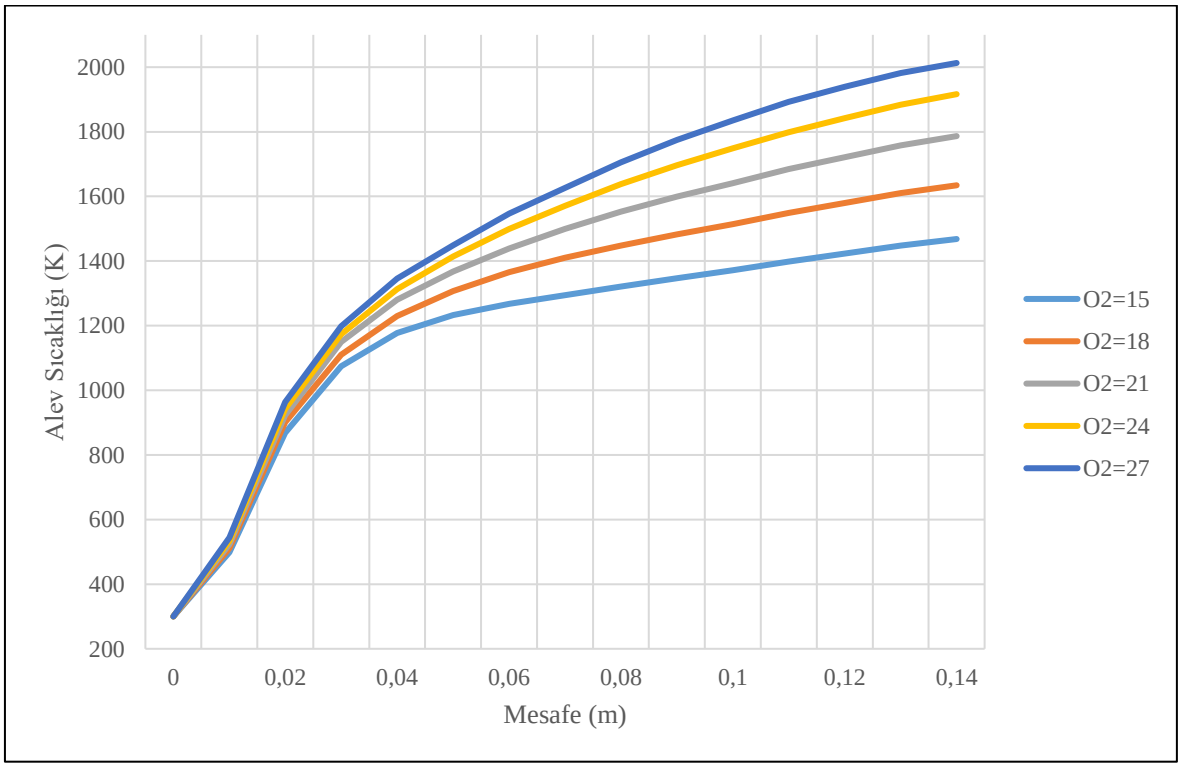
Şekil 7.12'de farklı karışım oranlı yakıtlarla ve farklı O_2 konsantrasyonları ile yapılan analizlerin sonuçları görülmektedir. Görüldüğü üzere hacimsel O_2 miktarı %21'in altına indiği durumlarda sıcaklıkları azalmaktayken O_2 miktarı %21'in üzerindeyken sıcaklıklar neredeyse doğrusal olarak artmaktadır. Oksijen konsantrasyonundaki azalma, aktif oksijen moleküllerinin miktarında azalmaya neden olduğundan oksijen ve yakıt arasındaki kimyasal reaksiyon engellenmektedir. Oksijen konsantrasyonunun azalması karışımdaki CO_2 miktarının artmasına eşdeğerdir. Bu durum özgül ısı kapasitesinin artmasına neden olduğundan sıcaklıklar da azalmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalarda da yer aldığı üzere yanma havasında seyreltici etki yapan N_2 oranının artmasının alev sıcaklığını düşürdüğü, tam tersine N_2 oranı azaltılıp O_2 oranı arttığında alev sıcaklığının arttığı görülmektedir [55].

Benzer sonuçlar, Şekil 7.13'deki %60 CH_4 oranlı yakıt için farklı hacimsel O_2 konsantrasyonları ile yapılan analizler sonucu oluşan sıcaklık konturları ve Şekil 7.14'teki sıcaklık eğrilerinde de görülebilmektedir.

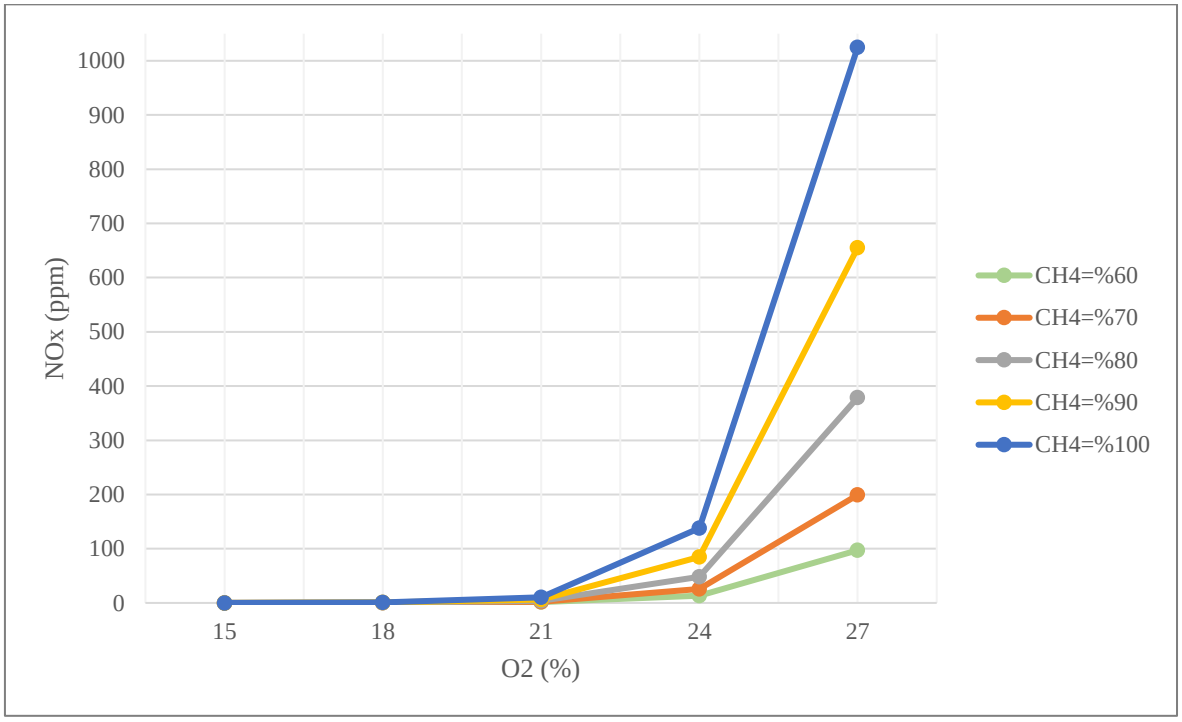


Şekil 7.13. %60 CH_4 oranlı yakıt için farklı hacimsel O_2 konsantrasyonları ile oluşan sıcaklık konturları



Şekil 7.14. Oksijen konsantrasyonun %60 CH_4 – %40 CO_2 yanması için yanma odası boyunca sıcaklık üzerinde etkisi

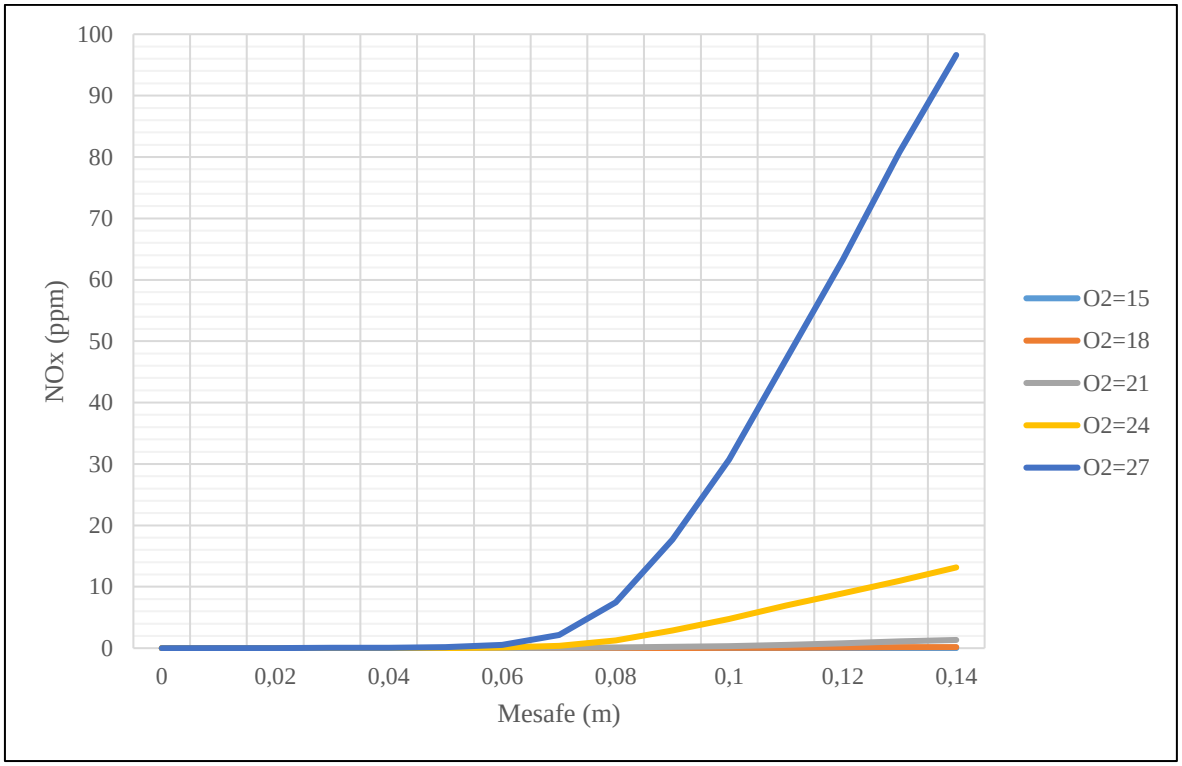
NO_x emisyonu; alev sıcaklıkları, oksijen konsantrasyonu ve ara türler gibi faktörlerden etkilenmektedir [56].



Şekil 7.15. Farklı hacimsel O_2 konsantrasyonlarının NO_x oluşumuna etkisi

O_2 konsantrasyonun artışıyla alev sıcaklıklarının da artması NO_x miktarının artışına sebep olmaktadır. Bunun yanında; N_2+O=NO+N ve N_2O+O=2NO reaksiyonları NO_x oluşumunda etkilidir. Oksijen, bahsedilen iki reaksiyonun reaktantı olduğu ve reaksiyon bölgesindeki Oksijen radikallerinin artışı göz önünde bulundurulduğunda NO_x artışı beklenen bir sonuçtur.

Şekil 7.15'te görüldüğü üzere %21 O_2 oranından sonra bütün yakıt karışımları için NO_x miktarı hızla artmaktadır. Özellikle 1600 °C üzerinde NO_x oluşumunun hızlandığı ve %21 O_2 oranından sonra sıcaklıkların hızla yükseldiği de göz önüne alındığında NO_x miktarının hızla artmasının doğal olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 7.16. Oksijen konsantrasyonun %60 CH_4 – %40 CO_2 yanması için yanma odası boyunca NO_x emisyonu üzerinde etkisi

Termal NO_x mekanizması için yaklaşık eşik seviye olarak 1600°C dikkate alınırsa bu sıcaklıkların üzerinde NO_x oluşum oranında hızlı bir artış daha oluşacağı beklenmektedir. Şekil 7.16, Şekil 7.14 ile birlikte değerlendirildiğinde, sıcaklığın artmasıyla birlikte NO_x oluşumunun yanma odasının ortasından itibaren hızlandığı görülmektedir.

7.2. Deney Sonuçları

Yukarıda detayları anlatılan deney sistemi kullanılarak 13,2 kW güç ve 0,75 eşdeğerlik oranı için farklı oranlı CH_4-CO_2 karışımları ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda dört farklı noktadan sıcaklık ve NO_x değerleri elde edilmiştir. Ölçümler alındıkça yanma odası muhafaza kapağı çıkartılarak alev gözlenmiştir. Deneyler sırasında alev kopması veya sönmesi gibi ciddi bir sorun gözlenmese de biyogazdaki CO_2 miktarı arttıkça bazı noktalarda kısmi alev kararlılığı sorunları gözlemlenmiştir.

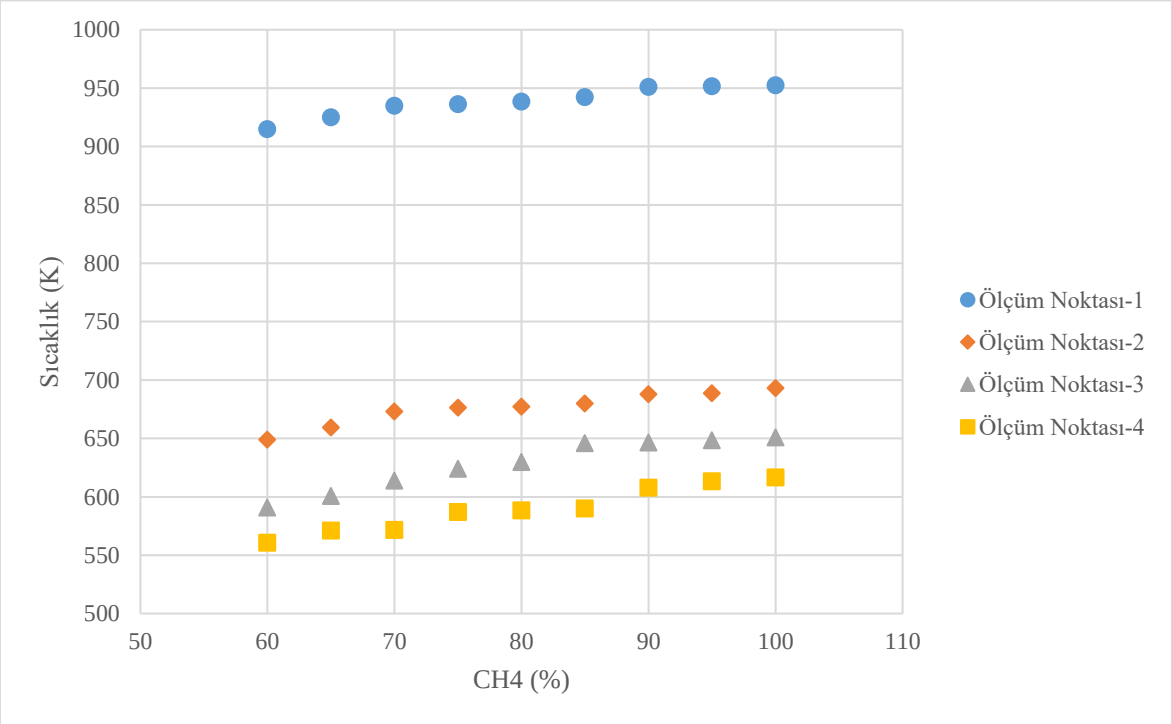
Deneyler sırasında kombinin gücü 13,2 kW'da sabit olacak şekilde farklı karışımlar için debiler ayarlanmıştır. Kullanılan debiler Çizelge 7.1'de görülmektedir.

Çizelge 7.1. Deneyler sırasındaki koşullar ve debiler

%CH_4-%CO_2	Eşdeğerlik Oranı	Güç (kW)	Debi CH_4 (kg/s)	Debi CO_2 (kg/s)
60-40	0,75	13,2	0,000264	0,000176
65-35	0,75	13,2	0,000264	0,000142
70-30	0,75	13,2	0,000264	0,000113
75-25	0,75	13,2	0,000264	0,000088
80-20	0,75	13,2	0,000264	0,000066
85-15	0,75	13,2	0,000264	0,0000466
90-10	0,75	13,2	0,000264	0,0000293
95-5	0,75	13,2	0,000264	0,0000139
100-0	0,75	13,2	0,000264	0

7.2.1. Sıcaklık sonuçları

Yanma odasına 3 cm aralıklarla dört termokupl yerleştirilmiştir. Farklı CH_4-CO_2 karışım oranları ile gerçekleştirilen deneylerde termokupllardan alınan sonuçlar Şekil 7.17'de verilmiştir.

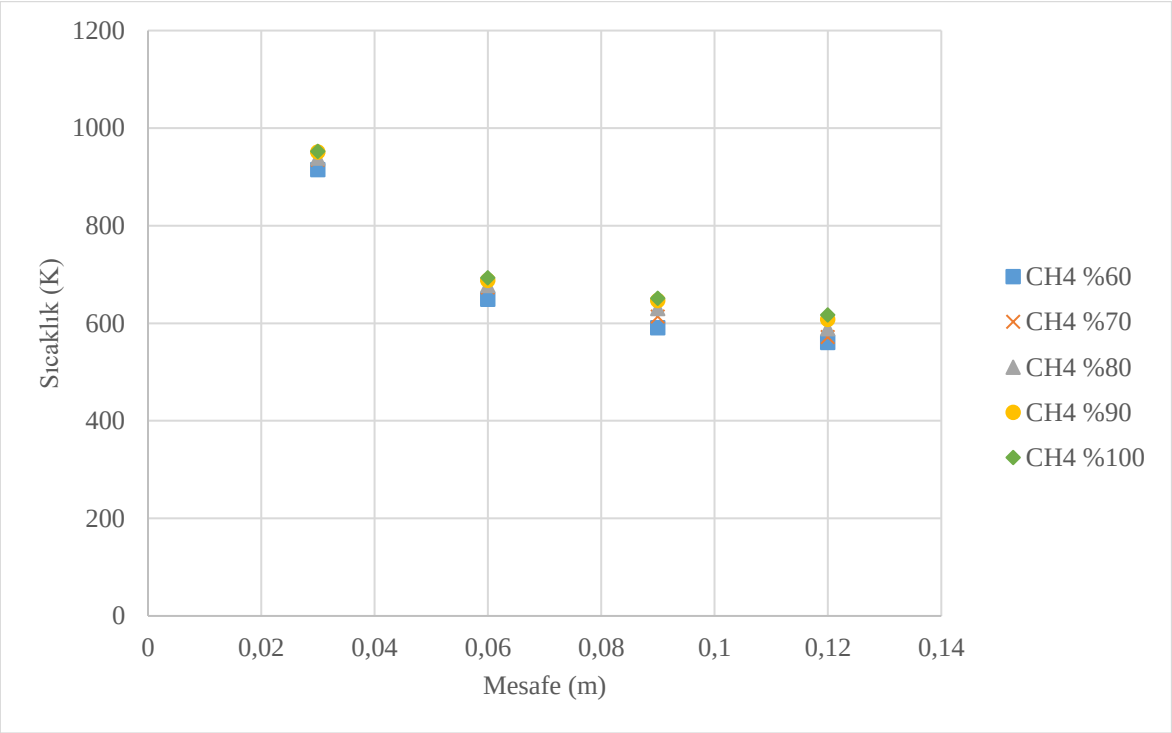


Şekil 7.17. Yakıt karışımlarının ölçüm noktalarındaki alev sıcaklıkları

Alev sıcaklıkları, yakıt karışımı ve buna bağlı olarak karışımın ısıl değeri ile değişmektedir. Karışımdaki CO_2 artışıyla ısıl değer de azalmaktadır. CO_2'nin reaktif olmaması ve inert etki

göstermesinden dolayı karışımdaki miktarı arttıkça alev sıcaklıklarının beklendiği gibi düştüğü görülmektedir.

Ölçüm noktası-1 aleve en yakın noktada (t+3cm) olmasından dolayı o noktadaki sıcaklıklar diğerlerinden ayrışmaktadır. %100 CH_4 için sırasıyla ölçüm noktası-2-3-4'te 693 K, 650 K, 616 K sıcaklık değerleri elde edilmişken aleve en yakın noktadaki ölçüm noktası-1'de 952 K değeri ölçülmüştür.



Şekil 7.18. Mesafeye göre sıcaklık değişimleri

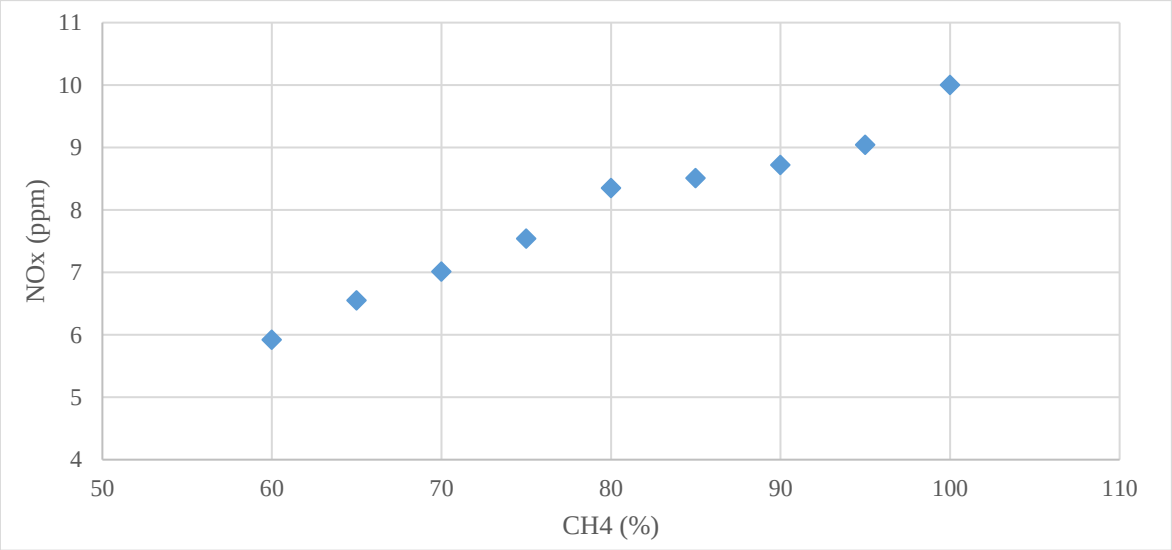
Farklı karışımlı yakıtların yakılması sonucu yanma odasının farklı mesafelerinden elde edilen sıcaklıklar Şekil 7.18'de görülmektedir. Konvektif ve ışınım ısı transferleri nedeniyle tüm sıcaklık dağılımları başlangıçta alev bölgesinde artmakta, daha sonra yanma odası çıkışına doğru giderek azalmaktadır.

Yanma odasının üst bölümünde ısı değiştirgeçleri yer almaktadır. Yanma sonucu elde edilen ısı bu ısı değiştirgeçleri ile suya aktarılmaktadır. Bu şekilde konvektif yolla gerçekleşen ısı transferi ile yanma odası sonlarına doğru ölçüm noktası-4'e kadar görüldüğü şekilde sıcaklıklar düşmektedir.

7.2.2. NO_x emisyonları

Bilindiği üzere önemli ve katı çevresel düzenlemelerden ve sınırlamalardan dolayı herhangi bir yanma sonucu emisyonların en aza indirilmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı bu sebeple de önem arz etmektedir. Bu noktada biyogazın önemli bir yer tuttuğu değerlendirildiğinden bu çalışmada biyogaz kullanımının NO_x emisyonlarına etkisi de incelenmiştir.

NO oluşumu; termal NO, yakıt NO ve hızlı NO şeklinde üç farklı mekanizma ile gerçekleşmektedir. Her ne kadar nitrojen ve oksijen atmosferde birbirleriyle reaksiyona girmeden bir arada bulunsa da, genel reaksiyonla yüksek sıcaklıkta birleşerek NO'yu oluşturmaktadır. Özellikle 1600° C'nin üzerinde NO oluşumu hızlanmaktadır.



Şekil 7.19. Farklı yakıt karışımlarına göre NO_x değişimi

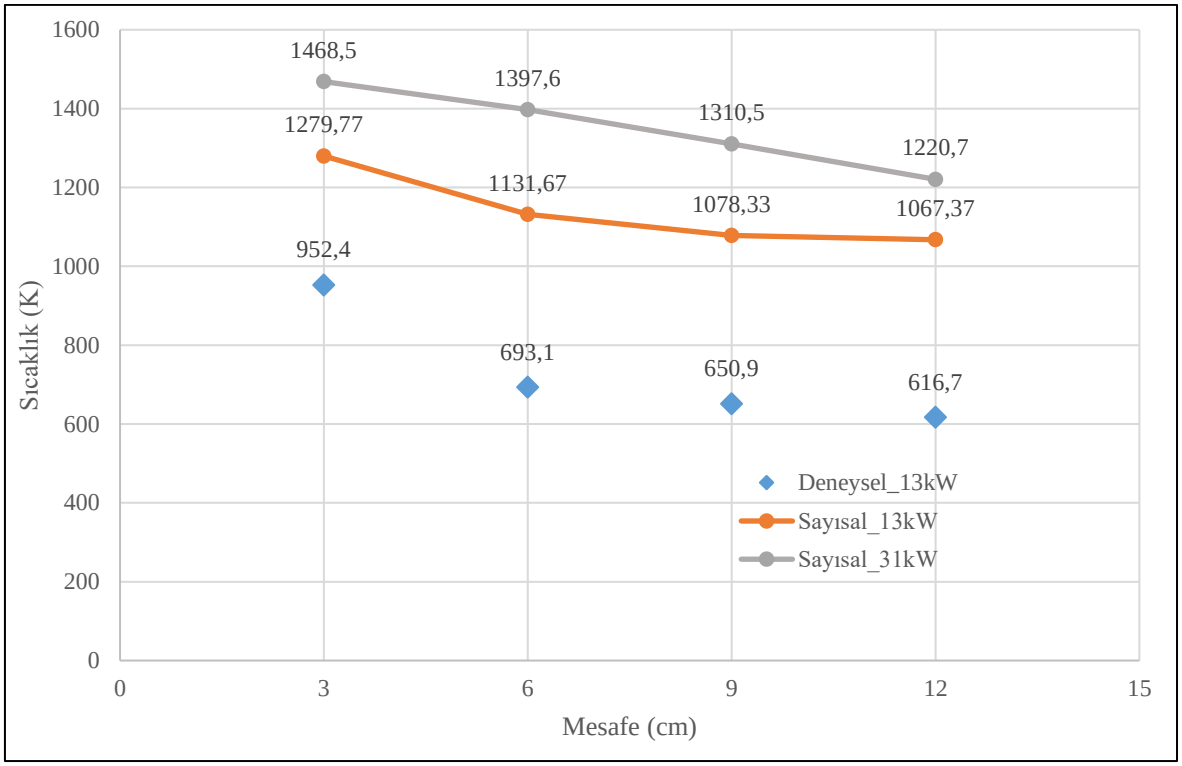
Biyogaz bileşimindeki karbondioksit gibi yanıcı olmayan bileşenlerin varlığı, alevin sıcaklığını düşürmekte ve dolayısıyla NO_x miktarı da azalmaktadır. Deneylerde yakıt karışımındaki CO_2 miktarının artmasıyla alev sıcaklıklarının düştüğü Şekil 7.17 ve Şekil 7.18'de gösterilmişti. Alev sıcaklıklarının düşmesiyle NO_x miktarındaki azalma Şekil 7.19'da açık şekilde görülmektedir. %60 CH_4 - %40 CO_2 oranlı yakıt için 5,92 ppm olan NO_x değeri %100 CH_4 ile 10 ppm değerine yükselmektedir.

7.3. Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

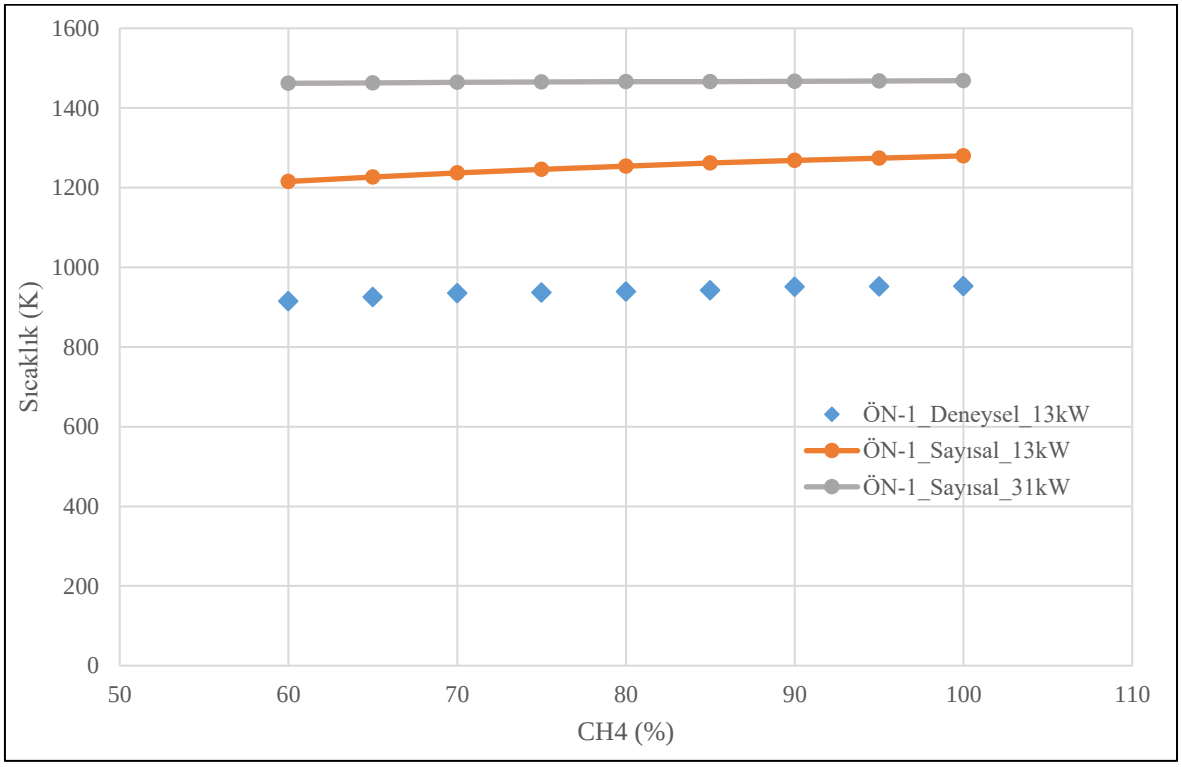
Bu bölümde sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Deneylerde yanma odasındaki farklı dört noktadan sıcaklık değerleri ve bacadan NO_x değerleri elde edildiğinden bu sonuçlar sayısal analizlerde elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile sayısal analizler için oluşturulan modelin doğrulamasının da yapılması amaçlanmıştır. Modelin doğruluğu sonraki çalışmalarda kullanımı için önem arz etmektedir.

Kombi 13 kW güç ve farklı CH_4-CO_2 karışımları için çalıştırılmıştır.

Şekil 7.20 yanma odası boyunca %100 CH_4'ün deneysel sıcaklık ölçümlerini sayısal model sonuçlarıyla karşılaştırmaktadır. Şekil 7.20'ye göre sayısal analizde elde edilen sıcaklık değerlerinin deneysel verilere göre biraz daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Benzer durum, farklı karışımlı yakıtlar için sayısal analizde elde edilen sıcaklık değerleri ile deneysel veriler arasındaki karşılaştırmayı gösteren Şekil 7.21'de de görülmektedir. Ancak, sonuçların eğilimlerinin tutarlılığı tartışılmaz bir şekilde görülmektedir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki farkın, çalışılan eşdeğerlik oranları arasındaki küçük farktan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Çünkü kombi, deneyler sırasında sistem tarafından kontrol edilemeyen ortam havasıyla çalışmaktadır. Sayısal analizlerde ise debiler sabit eşdeğerlik oranı 0,75’e göre ayarlanmıştır. Bu da sonuçlar arasında olası farklılıklara neden olmuştur.

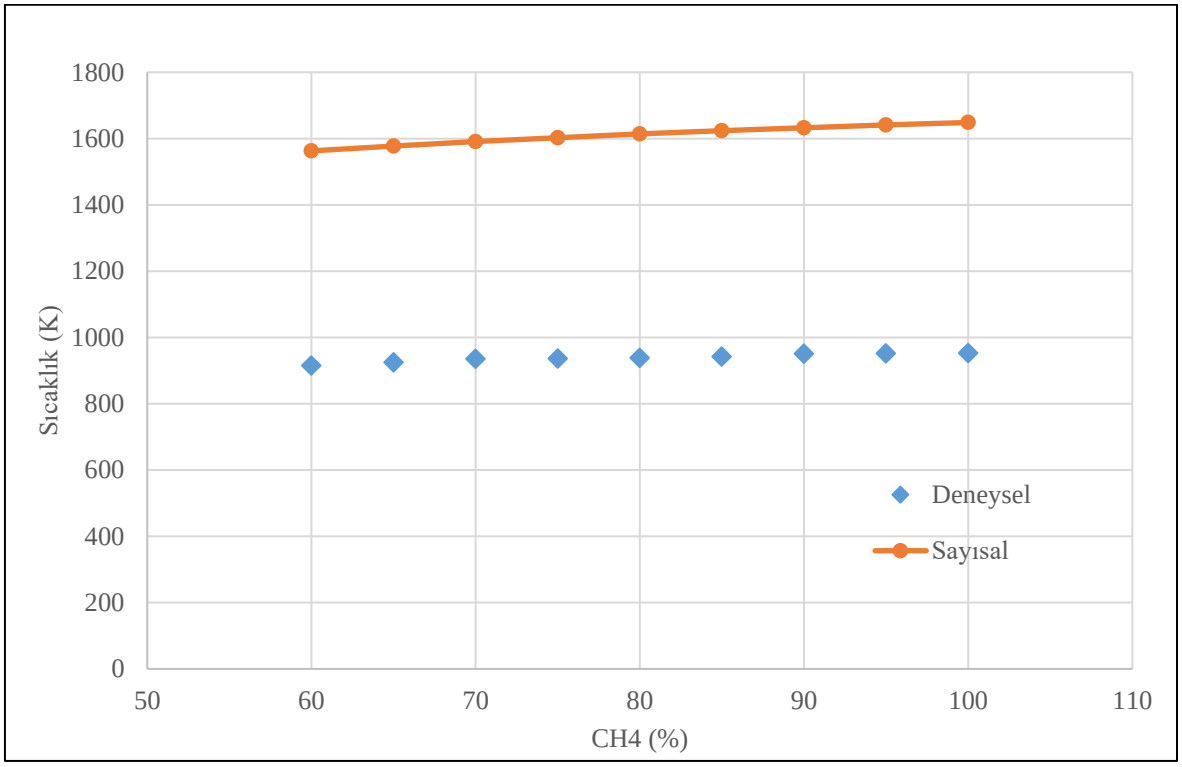


Şekil 7.20. Sayısal ve deneysel olarak yanma odası boyunca sıcaklıklar

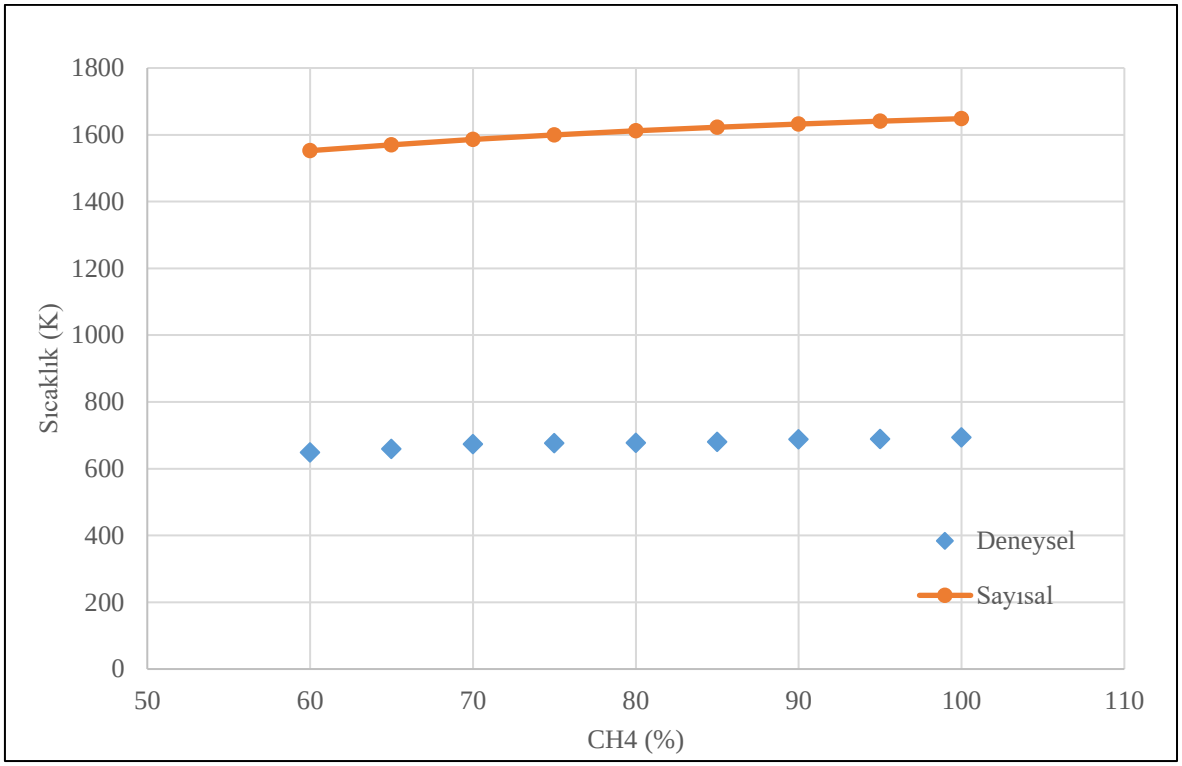


Şekil 7.21. Farklı karışımlı yakıtlar için sayısal ve deneysel olarak elde edilen sıcaklıklar

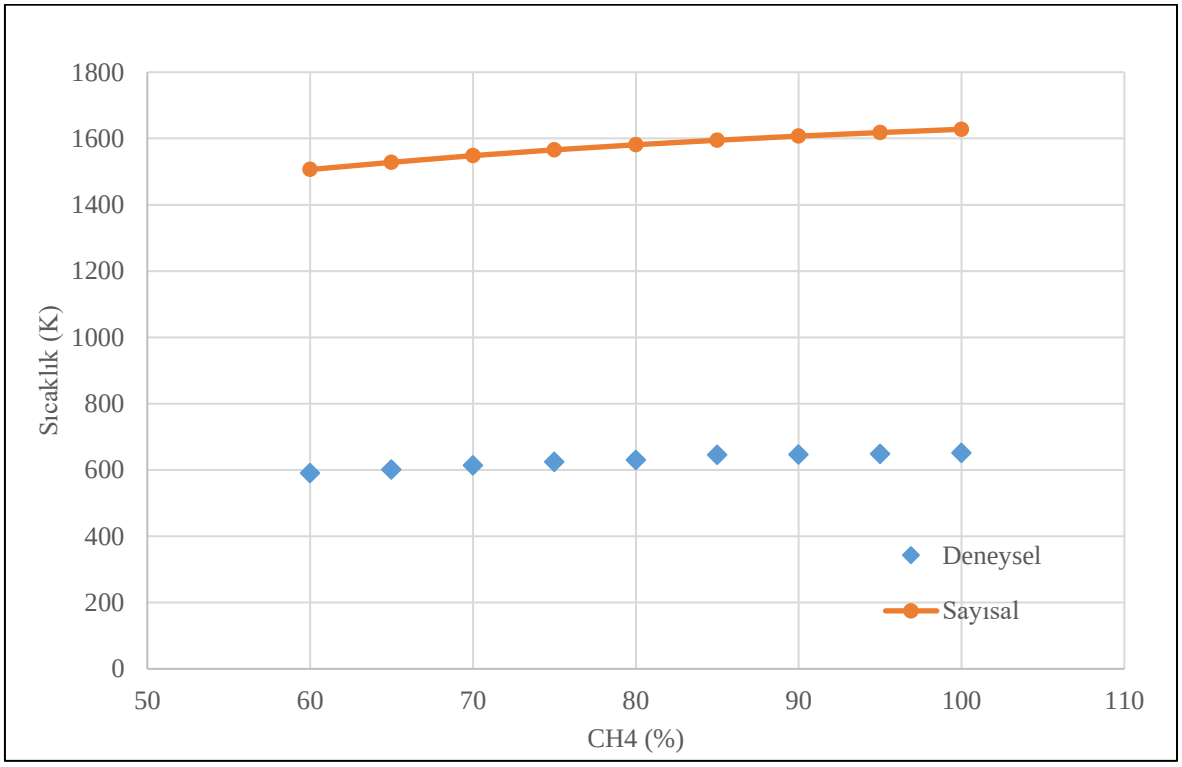
Yanma odasına 3 cm'lik aralıklarla dört farklı termokupl yerleştirildiği ve bu sayede yanma odası boyunca dört farklı noktadan ölçümler alındığı ifade edilmişti. Söz konusu dört ölçüm noktası için 13 kW güç ile elde edilen deneysel ve sayısal sıcaklık sonuçları Şekil 7.22, Şekil 7.23, Şekil 7.24 ve Şekil 7.25'te ayrı ayrı gösterilmektedir.



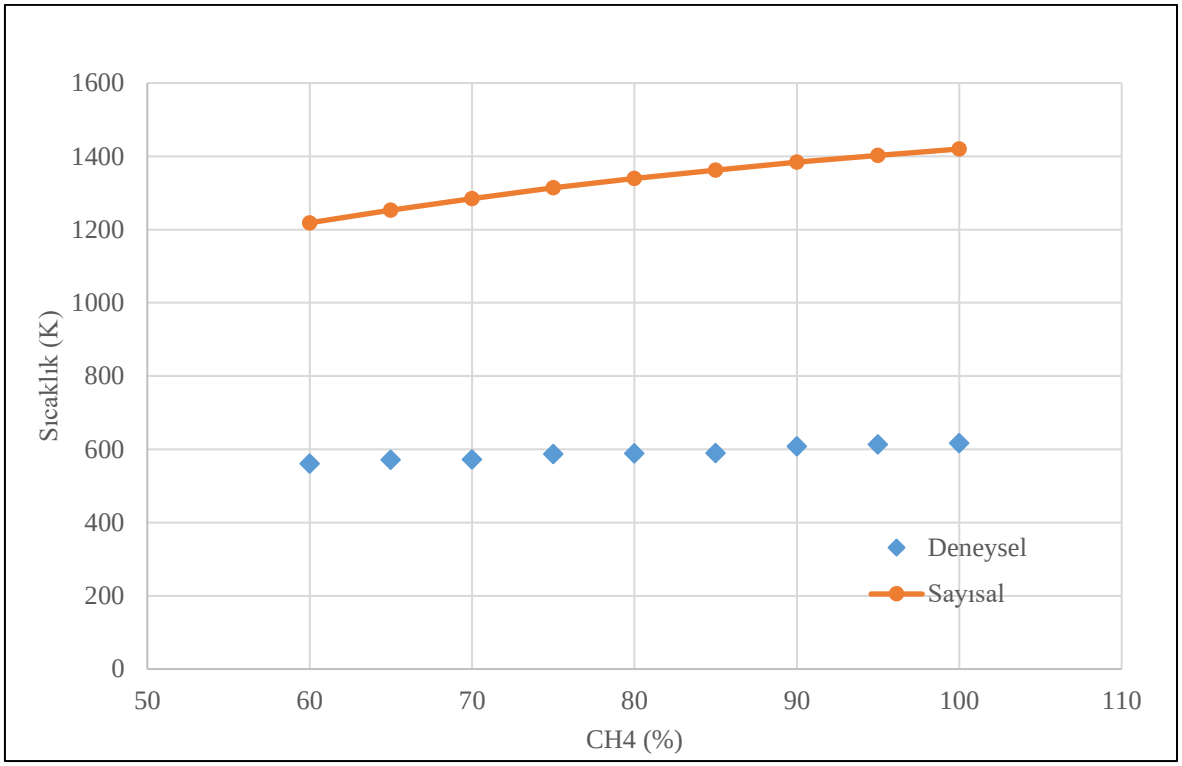
Şekil 7.22. Ölçüm noktası-1 için farklı karışımlı yakıtların karşılaştırılması



Şekil 7.23. Ölçüm noktası-2 için farklı karışımlı yakıtların karşılaştırılması

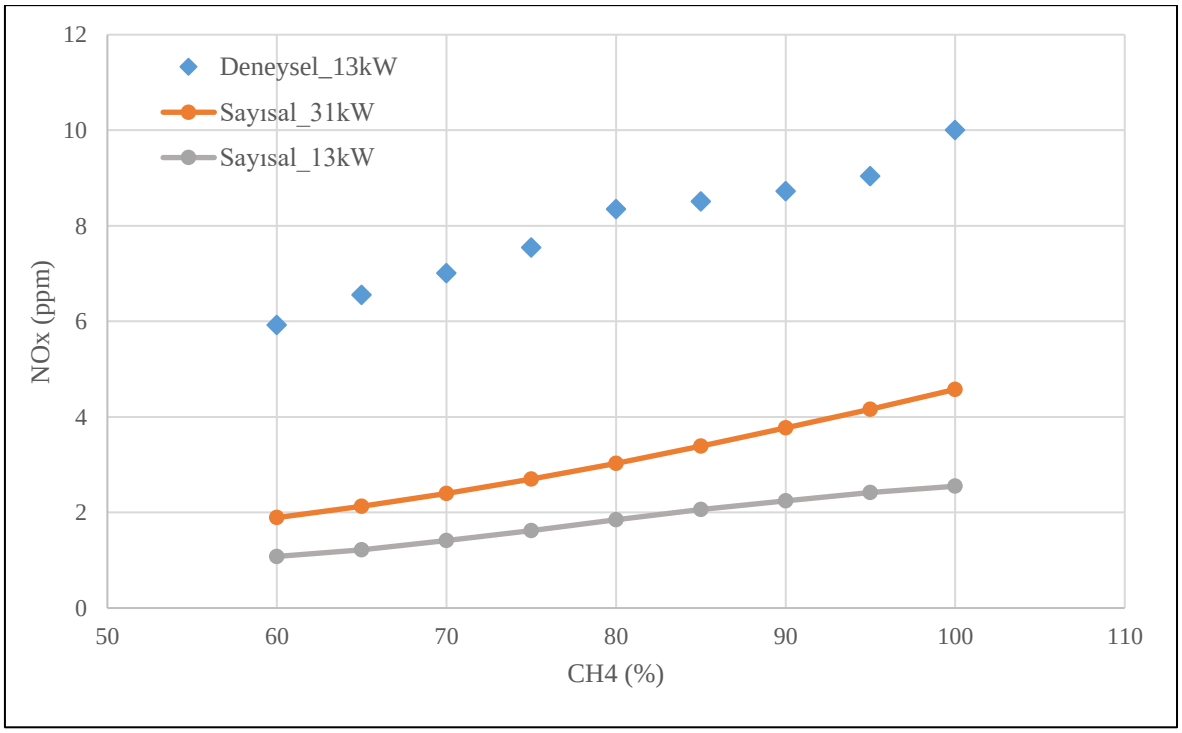


Şekil 7.24. Ölçüm noktası-3 için farklı karışımlı yakıtların karşılaştırılması



Şekil 7.25. Ölçüm noktası-4 için farklı karışımlı yakıtların karşılaştırılması

Sonuçların eğilimlerinin tutarlı ve literatürle de uyumlu olması nedeniyle sayısal modelin sonraki çalışmalarda kullanılabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 7.26. Farklı karışımlı yakıtlar için sayısal ve deneysel olarak elde edilen NO_x değerleri

Deneylerde yanma sonucu bacadan gaz analizörü ile ölçülen NO_x değerleri ile sayısal analizlerden elde edilen NO_x değerleri Şekil 7.26’da karşılaştırılmaktadır. Sonuçlar farklı olsa da Şekil 7.20 ve 7.21’da olduğu gibi eğilimlerin benzerlikleri açık şekilde görülmektedir.

Şekil 7.26'da görüldüğü gibi, incelenen tüm durumlar için yakıt karışımındaki CO_2 konsantrasyonunun artmasıyla birlikte sıcaklıkların düşmesinden dolayı NO_x değerinde azalma meydana gelmekte, bu da sayısal ve deneysel sonuçlar arasında makul bir tutarlılık sağlamaktadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, hermetik tip gaz yakıcı cihazlarda biyogazın kullanılabilirliği sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Modellemelerde, hacimce %60 CH_4 - %40 CO_2, %70 CH_4 - %30 CO_2, %80 CH_4 - %20 CO_2 ve %90 CH_4 - %10 CO_2 karışımlı biyogazlar kullanılmış, sıcaklık ve NO_x dağılımları elde edilmiştir.

Sayısal analizde türbülans modeli olarak eddy-viskozite modeli olarak da bilinen standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Hem sayısal hem de deneysel çalışmalar için eşdeğerlik oranı olarak 0,75 kullanılırken, deneysel çalışmalarda 13 kW güç, sayısal modellemelerde ise hem 31 kW hem de 13 kW güç için sonuçlar elde edilmiştir.

Deneylerde mevcut doğalgaz brülörü yardımıyla, oluşturulan yakıt karışımları verimli şekilde yakılmıştır. Farklı oranlı karışımlarla yapılan deneylerde herhangi bir alev kararsızlığı gözlenmemiştir.

Sayısal analizlerde, hava giriş sıcaklıkları ve oksitleyicideki oksijen konsantrasyonu da, yanma odası ve çıkıştaki farklı yanma koşullarını incelemek için değiştirilmiştir.

Deneyler sırasında yanma havası kullanımındaki olası farklılıklar nedeniyle ölçülen veriler ile sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar arasında küçük farklılıklar olsa da, sayısal analizlerden elde edilen sıcaklık ve NO_x profillerinin/eğilimlerinin, deneylerden elde edilen sıcaklık ve NO_x değerleri ile iyi bir uyum içinde olduğu sonucuna varılmıştır.

Yakıt karışımındaki CH_4 konsantrasyonunun alev sıcaklıkları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yakıt karışımındaki metan konsantrasyonu azaldıkça alev sıcaklıkları giderek azalmakta ve bunun sonucunda Zeldovich Mekanizması nedeniyle NO_x seviyeleri düşmektedir.

Her bir yakıt karışımı için hava giriş sıcaklığı (ön ısıtma etkisi) arttıkça alev sıcaklığı seviyelerinin de arttığı görülmüştür. Alev sıcaklığının artışı ile termal NO_x mekanizması nedeniyle NO_x seviyeleri de artmaktadır.

Oksitleyicideki oksijen konsantrasyonu arttığında da benzer bir sonuç ortaya çıkmıştır. Alev sıcaklıkları oksijen konsantrasyonu artışı ile yükselmiş ve bunun sonucunda NO_x seviyeleri de artmıştır.

Sonuç olarak bu çalışma, biyogaz yakıtı olarak CH_4 – CO_2 yakıt karışımlarının konut tipi hermetik tip gaz yakıcı cihazlarda kullanılabileceğini deneysel ve sayısal olarak ortaya koymaktadır. Bu kullanımın, brülör ve yanma odasında herhangi bir değişiklik yapılmadan olabileceği çalışma sonunda değerlendirilmektedir. Bu sayede, çevresel kirliliğe yol açmayan, sürdürülebilirlik sağlayabilen, her yerde elde edilebilen ve özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olabilecek biyogazın, sürekli tükenen, dünya çapında dağılımı eşit olmayan, erişim sorunu olan doğal gazın yerini alabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Keçebaş, A., Gedik, E., Kayfeci, M. (2010). Fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan hava kirliliği üzerine jeotermal enerji ve doğalgaz kullanımının etkisi: Afyon örneği. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3), 23-30.

2. İlleez, B. (2020). Türkiye'de biyokütle enerjisi. *Türkiye'nin Enerji Görünümü*, 317-346.

3. Şahin, M. (2016). *Konvansiyonel yakıcılarda biyogaz yanma karakteristiklerinin analizi*. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 17.

4. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2023). Doğal gaz piyasası 2023 yılı sektör raporu, *EPDK*, Ankara, 17-23.

5. Ma, J., Qi, C., Luo, S. and Zuo, Z. (2022). Numerical simulation of the influence of CO2 on the combustion characteristics and NOX of biogas. *Frontiers in Energy Research*, 9, 811037.

6. Zuo, Z., Qi, C., Ma, J., Sun, H., Luo, S., Ren, D., Zhang, Y., Guo, J., Cheng, Z. and Li, C. (2022). Combustion characteristics of low calorific value biogas and reaction path of NOx based on sensitivity analysis. *Frontiers in Chemistry*, 9, 830329.

7. Jiao, J., Yungang, W., Yufei, L., Xingbang, Z. and Qinxin, Z. (2023). Study on combustion characteristics of fully premixed water-cooled biogas burner. *Case Studies in Thermal Engineering*, 52, 103669.

8. Anggono, W., Wardana, I., Lawes, M., Hughes, K., Wahyudi, S., Hamidi, N. and Hayakawa, A. (2013). Biogas laminar burning velocity and flammability characteristics in spark ignited premix combustion. *Journal of Physics: Conference Series*, 423(1), 012015.

9. Şahin, M. (2019). Organik atıklarin fermantasyonu sonucu elde edilen biyogazların yanma karakteristiklerinin incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 418-428.

10. Zeng, W., Liu, J., Ma, H., Liu, Y. and Liu, A. (2018). Experimental study on the flame propagation and laminar combustion characteristics of landfill gas. *Energy*, 158, 437-448.

11. Greco, A., Mira, D., Jiang, X. (2017). Effects of fuel composition on biogas combustion in premixed laminar flames. *Energy Procedia*, 105, 1058-1062.

12. İlbaş, M., Karyeyen, S. (2015). A numerical study on combustion behaviours of hydrogen-enriched low calorific value coal gases. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(44), 15218-15226.

13. Cohe, C., Chauveau, C., Gökalp, I. and Kurtuluş, D. F. (2009). CO2 addition and pressure effects on laminar and turbulent lean premixed CH4 air flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(2), 1803-1810.

14. Hinton, N., Stone, R. (2014). Laminar burning velocity measurements of methane and carbon dioxide mixtures (biogas) over wide ranging temperatures and pressures. *Fuel*, 116, 743-750.

15. Chan, Y. L., Zhu, M., Zhang, Z. Z., Liu, P. and Zhang, D. (2015). The effect of CO2 dilution on the laminar burning velocity of premixed methane/air flames. *Energy Procedia*, 75, 3048-3053.

16. Lafay, Y., Taupin, B., Martins, G., Cabot, G., Renou, B. and Boukhalfa, A. (2007). Experimental study of biogas combustion using a gas turbine configuration. *Experiments in fluids*, 43(2), 395-410.

17. Amez, I., Castells, B., Llamas, B., Bolonio, D., García-Martínez, M. J., Lorenzo, J. L., García-Torrent, J. and F. Ortega, M. (2021). Experimental study of biogas–hydrogen mixtures combustion in conventional natural gas systems. *Applied Sciences*, 11(14), 6513.

18. Nonaka, H., Pereira, F. (2016). Experimental and numerical study of CO2 content effects on the laminar burning velocity of biogas. *Fuel*, 182, 382-390.

19. Ghenai, C., Janajreh, I. (2015). Combustion of renewable biogas fuels. *Journal of Energy and Power Engineering*, 9(10), 831-843.

20. Devi, S., Sahoo, N., Muthukumar, P. (2023). Comparative performance evaluation of a porous radiant burner with a conventional burner: Biogas combustion. *Applied Thermal Engineering*, 218, 119338.

21. Leonov, E., Trubaev, P. (2022). The effect of biogas composition on the characteristics of the combustion process. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 3, 1-9.

22. Sahin, M. (2019). Combustion characteristics of various biogas flames under reduced oxygen concentration conditions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(19), 2415-2427.

23. Zhen, H., Leung, C. W., Cheung, C. S. and Huang, Z. (2016). Combustion characteristic and heating performance of stoichiometric biogas–hydrogen–air flame. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 807-814.

24. Zhao, Y., McDonell, V., Samuelsen, S. (2020). Assessment of the combustion performance of a room furnace operating on pipeline natural gas mixed with simulated biogas or hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(19), 11368-11379.

25. Lee, C.-E., Hwang, C.-H. (2007). An experimental study on the flame stability of LFG and LFG-mixed fuels. *Fuel*, 86(5-6), 649-655.

26. Kiedrzyńska, A., Lewtak, R., Świątkowski, B., Jóźwiak, P., Hercog, J. and Badyda, K. (2020). Numerical study of natural gas and low-calorific syngas co-firing in a pilot scale burner. *Energy*, 211, 118552.

27. Decker, T., Baumgardner, M., Prapas, J. and Bradley, T. (2018). A mixed computational and experimental approach to improved biogas burner flame port design. *Energy for Sustainable Development*, 44, 37-46.

28. Dong, W., Xiang, L., Gao, J., Qiu, B. and Chu, H. (2023). Effect of CO2 dilution on laminar burning velocities, combustion characteristics and NO x emissions of CH4/air mixtures. *International Journal of Coal Science & Technology*, 10(1), 72.

29. Leonov, E., Trubaev, P. (2021). Analysis of biogas content influence on the flame properties. *Materials Science and Engineering*, 1089(1), 012032.

30. Bandara, J., Narayana, M., Bayer, C. (2023). Computational investigation of NOx emission in biogas combustion. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(38), 89548-89558.

31. Khaleghi, M., Hosseini, S. E., Wahid, M. A. (2015). Experimental and numerical investigations of biogas vortex combustion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 229(6), 662-676.

32. International Energy Agency (2020). Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth, *IEA*, Paris, 26-28

33. Bond, T., Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable development*, 15(4), 347-354.

34. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2016). Biyogaz enerji üretim tesisi fizibilite raporu, *STB*, Ankara, 1-44.

35. Aytav, E. (2018). *Biyogazın çift yakıtlı bir dizel motorunda ana yakıt olarak kullanımının deneysel incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 88-102.

36. Işık, D., Ökmen, G. (2013). Metan üreten mikroorganizmalar. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, (2), 79-85.

37. Üregen Güler, N. (2020). *Yerli kaynaklardan biyogaz üretimi ve oksi biyogaz yanması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,

38. Kaya, D., Öztürk, H. H. (2012). *Biyogaz teknolojisi: üretim-kullanım-projeleme*: İstanbul: Umuttepe Yayınları, 8-12.

39. Persson, M., Jönsson, O., Wellinger, A. (2006). Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. *IEA Bioenergy Task*, 37, 1-34.

40. Deviren, H., İlkılıç, C., Aydın, S. (2017). Biyogaz üretiminde kullanılabilen materyaller ve biyogazın kullanım alanları. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2/2), 79-89.

41. Cengel, Y. A. (2011). *Thermodynamics: an engineering approach*. New York: McGraw-Hill, 45-52.

42. Palmer, R. T. (2002). *Modern engineering thermodynamics*. New York: Elsevier, 45-52.

43. Winterbone, D. E. (2002). *Advanced thermodynamics for engineers*. New York: BH, 78-82.

44. Tatar, V. (2010). *Yakıt olarak metan ve biyokütleden piroliz yöntemi ile elde edilen sentetik gaz kullanan bir mikrotürbinin dairesel yanma odasındaki yanmanın akışkanlar dinamiği simülasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversites Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 99-102.

45. Zandaryaa, S., Buekens, A. (2014). Control of nitrogen oxides. *Pollution Control Technologies*, 2.

46. Bulut, Ç. (2021). *Konvansiyonel tip gaz yakıcı cihazlarda tek kademeli fanların frekans kontrollü fana dönüştürülerek performansının deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 102-105.

47. Gehrmann, H.-J., Jaeger, B., Wirtz, S., Scherer, V., Aleksandrov, K., Hauser, M., Stapf, D., Pollmeier, G. and Danz, P. (2021). Oscillating combustion—primary measure to reduce nitrogen oxide in a grate furnace–experiments and simulations. *Processes*, 9(12), 2210.

48. İnternet: ANSYS FLUENT 12.0/12.1. (2024). *ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation*. Web https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node60.htm, Son Erişim Tarihi:04/07/2024.

49. Gürenli, M., Atamtürk, U. (2011). *Türkiye'de yaygın olan kullanım sıcak suyu sistemlerine genel bir bakış hızlı boyler ve depo şarj sisteminin karşılaştırmalı analizi*. 10. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 46-85.

50. Gürsoy, E. (2019). *Düşük NOx emisyonlu kombilerin performans ölçümleri ve optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 65-72.

51. Koca, T., Aksungur, S. (2018). Hermetik ve yoğuşmalı kombi cihazlarının performanslarının deneysel olarak karşılaştırılmas. *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)*, 7(2), 181-186.

52. Ural, T., Akgün, M., Ertürk, M. (2020). Türkiye'de doğalgazın tüketildiği mahallerde kullanılan havalandırma menfezlerin optimizasyonu. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(2), 157-168.

53. Anetor, L., Osakue, E., Odetunde, C. (2012). Reduced mechanism approach of modeling premixed propane-air mixture using ANSYS Fluent. *Engineering Journal*, 16(1), 67-86.

54. Werle, S. (2015). Nitrogen oxides emission reduction using sewage sludge gasification gas reburning process. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 22(1), 83-94.

55. Alabaş, H. A., Çeper, B. A. (2023). Effect of oxygen enrichment on the combustion characteristic and pollutant emissions of kerosene-biogas mixtures on a mini jet engine combustion chamber. *Journal of the Energy Institute*, 111, 101420.

56. Cellek, M. S. (2020). Flameless combustion investigation of CH4/H2 in the laboratory-scaled furnace. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 35208-35222.

Gazili olmak ayrıcalıktır…