



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Birleşik tip gaz yakıcı cihazlarda metan-hidrojen karışımının performans analizi

Performance analysis of methane-hydrogen mixture in combined type gas burners

Yazar(lar) (Author(s)): Mert ÖKTEN¹, Halil İbrahim VARİYENLİ², Serhat KARYEYEN³, Koray GÖKTEKİN⁴

ORCID¹: 0000-0003-0077-4471

ORCID²: 0000-0001-6313-1786

ORCID³: 0000-0002-8383-5518

ORCID⁴: 0000-0003-4496-2247

To cite to this article: Ökten M., Variyenli H. İ., Karyeyen S. and Goktekin K., “Birleşik Tip Gaz Yakıcı Cihazlarda Metan-Hidrojen Karışımının Performans Analizi”, *Journal of Polytechnic*, 28(3): 969-977, (2025).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Ökten M., Variyenli H. İ., Karyeyen S. ve Goktekin K., “Birleşik Tip Gaz Yakıcı Cihazlarda Metan-Hidrojen Karışımının Performans Analizi”, *Politeknik Dergisi*, 28(3): 969-977, (2025).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1559852

Birleşik Tip Gaz Yakıcı Cihazlarda Metan-Hidrojen Karışımının Performans Analizi

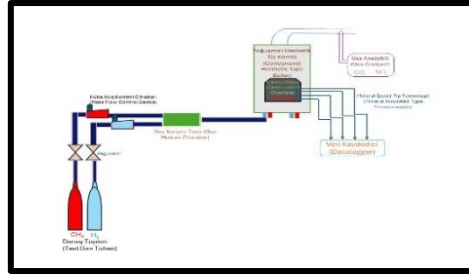
Performance Analysis of Methane-Hydrogen Mixture in Combined Type Gas Burners

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Birleşik tip gaz yakıcı cihazlarda metan-hidrojen yanması / Methane-hydrogen combustion in combined type gas combustors
- ❖ Ön karışimsız metan-hidrojen alevlerinin HAD modellemesi / CFD modeling of premixed methane-hydrogen flames
- ❖ Sera gazı emisyonu üzerine etkisi / Impact on greenhouse gas emissions

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çeşitli CH_4-H_2 karışımları deneysel ve sayısal olarak analiz edilmiştir. / Various CH_4-H_2 mixtures were analyzed experimentally and numerically.



Şekil. Deney düzeneği şematik gösterimi /Figure. Schematic of the experimental set-up

Amaç (Aim)

Hidrojenin doğal gazla çalışan bir ısıtma sisteminde kullanılabilirliği incelendi. / The usability of hydrogen in a natural gas-fired heating system was investigated.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışmanın deneysel kısmında yakıt karışımları yakılmış, sıcaklık ve baca gazı ölçümleri yapılmıştır. Çalışmanın sayısal kısmında realizabl $k-\epsilon$ türbülans modeli ve Eddy Dissipation yanma modeli kullanılmıştır. / In the experimental part of the study, fuel mixtures were burned and temperature and flue gas measurements were made. In the numerical part of this study, realizable $k-\epsilon$ turbulence model and Eddy Dissipation combustion model was used.

Özgünlük (Originality)

Literatürde konut tipi kombilerde hidrojen kullanılabilirliği üzerine çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu araştırma hidrojenin hermetik tip bir gaz yakma cihazında kullanılabilirliğine odaklanmıştır. / There is no study on hydrogen availability in residential boilers in the literature. Therefore, this research is focused on the usability of hydrogen in a hermetic type gas combustion appliance.

Bulgular (Findings)

Yakıt karışımındaki H_2 konsantrasyonu arttıkça alev sıcaklıkları kademeli olarak artmakta, CO emisyonu azalmaktadır. / As the H_2 concentration in the fuel mixture increases, flame temperatures gradually increase and CO emissions decrease.

Sonuç (Conclusion)

Bu çalışma, %70 CH_4 - %30 H_2 yakıt karışımlarının konut tipi hermetik tip gaz yakıcı cihazlarında tüketilebileceğini deneysel ve sayısal olarak ortaya koymaktadır. / This study demonstrates experimentally and numerically that 70% CH_4 - 30% H_2 fuel mixtures can be consumed in residential hermetic type gas combustors.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Birleşik Tip Gaz Yakıcı Cihazlarda Metan-Hidrojen Karışımının Performans Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mert ÖKTEN^{1,2*}, Halil İbrahim VARİYENLİ³, Serhat KARYEYEN³, Koray GÖKTEKİN⁴

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Müh. A.B.D., Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye

³Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

⁴Şehit Murat Üçöz Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi ANKARA/YENİMAHALLE

(Geliş/Received : 02.10.2024 ; Kabul/Accepted : 08.11.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 22.11.2024)

ÖZ

Enerji; hızlı nüfus artışı, sanayideki önemli gelişmeler, şehirleşme, kaynakların plansız kullanılması ve küreselleşme sonucu değişen üretim ve tüketim metodolojisi nedeniyle önemini artırarak korumakta ve günümüzün en önemli sorunlarından biri haline dönüşmektedir. Bu çalışmada, metan-hidrojen yakıt karışımının yanmasının ev tipi kombi brülöründe herhangi fiziksel değişime ve performans kaybına neden olmadan kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmış ve sayısal olarak modellenmiştir. Çalışma iki aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşamada hidrojen-metan yakıt karışımı kondenzasyonlu hermetik tip kombide deneysel olarak yakılmıştır. İkinci aşamada ise bir CFD programında yanma modellenmiştir. Sayısal analizde realize edilebilir κ - ϵ türbülans modeli, Eddy-dissipation yanma modeli ve Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğinde 4 basamaklı metan (CH_4) ile 9 basamaklı hidrojen (H_2) yanma reaksiyonları kullanılmıştır. CH_4 - H_2 yanmasında CH_4 miktarı 20 Sl/dk değerinde sabit tutulmuş, oluşturulan yakıt karışımında hidrojen, hacimce %0 ile %30 arasında %10'arlık artışlarla eklenmiştir. Yanma odasından alınan sıcaklık ölçümlerinde %0 H_2 'de 571.1 K'den %30 H_2 'de 636.2 K'e yükselmiştir. Yapılan emisyon değerleri ölçümünde karbon monoksit oranı %0 H_2 'de 15 ppm'den %30 H_2 'de 8 ppm seviyelerine inmiş, karbon dioksit oranı %2.6-2.8 değerleri, azot oksit oranı ise 10-13 ppm seviyeleri arasında ölçülmüştür. Sayısal analizde eşdeğerlik oranı 0.7 için kombinin ısı güç değeri 13 kW'tan 14.7 kW'a doğru değişim göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Emisyon, hidrojen, kombi, metan, yanma.

Performance Analysis of Methane-Hydrogen Mixture in Combined Type Gas Burners

ABSTRACT

Energy is becoming one of the most important problems of today due to rapid population growth, significant developments in industry, urbanisation, unplanned use of resources and changing production and consumption methodology as a result of globalisation. In this study, the feasibility of burning a methane-hydrogen fuel mixture without causing any physical changes and power loss in a domestic boiler burner is experimentally investigated and numerically modelled. The study consists of two phases. In the first stage, the hydrogen-methane fuel mixture was burned experimentally in a hermetic condensing boiler. In the second stage, the combustion is modelled in a CFD programme. Realizable κ - ϵ turbulence model, Eddy-Dissipation combustion model and Gri-Mech 3.0 chemical kinetics for 4-step methane (CH_4) and 9-step hydrogen (H_2) combustion reactions were used in the numerical analysis. In the CH_4 - H_2 combustion, the amount of CH_4 was kept constant at 20 Sl/min and hydrogen was added in 10% increments between 0% and 30% by volume in the fuel mixture. Temperature measurements taken from the combustion chamber increased from 571.1 K at 0% H_2 to 636.2 K at 30% H_2 . In the emission measurement, the carbon monoxide rate decreased from 15 ppm at 0% H_2 to 8 ppm at 30% H_2 , the carbon dioxide rate was measured between 2.6-2.8% and the nitrogen oxide rate was measured between 10-13 ppm. In the numerical analysis, the thermal output of the boiler changed from 13 kW to 14.7 kW for an equivalence ratio of 0.7.

Keywords: Emissions, hydrogen, combi boiler, methane, combustion.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkelerin iktisadi ve sosyal kalkınmasında en önemli kaynak enerjidir. Enerji; hızlı nüfus artışı, sanayideki önemli gelişmeler, şehirleşme, kaynakların plansız kullanılması ve küreselleşme sonucu değişen üretim ve tüketim metodolojisi nedeniyle önemini artırarak korumakta ve günümüzün en önemli sorunlarından biri haline dönüşmektedir. Petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıt rezervleri hızla tükenmekte, ozon 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. Her ne kadar doğal gaz diğer fosil kaynaklı yakıtlar içerisinde çevreci olarak öne çıksa da sonuç olarak doğal gaz da geçici bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : mert.okten@cbu.edu.tr

Sera gazları 1990 yılından günümüze %50 artmıştır. 2022 yılında 321 Mt karbondioksit (CO₂) emisyonu salınmış ve bunun 118 Mt'si doğal gaz kullanımı sonucu oluşmuştur. 2022 yılı sonu itibariyle de toplam CO₂ emisyonu 36.8 Gt'ye ulaşmıştır [1]. Enerji tüketiminin ve CO₂ emisyonlarının %70'i ise şehirlerde oluşmaktadır [2].

Hidrojen, sera gazı emisyonuna sebep olmaması ve geleneksel fosil yakıtlara göre daha yüksek alt ve üst ısı değerlere sahip olması nedeniyle yakıt olarak tercih edilmektedir [3]. Günümüzde doğal gaz hidrojen ilavesi ile ilgili çalışmalar yoğunlaşmıştır [4-9]. Metan-hidrojen karışımının yakıt bakımından zengin enine kademeli enjeksiyonla yanmasının deneysel bir çalışmada NO_x, CO₂ emisyonlarının azaldığını, CO ve C_xH_y emisyon değerlerinin arttığını ve artan hidrojen yüzdesi ve yakıt bakımından zengin yanma ile termal verimlilik değerlerinin azaldığı görülmüştür [10]. Propan, kömür gazı, biyogaz, amonyak gibi yakıtlara hidrojen ilavesinin CO₂ emisyonunu azalttığı, NO_x emisyonunu ise artırdığı görülmüştür [11-16]. [17]'de 100 kW'a kadar çalışabilen geleneksel bir doğal gaz brülöründe biyogaz-hidrojen yanması incelenmiş, biyogaz bileşimi %40'tan fazla CO₂ içerdiğinde brülör tutuşmadığı için, geleneksel sistemlerde biyogaz yakmanın zorluğu kanıtlanmış ve egzoz gazı sıcaklığında en iyi iyileştirmeler %5 hidrojen bileşiminde elde edilmiştir.

Çeper [18], yapmış olduğu çalışmada içten yanmalı motorlarda hidrojen-metan (hitan) kullanımı incelenmiş, hidrojen etkili doğal gaz motorunun normal doğalgazlı motora göre gücü %3-4, torku %2-3 oranında artırdığı, yakıt tüketimini yaklaşık %4 oranında düşürdüğü ve yanma sonucu açığa çıkan CO ve NO_x emisyonlarını azalttığı sonucuna ulaşmıştır. Riahi ve arkadaşları [19], oksijen zenginleştirmesinin hitan alevinin sıcaklığını artırdığı ve çevreye zararlı gazların oluşumunu en aza indirdiği sonucuna ulaşmışlardır. Hitan zenginleştirmenin bir sıkıştırma ateşlemeli motorunun performansı, emisyonu ve yanma özellikleri üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada duman emisyonunun, 2100 d/d motor devrinde %50 gaz yakıt oranında %95.44 oranında azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [20].

Öztürk ve Dinçer [21], yeşil hidrojen üreten ve bunu Zonguldak, Türkiye'de Karadeniz'de potansiyel olarak bulunan doğal gazla karıştıran entegre bir sistem tasarlamıştır. Hacimsel olarak %20'ye kadar hidrojen ilavesiyle yıllık doğal gaz tüketimi azalmış ve dolayısıyla Karadeniz doğal gaz rezervlerinin tüketim yılları artmıştır. Daha yüksek hidrojen ilavesi ile egzoz gazında yanma sonrası açığa çıkan karbon monoksit ve karbon dioksit emisyonları azalmış, azot oksit emisyonu ise artmıştır. İlbaş ve arkadaşları [22], hidrojen-havanın ve farklı bileşimdeki hidrojen-metan-hava karışımlarının laminer alev hızlarını, ortam sıcaklıklarında değişken eşdeğerlik oranları için ölçmüş, hidrojen-metan karışımındaki hidrojen yüzdesinin arttırılmasının, elde edilen yanma hızında bir artışa ve yanıcılık sınırlarının genişlemesine neden olduğunu göstermiştir. İçeriğinde daha yüksek miktarda hidrojen içeren kompozit yakıtta

yanma işleminin daha kısa sürede gerçekleştiği, kompozit yakıt karışımındaki hidrojen içeriğinin artması ile CO emisyonunun azaldığı ve yüksek alev sıcaklığına bağlı olarak NO_x emisyonunun arttığı belirlenmiştir. Ayrıca daha yüksek hidrojen içeren kompozit yakıtta hızlı ve çabuk yanmaya bağlı olarak alev boyunun kısmen daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Yakıt karışımında hidrojen miktarının artması ile alevden radyasyonla ısı kaybının azaldığı, mevcut doğalgaz brülörlerinde hacimsel olarak %30 seviyelerinde hidrojen içeren kompozit gaz yakıtın brülörde herhangi bir önemli değişikliğe ve düzenlemeye gerek kalmadan kullanılabileceği belirlenmiştir [23].

Mevcut doğal gaz boru hatlarına hidrojen ilavesi doğal gazın, Wobbe indeksini azaltarak yanma karakteristiğini değiştirmektedir. Hatlardaki uyum probleminden dolayı karışım limiti hacimce %20 civarındadır [24]. Birkitt ve arkadaşları [25], hacimce %20 hidrojen ilavesinin 2 bar basınca kadar İngiltere'nin doğal gaz şebekesindeki malzemelere etkisini incelemişlerdir. Ortam sıcaklığına yakın sıcaklıklarda gövde merkezli kübik kristal yapısına sahip metallerin, kristal kafes yapısındaki boşluk veya arayer kristal boşluklarından kaynaklı düşük yük taşıma kapasitesi olarak tanımlanan hidrojen kırılabilirliğine hassas olduklarını belirtmişlerdir. Öztürk ve Dinçer [26], konut uygulamalarında doğal gazla yenilenebilir hidrojenin hacimce %20 oranında ilavesinin, evsel cihazlardaki yanma reaksiyonundan kaynaklı CO₂ emisyonunu azalttığını belirtmişlerdir. Zhao ve arkadaşları [27], bir ocak brülörünün yanma ve pişirme performansını incelemiş ve doğal gazın hidrojen içeriği %75'e kadar yükseldiğinde brülörün sabit durum çalışma koşullarında hala kararlı bir şekilde yanabildiğini, ancak brülörün üzerine bir pişirme tenceresi yerleştirildiğinde geri tepme sınırının %55'e düştüğünü bulmuştur. Hidrojen karışım oranı %0, %10, %20 ve %30 olan doğal gaz kullanıldığında ev tipi gaz sobalarının [28, 29], gazlı su ısıtıcılarının [30, 31] ve duvara monte gaz kazanlarının [32] yanma özelliklerinin ve baca gazı emisyonlarının incelendiği çalışmalarda, hidrojen karışım oranının artmasıyla, birincil hava katsayısının, ısı yükünün ve dumanındaki CO ve NO_x içeriğinin kademeli olarak azaldığını [33, 34], termal verimliliğin ise kademeli olarak arttığı görülmüştür.

Bu çalışmada, doğal gazdaki hidrojen varlığının yanma üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir deneysel düzenek kurulmuştur. %99.9 saflıkta metan ve hidrojen karışımının bir kombide yakıt olarak kullanılması deneysel olarak incelenmiş ve sayısal olarak modellenmiştir. Ayrıca metana farklı hacimsel oranlarda hidrojen eklenmesi sonucu oluşan NO_x, CO ve CO₂ emisyonları ölçülmüş ve değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

Deney sistemi, yakıt tüpleri, kütle akış kontrol cihazları, kombi, baca gazı analizörü, K tipi termokupllar ve veri

kaydediciden oluşmaktadır (Şekil 1). Sistemde kullanılan kondenzasyonlu hermetik tip kombi 31 kW gücündedir [35]. CH₄ ve H₂ gazları, kütle akış kontrol cihazlarından debileri ayarlanarak gaz karışım tüpünde karıştırılmıştır. Gaz yakıt karışımının sulu güvenli koruma sisteminden geçirilerek homojen bir şekilde karışması da sağlanmıştır. Yanma odası üzerindeki ölçüm noktaları ile deneylerde yanma odası boyunca farklı eksenel ve radyal mesafelerde sıcaklık dağılımlarının ve baca kısmında atık egzoz gazlarının NO_x, CO ve CO₂ ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 1. Deney seti (Experimental setup)

Sistemde kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Ölçüm cihazları ve özellikleri (Measuring instruments and their properties)

Ölçüm	Ölçüm Cihazı	Özellikleri
Sıcaklık	Elimko K Tipi Termokupl (Düz ve Mineral İzoleli)	- 200 °C - +1300 °C ± 4 °C
Akış	Alicat MassFlow Controller	50 SL/dk ve 250 SL/dk ± (0,8% Okuma + 0,2% Tam Ölçek)
Veri	Elimko Datalogger E-680	± 0,5
Baca gazı	Novaplus Gaz Analizörü	O ₂ (%) 0-21, ±0,2 (%) CO (ppm) 0-10000 ppm, ±10 ppm NO ve NO ₂ (ppm), 0-1000 ve 0-200 ppm, ±5 ppm SO ₂ (ppm) 0-2000 ppm, ±10 ppm CO ₂ (%) 0-40, ±0,3 (%) Yanma Ürünlerinin Sıcaklığı (°C) 0-1100 °C, ±2 °C

Sistemde kullanılan gazlar %99.9 saflıktadır. Çizelge 2’de kullanılan gazların ve termodinamik özellikleri verilmiştir [27].

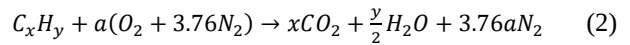
Çizelge 2. Kullanılan gazlar ve termodinamik özellikleri (Used gases and their thermophysical properties)

Özellik	Metan (CH ₄)	Hidrojen (H ₂)
Yoğunluk (kg.m ⁻³)	0.648	0.0813
Viskozite (10 ⁻⁵ Pa.s)	1.11	0.89
Laminer yanma hızı (m.s ⁻¹)	0.4	2.1
Düşük yanabilirlik (%)	5	4
Yüksek yanabilirlik (%)	15	75
Ateşlenme enerjisi (10 ⁻⁵ J)	33	2
Alt ısı değeri (MJ.m ⁻³)	34.0	10.2
Üst ısı değeri (MJ.m ⁻³)	37.8	12.5
Adyabatik alev sıcaklığı (K)	2226	2318
Wobbe indeksi (MJ.m ⁻³)	51.9	48.5

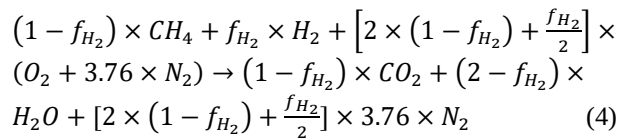
Yakıtların tutuşma sıcaklığında oksijenle tepkimeye girdiğinde ısı ile yan ürünlerin meydana gelmesi, yanma olarak adlandırılır. Bir yanma işlemi en önemli faktör hava-yakıt karışımıdır. Tam olarak yanma için gereksinim olan en az hava miktarına stokiometrik hava denilmektedir. Hava fazlalık katsayısı (λ), yanma esnasında kullanılan hava-yakıt oranının stokiometrik hava-yakıt oranına bölünmesiyle bulunur (Eş. 1). Stokiometrik yanmada hava fazlalık katsayısı 1’dir. Eşdeğerlik oranı (φ) gerçek hava-yakıt oranının stokiometrik hava-yakıt oranına bölümüdür ve karışımın yakıtça durumunu belirlemeye yardımcı olur. $\varphi > 1$ ise karışım yakıtça zengin, $\varphi < 1$ ise karışım yakıtça fakirdir. $\varphi = 1$ durumunda ise stokiometrik karışımın meydana geldiği söylenebilir.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{hava}}{\dot{m}_{hava, stokiometrik}} \times 100 \quad (1)$$

C_xH_y genel formülü ile gösterilen karbon ve hidrojen kökenli yakıt olan hidrokarbonların stokiometrik yanması Eşitlik 2’de, saf hidrojenin yanması ise Eşitlik 3’te gösterildiği şekildedir [36].

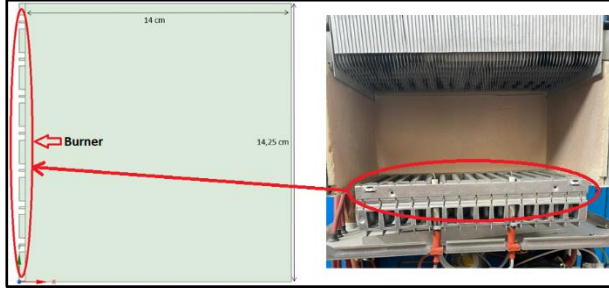


Bir hidrojen-metan karışımının yanma reaksiyonu, havanın %20.9 oksijen ve %79.1 azottan oluştuğu kabul edilerek Eşitlik 4’te gösterildiği gibi yazılabilir [3].



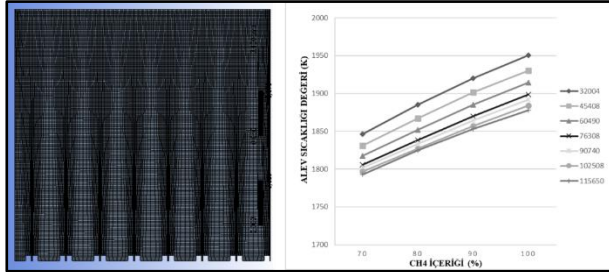
2.2. Sayısal Çalışma (Numerical Study)

Akış alanının simülasyonunda geometri, sınır şartları, akışkanın fiziksel özellikleri vb. gibi bütün önemli değişkenleri içerecek şekilde bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeli gereklidir. Bu doğrultuda; akışın özellikleri ile yanma odasının yanma ve emisyon performansının tahmini konularında sayısal analiz programı ile çalışmalar yapılmıştır. Şekil 2’de yanma odasının modellenmesi verilmiştir.



Şekil 2. Kombi yanma odası (Boiler combustion chamber)

Yanma odasının ağ yapısı 76308 eleman sayısına sahiptir (Şekil 3). Sayısal analizde türbülans modeli olarak hem düzlemsel hem de yuvarlak jetlerin yayılma oranını daha doğru bir şekilde tahmin eden realizable κ - ϵ türbülans modeli (Eş. 5, Eş. 6), türbülans kimyasal reaksiyon yöntemi olarak ön karışimsız yanmada Eddy-Dissipation modeli seçilmiş olup yanma modelinin etkisi araştırılmıştır [37].



Şekil 3. Ağ yapısı genel görüntüsü (Mesh structure overview)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\kappa u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_\kappa + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_\kappa \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu\epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (6)$$

Simülasyon kısmında kararlı durum şartlarında çalışma yapılmıştır. Eşitlik 7’de kütle korunumu (süreklilik), Eşitlik 8’de momentum korunumu ve Eşitlik 9’da enerji korunumu, Eşitlik 10’da türlerin korunumu denklemleri verilmiştir [38].

Kütle korunumu (Süreklilik),

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

Momentum korunumu,

$$\frac{\partial (\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j - \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (8)$$

Enerjinin korunumu,

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial (\lambda_f \rho T_f)}{\partial x_i} - \sum_j \frac{\partial (h_j J_j)}{\partial x_i} + \sum_j h_j R_j \quad (9)$$

Tür denklemi,

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i Y_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial J_i}{\partial x_i} + R_i \quad (10)$$

Arrhenius denklemi, kimyasal reaksiyonlarda aktivasyon enerjisini sıcaklık ve hız sabitiyle olan ilişkisini açıklayan (Eş. 11) eşitlik [38]. Yanma modellemesinin iyileştirilmesi için Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğinde 4 basamaklı CH_4 ile 9 basamaklı H_2 yanma reaksiyonları kullanılmıştır. Çizelge 3’te CH_4 yanma reaksiyonları [39], Çizelge 4’te H_2 yanma reaksiyonları [40] verilmiştir.

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_a/RT} \quad (11)$$

Çizelge 3. Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğine göre CH_4 yanma reaksiyonları (CH_4 combustion reactions according to Gri-Mech 3.0 chemical kinetics)

No	Reaksiyon	Arrhenius faktörü	β_r	Ea [kJ.mol ⁻¹]
1	$\text{CH}_4 + 0.5\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	$7.82e^{13}$	0	$30.0e^3$
2	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	$0.30e^{12}$	0	$30.0e^3$
3	$\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$	$1.21e^{18}$	-1	$40.0e^3$
4	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	$2.75e^{12}$	0	$20.0e^3$

Çizelge 4. Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğine göre H_2 yanma reaksiyonları (H_2 combustion reactions according to Gri-Mech 3.0 chemical kinetics)

No	Reaksiyon	Arrhenius faktörü	β_r	Ea [kJ.mol ⁻¹]
1	$\text{O}_2 + \text{H} \leftrightarrow \text{OH} + \text{O}$	$5.10e^{13}$	-0.82	69.1
2	$\text{H}_2 + \text{O} \leftrightarrow \text{OH} + \text{H}$	$1.80e^7$	1.00	37.0
3	$\text{H}_2 + \text{OH} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	$1.20e^6$	1.30	15.2
4	$\text{OH} + \text{OH} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$	$6.00e^6$	1.30	0.0
5	$\text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{OH} + \text{OH}$	$1.70e^{10}$	0.00	200.0
6	$\text{H} + \text{OH} + \text{M} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M}$	$7.50e^{17}$	-2.60	0.0
7	$\text{O}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{O} + \text{O} + \text{M}$	$1.90e^8$	0.50	400.1
8	$\text{H}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{H} + \text{H} + \text{M}$	$2.20e^9$	0.50	387.7
9	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$	$2.10e^{12}$	-1.00	0.0

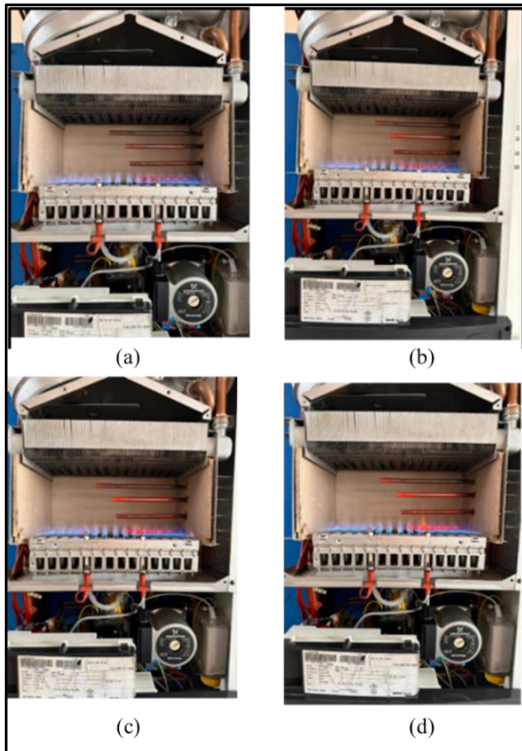
Wobbe İndeksi (Eş. 12), yakıt gazlarının değiştirilebilirliğinin ana göstergesidir. Belirtilen referans koşullarındaki ısıtma değerinin hacimsel değerinin, aynı belirlenmiş referans ölçüm koşullarında bağıl yoğunluğun kareköküne bölümü olarak tanımlanır. Bu nedenle, farklı ısıtma değerlerine ve yoğunluklarına sahip iki gaz, benzer bir Wobbe İndeksi değerine sahipse benzer ısıtma yükleri üretebilir [3].

$$WI = \frac{\text{Alt Isıl Değer}}{\sqrt{\frac{\rho_{\text{gaz}}}{\rho_{\text{hava}}}}} \quad (12)$$

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

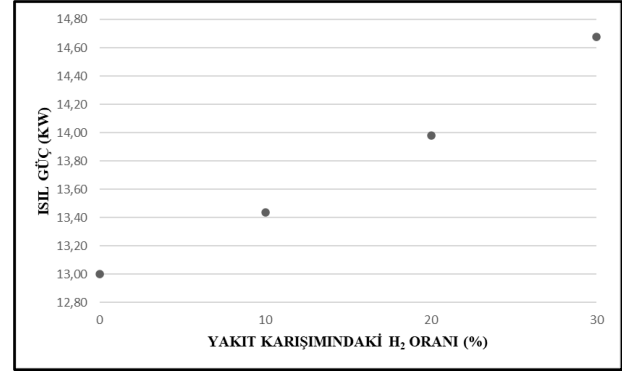
Çalışmada kondenzasyonlu hermetik tip kombide hidrojen-metan yakıt karışımı yakılmıştır. Gazların giriş basıncı 0.5 bara ayarlanmış, yanma yaklaşık olarak atmosferik şartlarda gerçekleşmiştir. Yakıt karışımındaki CH₄ değeri 20 SI/dk sabit debide tutulmuştur. Oluşturulan yakıt karışımında H₂, hacimce %0 ile %30 arasında %10'arlık artışlarla eklenmiştir.

Şekil 4'te karışım yakıtı içerisindeki hidrojen yüzdesine göre yanma esnasında oluşan alevin görünümü verilmiştir. %100 CH₄ yanması sırasında alev boyunun kısa ve alev renginin mavi olduğu görülmektedir. Yakıt karışımı içerisindeki H₂ oranı arttıkça yakıtın renginin maviden turuncuya doğru döndüğü ve alev boyunda ise uzama olduğu görülmüştür.



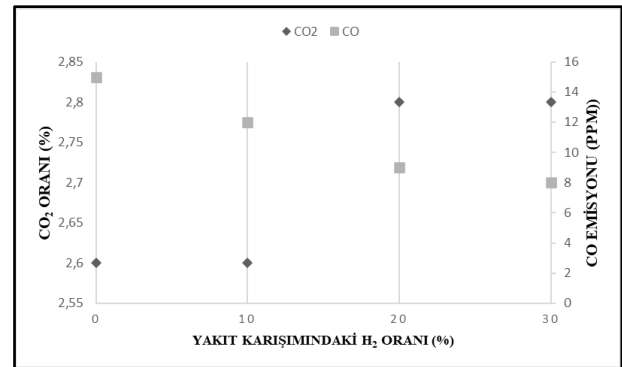
Şekil 3. Yakıt içerisindeki hidrojen değerine göre alev görünümü ((a): %0, (b): %10, (c): %20, (d): %30) (Flame appearance according to the hydrogen content in the fuel)

Deney sisteminde sabit fan hızlı kombi kullanılmıştır. Bu durum yanma için gerekli olan stokiometrik hava miktarının ayarlanamamasına neden olmaktadır. Isıl güç değeri %100 CH₄'te 20 SI/dk yakıt miktarına denk gelen 13 kW'tan, %70 CH₄ - %30 H₂'de 28.5 SI/dk yakıt miktarına denk gelen 14.7 kW'a yükselmiştir (Şekil 5). Bu değer %90 CH₄ - %10 H₂'de 22.22 SI/dk'de 13.44 kW, %80 CH₄ - %20 H₂'de 25 SI/dk'de 14 kW'tır.



Şekil 5. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre ısı güç değişimi (Thermal power change according to H₂ ratio in fuel)

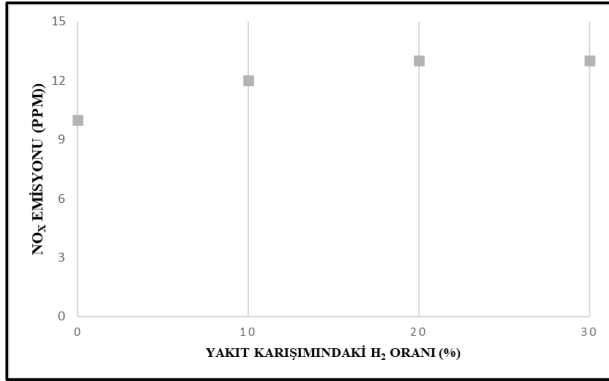
Yanma deneyleri sırasında emisyon değerleri, baca gazı analizör cihazı ile ölçülmüştür. Şekil 6'da yakıt içindeki hidrojen oranına göre karbon emisyon değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Karışım içerisinde hidrojen oranı arttıkça yanma odasının sıcaklık değeri yükselmektedir. Bu durum yanmamış CH₄ miktarını azaltmaktadır. Böylelikle karbon monoksit (CO) oranında düşüşe (15 ppm'den 8 ppm'e), karbon dioksit (CO₂) değerinde ise artışa (%2.6'dan %2.8'e) sebebiyet vermektedir.



Şekil 6. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre karbon emisyonu değişimi (CO_x emission change according to H₂ ratio in fuel)

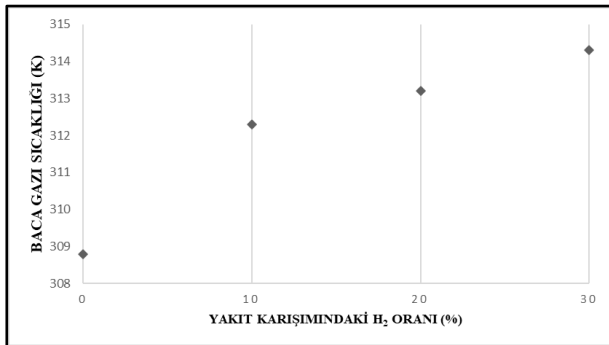
Şekil 7'de yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre azotoksit emisyonu değişimi gösterilmiştir. H₂ oranının artması ile yanma odası sıcaklığındaki artış, hava içerisindeki azot moleküllerinin oksijenle reaksiyona girme miktarını artırarak NO_x oluşumuna (10 ppm – 13 ppm) neden olduğu görülmektedir. Bu durum

stokiyometrik yanma koşullarında gerçekleşmiş olsaydı değerlerde yaklaşık %2-5 kat artış görülebilirdi. Genelde yakıt karışımı içerisindeki H_2 oranının artması yanma sürecinde NO_x oluşumunu düşürebilir ancak, hidrojenin yüksek yanma hızı, hidrojen içeren (özellikle %10-20 H_2) yakıt karışımlarının yanma esnasında oluşan sıcaklık pikleri, karışımın homojenliği ve alev ısısı ile fazla havanın etkisi NO_x düşüşünü sınırlayabilmektedir. Bu yüzden %10-30 H_2 içerikli karışımlarda NO_x değerinin sabit kalması veya çok az artması mümkündür.



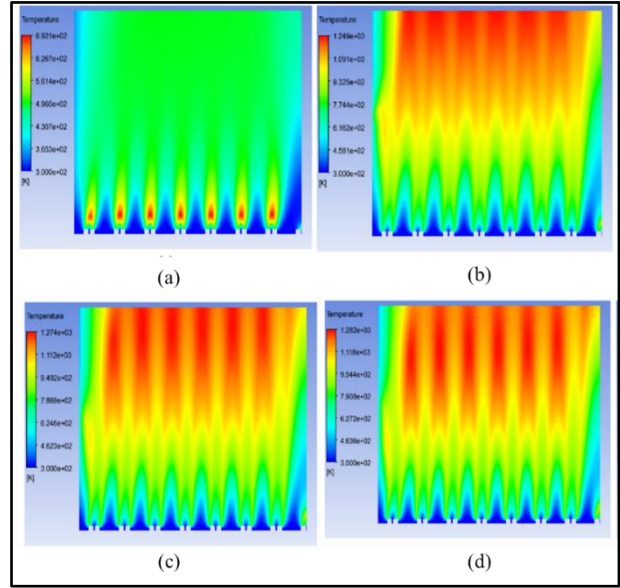
Şekil 7. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre azotoksit emisyonu değişimi (NO_x emission change according to H_2 ratio in fuel)

Hidrojen oranındaki artma, yanma odası sıcaklığındaki artışa neden olmakta ve bu durum atık gaz sıcaklığını da (Şekil 8) artırmaktadır.



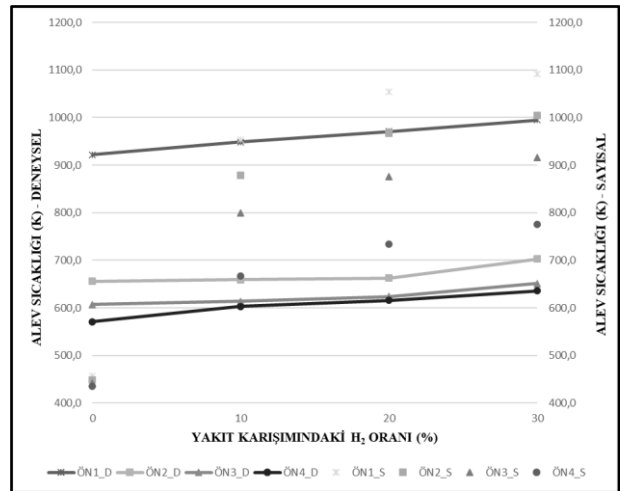
Şekil 8. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre baca gazı sıcaklığı değişimi (Flue gas temperature change according to H_2 ratio in fuel)

Sistemin bir hesaplamalı akışkanlar mekaniği (CFD) programı olan ANSYS Fluent ile modellenmesinin görüntüsü Şekil 9'da gösterilmiştir. Modellemede realizabl κ - ϵ türbülans modeli, Eddy-dissipation yanma modeli ve Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğinde 4 basamaklı CH_4 ile 9 basamaklı H_2 yanma reaksiyonları kullanılmıştır.



Şekil 9. Yanma CFD görüntüsü ((a): %0, (b): %10, (c): %20, (d): %30) (Combustion CFD image)

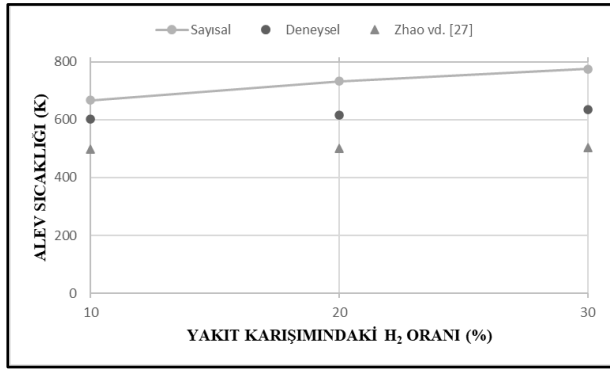
Şekil 10'da yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre sıcaklık değişimi gösterilmiştir.



Şekil 10. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre alev sıcaklığı değişimi (Flame temperature change according to H_2 ratio in fuel)

Sayısal modellemede deneysel ölçüm değerlerine en yakın olan eşdeğerlik oranı 0.7'de çalışma yapılmıştır. Deneysel verilerde %100 CH_4 içeren yakıtın yakılmasında 571.1 K alev sıcaklığı değeri ölçülürken bu değer %70 CH_4 - %30 H_2 içeren yakıtta 636.2 K olarak ölçülmüştür. Sayısal modellemede ise alev sıcaklık tahmin değerleri sırasıyla 435.8 K ve 775.2 K'dir.

Yapılan deney ve sayısal modelleme sonucunda elde edilen veriler literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın, Zhao vd. [27] doğal gazlı ocakta yapmış oldukları ile deney verileri ile orantılı olduğu görülmüştür (Şekil 11).



Şekil 11. Deneyel ve sayısal verilerin literatürde doğrulanması (Validation with literature)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada kondenzasyonlu hermetik tip kombide hidrojen-metan yakıt karışımı yakılmıştır. Çalışmanın modellenmesi ANSYS Fluent ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizde realizeable κ - ϵ türbülans modeli, Eddy-dissipation yanma modeli ve Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğinde 4 basamaklı CH₄ ile 9 basamaklı H₂ yanma reaksiyonları kullanılmıştır.

Çalışma şu şekilde özetlenebilir:

- Y CH₄ miktarı 20 Sl/dk değerinde sabit tutulmuş, oluşturulan yakıt karışımında hidrojen, hacimce %0 ile %30 arasında %10'arlık artışlarla eklenmiştir.
- Y Kombin ısı güç değeri 13 kW'tan 14.7 kW'a değişim göstermiştir.
- Y Sayısal analizde eşdeğerlik oranı 0.7 için çalışma yapılmıştır
- Y En üst seviyedeki (12 cm) ölçüm noktasında alev sıcaklığı değeri deneyel çalışmada %100 CH₄ içeren yakıt karışımında 571.1 K'den %70 CH₄ - %30 H₂ yakıt karışımında 636.2 K'e yükselmiştir. Sayısal modellemesinde ise bu değerler sırasıyla 435.8 K ve 775.2 K değerindedir.
- Y Deney sırasında yapılan emisyon değerleri ölçümünde karbon monoksit oranı 13 kW ısı güçte 15 ppm seviyesindeyken 14.7 kW ısı güçte 8 ppm seviyesine inmiş, karbon dioksit oranı %2.6'dan %2.8'e, azot oksit oranı ise 10 ppm'den 13 ppm'e yükselmiştir.

Bu çalışmanın amacı, birleşik tip kombilerde hidrojenin doğal gaz ile beraber kullanılabilirliğini göstermektedir. Hidrojen, doğal gaza göre daha düşük hacimsel ısıtma değerine sahip olsa da, benzer Wobbe İndeksi değerine [3] sahiptir. Bu durum yanma sisteminde kullanılan atmosferik tip brülörlerin ısıtma yükü üzerindeki etkisini minimuma indirmektedir. Böylece hidrojenin doğal gaz boru hatları ile taşınmasıyla patlama riskini ortadan kaldıracaktır. Metan-Hidrojen karışımındaki hidrojen oranının artışı doğal gaz miktarında tasarruf sağlayacaktır. Doğal gazda dışa bağımlı ülkelerde temiz

yakıt olarak kullanılabilecek hidrojenin sera gazı emisyonlarının yanı sıra ekonomiye de katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

SİMGELER & KISALTMALAR (NOMENCLATURES)

A_r	: üssel öncesi faktör
$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$	: formül sabitleri
E_a	: aktivasyon enerjisi
f	: gazların hacimsel oranı
G_b	: kaldırma kuvvetine bağlı türbülans kinetik enerji üretimi
G_K	: ortalama hız gradyanlarına bağlı türbülans kinetik enerji üretimi
h	: entalpi
J_i	: i türünün difüzyon akısı
$k_{f,r}$	: reaksiyon oran sabiti
p	: basınç
R	: evrensel gaz sabiti
R_j	: j türünün reaksiyon yoluyla net üretim oranı
S_K, S_ϵ	: kullanıcı tanımlı kaynak terimleri
T	: sıcaklık
u	: hız
Y_M	: dalgalanan dilatasyonun sıkıştırılabilir türbülansın genel dağılıma oranına katkısı
β_r	: sıcaklık üssü
$\sigma_K, \sigma_\epsilon$	: türbülanslı Prandtl sayıları
ϵ	: türbülans dağılım oranı
κ	: türbülans kinetik enerjisi
μ	: viskozite
ρ	: yoğunluk
λ	: termal iletkenlik
τ_{ij}	: stres tensörü

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (Proje numarası: FDK-2022-7756) ve TUBITAK (Proje numarası: 123M232) tarafından desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mert ÖKTEN: Deneylerin uygulanması, sonuçların yorumlanması ve makalenin hazırlanmasında görev almıştır.

Halil İbrahim VARIYENLİ: Deneylerin uygulanması, sonuçların yorumlanması ve makalenin hazırlanmasında görev almıştır.

Serhat KARYEYEN: Deneylerin uygulanması, sonuçların yorumlanması ve makalenin hazırlanmasında görev almıştır.

Koray GÖKTEKİN: Deneylerin uygulanması, sonuçların yorumlanması ve makalenin hazırlanmasında görev almıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] IEA, "CO₂ emissions in 2022", <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>, (2023).
- [2] Dinçer İ. ve Ezan M.A., "*Alternatif enerji kaynakları ve doğal gaz lojistiği raporu*", Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 52. <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-60-3.pdf>, (2023).
- [3] Dinçer İ., Javani N., Sorgulu F. ve Öztürk M., "Türkiye'de yeşil hidrojenin üretilip doğal gaza karıştırılması çalışmaları", *Hidrojen Teknolojileri Derneği*, https://www.hidrojenteknolojileri.org/HTD/Yesil_Hidrojenin_Uretilip_Dogal_Gaza_Karistirilmasi_Calismalari.pdf, (2021).
- [4] Zhao Y., McDonnell V. and Samuelsen S., "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, (2020).
- [5] Manimaran R. "Numerical investigations of hydrogen and air mixture with vortex tube and duct combinations", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(36): 19140-19157, (2021).
- [6] Araoye A.A., Abdelhafez A., Nemitallah M.A., Habib M.A. and Ben-Mansour R., "Experimental and numerical investigation of stability and emissions of hydrogen-assisted oxymethane flames in a multi-hole model gas-turbine burner", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(38): 20093-20106, (2021).
- [7] Ortiz-Imedio R., Ortiz A., Urroz J.C., Dieguez P.M., Gorri D., Gandia L.M. and Ortiz I., "Comparative performance of coke oven gas, hydrogen and methane in a spark ignition engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46: 17572-17586, (2021).
- [8] Bai N.J., Fan W.J., Zhang R.C., Zou Z.P., Zhang C.X. and Yan P.L., "Numerical investigation into the structural characteristics of a hydrogen dual-swirl combustor with slight temperature rise combustion", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(43): 22646-22658, (2021).
- [9] Mayrhofer M., Hochenauer C., Koller M., Seemann P. and Prieler R., "Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnaces", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(41): 21672-21686, (2021).
- [10] Boulahlib M.S., Medaerts F. and Boukhalfa M.A., "Experimental study of a domestic boiler using hydrogen methane blend and fuel-rich staged combustion", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46: 37628-37640, (2021).
- [11] Yılmaz İ., Taştan M., İlbaş M. and Tarhan C., "Effect of turbulence and radiation models on combustion characteristics in propane-hydrogen diffusion flames", *Energy Conversion and Management*, 72: 179-186, (2013).
- [12] İlbaş M. and Karyeyen S., "A numerical study on combustion behaviors of hydrogen-enriched low calorific value coal gases", *International Journal of Hydrogen Energy*, 40: 15218-15226, (2015).
- [13] Karyeyen S. and İlbaş M., "Turbulent diffusion flames of coal derived hydrogen supplied low calorific value syngas mixtures in a new type of burner: An experimental study", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 2411-2423, (2017).
- [14] İlbaş M. and Karyeyen S., "An experimental and numerical study on turbulent combustion of hydrogen-rich coal gases in a generated non-premixed burner", *Fuel*, 194: 274-290, (2017).
- [15] Karyeyen S. and İlbaş M., "Application of distributed combustion technique to hydrogen-rich coal gases: A numerical investigation", *International Journal of Hydrogen Energy*, 45: 3641-3650, (2020).
- [16] İlbaş M., Kekul O., Bektaş A. and Karyeyen S., "Oxidizer effects on ammonia combustion using a generated non-premixed burner", *International Journal of Hydrogen Energy*, 47: 12317-12337, (2022).
- [17] Ameiz I., Castells B., Llamas B., Bolonio D., GarcíaMartínez M.J., Lorenzo J.L., García-Torrent J. and Ortega M., "Experimental study of biogas-hydrogen mixtures combustion in conventional natural gas systems", *Applied Science*, 11: 6513, (2021).
- [18] Çeper B.A., "Use of hydrogen-methane blends in internal combustion engines", *Hydrogen Energy-Challenges and Perspectives*, IntechOpen; (2021).
- [19] Riahi Z., Hraiech I., Sautet J.C. and Nasrallah S.B., "Experimental and numerical study of oxidant effect on hythane combustion", *International Journal of Hydrogen Energy*, 47: 8105-8117, (2022).
- [20] Sandalcı T., Işın Ö., Galata S., Karagöz Y. and Güler İ., "Effect of hythane enrichment on performance, emission and combustion characteristics of an ci engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, 44: 3208-3220, (2019).
- [21] Ozturk M. and Dincer I., "System development and assessment for green hydrogen generation and blending with natural gas", *Energy*, 261: 125233, (2022).
- [22] İlbaş M., Crayford A.P., Yılmaz İ., Bowen P.J. and Syred N., "Laminar-burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-methane-air mixtures: An experimental study", *International Journal of Hydrogen Energy*, 31: 1768-1779, (2006).
- [23] Yılmaz İ. and İlbaş M., "An experimental study on hydrogen-methane mixtured fuels", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35: 178-187, (2008).
- [24] Götz M., Lefebvre J., Mörs F., McDaniel Koch A., Graf F., Bajohr S., Reimert R. and Kolb T., "Renewable Power-to-Gas: A Technological and economic review", *Renewable Energy*, 85: 1371-1390, (2016).
- [25] Birkitt K., Loo-Morrey M., Sanchez C. and O'Sullivan L., "Materials aspects associated with the addition of up to 20 mol% hydrogen into an existing natural gas distribution network", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(23): 12290-12299, (2021).

- [26] Ozturk M. and Dinçer İ., “Development of renewable energy system integrated with hydrogen and natural gas subsystems for cleaner combustion”, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83: 103583, (2020).
- [27] Zhao Y., McDonell S. and Samuelsen S., “Influence of hydrogen addition to pipeline natural gas on the combustion performance of a cook top burner”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23): 12239-12253, (2019).
- [28] Ozturk M., Sorgulu F., Javani N. and Dincer I., “An experimental study on the environmental impact of hydrogen and natural gas blend burning”, *Chemosphere*, 329: 138671, (2023).
- [29] Sorgulu F., Ozturk M., Javani N. and Dincer I., “Experimental investigation for combustion performance of hydrogen and natural gas fuel blends”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48: 34476-34485, (2023).
- [30] Choudhury V.G., McDonell S. and Samuelsen S., “Combustion performance of low-NO_x and conventional storage water heaters operated on hydrogen enriched natural gas”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3): 2405-2417, (2020).
- [31] Zhan X., Chen Z. and Qin C., “Effect of hydrogen-blended natural gas on combustion stability and emission of water heater burner”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 37: 102246, (2022).
- [32] Yan R., Gao W., Zhang Y. and Zhang J., “Combustion performance tests of hydrogen-natural gas mixtures as fuels in domestic gas appliances”, *Natural Gas Industry*, 38(2): 119-124, (2018).
- [33] İlbaş M., Candan G., “Küçük bir girdaplı yakıcı ve fırında CO₂ seyreltmesinin alev stabilizasyonu ve NO_x emisyonu üzerinde”, *Politeknik Dergisi*, 26(2): 603-608, (2023).
- [34] Sahin B., Doner N. ve Ilbas M., “Flame and flow analysis of LPG in household cookers with rectangular ports”, *Politeknik Dergisi*, 27(3): 1121-1128, (2024).
- [35] Variyenli H.İ. and Khanlari A., “Analyzing the environmental effects of conventional and condensing combi boilers using natural gas”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1277-1284, (2020).
- [36] El-Mahallawy F. and El-Din Habik S., “Fundamentals and Technology of Combustion”, First Edition, Elsevier, (2002). ISBN: 9780080532189
- [37] ANSYS fluent theory guide 19.2, ANSYS Inc., (2018).
- [38] Yılmaz H., Karyeyen S., Tepe A.Ü. and Brüggemann D., “Colourless distributed combustion characteristics of hydrogen/air mixtures in a micro combustor”, *Fuel*, 332: 126163, (2023).
- [39] İlbaş M., Akyıldız S., Karyeyen S. and Aktaş A., “Conventional and distributed combustion regime on a model thermoelectric generator (TEG) performance using a swirl burner/furnace”, *Fuel*, 347: 128487, (2023).
- [40] Cam O., Yılmaz H., Tangoz S. and Yılmaz I., “A numerical study on combustion and emission characteristics of premixed hydrogen air flames”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 25801-25811, (2017).