

Sentez gazı-metan karışımlarının ön karışimsız türbülanslı yanmasının azot oksit emisyonlarına etkisi üzerine sayısal bir çalışma

A numerical study on the effect of non-premixed turbulent combustion of synthesis gas-methane mixtures to nitrogen oxide emissions

Suat ÖZTÜRK* 

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 67100, Zonguldak

• Geliş tarihi / Received: 08.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 20.08.2024

Öz

Sunulan çalışmada, biyokütlenin gazlaştırılması ile üretilen sentez gaza farklı oranlarda metan eklenmesi ile elde edilen karışımların türbülanslı yanması sonunda azot oksitlerin emisyonlarındaki değişimler farklı şartlar altında sayısal olarak incelenmiştir. Simülasyonlar, ön karışimsız yakıt/hava karışımı jet alevleri için gerçekleştirilmiştir. Adyabatik olmayan alev sıcaklıkları ve emisyonlar ANSYS programı kullanılarak hesaplanmıştır. Alev sıcaklıkları ve yakıcı çıkışında azot oksitlerin salımlarının, hidrojen/karbon monoksit-metan karışımı içindeki metan miktarının artması ile azaldığı saptanmıştır. %50 metan eki, azot oksitlerin salımını %58.9 düşürmektedir. Artan basıncın azot oksitlerin emisyonlarını artırdığı ve bu artışın metan oranının yükselmesi ile azaldığı belirlenmiştir. Azot oksitler, 7 bar basınçta %202.8 yükselmektedir. Tüm yakıt karışımları için, hem giriş havası hem de yakıcı duvar sıcaklıklarındaki artış alev sıcaklığını ve azot oksitlerin üretimini artırdığı tespit edilmiştir. Giriş sıcaklığının 100 K yükseltilmesi azot oksitlerin salımını %14.4 artırmaktadır. Yakma havası içindeki nem oranının artmasının azot oksitlerin oluşumunu düşürdüğü ve yakma havası içinde karbon dioksit seyreltmesinin azot oksitlerin salımlarını azalttığı belirlenmiştir. Karbon dioksit seyreltmesinde %5 artış, azot oksitlerin salımını %63 düşürmektedir.

Anahtar kelimeler: Azot oksitler, Ön karışimsız, Sentez gazı, Türbülans, Yanma

Abstract

In the presented study, changes in nitrogen oxides emissions at the end of turbulent combustion of mixtures obtained by methane addition at several ratios to synthesis gas produced by gasification of biomass are numerically investigated under different conditions. Simulations are performed for non-premixed fuel/air mixture jet flames. Temperatures and emissions of non-adiabatic flames are calculated using ANSYS program. It is determined that flame temperatures and nitrogen oxides emissions at the outlet of the combustor decrease with increase of methane amount in hydrogen/carbon dioxide-methane mixture. 50% addition of methane reduces nitrogen oxides emissions 58.9%. It is specified that raising pressure increases nitrogen oxides emissions and this increment is reduced by ascending of methane ratio. Nitrogen oxides rises 202.8% at 7 bar pressure. It is detected that increment at temperatures of both inlet air and the wall of the combustor enhances flame temperature and nitrogen oxides production for all the fuel mixtures. Increase of 100 K at inlet temperature raises nitrogen oxides emission 14.4%. It is designated that increase of humidity ratio in burning air reduces nitrogen oxides formation and carbon dioxide dilution in the burning air decreases nitrogen oxides emissions. 5% increase at carbon dioxide dilution decreases nitrogen oxides emission 63%.

Keywords: Combustion, Nitrogen oxides, Non-premixed, Synthesis gas, Turbulence

*Suat ÖZTÜRK; suatozturk@beun.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Taşıma, ısınma ve enerji üretimi için fosil kökenli yakıtların artan nüfus ile birlikte aşırı tüketimi sonucunda oluşan zararlı emisyonlar önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır. Yıllar içinde azalan fosil yakıt kaynakları ve mevcut kaynaklardan yakıtın çıkarılma zorlukları ile artan maliyetler ülke ekonomilerine ciddi yükler getirmektedir. Daha az zararlı emisyon yayan verimli yakıcıların geliştirilmesi de mevcut sorunu bir noktaya kadar iyileştirebilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, üretimi ve yanma sonu ürünleri dikkate alındığında, sentez gazı gibi çevre dostu, temiz ve yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımı öne çıkmaktadır.

Kömür, atık lastik, odun, küspe vb. biyokütlelerin gazlaştırılması ile üretilen sentez gazı H₂ (hidrojen), CO (karbon monoksit), CH₄ (metan), CO₂ (karbon dioksit), N₂ (azot) ve H₂O (su) bileşenlerinden meydana gelebilmektedir. Basınç salımlı absorpsiyon, amin yıkama ve membran reaktörler kullanılarak yapılan pürifikasyon sonucu farklı oranlarda H₂/CO veya H₂/CO/CH₄ bileşenli olarak elde edilebilmektedir (Cheng vd., 2011). Sentez gazı, tek başına veya yüksek CH₄ içerikli doğal gaz ile belli oranlarda karıştırılarak kurulu mevcut sistemler içerisinde yakılıp enerji üretiminde kullanılabilir. Ayrıca, diğer gaz yakıtlarda olduğu gibi hava ile ön karışimsız, ön karışimli veya kısmi ön karışimli olarak yakılabilir.

Gelecek vaat eden yakıtlardan biri olarak görülen sentez gazın ve diğer gazlar ile karışımlarının hava ile yakılması işlemi, yanma karakteristikleri ve yanma sonu ürünlerinin belirlenmesi açısından çalışılması gereken önemli bir konu olarak durmaktadır. Yanma sonu ürünleri bakımından incelendiğinde, sentez gazın asıl kirleticisinin diğer gazlarda olduğu gibi NO_x (azot oksitler) ve CO olduğu gözükmektedir (Othman vd., 2016). Sentez gaza metan ikamesinin tam yanma elde etmek için yararlı olduğu ve maksimum yanma sıcaklığını düşürdüğü görülmüştür (Barbato vd., 2013). Ancak, H₂/CO karışımına CH₄ ilavesi yanma hızını düşürmektedir (Morovatiyan vd., 2019). Diğer taraftan, H₂/CO/CH₄ gaz karışımının yanması sonucunda NO oluşumu, NNH (amin amonyak) ve N₂O (azot protoksit) ara NO (azot monoksit) oluşum yollarına ait reaksiyonları arttırdığından dolayı, karışımdaki artan hidrojen yüzdesi ile arttığı belirtilmiştir (Park vd., 2017; Guo vd., 2005). Ancak, artan CH₄ oranının, H₂/CO/CH₄ karışımlarının reaktivitesini azalttığı, ateşleme gecikme süresini arttırdığı bildirilmiştir (Murokami vd., 2021). Diğer taraftan, CH₄/H₂ karışımında H₂ oranındaki artış, hem yanma sıcaklığını hem de NO kütle oranını artırmakta; CO, CO₂ oranlarını ve is oluşumunu ise azalttığı ifade edilmiştir (Tabet vd., 2009; Ziani vd., 2013; Chouaieb vd., 2016; Wu vd., 2008). Öte yandan, artan giriş havası sıcaklığı ve basıncın NO üretimini artırdığı; CO₂ seyreltmesinin artması ise NO_x emisyonlarını düşürdüğü bildirilmiştir (Williams vd., 2007; Chun vd., 2011; Samiran vd., 2016). Ayrıca, sentez gazı yanmasında artan CO₂ seyreltmesi artan momentumdan dolayı alevin uzunluğunu, sıcaklığını ve reaksiyon hızlarını azaltmaktadır (Liu vd., 2021; Tran vd., 2019). H₂/CO/CH₄ karışımında yükselen CH₄ içeriğinin, ateşleme gecikme süresini arttırdığı, alev ve yanma hızını azalttığı ve düşük basınçta CH₄ daha hızlı tüketildiği tespit edilmiştir (Stylianidis vd., 2019; Hwang vd., 2013).

Bu çalışmada, ön karışimsız adyabatik olmayan türbülanslı yanma şartlarında, değişen basınç, giriş sıcaklığı, duvar sıcaklığı, hava nem oranı ve CO₂ seyreltme oranları için, H₂/CO ve CH₄ gaz karışımlarının hava ile ön karışimsız yakılması sonucu oluşan NO_x emisyonlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

2. Matematiksel formüller

2. Mathematical formulas

Bu çalışmada kullanılan ANSYS Fluent programı, akış, enerji ve kütle denklemlerini kullanarak, program içinde seçilmiş türbülans, radyasyon, NO_x vb. farklı modeller ile iki veya üç boyutlu bir geometri üzerinden yanma olayının sayısal olarak çözümünü gerçekleştirebilmektedir.

2.1. Kütle korunumu

2.1. Mass conservation

Silindirik koordinatlar için süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v) + \frac{\rho v}{r} = 0 \quad (1)$$

Süreklilik denkleminde; karışımın özgül kütlesi ρ , zaman ortalama hızları u , v ve eksenel ve radyal koordinatları x , r sembolleri ile verilmiştir (Mohammadi, 2018).

2.2. Momentumun korunumu

2.2. Conservation of momentum

Eksenel ve radyal akış denklemleri;

$$u \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + v \frac{\partial}{\partial r} (\rho u) = -\frac{\partial p^*}{\partial x} + \nabla \cdot ((\mu + \mu_t) \nabla u) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial}{\partial x} (\rho v) + v \frac{\partial}{\partial r} (\rho v) = -\frac{\partial p^*}{\partial r} + \nabla \cdot ((\mu + \mu_t) \nabla v) + \frac{\partial}{\partial x} \left(r \mu_t \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_t \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{(\mu + \mu_t)v}{r^2} + \frac{\rho \omega^2}{r} \quad (3)$$

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$p^* = p - \left(\frac{2}{3} \right) k \quad (5)$$

Korunum denklemlerinde; karışımın dinamik ve türbülanslı viskozitesi μ ve μ_t , zaman ortalamalı ve modifiye edilmiş basınçlar p ve p^* , türbülans model için deneysel sabit, kinetik enerji ve yitimi c_μ , k ve ε sembolleri ile verilmiştir (Canlı vd., 2020).

2.3. k- ω türbülanslı model

2.3. k- ω turbulence model

k- ω türbülans denklemleri;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (7)$$

Türbülanslı model denklemlerinde; türbülanslı kinetik enerji k , özgül yitim oranı ω , kinetik enerji ve yitim oranının üretimi G_k ve G_ω , efektif yayılımları Γ_k ve Γ_ω , yitimleri Y_k ve Y_ω ve kullanıcı tanımlı kaynak terimleri S_k ve S_ω sembolleri ile tanımlanmıştır (Peng vd., 1996).

2.4. Enerjinin korunumu

2.4. Energy conservation

Enerjinin korunumu denklemi;

$$u \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) + v \frac{\partial}{\partial r} (\rho h) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{K}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + S_{rad} + S_{rea} \quad (8)$$

$$c_p = \sum_x f_x c_{p,x} \quad (9)$$

$$S_{rea} = \sum_x \left(\frac{h_x^o}{MM_x} + \int_{T_{ref,x}}^T c_{p,x} dT \right) R_x \quad (10)$$

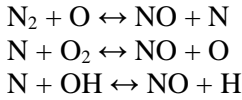
$$S_{rad} = \frac{1}{A_k} \left(\sum_{\gamma=1}^{\Gamma} g_{\gamma} s_k \sigma T_{\gamma}^4 + \sum_{j=1}^j s_j s_k q_{o,j} \right) - q_{o,k} \quad (11)$$

Enerji denklemlerinde; ortalama entalpi h , özgül ısı $c_{p,x}$, kimyasal elemanın özgül kütlesi ve ortalama kütle kesiti $c_{p,x}$ ve f_x , türbülanslı Prandtl sayısı Pr_t , karışımın ısı iletimi K , kimyasal reaksiyonlar ve radyatif transfer kaynaklı ısı enerjinin kaynakları S_{rea} ve S_{rad} , yüzey alanı A_k , Stefan-Boltzman sabiti σ , ve ısı akı alanları g_{γ} , s_j ve s_k sembolleri ile verilmiştir (Effiong vd., 2015).

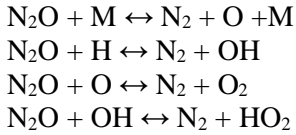
3. NO_x oluşum mekanizmaları

3. NO_x formation mechanisms

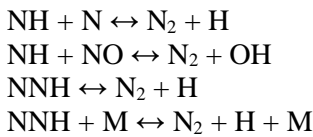
Azot monoksit (NO) ve nispeten daha düşük miktarda azot dioksitten (NO₂) meydana geldiğinden dolayı, azot oksitler (NO_x) çoğunlukla NO için kullanılmaktadır. NO ozona verdiği zararlarla birlikte asit yağmurlarına; canlılarda toksik etkilere neden olan NO₂ ise atmosferde zararlı sislere yol açmaktadır. Yanma süresince NO oluşumu ısı, anlık ve yakıt kaynaklı olabilmektedir. Isıl NO, Zeldovich (1946) tarafından tanımlanmış,



reaksiyonlarını içeren, 1300 santigrat üzerinde ortaya çıkan ve daha çok yakma havası içindeki azot kaynaklı NO oluşum mekanizmasıdır. Anlık NO, yakıtça zengin şartlarda CH radikalleri ve N₂ bileşenlerinin reaksiyonları ile oluşmaktadır. Yakıt NO ise yakıttaki azot ve azot bileşenlerinin oksidasyonu olarak tanımlanmaktadır (Asgari & Padak, 2018). Ayrıca NO, N₂O ve NNH ara yolları ile de oluşabilir. N₂O ara yolu,



vb. reaksiyonlar ile oluşan N₂O'nun NO'ya dönüşmesidir. NNH ara yolu ise; N₂ ile H, OH, H₂ gibi hidrokarbonsuz radikallerin,



vb. reaksiyonlarından oluşmaktadır (Guo vd., 2005).

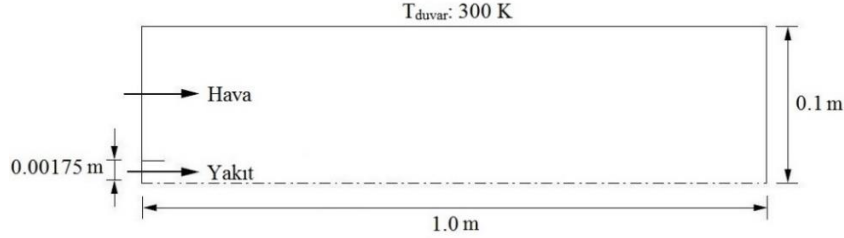
4. Materyal ve metot

4. Material and method

Isı ve kütle transferi, akışkan akışı ve kimyasal reaksiyonları içeren endüstriyel olan veya olmayan olayların ayrıntılı incelenmesi ve analizinde; modelin kurulum maliyetleri, olayların geçtiği alanın bazen çok küçük olması ve kısa zamanda vuku bulması gibi olumsuz nedenlerden dolayı, hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) yazılımları çokça kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, yakıt karışımlarının hava ile yanması sonucu ortaya çıkan zararlı emisyonların ve sıcaklıkların sayısal hesaplamaları için ANSYS analiz sisteminin Fluent CFD kodları kullanılmıştır. Fluent, incelenecek bir olaya ait problemin çözümünde, olayı tanımlayan matematiksel modeli içeren denklemleri, olayın geçtiği ağ (mesh) edilmiş bir geometri üzerinde tanımlanmış sınır şartları altında çözer ve analiz eder.

H₂/CO-CH₄ yakıtlarının farklı oranlarda karışımlarının hava ile yanmasına ait sayısal denklemlerin basitleştirilmesi ve hızlı çözümleri için iki boyutlu bir geometri kullanılmıştır. ANSYS programının simetri özelliği kullanılarak iki boyutlu geometrinin yarısı modellenmiştir. Çözümler sırasında süreklilik, hız, enerji, yitim ve diğer bileşenlerin aşırı dalgalanmalarına neden olmasından dolayı, k-ε modeli yerine k-ω türbülans modeli tercih edilmiştir. Analizler için radyasyon modeli P1 olarak seçilmiştir. Yakıcının ebatları Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Yakıcının boyutları
Figure 1. Dimensions of combustor

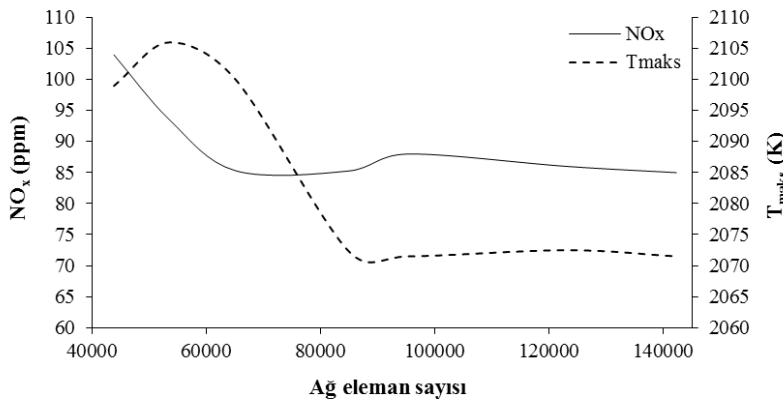
%75 H₂ ve %25 CO içeren sentez gazı yakıtının hava ile yanması için yapılmış olan deneysel çalışmanın (Hwang vd., 2013) verileri duyarlılık analizi ve doğrulama işlemi için kullanılmıştır. Deneyde kullanılan yakıcının ebatları 20x20x80 cm ve yakıcı nozul çapı ise 0.35 cm’dir. NO_x sensörü yakıcı çıkışından yaklaşık olarak 20 cm uzaklıkta egzoz borusu üzerine yerleştirildiği düşünüldüğünden dolayı, simülasyonlar için yakıcı uzunluğu 20 cm daha uzatılarak 100 cm yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında, yakıt/hava giriş ve duvar sıcaklıkları 300 K, basınç 1 bar, eşitlik oranı 0.5 ve yakma havasının nem oranı %1 olarak alınmıştır. H₂/CO sentez gazı ile CH₄ gazının farklı oranlarda karıştırılmasından elde edilen yakıtların özellikleri ve diğer parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. H₂/CO sentez gazı ve karışım yakıtların özellikleri (300 K, 1 bar)

Table 1. Properties of H₂/CO syngas and mixture fuels (300 K, 1 bar)

Parametreler	H ₂ /CO-CH ₄ (% hacimsel)					
	75/25-0	67.5/22.5-10	60/20-20	52.5/17.5-30	45/15-40	37.5/12.5-50
ρ_f (kg/m ³)	0.346	0.376	0.407	0.438	0.468	0.499
μ_f (μPa.s)	15.3	14.6	14.1	13.7	13.3	12.9
f_{st}	8.064	9.629	10.959	12.102	13.096	13.968
\dot{m}_f (kg/s)	0.00021	0.000201	0.000194	0.000188	0.000182	0.000178

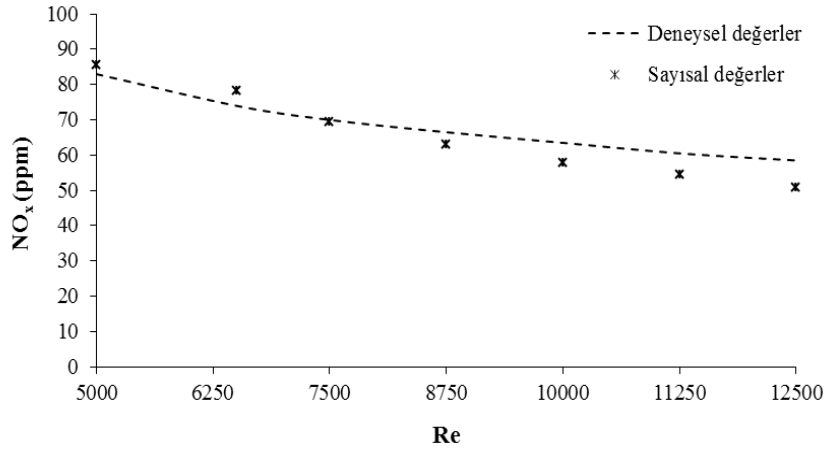
Sayısal analiz esnasında, çözümün tam gerçekleşmediği durumlar için; süreklilik, hız, enerji vb. bileşenlerin farkları 1.10⁻⁶ değerine ulaştığı anda ki NO_x değerleri sunulmuştur. Sayısal çözümlerde kullanılacak ağ eleman sayısını belirlemek için yapılmış olan duyarlılık analizi Şekil 2’de verilmiştir (Ozturk, 2021). Analiz sonucunda hızlı çözüm için, 86320 nod ve 84922 eleman içeren kuadrilateral dominant metot kullanılmaya karar verilmiştir. Duvar, hava ve yakıt giriş kenarları sırasıyla 1300, 120 ve 50 bölüme ayrılmıştır.



Şekil 2. Duyarlılık analizi için ağ eleman sayısı ile NO_x and T_{maks} değişimleri

Figure 2. NO_x and T_{maks} variations with mesh element number for sensitivity analysis

%75H₂/%25CO sentez gazının hava ile yanması için Fluent ile yapılan nümerik hesaplamaların sonuçlarının doğrulaması Şekil 3'te (Oztürk, 2021) sunulmuştur. 11000'den daha yüksek Reynolds sayıları dışında, deneysel ve sayısal değerlerin iyi bir uyum içinde oldukları görülmüştür. Reynolds sayısı 11250 ve 12500'de iken, deneysel ve sayısal değerler arasındaki yüzdesel farklar %10.4 ve %13.6 olarak belirlenmiştir.



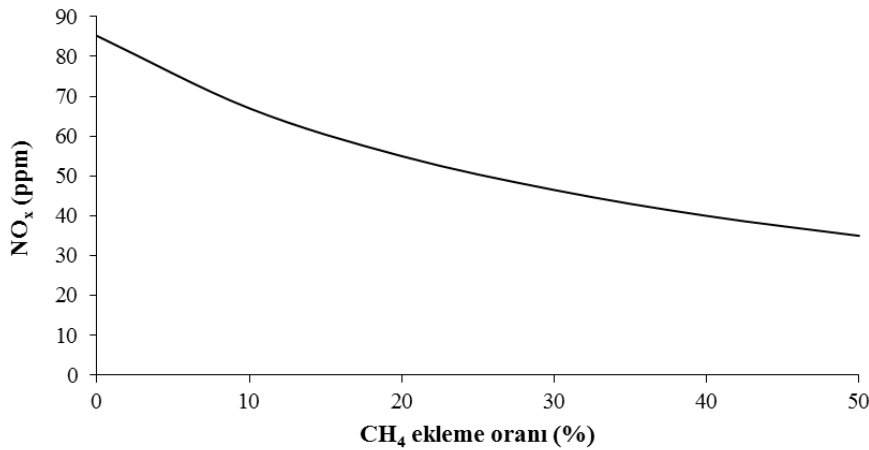
Şekil 3. Doğrulama için Re sayısı ile NO_x değişimlerinin karşılaştırılması
Figure 3. Comparison of NO_x variations with Re number for validation

Bu çalışmada, yanma sonu NO_x emisyonları için bundan sonra yapılmış hesaplamalar, Reynolds sayısı 5000 için %75H₂/%25CO sentez gazının farklı oranlarda CH₄ gazı ile karıştırılmasından elde edilen yakıtlar için gerçekleştirilmiştir.

5. Bulgular ve tartışma

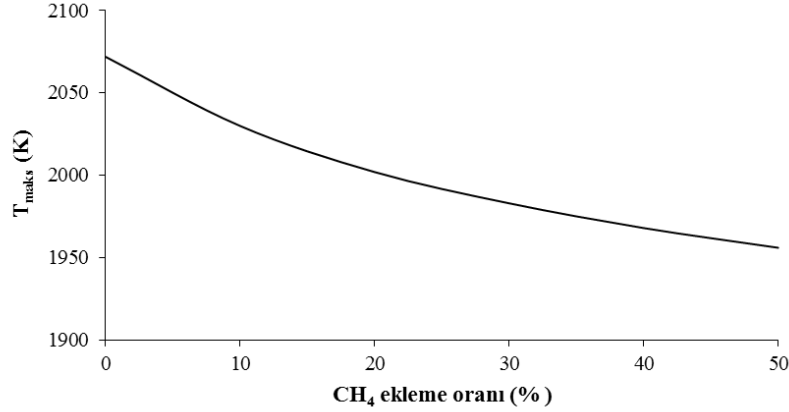
5. Results and discussions

Metan gazının sentez gazı ile farklı oranlarda karıştırılmasının, yanma sonu NO_x emisyonu üzerine etkileri Şekil 4'te verilmiştir. Karışım içinde CH₄ gazının ekleme oranı arttıkça NO_x emisyonları düşmektedir. Bunun temel nedeni, metanın ısı değeri hidrojeninkinden daha düşük olduğundan dolayı, yakıtın metan içeriği yükseldikçe reaksiyon sıcaklığının ve buna bağlı olarak ısı NO_x oluşumunun azalmasıdır. CH₄ artışı karışımın reaktivitesini de düşürmektedir (Murakami vd., 2021). Ayrıca, CH₄ ve H₂ gaz yakıt karışımlarında H₂ içeriğinin yükselmesi ile ısı ve anlık NO_x oluşumlarının yanında N₂O ve NNH ara yolları ile NO_x oluşumları da arttığından dolayı; yakıtta H₂ oranının düşerek CH₄ oranının artması, NO_x oluşumlarının düşmesi için bir diğer neden olarak görülmektedir (Guo vd., 2005; Ziani vd., 2013). Karışım içinde metan oranı %50'ye çıkarıldığında, NO_x salımı %58.9 azalmaktadır.



Şekil 4. CH₄ ekleme oranına göre NO_x değişimleri
Figure 4. NO_x variations with respect to CH₄ addition ratio

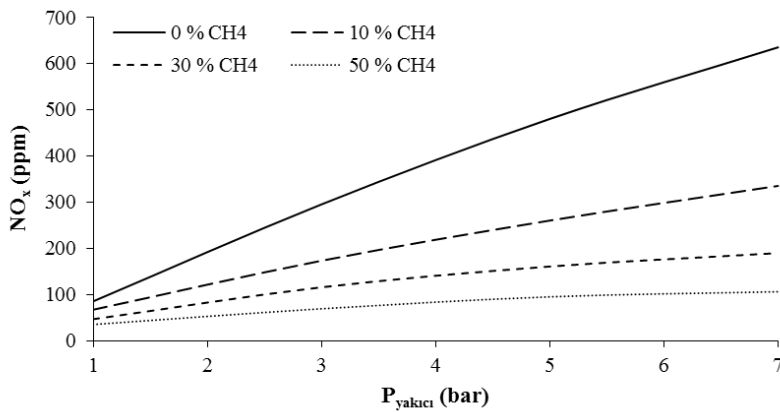
Maksimum alev sıcaklığı ile sentez gazı metan ekleme oranı arasındaki ilişki Şekil 5'te sunulmuştur. Karışımda H₂ oranının artışı ile sıcaklık yükselmesi ve NO_x artışı arasında pozitif bir ilişki bulunmaktadır (Wu vd., 2008). Yükselen sıcaklık ısılı NO_x oluşum mekanizmasındaki sıcaklık bağımlı reaksiyonların da artışına sebep olmaktadır. CH₄ artışı ise, maksimum alev sıcaklığının düşmesi ile yakıcı iç ve çıkış sıcaklıklarının da azalmasına sebep olmaktadır. Bu durumun, metanın ısılı değerinin hidrojene göre daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Metan ekleme oranı %50 iken, alev sıcaklığı metansız sentez gazı yanmasına göre %5.6 düşmektedir.



Şekil 5. CH₄ ekleme oranına göre maksimum alev sıcaklığındaki değişimler

Figure 5. Variations in maximum flame temperature with respect to CH₄ addition ratio

Şekil 6, farklı CH₄ oranları ile karıştırılan sentez gazın yanması sonucu oluşan NO_x miktarlarının basınçla değişimini göstermektedir. Basınç artışı, yakıt ve hava gazlarının üzerindeki sıkıştırma etkisi ile kütlelesel yoğunluklarını yükselterek reaksiyon sıcaklığını ve NO_x miktarını artırmaktadır. Sentez gazı yakıtlarda NO_x oluşumundaki doğrusal olmayan bu artış, NO'dan NO₂, O₂, N₂ vb. bileşenlere dönüşüme yol açan H + NO + M ↔ HNO + M gibi yüksek basınçta daha baskın olan reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır (Chun vd., 2011; Asgari & Padak, 2018). 7 bar basınç için, karışım içinde metan oranı %50 olduğunda metansız sentez gazı yanmasına göre NO_x %83.3 azalmakta ve 1 ile 7 bar basınç arasında NO_x %202.8 artış göstermektedir. Yakıt içinde CH₄ miktarının artması ile NO_x oluşum hızındaki artışın daha fazla azalmasının nedeni, CH₄ ve türevi alt bileşenlerinin katıldığı NO tüketen basınç bağımlı reaksiyonların sayısının daha da artması ile olduğu düşünülmektedir.

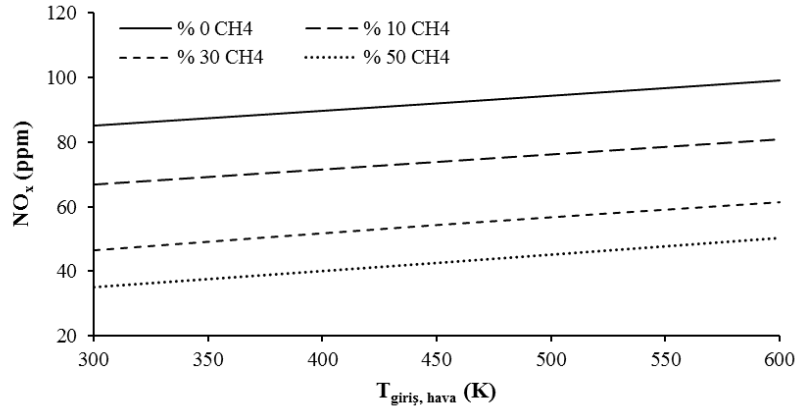


Şekil 6. Yakıcı basıncına göre NO_x değişimleri

Figure 6. NO_x variations with respect to pressure of combustor

Yanma havası giriş sıcaklığındaki artışın NO_x oluşumunu yükselttiği Şekil 7'de gösterilmiştir. Artan sıcaklık, hava ile yakıt gazların daha hızlı karışmasına, hızlı ateşlenmesine ve daha iyi yanmasına sebep olduğundan yanma odasının sıcaklığını arttırmakta ve artan sıcaklıklarla Zeldovich tarafından tanımlanan ısılı NO_x oluşum reaksiyonlarını da yükseltmektedir. Hava giriş sıcaklığındaki her 100 K'lik artış, NO_x salımını %14.4

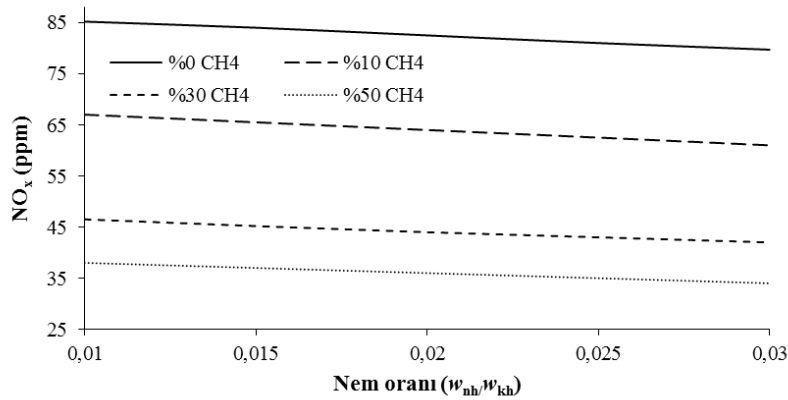
artırmaktadır. Aslında, giriş sıcaklığının yükseltilmesi ile hem reaksiyon sıcaklıklarını hem de sistemin verimliliğinin artırılması istenilen bir durum olmakla birlikte, çevreye salınan zararlı emisyonların yükselmesi ve bunları önleyici ekipmanların kurulum ve işletim maliyetleri açısından bir fayda-zarar noktası var olduğu bilinmektedir. Hava giriş sıcaklığının artması ile yakıcı çıkışında NO_x oluşumunun doğrusal artış oranının, tüm yakıt karışımları için yaklaşık aynı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Yakma havası giriş sıcaklığına göre NO_x değişimleri

Figure 7. NO_x variations with respect to inlet temperature of burning air

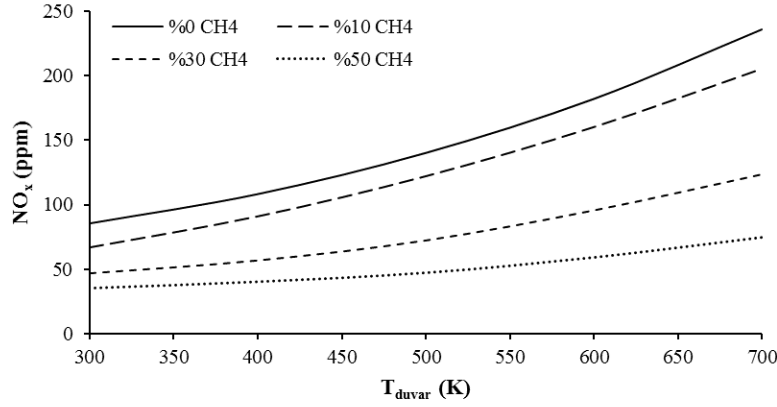
Yakma havası nem oranında ki artışın NO_x üzerine etkisi Şekil 8’de verilmiştir. Nem oranındaki artışın yakıcı çıkışındaki NO_x emisyonlarını tüm gaz yakıt karışımları için düşürdüğü belirlenmiştir. Bu azalışın sebebi, nemin hem ısı tutma kapasitesinin yüksek olması hem de alevi çevreleyip sararak hava içindeki oksijenin alev alanına ulaşmasını engellemesi ile reaksiyon sıcaklığını düşürmesi olarak açıklanabilir. Yakma havası nem oranı 0.01’den 0.03’e çıkartıldığında NO_x %8.9 azalmaktadır. Tüm yakıtlar için, nem oranındaki artış ile NO_x oluşumun azalma oranı benzer çıktığı şekilden görülmektedir.



Şekil 8. Yakma havası içinde nem oranına göre NO_x değişimleri

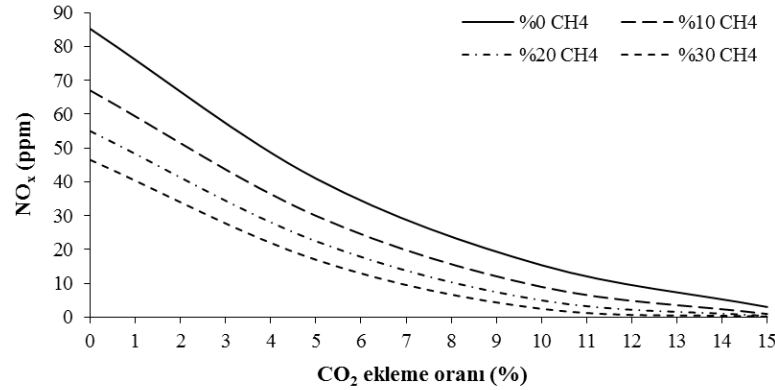
Figure 8. NO_x variations with respect to humidity ratio of burning air

Şekil 9, yakıcı duvar sıcaklığındaki artışın yanma sonu yakıcı çıkışı NO_x oluşumunu da arttırdığını göstermektedir. Artan duvar sıcaklığı, yanma ortamından yakıcı duvarlarına ısı transferinin azalmasına sebep olmaktadır. Azalan ısı transferi de reaksiyon sıcaklığının ve ona bağlı olarak NO_x emisyonunun yükselmesine yol açmaktadır. %50’lik metan karışımı için, duvar sıcaklığı 300 K’den 700 K’ne artırıldığında, NO_x salımının da %113 artışı göstermektedir. NO_x oluşumundaki eksponansiyel artış, sıcaklık bağımlı ısı NO_x oluşum reaksiyonlarının daha baskın hale gelmesi ile açıklanabilir. Şekilden görüldüğü gibi, NO_x artış hızı, CH_4 ekleme oranındaki artış ile azalmaktadır.



Şekil 9. Yakıcının duvar sıcaklığına göre NO_x değişimleri
Figure 9. NO_x variations with respect to wall temperature of combustor

Yanma sonu NO_x miktarını azaltmak için, CO₂, H₂O ve N₂ ile seyreltme işlemi, hem yakıtta hem de yakma havası içinde uygulanabilmektedir. Yanıcı olmayan CO₂ gazının yakma havasına eklenmesi ile yakıcı çıkışı NO_x emisyonunun da ki değişimler Şekil 10'da verilmiştir. CO₂ seyreltmesi, alev sıcaklığını düşürücü etki ile NO_x oluşumlarını azalttığı şekilden görülmektedir. CO₂ seyreltmesi %5'te iken, yanma sonu NO_x salımları yaklaşık olarak %63 düşmektedir. Asal bir gaz olarak CO₂, kimyasal ve radyasyon etkileriyle, hem reaksiyonlara giren bileşenlerin konsantrasyonunu hem de reaksiyon hızlarını azaltarak reaksiyon sıcaklığını düşürmektedir (Shih & Hsu, 2013). Böylece, artan CO₂ oranı ile NO_x emisyonunun azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 10. Yakma havasında CO₂ seyreltme oranına göre NO_x değişimleri
Figure 10. NO_x variations with respect to ratio of CO₂ dilution in burning air

6. Sonuçlar

6. Conclusions

Bu çalışmada, sentez gazı ve metan gazının farklı oranlarda karışımından elde edilen yakıtların hava ile türbülanslı ön karışimsız yakılmasından ortaya çıkan NO_x emisyonları sayısal olarak incelenmiş ve yanma sonu NO_x miktarları; değişen basınç, yakma havası giriş sıcaklığı, nem oranı, yakıcı duvar sıcaklığı ve karbon dioksit seyreltme oranları için iki boyutlu bir yakıcı modeli kullanılarak ANSYS programı ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Sabit bir Reynolds sayısı ve eşitlik oranında, sentez gazı-metan karışımı ile oluşturulan yakıtın içinde artan metan oranı, hem alev sıcaklığı hem de NO_x oluşumunun azalmasına sebep olmaktadır. Karışım içinde metan oranı %50'ye çıkarıldığında, alev sıcaklığı %5.6, NO_x ise %58.9 azalmaktadır.
- Yükselen basınç, reaksiyon sıcaklıkları ve NO_x miktarını yükseltmekte ve artan metan oranı ile basıncın neden olduğu NO_x artış hızı düşmektedir. 7 bar basınçta, karışım içinde metan oranı %50 olduğunda metansız sentez gaza göre NO_x %83.3 azalmakta ve basınç 1 bar'dan 7 bar'a yükselttiğinde NO_x %202.8 artış göstermektedir.

- Yakma havası giriş sıcaklığının yükselmesi NO_x oluşumunu artırmaktadır. Giriş sıcaklığında 100 K'lik artış, NO_x salımını %14.4 artırmaktadır.
- Yakma havasının nem oranının yükselmesi ise NO_x emisyonlarını düşürmektedir. Nem oranı 0.01'den 0.03'e artırıldığında NO_x %8.9 azalmaktadır.
- Yakıcı duvar sıcaklığındaki artış NO_x miktarının artan oranda yükselmesine neden olmakta ve %50 metan ekinde duvar sıcaklığı 300 K'den 700 K'ne yükseltildiğinde %113 NO_x artışı gözlemlenmektedir. Yakıt içinde CH_4 oranının artması ise, NO_x oluşumunun artış hızını düşürmektedir.
- Yakma havası taraflı CO_2 seyreltme oranındaki artış, tüm yakıt karışımları için, reaksiyon sıcaklıklarını düşürerek yanma sonu NO_x emisyonunu azaltıcı etki göstermekte ve %5'lik CO_2 seyreltmesi NO_x salımlarını yaklaşık olarak %63 düşürmektedir.

Diğer gaz yakıtlarda olduğu gibi, sentez gazı ve karışımlarının hava ile yakılması sonucu oluşan zararlı azot oksitlerin çevreye salınım miktarları; ısınma, taşıma ve elektrik üretme için kullanılan mevcut gaz yakıtlı sistemlerde bulunan egzoz gazı resirkülasyonu (EGR), sıvı duşu, nemli yakma havası, seyrelticilerin kullanımı, su enjeksiyonu, sıkıştırılmış hava, katalitik redaksiyon vb. metotlar ile düşürülebilmektedir.

Yazar katkısı

Author contribution

Çalışmada bir başka yazarın katkısı yoktur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Semboller

Symbols

A_k	: Yüzey alanı (m^2)	T_{maks}	: Maksimum sıcaklık (K)
CFD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği	Y	: Efektif yitimler
CH_4	: Metan	Γ	: Efektif yayılımlar
CO	: Karbon monoksit	c_p	: Özgül ısı (J/kgK)
CO_2	: Karbon dioksit	g	: Isı akısı (J/s)
G_k	: Enerji üretim oranı üretimi	h	: Entalpi (kJ/kg)
G_ω	: Enerji yitim oranı üretimi	f	: Ortalama kütle kesiti
H_2	: Hidrojen	f_{st}	: Karışım oranı
H_2O	: Su	k	: Kinetik enerji (J)
K	: Kelvin	\dot{m}_f	: Kütleli debi (kg/s)
N_2	: Azot	ppm	: Milyonda bir birim
NO	: Azot monoksit	r	: Radyal koordinat
NO_x	: Nitrojen oksitler	w_{kh}	: Kuru hava nem oranı
N_2O	: Azot protoksit	w_{nh}	: Nemli hava nem oranı
O_2	: Oksijen	u, v	: Zaman ortalama hızlar
OH	: Hidroksit	x	: Eksenel koordinat
P	: Basınç (bar)	ρ	: Özgül kütle (kg/m^3)
P_{rt}	: Prandtl sayısı	σ	: Stefan-Boltzman sabiti
Re	: Reynolds sayısı	μ	: Dinamik viskozite (kg/m.s)
S	: Kullanıcı tanımlı kaynak terim	μ_t	: Türbülanslı viskozite (kg/m.s)
$S_{rad,rea}$: Isıl enerjinin kaynakları	ω	: Özgül yitim oranı
T_{duvar}	: Duvar sıcaklığı (K)		

Kaynaklar*References*

- Asgari, N., & Padak, B. (2018). Effect of fuel composition on NO_x formation in high-pressure syngas/air combustion. *AIChE Journal*, 64(8), 3134-3140. <https://doi.org/10.1002/aic.16170>
- Barbato, P. S., Landi, G., & Russo, G. (2013). Catalytic combustion of CH₄-H₂-CO mixtures at pressure up to 10 bar. *Fuel Processing Technology*, 107, 147-154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.08.024>
- Canlı, E., Ateş, A., & Bilir, Ş. (2020). Derivation of dimensionless governing equations for axisymmetric incompressible turbulent flow heat transfer based on standard k-ε model. *AKU J. Sci. Eng.*, 20, 1096-1111. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.821009>
- Cardona, C., Amell, A., & Burbano, H. (2013). Laminar burning velocity of natural gas/syngas-air mixture. *Dyna*, 180, 136-143.
- Cheng, T. S., Chang, Y. C., Chao, Y. C., Chen, G. B., Li, Y. H., & Wu, C. Y. (2011). An experimental and numerical study on characteristics of laminar premixed H₂/CO/CH₄/air flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 13207-13217. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.077>
- Chouaieb, S., Kriaa, W., Mhiri, H., & Bournot, P. (2016). Presumed pdf modeling of microjet assisted CH₄-H₂/Air turbulent flames. *Energy Conversion and Management*, 120, 412-421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.003>
- Chun, K. W., Chung, H. J., Chung, S. H., & Choi, J. H. (2011). A numerical study on extinction and NO_x formation in nonpremixed flames with syngas fuel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(11), 2943-2949. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0810-4>
- Effiong, E. E., Orga, A. C., Ibe, E. C. & Ekeke, I. C. (2015). Model for the transient flow of natural gas through a pipeline in two dimensional cylindrical coordinates-Part I. *International Journal of Current Research*, 7, 11, 22367-22370.
- Guo, H., Smallwood, G. J., Liu, F., Ju, Y., & Gülder, Ö., L. (2005). The effect of hydrogen addition on flammability limit and nox emission in ultra-lean counterflow CH₄/air premixed flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30, 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.177>
- Hwang, J., Sohn, K., Bouvet, N., & Yoon, Y. (2013). NO_x scaling of syngas H₂/CO turbulent non-premixed jet flames. *Combustion Science and Technology*, 185(12), 1715-1734. <https://doi.org/10.1080/00102202.2013.831847>
- Liu, Y., Xue, Q., Zuo, H., Yang, F., Peng, X., & Wang, J. (2021). Effects of CO₂ and N₂ dilution on the combustion characteristics of H₂/CO mixture in a turbulent partially premixed burner. *ACS Omega*, 6, 15651-15662. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00534>
- Mohammadi, M. H. (2018). Numerical Analysis of fluid flow and heat transfer based on the cylindrical coordinate system. *Fluid Mechanics*, 4(1), 1-13. <https://doi.org/10.11648/j.fm.20180401.11>
- Morovatiyan, M., Shahsavan, M., Baghirzade, M., & Mack, J. H. (2019). Effect of hydrogen and carbon monoxide addition to methane on laminar burning velocity. *Proceedings of the ASME 2019 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference (ICEF)* (pp. 20-23), Chicago. <https://doi.org/10.1115/ICEF2019-7169>
- Murakami, Y., Nakamura, H., Tezuka, T., Asai, G., & Maruta, K. (2021). Reactivity of CO/H₂/CH₄/Air mixtures derived from in-cylinder fuel reformation examined by a micro flow reactor with a controlled temperature profile. *Combustion Science and Technology*, 193(2), 266-279. <https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1847096>
- Othman, N. F. & Boosroh, M. H. (2016). Effect of H₂ and CO contents in syngas during combustion using micro gas turbine. *International Conference on Advances in Renewable Energy and Technologies (ICARET)* (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/32/1/012037>
- Ozturk, S. 2021. CFD study for NO_x formation in turbulent jet flames with syngas fuel. *Global Conference on Engineering Research (Globcer)* (pp. 2-5), Bandırma.
- Park, S., & Kim, Y. (2017). Effects of nitrogen dilution on the NO_x formation characteristics of CH₄/CO/H₂ syngas counterflow non-premixed flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 11945-11961. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.080>

- Peng, S. F., Davidson, L., & Holmberg, S. (1996). The two-equation turbulence k-w model applied to recirculating ventilation flows. *Chalmers University of Technology*, 96, 13, 1-25.
- Tabet, F., Sarh, B., & Gökalp, I. (2009). Hydrogen–hydrocarbon turbulent non-premixed flame structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 5040-5047. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.12.083>
- Tran, M. V., Scribano, G., Chong, C. T., Ng, J. H., & Ho, T. X. (2019). Numerical and experimental study of the influence of CO₂ dilution on burning characteristics of syngas/air flame. *Journal of the Energy Institute*, 92, 1379-1387. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.09.004>
- Samiran, N. A., Ng, J. H., Jaafar, M. N. M., Valera-Medina, A., & Chong, C. T. (2016). H₂-rich syngas strategy to reduce NO_x and CO emissions and improve stability limits under premixed swirl combustion mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 19243-19255. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.095>
- Shih, H. Y., & Hsu, J. R. (2013). Dilution effects analysis of opposed-jet H₂/CO syngas diffusion flames. *Combustion Theory and Modelling*, 17(3), 543-562. <http://dx.doi.org/10.1080/13647830.2013.782069>
- Stylianidis, N., Azimov, U., & Birkett, M. (2019). Investigation of the effect of hydrogen and methane on combustion of multicomponent syngas mixtures using a constructed reduced chemical kinetics mechanism. *Energies*, 12(2442), 1-23. <https://doi.org/10.3390/en12122442>
- Williams, T. C., Shaddix, C. R., & Schefer, R. W. (2007). Effect of syngas composition and CO₂-diluted oxygen on performance of a premixed swirl-stabilized combustor. *Combustion Science and Technology*, 180(1), 64-88. <https://doi.org/10.1080/00102200701487061>
- Wu, H., & Zhang, W. (2008). Combustion characteristics of hydrogen-methane hybrid fuels in coflow jet diffusion flames. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air (GT2008)* (pp. 9-13), Berlin.
- Zeldovich, Y. B. (1946). The oxidation of nitrogen in combustion and explosives. *Acta Physicochimica USSR*, 21, 577.
- Ziani, L., Chaker, A., Chetehouna, K., Malek, A., & Mahmaha, B. (2013). Numerical simulations of non-premixed turbulent combustion of CH₄/H₂ mixtures using the pdf approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 8597-8603. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.104>