



Alınma
24 Temmuz 2024
Kabul
17 Ekim 2024

* Sorumlu yazar.
e-mail:
degererdem1031@gmail.com

Anahtar Kelimeler:

- Yanma
- Seyreltici
- Yanma Hızı
- Emisyon

Yanma Deneylerinde Kullanılan Seyrelticilerin Yanma Hızı ve Emisyon Değerleri Üzerindeki Etkisi

Erdem DEĞER^{1*}, Murat TAŞTAN²

¹ Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Gövde-Motor Bakım ABD, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

² Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Günümüzde yükselen sıcaklıklar, buzulların erimesi ve mevsim normallerinin üstünde seyreden sıcaklıklar küresel ısınmanın hayatımıza olan olumsuz etkilerini daha da net olarak göstermektedir. Bu bağlamda alternatif yakıt ve yanma yöntemleri arayışı hız kazanmıştır. Fosil yakıtlar halen enerji ihtiyacımızın büyük bir bölümünü karşılamaktadır. Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji için çalışmalar hız kazansa da fosil yakıtlardan hem zararlı emisyon değerleri düşük olacak hem de enerji çıkışıyla verimi en yüksek seviyeye çıkaracak çözümler aranmaktadır. Bu çalışmada seyreltme yönteminin yanma performansı üzerindeki etkisi literatür çalışması kapsamında araştırılmıştır. Örneklem olarak seçilen seyrelticiler ise N₂, CO₂, Ar ve H₂O olarak belirlenmiştir ve belirlenen seyrelticilere ait çalışmalarda seyreltme sonuçlarının yanma hızına ve emisyon değerlerine olan etkisi görülmektedir. Yapılan çalışmalarda örneklem olarak seçilen seyrelticilerin yanma hızına ve emisyon değerlerine olan etkisi incelendiğinde çıkarılan sonuçta seyrelticilerin yanma hızını azalttığı saptanmıştır. CO ve NO_x değerlerinde ise kullanılan yöntem, eşdeğerlik oranı ve kullanılan yakıt gibi birçok etmenin emisyon değerlerini azalttığı veya çoğalttığı görülmüştür.

Effect of Diluents Used in Combustion Experiments on Burning Rate and Emission Values

Erdem DEĞER^{1*}, Murat TAŞTAN²,

¹ Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Airframes and Powerplants Maintenance, Erciyes University, 38030, Kayseri, Turkey

² Department of Airframes and Powerplants Maintenance, Erciyes University, 38030, Kayseri, Turkey

Received
24 July 2024
Accepted
17 October 2024

* Corresponding author.
e-mail:
degererdem1031@gmail.com

Keywords:

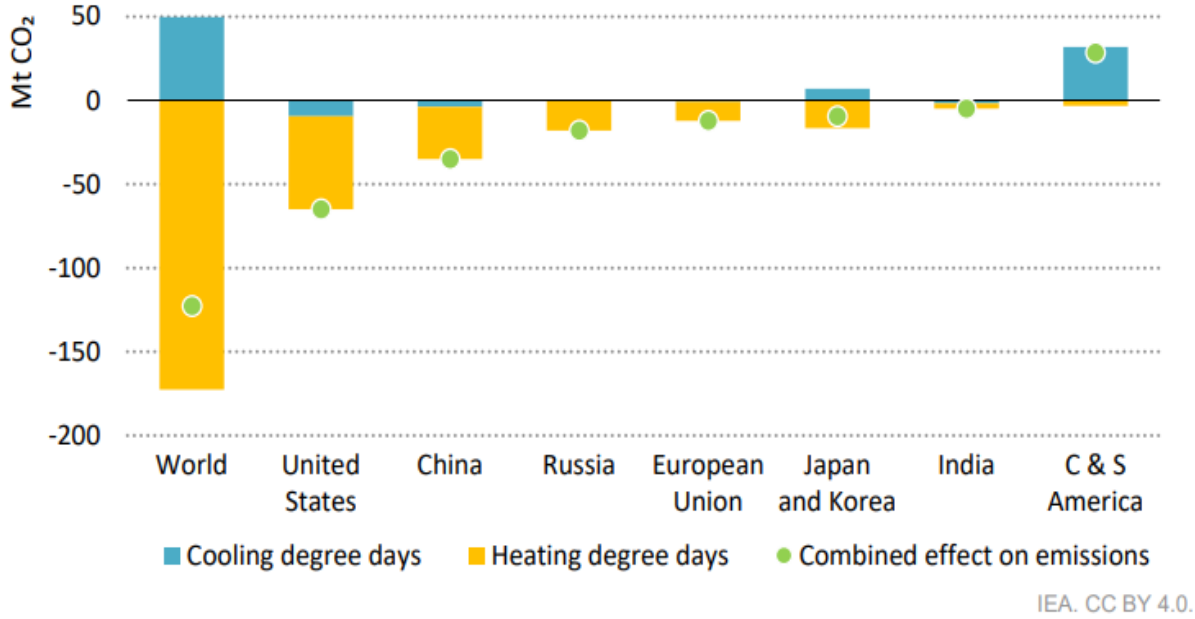
- Combustion
- Diluent
- Burning Velocity
- Emission

ABSTRACT

Climate change causes the ozone layer to thin, the seasons to change, and the world's temperature to increase. Today, rising temperatures, melting glaciers and temperatures above seasonal norms show more clearly the negative effects of global warming on our lives. In this context, the search for alternative fuels and combustion methods has gained momentum. Fossil fuels still meet a large part of our energy needs. Although efforts for renewable and sustainable energy are gaining momentum, solutions are being sought that will both reduce harmful emissions from fossil fuels and maximize energy output and efficiency. In this study, the effect of the dilution method on combustion performance was investigated within the scope of the literature study. The diluents selected as samples were determined as N₂, CO₂, Ar and H₂O, and the effects of the dilution results on the burning rate and emission values are seen in the studies of the determined diluents. When the effects of the diluents selected as samples on the burning rate and emission values were examined in the studies, it was determined that the diluents reduced the burning rate. As for CO and NO_x values, it has been observed that many factors such as the method used, the equivalence ratio and the fuel used reduce or increase the emission values.

1. Giriş (Introduction)

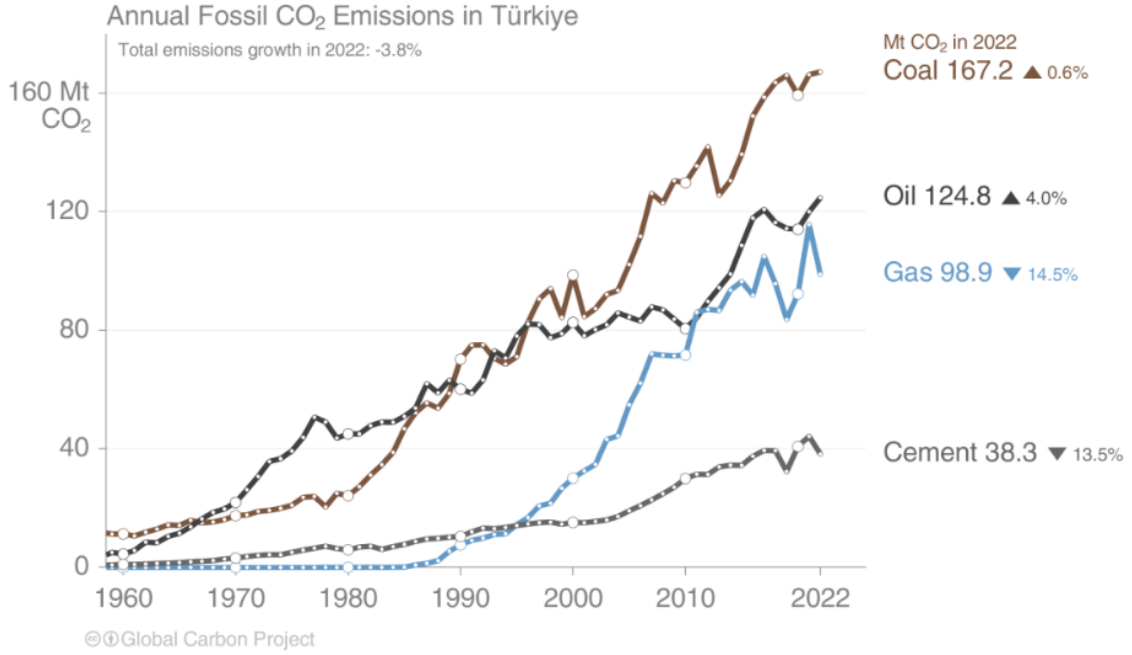
Daha temiz bir çevreye katkıda bulunmak, küresel ısınmaya olumsuz etkileri azaltmak ve yanma işleminin daha verimli hale gelmesi için dünya çapında çalışmalar sürmektedir. Our World in Data (Ritchie & Roser, 2024) yaptığı geniş çaplı enerji tüketim raporunda enerji ihtiyacının büyük kısmının fosil yakıtlardan karşılandığı görülmüştür. Raporda yer alan verilere göre 2023 yılı için enerji tüketiminde Kömür, Doğalgaz ile Petrol' ün başı çektiği görülmüştür. Çalışmaların büyük kısmı devam eden enerji ihtiyacına emisyon değerlerinde daha çevre dostu olacak ve yanmayı daha verimli hale getirecek yöntemler üzerinde yürütülmektedir. İstenilen değerleri karşılamak adına kullanılan yöntemlerden biri olan seyreltme ile geleneksel yanma sırasında ortaya çıkan NO_x ve CO emisyonlarını azaltmak ve aynı zamanda yanmadaki verimliliği korumak amaçlanmaktadır.



Şekil 1: Seçilmiş bölgelerde 2022 ve 2023 yılları arasındaki sıcaklık değişimlerinin CO₂ emisyonlarına etkisi
(The impact of temperature changes on CO₂ emissions between 2022 and 2023 in selected regions)

Küresel ısınma nedeniyle değişen iklim koşulları dünyaya yüksek emisyon olarak geri dönebilmektedir ve etkileri çeşitli raporlar ve araştırmalarla ortaya çıkmaktadır. IEA (International Energy Agency, 2023) yayınladığı raporda 2023 yılının kayıtlara geçen en sıcak yıl olduğunu belirtmiştir. Sıcaklığın artması ile genel soğutma ihtiyacı için harcanan yakıt ve enerjide artışa geçmiştir. 2023 yılı içerisinde soğutma ihtiyacı için emisyon artışı 50 Mt (Milyon Ton) CO₂ değerinde olduğu görülmüştür. Şekil 1’ de Seçilmiş bölgelerde 2022 ve 2023 yılları arasındaki sıcaklık değişimlerinin CO₂ emisyonlarına etkisi gösterilmiştir.

IEA raporlarında ayrıca 2023 yılı 2022 yılı ile karşılaştırıldığında dünya genelinde kış aylarındaki hava koşullarının daha hafif geçtiği belirtilmiştir. Hafif geçen kış ayları ısınma ihtiyacının azalmasına yol açmıştır. Isınma ihtiyacının azalmasıyla beraber 2023 yılında ısınmaya harcanan enerjide düşüş olmuş bu düşüş 170 Mt CO₂ emisyon değerinde olmuştur.



Şekil 2: Türkiye' nin yıllık Fosil yakıt kaynaklı CO₂ emisyonu (Türkiye's annual CO₂ emissions from fossil fuels)

Küresel Karbon Projesi' nin (Global Carbon Project, 2020) hazırladığı 2023 raporundan Yıllık CO₂ Emisyonu grafiği Şekil 2' de gösterilmiştir. Rapora göre fosil yakıtlı CO₂ emisyonlarında tarihi zirve görülmesinin beklendiği görülmektedir. Mevcut emisyon değerlerinin devam etmesi halinde 1,5°C' lik ısınmanın 7 yıl içinde aşılma ihtimalinin %50 olarak görüldüğü belirtilmektedir.

2. Seyreltme yöntemi (Dilution Method)

Seyreltme basit bir şekilde çözelti içerisindeki çözünen konsantrasyonunu çözücü miktarını arttırarak azaltmaktır. Yanma deneylerinde de aynı mantık izlenmektedir. Amaç tepkimeyi seçilen maddelerle seyrelterek sonucunda hem verimli hem de çevre dostu emisyon değerlerine sahip yanma tepkimesi elde etmektir. Yanma da seyreltmenin yanma hızına ve emisyon değerlerine etkisini gösteren çalışmalar literatürde yer almaktadır. Han ve arkadaşları (Han et al., 2015) H₂/CO gazının farklı CO₂ seyreltme oranlarında yanma deneyini gerçekleştirmişler bu deneyleri yüksek sıcaklık ve basınç şartlarında yapmışlar, deneylerde laminer yanma hızında ve Markstein uzunluklarında meydana gelen değişimleri gözlemlemişlerdir. Makalede yanma işlemlerinde uygulanan seyreltme işleminin başlıca yapıldığı seyrelticiler ele alınmış ve araştırmacıların bu çalışmalar ile elde ettiği sonuçlar belirtilmiştir. Seyreltme çalışmalarında en sık görülen seyrelticiler N₂, H₂O, CO₂ ve Ar çalışma kapsamında ele alınmıştır.

3. Seyreltmenin Yanma Hızı ve Emisyon Değerleri Üzerindeki Etkisi (Effect of Dilution on Emission Values)

3.1. Seyreltmenin Yanma Hızı Üzerindeki Etkisi (Effect of Dilution on Burning Rate)

3.1.1. N₂ ile seyreltme (Dilution with N₂)

Chu ve arkadaşları (Chu et al., 2021) ön karışımli Metan-Hava gazını N₂ ile seyreltmiş ve sonucunda laminer yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda ilk başta laminer yanma hızında artış görülse de eşdeğerlik oranının artmasıyla beraber tam tersine laminer yanma hızında düşüş tespit ettiklerini belirtmişlerdir (Chu et al., 2021).

Nair ve arkadaşları (Nair et al., 2016) çalışmalarında LPG-Hava karışımını saf haliyle ve CO₂/N₂ ile seyreltilerek yakmış ve bu yanma deneyleri sonucunda laminer yanma hızının değişimlerini gözlemlemişlerdir. Saf LPG-Hava karışımının yakımı sonucu elde edilen laminer Yanma Hızı değerleri literatürdeki diğer çalışmalarla benzer sonuçlar verdiğini saptamışlardır. Eşdeğerlik oranının 0.8-1.1 değerleri arasında olduğu zaman laminer yanma hızında ani yükseliş görmüşler sonrasında ise eşdeğerlik oranının 1.2-1.3 değerleri arasında olduğu zaman yanma hızında düşüşün gerçekleştiği belirtilmiştir. Seyreltme oranındaki artış ile her iki seyreltme durumunda da (CO₂/N₂) laminer yanma hızında azalma görülmüştür. İki seyreltici karşılaştırıldığında ise CO₂ ile seyreltildiğinde oluşan laminer yanma hızı değeri N₂ ile seyreltilene oranla daha düşük çıktığı görülmüştür (Nair et al., 2016).

Prathap ve arkadaşları (Prathap et al., 2008) Sentez gazının N₂ ile seyreltilmesinin Laminer Yanma hızına olan etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde seyreltme oranlarının %40 ile %60 arasında olmasının yanma hızı için optimum değerleri vereceğini belirlemişlerdir. Özellikle %60 ve üstünde olacak seyreltmelerin kararsızlık ve yanma hızını olumsuz yönde etkileyeceği saptanmıştır. En yüksek yanma hızlarını ise eşdeğerlik oranının 1.4 olduğu deney şartları için %40 ve %50 seyreltme oranlarında, eşdeğerlik oranının 1.2 olduğu şartlarda ise %60 seyreltme oranında tespit etmişlerdir. Sonuç olarak N₂ seyreltmesi arttıkça karışımın ısıl dağılıma ve alev sıcaklığında azalmaya neden olacağı ve sonucunda yanma hızında düşüşe sebebiyet vereceği belirtilmiştir (Prathap et al., 2008).

Paidi ve arkadaşları (Paidi et al., 2013) H₂-Hava karışımının N₂ ve CO₂ ile seyreltilmesi sonucu laminer yanma hızında oluşan değişimleri incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda CO₂ ve N₂ seyrelticilerinin oranı azaldıkça laminer yanma hızının arttığı gözlemlenmiştir. İki seyreltici karşılaştırıldığında CO₂' in yüksek ısı kapasitesinden dolayı N₂ seyrelticisine oranla daha baskın olduğunu belirtmişlerdir (Paidi et al., 2013).

3.1.2. CO₂ ile seyreltme (Dilution with CO₂)

Wei ve arkadaşları (Wei et al., 2018) hidrojen-hava karışımının Ar/ N₂/CO₂ ile seyreltilmesi sonucu yanmaya olan etkileri belirledikleri bir çalışma yapmışlardır. Ayrı ayrı uygulanan seyrelticilerin alevin yayılımını önlemede en etkili olandan en etkisize sırasıyla CO₂, N₂ ve Ar şeklinde olduğunu belirtmişlerdir (Wei et al., 2018).

Prathap ve arkadaşları (Prathap et al., 2012) CO₂ ile seyreltilen H₂-CO Sentez gazının laminer yanma hızına olan etkilerine çalışmalarında yer vermişlerdir. 50%H₂-50%CO oranında belirlenen karışıma öncelikle CO₂ ardından N₂ seyreltici olarak eklenmiştir. Sadece seyrelticiler değiştirilerek yaptıkları etki başka bir etmen olmadan direkt olarak karşılaştırılabilmiştir. Sonuç olarak karışımdaki seyreltici N₂' den CO₂' e geçtiğinde yanma hızında N₂' ye oranla daha büyük bir düşüş gözlemlediklerini belirtmişlerdir (Prathap et al., 2012).

Bir diğer çalışmada Chan ve arkadaşları (Chan et al., 2015) CO₂ seyrelticisini ön karışimli Metan/Hava karışımında kullanarak bu deney sonucunda laminer yanma hızının değişimini gözlemlemişlerdir. Deneylerini atmosferik basınç ve 298 K koşullarında gerçekleştirmişlerdir. Seyreltici karışıma eklendiğinde karışımın spesifik ısısında artış olmuş bu da alev ısısında azalmaya sebebiyet vermiştir, tüm reaksiyonların sonucunda laminer yanma hızında da azalma görüldüğü belirtilmiştir (Chan et al., 2015).

Seyreltmenin laminer yanma hızına etkisi ön karışimli Dimetil Eter-Hava karışımı kullanılarak Chen ve arkadaşları (Zhaoyang Chen et al., 2009) tarafından incelenmiştir. Çalışmalarını oda sıcaklığında ve atmosferik basınç koşullarında gerçekleştiren araştırmacılar seyreltici olarak N₂ ve CO₂ kullanmışlardır. Sonuçlar seyreltme oranı arttıkça laminer yanma hızının ve alev hızının azaldığını göstermektedir. Ancak iki seyrelticiyi karşılaştırdıklarında CO₂' in N₂'ye nazaran yanma hızı ve alev kararsızlığında daha büyük etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır (Zhaoyang Chen et al., 2009).

Burbano ve arkadaşları (Burbano et al., 2011) H₂/CO/Hava karışımlarının N₂ ve CO₂ ile seyreltilmesi sonucu oluşan kararsızlıkları incelemişlerdir. Değişken eşdeğerlik oranlarında ve deniz seviyesine yakın bir seviyede gerçekleştirilen deneye 0.95 atm ve 303 ± 2 K şartlarında devam edilmiştir. Karışımda H₂ bulunmasının termal difüzyon kararsızlığı artıran olumsuz bir etkiye neden olduğu belirtmişlerdir. CO ile karşılaştırıldığında H₂' nin varlığının kararsızlığa olan olumsuz etkisinin daha büyük olduğu görülmektedir. Deney sonucunda ise eşmolar H₂/CO karışımına eklenen N₂ ve CO₂ seyrelticilerinin fakir şartlarda yanma kararsızlığına neden olduğu belirlenmiştir. Kararlı yanmanın ise ancak deneyde yer alan seyrelticilerin %60 gibi yüksek oranlı bir seviyede kullanılması ve deneyin zengin eşdeğerlik oranlarında gerçekleştirilmesi sonucu kararlı yanma gerçekleştirilebilmiştir (Burbano et al., 2011).

3.1.3. Ar ile seyreltme (Dilution with Ar)

Zhang ve arkadaşları (B. Zhang et al., 2015) Dimetil Eter/Hava karışımının Ar ve N₂ ile seyreltilmesi sonucunda yanma hızında oluşan değişimleri incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda her iki seyrelticinin de yanma hızını düşürdüğü sonucuna varsalar da N₂ ile seyreltilen deneyde yanma hızının aniden düşüğe geçtiği belirtilmiştir (B. Zhang et al., 2015).

Hu ve arkadaşları (Hu et al., 2012) Metan/Hava karışımında seyreltmenin laminer yanma hızına olan etkilerini araştırdıkları bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada He, Ar, N₂ ve CO₂ seyreltici olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda karışıma ayrı ayrı uygulanan seyrelticiler laminer yanma hızını azaltmış azalmanın en etkili olandan en etkisiz olana doğru sıralaması CO₂, N₂, Ar ve He şeklinde olmuştur (Hu et al., 2012).

Bir diğerk çalışmada Zhang ve arkadaşları (B. Zhang et al., 2014) Doğal gaz-hava-Ar ve Doğal gaz-hava- N₂ karışımlarını karşılaştırmış ve laminer yanma hızında olan değişimleri incelemişlerdir. Başlangıç basıncının artması ile laminer yanma hızının azaldığını belirtmişlerdir. Azalmanın N₂ ile Ar seyreltmesinde daha hızlı olduğu sonucuna da varmışlardır. Bunun nedeninin seyrelticiler arasındaki yoğunluğun geciktirme etkisinden daha baskın olması ile sonuçlandığını belirtmişlerdir (B. Zhang et al., 2014).

Kishore ve arkadaşları (Ratna Kishore et al., 2009) H₂/O₂ karışımının atmosferik basınç, 300 ± 2K sıcaklık ve çeşitli eşdeğerlik oranlarında CO₂, N₂ ve Ar ile seyreltilmesinin yanma hızına olan etkilerini araştırmışlardır. Tüm seyrelticilerin yanma hızında azalmaya yol açtığı ancak bu hızı azaltmada en etkiliden en etkisize sıralandıklarında CO₂, N₂ ve Ar sıralamasının karşımıza çıktığını belirtmişlerdir (Ratna Kishore et al., 2009).

3.1.4. H₂O ile seyreltme (Dilution with H₂O)

Duan ve Liu (Duan & Liu, 2017) hidrojen/hava karışımının N₂ + H₂O ile seyreltilmesinin laminer yanma karakteristiğinde meydana getirdiği değişiklikleri ele almışlardır. Deneylein sonucu tepkimenin N₂ + H₂O ile seyreltilmesiyle alev yayılma hızı ve laminer yanma hızında büyük düşüş olduğunu göstermiştir. Seyreltme oranının artmasıyla beraber önemli etmenlerden biri olan alev kararsızlığında da bir miktar düşüş görüldüğü sonuçlar arasında yer almaktadır (Duan & Liu, 2017).

Endouard ve arkadaşları (Endouard et al., 2016) İzo-Oktan/Hava karışımının CO₂, H₂O ve Egzoz gaz dolaşımı ile seyreltmesi sonucu yanma hızında oluşan değişimleri ele almışlardır. Değişken sıcaklık, basınç ve eşdeğerlik oranlarında her bir seyrelticiyi test etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda CO₂ ve H₂O seyreltmelerinin yanma hızını azalttığı ve bu etkinin egzoz gaz dolaşımı seyreltmesinden daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır (Endouard et al., 2016).

Mazas ve arkadaşları (Mazas et al., 2010) CH₄/O₂ karışımının CO₂ ve H₂O ile seyreltilerek bu seyrelticilerin laminer yanma hızına olan etkilerini araştırmışlardır. Geniş bir eşdeğerlik oranı aralığında (0.50 < φ < 1.50) deneyler yürütülmüştür. Çalışmanın sonucunda CO₂ seyrelticisinin H₂O ile karşılaştırıldığında laminer yanma hızını daha yüksek oranda azalttığı sonucuna varmışlardır (Mazas et al., 2010).

Xie ve arkadaşları (Xie et al., 2014) yaptıkları çalışmada CO/H₂/Hava karışımının CO₂ ve H₂O ile seyreltilmesi sonucunda laminer yanma karakteristiğinde meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda hem CO₂ hem H₂O seyreltmesi sonucunda laminer yanma hızında azalma görüldüğünü belirtmişlerdir. Ancak iki seyreltici karşılaştırıldığında CO₂' in laminer yanma hızını azaltmada H₂O' dan daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır (Xie et al., 2014).

3.2. Seyreltmenin Emisyon Değerlerine Etkisi (Effect of Dilution on Emission Values)

3.2.1. N₂ ile seyreltme (Dilution with N₂)

Yılmaz ve arkadaşları (Yılmaz et al., 2022) 60% CH₄/40% CO₂ biyogazı farklı oranlarda N₂ ile seyreltilmiştir. %20 oranında N₂ seyreltme oranına kadar NO_x değerlerinde azalma görülsede artan

seyreltme oranlarında yakıttaki nitrojenin artmasından dolayı NO_x değerlerinde tekrar artış gözlemlenmiştir (Yılmaz et al., 2022).

Sahu ve arkadaşları (Sahu et al., 2019) (Metiltetrahidrofuran)MTHF/Hava karışımını N_2 ve CO_2 seyrelterek bu etkinin yanma kararsızlığına olan etkisini incelemiştir. Deney 393 K sıcaklık ve 0.1 MPa basınç şartlarında gerçekleştirilmiştir. Seyreltme oranları %5 ile %15 arası değişirken eşdeğerlik oranı ise 0.2 ile 1.5 arasında değişmiştir. Yapılan deneyler sonucunda her iki seyreltici için de eşdeğerlik oranının 1.3 ve aşağısında olduğu durumlarda kararlı yanma görülürken eşdeğerlik oranının 1.3 üstü olduğu şartlarda ise yanmada kararsızlık meydana geldiğini belirtmişlerdir (Sahu et al., 2019).

Sharma ve arkadaşları (Sharma et al., 2022) yakıt olarak kerosen ve biyodizelin kullanıldığı alevsiz yakıcıda CO_2 ve N_2 seyreltmesinin yanma ve emisyon karakteristiklerine olan etkilerini araştırmışlardır. CO_2 ' in yüksek ısı kapasitesinden dolayı seyreltici olarak N_2 ' den daha efektif olduğunu gözlemlenmiştir. CO_2 seyreltmesinde CO emisyonu önemli bir değişim göstermese de NO_x emisyonunda önemli düşüş tespit etmişlerdir. N_2 seyreltmesi uygulandığında ise NO_x emisyonunda artış görülmüş CO formasyonunu önlemede ise CO_2 seyreltmesinden daha etkili olduğunu belirtmişlerdir (Sharma et al., 2022).

Dai ve arkadaşları (Dai et al., 2018) CH_4 ' ün sıcak oksidan akışına sahip yakıcı da N_2 ve H_2O seyreltmesini karşılaştırıp yanmaya olan etkilerini çalışmalarında belirtmişlerdir. Seyreltici N_2 ' den H_2O ' ya geçtiğinde alev sıcaklığı ve boyunun önemli ölçüde azaldığını belirtmişler bu azalmanın ana nedeninin ise H_2O ' nun N_2 ' ye oranla daha düşük yoğunluğa ve yüksek ısı kapasitesine sahip olmasından kaynaklandığı sonucuna varmışlardır (Dai et al., 2018).

3.2.2. CO_2 ile seyreltme (Dilution with CO_2)

Zhang ve arkadaşları (Y. Zhang et al., 2012) Sentez Alevindeki emisyon değerlerini azaltmak için mikro karışım ve CO_2 ile seyreltme yoluna başvurmuşlardır. Hem CO hem NO_x emisyon değerlerini azaltılabileceğini bununda yanma parametrelerinde yapılacak değişikliklerle mümkün olabildiğini belirtmişlerdir. Tepkimedeki yakıt ve hava oranını ayarlayarak NO_x emisyonunu 2 ppm değerine, CO emisyonunu ise 3 ppm değerine düşürülebildiklerini gözlemlenmiştir. Yüksek oranda seyreltmenin NO_x değerlerini daha da düşük hale getirebildiği ancak CO emisyon değerlerinde ise yükselişe neden olabildiği sonucuna varmışlardır. Diğer bir sonuçta ise seyreltme seviyesi sabit olup C/H oranı artırıldığında hem NO_x hem CO emisyonlarında artış olduğu görülmüştür (Y. Zhang et al., 2012).

Persis ve arkadaşları (De Persis et al., 2013) gaz türbini koşullarında fakir ön karışimli metan yanmasının CO_2 ile seyreltilmesinin NO ve CO emisyonlarına olan etkisini araştırmışlardır. Sıcaklığın 293 K, eşdeğerlik oranının 0.80 ve basıncın 1 atm olduğu koşullarda gerçekleştirilen deneyde CO_2 seyreltmesindeki artış ile NO emisyonunda düşüş yaşandığını ancak CO emisyonunda ise artış gördüklerini belirtmişlerdir (De Persis et al., 2013).

Ślefarski (Ślefarski, 2019) yaptığı çalışmada ön karışimli metan alevinin CO_2 seyreltmesi sonucunda emisyon değerlerine olan etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda CO_2 seyreltmesi ile CO emisyonunda artış NO_x emisyonunda ise azalış olduğu belirtilmiştir. Deney sırasında artan basıncın CO

emisyona deęerlerinin daha da artmasına NO_x deęerlerinde ise dūşūş oranının azalmasına neden olduęu sonucuna varmıřlardır (Slefarski, 2019).

Zaidaoui ve arkadaşları (Zaidaoui et al., 2018) ön karışımsız tūrbūlanslı CH₄/Hava karışımının O₂ zenginleştirmesi ve CO₂ seyreltmesi sonucunda oluşan emisyon değerlerini incelemişlerdir. Yapılan alışmalar O₂ zenginleştirmesi ile CO emisyonunda önemli derecede azalma olduğunu ancak NO_x emisyon değerinin arttığını göstermiştir. CO₂ seyreltmesi sonucuna bakıldığında ise araştırmacılar seyreltme ile CO emisyonunda artış, NO_x emisyonunda ise önemli derecede azalma görūldūęünü belirtmişlerdir (Zaidaoui et al., 2018).

3.2.3. Ar ile seyreltme (Dilution with Ar)

Lı ve arkadařları (LEE, 2012) 6 silindirli doęal gaz kullanan buji ateřlemeli bir motorda Ar seyreltmesi yapmıřlardır. Seyreltmenin termal verimlilik ve NO_x emisyonları üzerindeki etkisini ele almıřlardır. Termal verimlilięin önce arttıęı ardından azaldıęı görūlmüřtür. Ar oranı arttıķça NO_x emisyonunda önemli ölçūde dūşūş olduęu tespit edilmiřtir. Termal verimlilik seyreltme oranı %9.8 olduęunda en ūst seviyesine çıktıęı belirtilmiřtir. En yūksək seyreltme oranında ise (%18.6) NO_x emisyonunda %64' lük bir azalma görūldūęu sonucuna varmıřlardır. Son olarak Ar maddesinin yūksək termal verimlilik için N₂ ve CO₂' e nazaran daha ūstūn olduęu belirtilmiřtir (LEE, 2012).

Alabař ve arkadaşları (Alabař et al., 2023) yanma kararsızlıklarını emisyon değerlerindeki değişimi gözlemledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. %70 CH₄ - %30 CO₂ biyogaz karışımını kullandıkları çalışmada seyreltici olarak N₂ ve Ar gazlarını seçmişlerdir. Tepkime Ar ile seyreltildeğinde Termoakustik kararsızlığın N₂ ile seyreltmeye gōre daha dūřuk kararsızlık sonuçları verdiği belirtilmiştir. Hem Ar hem N₂ seyreltme oranlarında artış görūldūķe CO emisyonunda da artış görūlmekte olduğu sonucuna varılmıştır (Alabař et al., 2023).

Rangrazi ve arkadařları (Rangrazi et al., 2013) ön karıřımsız tūrbūlanslı propan-hava karıřımını Nitrojen ve Argon ile seyrelterek sonucunda oluřan NO_x emisyonlarını karřılařtırmıřlardır. Her iki seyreltmede yanma odasının sıcaklıęını azaltmıřtır ancak nitrojen seyreltmesinde nitrojenin ısı kapasitesi daha yūksək olduęu için sıcaklıęı daha fazla dūřürmüřtür. Argon ile seyreltme sonucu NO_x emisyonunda %37 oranında dūřūş görūlmüř ancak nitrojen ile seyreltme sonucunda %63 oranında bir dūřūş görūlmüřtür. Sonuç olarak arařtırmacılar NO_x emisyon deęerlerini dūřürmede nitrojenin argondan daha etkili olduęu sonucuna varmıřlardır (Rangrazi et al., 2013).

Galmiche ve arkadařları (Cao & Zhu, 2011) ön karıřımlı metan/hava karıřımında seyreltmenin etkisini arařtırmıřlardır. Arařtırmalarında seyreltici olarak He, Ar, N₂, CO₂ ve su buharını kullanmıřlardır. Deneylerini atmosferik basınçta ve 393 K sıcaklıkta yūrüten arařtırmacılar tūm seyrelticileri ayrı ayrı kullanmıřlardır. Vardıkları sonuçta seyreltme oranı arttıķça yanma hızında dūřūş olduęu ve bu dūřūşün test edilen tūm seyreltici maddeler için de geçerli olduęu belirtilmiřtir. Ancak laminer yanma hızı için en būyūk etkinin CO₂ ile görūldūęu, en kūek etkinin ise N₂ ile görūldūęu belirtilmiřtir (Cao & Zhu, 2011).

Kumuk ve arkadaşları (Kumuk, 2024) yaptıkları deneyde metan gazının çeşitli oksijen konsantrasyonları ile yakılıp Ar, He ve CO₂ gazlarıyla seyreltilmesi sonucu yanmada oluşan kararsızlık

ve emisyon değerlerini incelemişlerdir. Ar seyreltmesi basınç dalgalanmalarındaki sönümlleme etkisi sayesinde termoakustik kararsızlığı azaltmada He ve CO₂' e göre daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Saf metan yanması ile 140 ppm olarak ölçülen CO emisyonunun ardından %20 oranında oksijen ile yanmaya uygulanan CO₂, Ar ve He sırasıyla uygulanan seyrelticilerin sonucu aynı sırayla 1254 ppm, 356 ppm ve 308 ppm şeklinde olduğunu belirtmişlerdir (Kumuk, 2024).

3.2.4. H₂O ile seyreltme (Dilution with H₂O)

Shi ve arkadaşları (Shi et al., 2022) sentez gazında orta veya aşırı düşük oksijen seyreltmesi yöntemini izlemiştir. Seyreltici gazları N₂, CO₂ ve H₂O olarak belirlemişlerdir. Yapılan çalışmaların sonucunda sentez gazı yanması için ve NO emisyonunu azaltmak için en iyi seyreltici gazın H₂O olduğu sonucuna varmışlardır (Shi et al., 2022).

şahin ve İlbaş (Sahin & Ilbas, 2020) H₂O içeriğinin biyogaz ile yanma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yanma karışımında artan H₂O içeriği ile biyogaz alev sıcaklığında düşüş görüldüğü ve nedeninin de karışımdaki seyreltme olduğu belirtilmiştir. Karışımdaki H₂O oranında artış ile beraber CO ve CO₂ emisyonlarında önemli değişiklikler olduğu saptanmıştır. CO₂ emisyonundaki düşüşün karışımda bulunan H₂O oranındaki artış ile gerçekleştiğini sonuçlar arasında belirtmişlerdir (Sahin & Ilbas, 2020).

Öztürk (ÖZTÜRK, 2019) Kısmi Ön karışımlı Sentez Gaz yanmasında CO₂, H₂O ve N₂ seyreltmelerinin etkisini araştırmışlardır. Yürütölen çalışmada en yüksek NO emisyon değerlerine eşdeğerlik oranının 1.39 olduğu zaman ulaşıldığı görölmüştür. NO emisyonlarında seviyeyi düşürebilmek için eşdeğerlik oranının daha düşük değerlerde olması gerektiği belirtilmiştir. NO emisyonlarını azaltmada H₂O en büyük etkiyi yapmıştır. Eşdeğerlik oranının 1.39 olduğu şartlarda seyreltmesiz yanma ve H₂O seyreltmesi ile gerçekleşen yanma sonucu oluşan NO emisyon değerleri arasında %24.8' lik bir fark bulunduğu sonucuna varılmıştır (ÖZTÜRK, 2019).

Ren ve arkadaşları (Ren et al., 2020) yaptıkları çalışmada metan kullanmış ve yanmayı N₂, CO₂ ve H₂O kullanarak seyreltmişlerdir. Seyrelticileri ayrı ayrı kullanarak yanmaya olan etkilerini araştırmışlardır. Kullanılan tüm seyreltici maddelerin hepsinde fiziksel ve kimyasal olarak en büyük etkinin eşdeğerlik oranının 1.0 değerinde olduğu şartlarda elde edildiği belirtilmiştir. H₂O ve CO₂ seyreltmelerinin kimyasal etkileri ile NO oluşmasının azalmasına yardımcı olduğu ancak N₂ ile seyreltilen yanmada tam tersine NO oluşumunun arttığı sonucuna varıldığı belirtilmiştir (Ren et al., 2020).

4. Sonuç (Conclusion)

Fosil yakıtlara olan bağımlılığımız her ne kadar gerekli olsa da dünyaya olan zararlı yadsınamaz bir gerçek olarak görölmektedir. Gerek küresel ısınma gerek fosil kaynakların giderek azalması araştırmacıları alternatif özömlere yönelmektedir. Sürdürülebilir enerjiye geçiş hızlansa da bu geçişin küresel ısınmaya büyük bir olumlu etkisi olmamaktadır. Seyreltme yöntemi fosil yakıtların daha çevre dostu ve verimli olması için uygulanan araştırmacıların geniş alanda çalıştığı bir yöntemdir. Çalışma bu yöntemde kullanılan seyrelticilerin farklı etkilerini ele almaktadır.

Tablo 1. Ar, N₂, CO₂, H₂O (Buhar) Seyrelticilerinin Isıl Kapasiteleri ve Yoğunlukları (Thermal Capacities and Densities of Ar, N₂, CO₂, H₂O (Steam) Diluents)

Gaz	Moleküler Ağırlık (g/mol)	Spesifik Isı Kapasitesi (C_p)	Spesifik Isı Kapasitesi(C_v)	Yoğunluk (g/L) (0 °C, 1 atm)
Ar	39.95	0.520 J/g.K	0.312 J/g.K	1.784
N₂	28.02	1.04 J/g.K	0.743 J/g.K	1.250
CO₂	44.01	0.844 J/g.K	0.656 J/g.K	1.977
H₂O (Buhar)	18.02	1.996 J/g.K	1.5 J/g.K	0.597 (100, 1 atm)

Çalışmada seyreltici maddeler N₂, H₂O, CO₂ ve Ar olarak belirlenmiş her bir seyrelticinin yanma hızı ve emisyon değerleri üzerindeki etkileri farklı çalışmalarla ele alınmıştır. N₂ çalışmada ilk incelenen seyreltici olmuştur. Seçilen seyreltici gazların yanma hızına olan etkileri incelendiğinde CO₂ deneylerde yanma hızına önemli derecede düşürücü etki yapmıştır. N₂, H₂O ve Ar seyrelticileri de yanma hızını düşürücü etki yapsa da bu etki CO₂ ile karşılaştırıldığında daha etkisiz kalmıştır. Emisyon değerlerine bakıldığında ise yine H₂O ve CO₂ seyrelticilerinin diğer seyrelticilere nazaran emisyon değerlerini düşürmede öne çıktığı görülmüştür. Çalışmalardan genel çıkarılan sonuca ve Tablo 1.' de verilen değerlere bakıldığında spesifik ısı kapasitesi ve yoğunluk gibi özellikler seyrelticinin tepkimeye olan etkisini büyük ölçüde belirlemektedir. Çalışmalar incelendiğinde ise deneyin gerçekleştiği eşdeğerlik oranı, sıcaklık, basınç, yakıtları karıştırma yöntemleri gibi birçok etmenin emisyon ve yanma hızı değerlerini etkilediği sonucuna varılmaktadır.

Çalışmada ele alınan seyrelticilerin hepsinin benzer özellikleri bulunmakta ve genel olarak literatürde hepsine yer verilmektedir. Literatüre baktığımızda her bir seyrelticinin benzer yanlarının değişken yakıt ve karışımlara olan etkisinin görüldüğü bu etkilerin deney şartlarına ve uygulama metotlarına göre değişkenlik gösterebildiği sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı FBA-2023-12530 proje kodu ile destekleyen Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi' ne teşekkür ederim.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

1. Alabaş, B., Yılmaz, İ., & Çam, Y. (2023). N₂ and Ar dilution on the premixed biogas jet flame under external acoustic enforcement. *Propulsion and Power Research*, 12(4), 486–504. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2023.09.001>
2. Burbano, H. J., Pareja, J., & Amell, A. A. (2011). Laminar burning velocities and flame stability analysis of H₂/CO/air mixtures with dilution of N₂ and CO₂. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(4), 3232–3242. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.089>
3. Cao, Z., & Zhu, T. (2011). Effects of diluents addition on laminar burning velocity of premixed methane flames. *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University*, 39(10), 1557–1562. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-374x.2011.10.027>
4. Chan, Y. L., Zhu, M. M., Zhang, Z. Z., Liu, P. F., & Zhang, D. K. (2015). The Effect of CO₂ Dilution on the Laminar Burning Velocity of Premixed Methane/Air Flames. *Energy Procedia*, 75, 3048–3053. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.621>
5. Chu, H., Xiang, L., Meng, S., Dong, W., Gu, M., & Li, Z. (2021). Effects of N₂ dilution on laminar burning velocity, combustion characteristics and NO_x emissions of rich CH₄–air premixed flames. *Fuel*, 284(August 2020), 119017. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119017>
6. Dai, C., Shu, Z., Li, P., & Mi, J. (2018). Combustion Characteristics of a Methane Jet Flame in Hot Oxidant Coflow Diluted by H₂O versus the Case by N₂. *Energy and Fuels*, 32(1), 875–888. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03060>
7. De Persis, S., Cabot, G., Pillier, L., Gökalp, I., & Boukhalfa, A. M. (2013). Study of lean premixed methane combustion with CO₂ dilution under gas turbine conditions. *Energy and Fuels*, 27(2), 1093–1103. <https://doi.org/10.1021/ef3016365>
8. Duan, J., & Liu, F. (2017). Laminar combustion characteristics and mechanism of hydrogen/air mixture diluted with N₂ + H₂O. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(7), 4501–4507. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.071>
9. Endouard, C., Halter, F., Chauveau, C., & Foucher, F. (2016). Effects of CO₂, H₂O, and Exhaust Gas Recirculation Dilution on Laminar Burning Velocities and Markstein Lengths of Iso-Octane/Air Mixtures. *Combustion Science and Technology*, 188(4–5), 516–528. <https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1138792>
10. Global Carbon Project. (2020). Global Carbon Budget | Global Carbon Atlas. *Global Carbon Budget 2010-2019*, 93(November). <http://www.globalcarbonatlas.org/en/content/global-carbon-budget>
11. Han, M., Ai, Y., Chen, Z., & Kong, W. (2015). Laminar flame speeds of H₂/CO with CO₂ dilution at normal and elevated pressures and temperatures. *Fuel*, 148, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.083>

12. Hu, E., Jiang, X., Huang, Z., & Iida, N. (2012). Numerical study on the effects of diluents on the laminar burning velocity of methane-air mixtures. *Energy and Fuels*, 26(7), 4242–4252. <https://doi.org/10.1021/ef300535s>
13. International Energy Agency. (2023). CO₂ Emissions in 2023. *International Energy Agency*, 24, 22.
14. Kumuk, O. (2024). CO₂, Ar, and He dilution effects on combustion dynamics and characteristics in a laboratory-scale combustor. *Fuel*, 369(X), 131745. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131745>
15. Lee, T. Y. K. and S. H. (2012). Combustion and Emission Characteristics of Wood Pyrolysis Oil-Butanol Blended Fuels in a Di Diesel Engine. *International Journal of Automotive Technology*, 13(2), 293–300. <https://doi.org/10.1007/s12239>
16. Mazas, A. N., Lacoste, D. A., & Schuller, T. (2010). Experimental and numerical investigation on the laminar flame speed of CH₄/O₂ mixtures diluted with CO₂ and H₂O. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2(PARTS A AND B), 411–421. <https://doi.org/10.1115/GT2010-22512>
17. Nair, A., Velamati, R. K., & Kumar, S. (2016). Effect OF CO₂/N₂ dilution on laminar burning velocity of liquid petroleum gas-air mixtures at elevated temperatures. *Energy*, 100, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.094>
18. Öztürk, S. (2019). The Effects of CO₂, N₂, and H₂O Dilutions on NO Formation of Partially Premixed Synthesis Gas Combustion. *Cumhuriyet Science Journal*, 40(4), 813–818. <https://doi.org/10.17776/csj.543130>
19. Paidi, S. K., Bhavaraju, A., Akram, M., & Kumar, S. (2013). Effect of N₂/CO₂ dilution on laminar burning velocity of H₂-air mixtures at high temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(31), 13812–13821. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.024>
20. Prathap, C., Ray, A., & Ravi, M. R. (2008). Investigation of nitrogen dilution effects on the laminar burning velocity and flame stability of syngas fuel at atmospheric condition. *Combustion and Flame*, 155(1–2), 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.04.005>
21. Prathap, C., Ray, A., & Ravi, M. R. (2012). Effects of dilution with carbon dioxide on the laminar burning velocity and flame stability of H₂-CO mixtures at atmospheric condition. *Combustion and Flame*, 159(2), 482–492. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.08.006>
22. Rangrazi, A., Niazmand, H., & Heravi, H. M. (2013). Experimental study of argon dilution effects on NO_x emission in a non-premixed flame in comparison with nitrogen. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 30(8), 1588–1593. <https://doi.org/10.1007/s11814-013-0088-6>
23. Ratna Kishore, V., Muchahary, R., Ray, A., & Ravi, M. R. (2009). Adiabatic burning velocity of H₂-O₂ mixtures diluted with CO₂/N₂/Ar. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(19), 8378–8388. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.029>
24. Ren, F., Xiang, L., Chu, H., Jiang, H., & Ya, Y. (2020). Modeling Study of the Impact of Blending N₂,

- CO₂, and H₂O on Characteristics of CH₄ Laminar Premixed Combustion. *Energy and Fuels*, 34(2), 1184–1192. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02108>
25. Ritchie, H., & Roser, M. (2024). Energy Production and Consumption - Our World in Data. In *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>
 26. Sahin, M., & Ilbas, M. (2020). Analysis of the effect of H₂O content on combustion behaviours of a biogas fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3651–3659. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.042>
 27. Sahu, A., Wang, C., Jiang, C., Xu, H., Ma, X., Xu, C., & Bao, X. (2019). Effect of CO₂ and N₂ dilution on laminar premixed MTHF/air flames: Experiments and kinetic studies. *Fuel*, 255(March). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115659>
 28. Sharma, S., Chowdhury, A., & Kumar, S. (2022). Effect of CO₂/N₂ Dilution on Characteristics of Liquid Fuel Combustion in Flameless Combustion Mode. *Combustion Science and Technology*, 194(4), 721–744. <https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1780582>
 29. Shi, G., Li, P., Hu, F., & Liu, Z. (2022). NO mechanisms of syngas MILD combustion diluted with N₂, CO₂, and H₂O. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(37), 16649–16664. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.123>
 30. Slefarski, R. (2019). Study on the combustion process of premixed methane flames with CO₂ dilution at elevated pressures. *Energies*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/en12030348>
 31. Wei, H., Xu, Z., Zhou, L., Zhao, J., & Yu, J. (2018). Effect of hydrogen-air mixture diluted with argon/nitrogen/carbon dioxide on combustion processes in confined space. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14798–14805. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.038>
 32. Xie, Y., Wang, J., Xu, N., Yu, S., & Huang, Z. (2014). Comparative study on the effect of CO₂ and H₂O dilution on laminar burning characteristics of CO/H₂/air mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(7), 3450–3458. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.037>
 33. Yilmaz, I., Cam, Y., & Alabas, B. (2022). Effect of N₂ dilution on combustion instabilities and emissions in biogas flame. *Fuel*, 308(April 2021), 121943. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121943>
 34. Zaidaoui, H., Boushaki, T., Sautet, J. C., Chauveau, C., Sarh, B., & Gökalp, I. (2018). Effects of CO₂ Dilution and O₂ Enrichment on Non-premixed Turbulent CH₄-Air Flames in a Swirl Burner. *Combustion Science and Technology*, 190(5), 784–802. <https://doi.org/10.1080/00102202.2017.1409217>
 35. Zhang, B., Shen, X., & Pang, L. (2015). Effects of argon/nitrogen dilution on explosion and combustion characteristics of dimethyl ether-air mixtures. *Fuel*, 159, 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.07.019>
 36. Zhang, B., Xiu, G., & Bai, C. (2014). Explosion characteristics of argon/nitrogen diluted natural gas-air mixtures. *Fuel*, 124, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.090>

37. Zhang, Y., Yang, T., Liu, X., Tian, L., Fu, Z., & Zhang, K. (2012). Reduction of emissions from a syngas flame using micromixing and dilution with CO₂. *Energy and Fuels*, 26(11), 6595–6601. <https://doi.org/10.1021/ef300751d>
38. Zhaoyang Chen, Liangjie, W., Zuohua, H., Haiyan, M., Xibin, W., & Deming, J. (2009). Measurement of laminar burning velocities of dimethyl ether-air premixed mixtures with N₂ and CO₂ dilution. *Energy and Fuels*, 23(2), 735–739. <https://doi.org/10.1021/ef8008663>