



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 24.05.2022  
Kabul Tarihi : 07.07.2022

Received Date : 24.05.2022  
Accepted Date : 07.07.2022

### DİZEL MOTORLARDA DİMETİL ETER KULLANIMININ NO<sub>x</sub> EMİSYONLARINA ETKİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME ÇALIŞMASI

#### A REVIEW STUDY ON THE EFFECTS OF DIMETHYL ETHER ON NO<sub>x</sub> EMISSIONS IN DIESEL ENGINES

İsmet SEZER<sup>1</sup> (ORCID: 0000-000-342-9172)

<sup>1</sup> Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İsmet SEZER, isezer@gumushane.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışma, dizel motorlarda dimetil eter (DME)'in saf veya yakıt katkısı olarak kullanımı üzerine yapılmış çeşitli çalışmaların sonuçlarından yararlanılarak derlenmiştir. Dizel motorlarda zararlı egzoz emisyonlarını azaltmanın birkaç yöntemi vardır. Bunlardan ilki motor tasarımında ve yakıt enjeksiyon sisteminde modifikasyonlar yaparak yanmanın iyileştirilmesidir, ancak bu pahalı ve zaman alıcı bir yöntemdir. İkinci yöntem ise katalitik konvektör ve partikül fitresi gibi donanımlar kullanmaktır, ancak bu donanımlar motor performansını olumsuz yönde etkiler. Hem egzoz emisyonlarını azaltmak hem de motor performansını artırmak için uygulanan son yöntem çeşitli alternatif yakıtların veya yakıt katkılarının kullanılmasıdır. Dizel motorlardaki en önemli emisyonlar azot oksitler (NO<sub>x</sub>) ve partikül maddelerdir (PM). Çoğu araştırmacı emisyonları azaltmanın en iyi yolunun doğalgaz, biyogaz, biyodizel gibi alternatif yakıtların veya konvansiyonel veya alternatif yakıtlarla birlikte çeşitli yakıt katkılarının kullanılması olduğunu bildirmektedir. Bu nedenle, alternatif yakıtlar ve yakıt katkıları üzerine yapılan çalışmaların sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi pratik uygulamalar için oldukça önemlidir. Bu çalışma, dimetil eterin dizel motorlarda yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanılmasının azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonları üzerindeki etkilerinin incelenmesine odaklanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Dizel motor performansı, dimetil eter, NO<sub>x</sub> emisyonları, yakıt katkıları

#### ABSTRACT

This review study was created from the various studies which were completed on the use of dimethyl ether (DME) in diesel engines as a fuel or fuel additive. The several methods are available for the decreasing of the harmful emissions in diesel engines. The first method for the reduction of harmful emissions is improved the combustion by modification of engine design and fuel injection system, but this process is expensive and time consuming. The second method is the using various exhaust gas devices like catalytic converter and diesel particulate filter. However, the use of such devices affects negatively diesel engine performance. The last method to reduce emissions and also improve diesel engine performance is the use of various alternative fuels or fuel additives. The major pollutants of diesel engines are oxides of nitrogen (NO<sub>x</sub>) and particulate matter (PM). It is very difficult to reduce NO<sub>x</sub> and PM simultaneously in practice. The most researches declare that the best way to reduce these emissions is the use of various alternative fuels i.e. natural gas, biogas, biodiesel or using some additives with the alternative fuels or conventional diesel fuel. Therefore, it is very important that the results of various studies on alternative fuels or fuel additives are evaluated together to practice applications. Especially, this study focuses on the usage of dimethyl ether in diesel engines as fuel or fuel additive. This review study investigates the effects of using dimethyl ether on nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) emissions.

**Keywords:** Diesel engine performance, dimethyl ether, NO<sub>x</sub> emissions, fuel additives

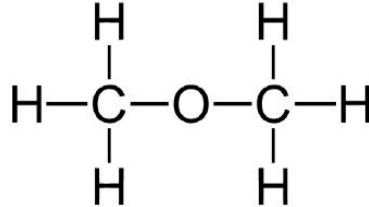
ToCite: SEZER, İ., (2022). DİZEL MOTORLARDA DİMETİL ETER KULLANIMININ NO<sub>x</sub> EMİSYONLARINA ETKİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME ÇALIŞMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 381-398.

## GİRİŞ

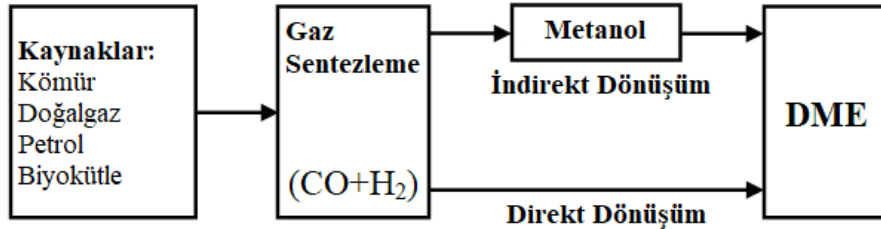
Dizel motorlar yüksek tork, düşük yakıt tüketimi ve benzin motorlarına kıyasla daha düşük hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonu seviyeleri nedeniyle taşıtlar için başlıca güç kaynağıdır (Yoon vd., 2010). Ancak, dizel motorları atmosfere benzin motorlarından daha yüksek seviyede partikül madde (PM) ve azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonu yaymaktadırlar. Bu nedenle, birçok araştırmacı daha düşük emisyon değerlerine sahip dizel motorlar geliştirmeye yönelik ve daha temiz emisyon üretebilecek alternatif yakıtlar üzerine sürekli araştırmalar yapmaktadır (Youn vd., 2011). Çeşitli alternatifler arasında, dimetil eter (DME) kömürden, doğalgazdan ve farklı biyokütle kaynaklarından üretilebilmesi nedeniyle oldukça umut verici bir alternatif yakıt olarak görülmektedir (Alam & Kajitani, 2001). Ancak, DME'nin düşük viskozite, yetersiz yağlayıcılık, düşük yanma entalpisi ve düşük kaynama noktası gibi fiziksel özellikleri dizel motorların temel yapısında ve yardımcı donanımlarında modifikasyonlar yapılmasını gerektirmektedir. DME'nin saf olarak kullanılabilmesi dizel motorlu taşıtlar hala geliştirme aşamasındadır. Bununla birlikte, DME dizel yakıtı veya diğer alternatif yakıtlarla birlikte kullanılabilir (Maji vd., 2014). Bu nedenle, DME'in kullanımı üzerine yapılmış çalışmaların sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi pratik uygulamalar açısından oldukça önemlidir. Bu derleme çalışması DME kullanımının PM emisyonları üzerindeki etkilerinin incelenmesini amaçlamaktadır.

## DİMETİL ETERİN KARAKTERİSTİKLERİ

DME, Şekil 1'de kimyasal yapısından da görüleceği gibi CH<sub>3</sub>-O-CH<sub>3</sub> kimyasal formülüne sahip basit eterlerden birisidir. Genel olarak, DME'in fiziksel özellikleri sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)'nin özelliklerine çok benzerdir. Bu nedenle, DME'in depolanması, nakliyesi ve yakıt istasyonlarında taşıtların deposuna aktarılması ilgili gereklilik ve şartlar LPG ile aynıdır (Alam & Kajitani, 2001). Şekil 2'de gösterildiği gibi, DME direkt veya indirekt sentetik metotlarla üretilebilmektedir. Direkt üretim yönteminde DME doğrudan doğalgazdan üretilirken, indirekt üretim yönteminde metanolün sentetik dehidrasyonu ile üretilebilmektedir (Park & Lee, 2014). Enerji eşdeğerli değerlendirme yapıldığında DME'in üretimi benzin veya dizel yakıtından daha ucuza mal olmaktadır. Büyük çapta üretim tesisleri dikkate alındığında DME'nin üretim maliyeti sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) veya sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) üretim maliyetine benzerdir (Wattanavichien, 2009). DME oda sıcaklığında ve atmosferik basınçta gaz fazında olup zehirsizdir. Bu nedenle, DME'nin 0.5 MPa üzerindeki bir basınçta sıvılaştırılması gerekir. DME'in taşıt üzerinde yakıt tankından motora sevk edilebilmesi sırasında buhar tıkaçı oluşumunu engellemek için yakıt enjeksiyon sisteminde basıncın 1.7–2.0 MPa aralığına yükseltilmesi gerekir (Duan vd., 2012; Kowalewicz & Wojtyniak, 2005).



Şekil 1. DME'in Kimyasal Yapısı (Park & Lee, 2014)



Şekil 2. DME'in Üretim Yöntemleri (Azizi vd., 2014)

Dizel yakıtı ve DME'in yakıt özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi DME'in yakıt özellikleri dizel yakıtından oldukça farklıdır. Yüksek buharlaşma basıncı ve düşük kaynama noktası değerlerine sahip olduğundan DME atmosferik basınç ve oda sıcaklığında gaz fazındadır. Diğer taraftan, DME'in ısıl değeri dizel yakıtının yarısı kadardır. Bu nedenle, yakıt besleme sistemi, yakıt püskürtme sistemi ve yanma odasının yeniden tasarlanması gerekmektedir (Huang vd., 2009). DME'nin setan sayısı dizel yakıtından daha yüksek olması

nedeniyle daha iyi tutuşma özelliklerine sahiptir. DME'in buharlaşma gizli ısısı dizel yakıtına kıyasla oldukça yüksek olduğundan yakıt-hava karışımının sıcaklığının düşürülmesine yardımcı olur.

**Tablo 1.** DME ve Dizel Yakıtının Özellikleri

| Özellik                             | DME                                | Dizel                         |
|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| Kimyasal formülü                    | CH <sub>3</sub> -O-CH <sub>3</sub> | C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> |
| Moleküler ağırlığı, g               | 46.07                              | 170                           |
| Kaynama noktası, °C                 | -24.9                              | 180-360                       |
| Sıvı fazdaki yoğunluğu, kg/lt       | 668                                | 840                           |
| Sıvı fazdaki viskozitesi, cP        | 0.15                               | 4.4-5.4                       |
| Alt ısı değeri, kJ/kg               | 28430                              | 42500                         |
| Tutuşma sıcaklığı, °C               | 235                                | 250                           |
| Setan sayısı                        | 55-60                              | 40-55                         |
| Stokiyometrik hava/yakıt oranı      | 9                                  | 14.6                          |
| Elastisite modülü, N/m <sup>2</sup> | 6.37x10 <sup>8</sup>               | 1.486x10 <sup>9</sup>         |
| Kütlesel karbon oranı               | 52.2                               | 86                            |
| Kütlesel hidrojen oranı             | 13                                 | 14                            |
| Kütlesel oksijen oranı              | 34.8                               | 0                             |

DME sadece C-H ve C-O kimyasal bağına sahip olup direkt C-C bağına sahip değildir ve içeriğinde % 34.8 oksijen bulundurur. Bu özellikleri sayesinde, DME'nin yanması sırasında nerdeyse hiç PM üretimi olmaz, düşük gürültü seviyesi ortaya çıkar ve yüksek oranda egzoz gazı resirkülasyonunu (EGR) tolere edilebildiğinden NOx emisyonunun azaltılmasında dizel yakıtından daha avantajlıdır (Wattanavichien, 2009). DME'nin düşük viskozitesi yakıt besleme sisteminde sızıntılara neden olabileceğinden daha düşük toleranslı parçalar kullanılması gerekir. DME'in yetersiz yağlama özelliği yakıt sistemindeki hareketli parçalarda aşınmalara neden olabilir. Bu nedenle, DME'nin içerisine sızıntı ve aşınmayı önleyici katkıları katılması gereklidir. DME'in sıkıştırılabilirliği dizel yakıtından daha fazla olduğundan yakıt sisteminde yakıtın nakledilebilmesi için daha fazla pompalama işine ihtiyaç vardır. Genel olarak, DME korozif yapısı nedeniyle kauçuk esaslı materyallerin yapısını bozar. Bu nedenle, yakıt sistemindeki kauçuk esaslı materyaller DME'nin korozif etkilerine dayanıklı malzemelerle değiştirilmelidir (Yoon vd., 2010). DME'in bir diğer avantajı ise metal malzemeler için korozif olmayışıdır (Park & Lee, 2014).

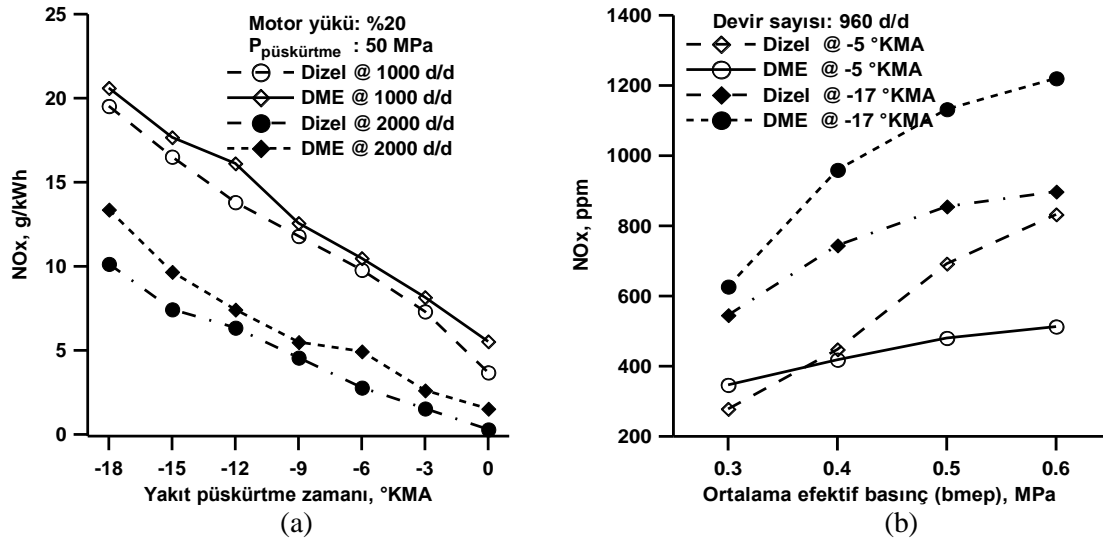
## DİMETİL ETER İLE İLGİLİ LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde, DME'in üretim teknolojileri, yakıt özellikleri, yanma karakteristikleri, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerine yapılmış oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Üretim teknolojileri üzerine yapılmış çalışmalarda (Inayat vd., 2017; Lecksiwilai vd., 2016; Azizi vd., 2014) farklı üretim teknikleri incelenmiş ve bunlar maliyet açısından değerlendirilmiştir. Yakıt özellikleri üzerine yapılmış çalışmalarda (Maji vd., 2015; Park & Lee, 2014; Park & Lee 2013; Teng vd., 2001) özellikle DME'in dizel yakıtından farklı olan içeriğinde oksijen bulunması, düşük yoğunluk ve düşük viskozite gibi olumlu özelliklerinin yanı sıra düşük yağlayıcılık gibi yetersiz yönleri incelenmiştir. Püskürtme karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalarda (Mohan vd., 2017; Jalanapurkar vd., 2015; Lim & Iida, 2015; Guangxin vd., 2013; Genbao vd., 2012; Xu vd., 2012; Kim vd., 2011; Suh & Lee, 2008) DME'in düşük yoğunluk ve düşük viskozite sayesinde püskürtme karakteristiklerini nasıl iyileştirdiğiyle ilgili incelemeler yapılmıştır. Yanma karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalarda (Benajes vd., 2018a; Benajes vd., 2018b; Lamani vd., 2017; Baskaran, 2015; Wang vd., 2015; El-Hagar, 2014; Jeon vd., 2014; Khunaphan vd., 2013; Park & Lee, 2013; Park, 2012; Chapman & Boehman, 2008; Ying vd., 2005; Oda vd., 2004; Song vd., 2004) DME'in tutuşma gecikmesi süresi, yanma süresi, kütleli yanma oranı, silindir basıncı ve yanma sıcaklıkları gibi parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Motor performans karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalarda (Abhishek vd., 2017; Hewu & Longbao 2017; Kropiwnicki vd., 2017; Smolec vd., 2017; Theinnoi vd., 2017; Vispute & Pawar, 2016; Deepak vd., 2015; Prabhakaran vd., 2015; Ryu vd l., 2014; Taghavifar vd., 2014; Wang vd., 2013; Patil & Thipse 2012; Li, 2011; Sezer, 2011; Namasivayam vd., 2010; Ying vd., 2010; Jang & Bae, 2009; Arcoumanis vd ., 2008; Semelsberger vd., 2006; Kajitani, 2004; Kajitani & Chen, 2003; Chen vd., 2000) DME'in döndürme momenti (tork), efektif motor gücü, özgül ve toplam yakıt tüketimi ve efektif verim gibi başlıca performans parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Egzoz emisyonu karakteristikleriyle ilgili yapılan çalışmalarda (Ambekar & Hole, 2018; Bogdan vd., 2017; Geng vd., 2017; Kim & Park, 2016; Park vd., 2016; Roh vd., 2015; Hou vd., 2014; Park vd., 2014; Thomas vd., 2014; Wang vd., 2014; Yanju vd., 2014; Zhao vd., 2014; Yoon vd., 2013; Kim vd., 2012; Loganathan vd., 2013; Loganathan vd., 2012; Zhu vd., 2012; Park vd., 2010;

Xinling & Zhen, 2009; Ying vd., 2006; Longbao vd., 2002; Wang vd., 2000) DME'in daha çok karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC), partikül madde (PM) veya is, azot oksitler (NO<sub>x</sub>) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gibi genel emisyonlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sunulan çalışmada ise sadece DME'in NO<sub>x</sub> emisyonlarına etkileri üzerine yoğunlaşmıştır.

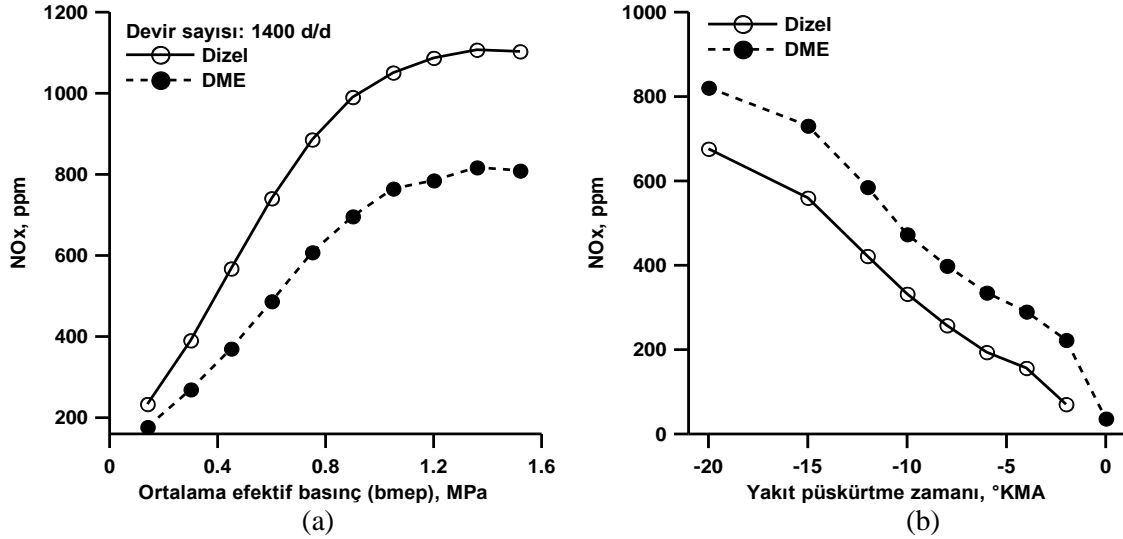
### DİMETİL ETERİN NO<sub>x</sub> EMİSYONLARINA ETKİLERİ

Şekil 3(a) dizel ve DME yakıtları için farklı yakıt püskürtme zamanı değerlerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi verilmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonu oluşumu yanma sıcaklığına, yanma odasındaki oksijen miktarına ve reaksiyon süresine bağlıdır. Şekilden görüldüğü gibi püskürtme avansının artırılması her iki yakıt için NO<sub>x</sub> emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Bunun nedeni püskürtme avansının artırılmasının maksimum yanma sıcaklığının ve basıncının üst ölü nokta civarında ortaya çıkmasına neden olmasıdır. Diğer taraftan, DME yakıtı kullanıldığında NO<sub>x</sub> emisyonu dizel yakıtına kıyasla bir miktar artmıştır. Bu durum DME'in tutuşma sıcaklığının düşük olması nedeniyle yanmanın daha erken başlaması sebebiyle yanma sıcaklığının artmasından kaynaklanmaktadır. DME'in içeriğinde bulunan oksijen de NO<sub>x</sub> emisyonunun artmasına katkı sağlamaktadır (Youn vd., 2011). Şekil 3(b)'de dizel ve DME yakıtları için farklı yakıt püskürtme zamanı ve ortalama efektif basınç değerlerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi püskürtme zamanının ve ortalama efektif basıncın artırılması NO<sub>x</sub> emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Bunun muhtemel sebebi yanmanın erken başlaması veya ortalama efektif basıncın artması sebebiyle yanma sıcaklığının artmasıdır. Diğer taraftan DME içeriğindeki oksijen sayesinde yanma sıcaklığını artırarak dizel yakıtına göre daha yüksek NO<sub>x</sub> emisyonu vermiştir (Alam & Kajitani, 2001).

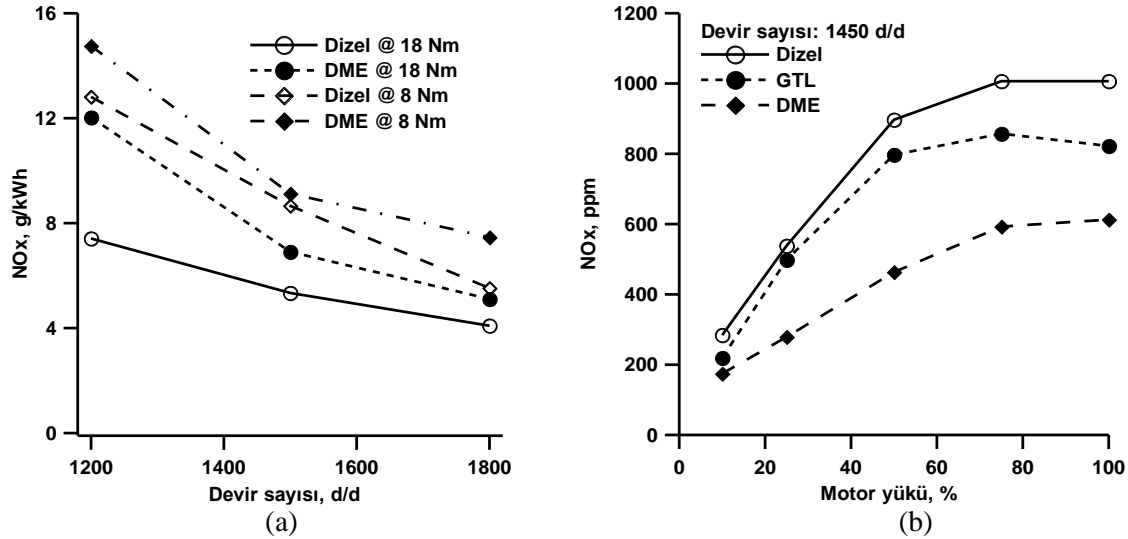


Şekil 3. NO<sub>x</sub> Emisyonunun Dizel ve DME Yakıtları için A) Yakıt Püskürtme Zamanı ile (Youn vd., 2011) ve B) Ortalama Efektif Basınç ile (Alam & Kajitani, 2001) Değişimi

Şekil 4(a)'da dizel yakıtı ve DME için farklı ortalama efektif basınç değerlerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME dizel yakıtına kıyasla tüm ortalama efektif basınç değerlerinde daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri vermiştir. 1.52 MPa ortalama efektif basınç değerinde DME dizel yakıtına göre NO<sub>x</sub> emisyonunda %28.1 azalma sağlamıştır. DME kullanıldığında daha fazla yakıt püskürtülmesi sebebiyle tutuşma gecikmesi süresinin uzaması ve buharlaşma gizli ısısının yüksek olması sebebiyle yanma sıcaklığının düşmesi NO<sub>x</sub> emisyonunun azalmasına neden olmaktadır (Huang vd., 2009). Şekil 4(b)'de dizel ve DME yakıtları için NO<sub>x</sub> emisyonunun farklı yakıt püskürtme zamanı değerlerinde değişimi verilmiştir. DME'in yüksek setan sayısı sayesinde daha erken tutuşması yanma işlemini daha erken başlatmakta ve yanma sıcaklığını artırarak NO<sub>x</sub> emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan, aynı gücü sağlamak için silindire daha fazla DME püskürtülmesi nedeniyle yanma işlemi daha uzun sürmekte ve silindirde daha uzun süre yüksek sıcaklıklar ortaya çıkmaktadır. NO<sub>x</sub> oluşumu yanma sıcaklığına, silindirdeki oksijen miktarına ve yanma süresine bağlı olduğundan DME kullanıldığında NO<sub>x</sub> emisyonu artmaktadır (Park & Lee, 2013).

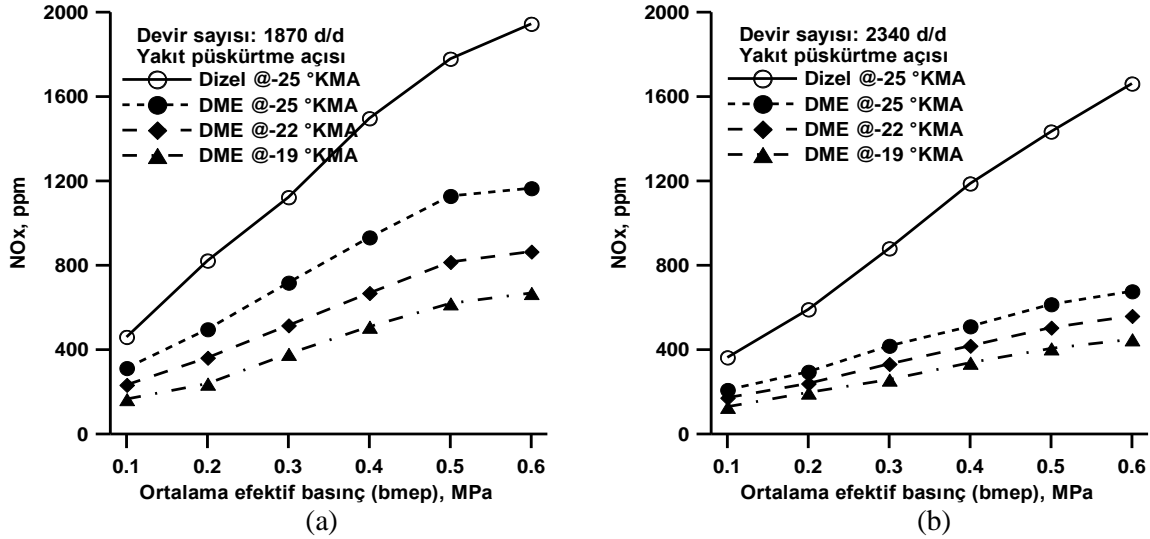


Şekil 4. NOx Emisyonunun Dizel ve DME Yakıtları için A) Ortalama Efektif Basınç ile (Huang vd., 2009) ve B) Yakıt Püskürtme Zamanı ile (Park & Lee, 2013) Değişimi



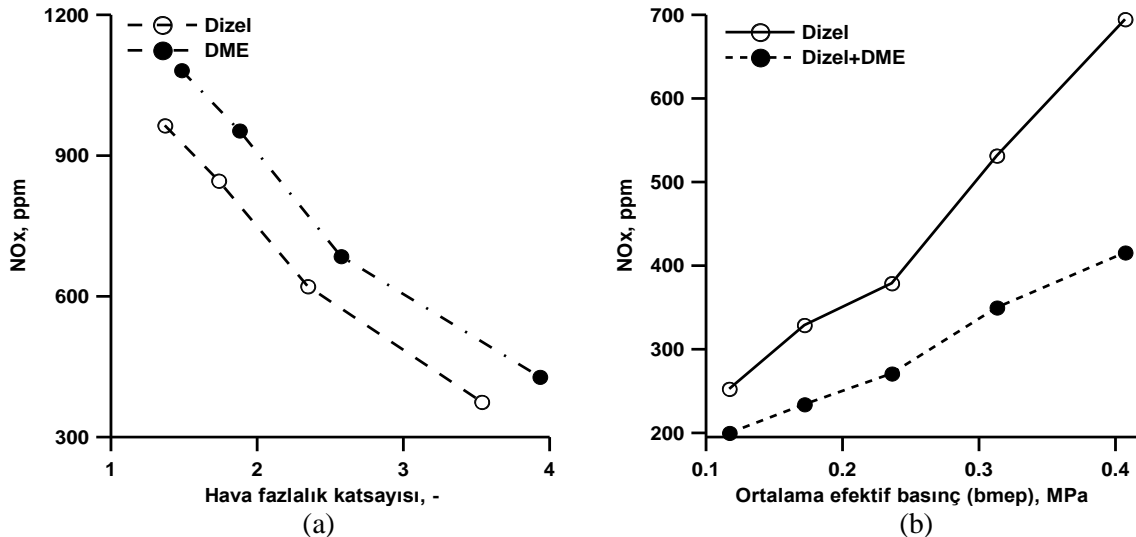
Şekil 5. NOx Emisyonunun A) Dizel ve DME Yakıtları için Devir Sayısı ile (Jeon vd., 2014) ve B) Dizel, GTL ve DME Yakıtları için Motor Yükü ile (Xinling & Zhen, 2009) Değişimi

Şekil 5(a)'da dizel ve DME yakıtları için farklı tork ve devir sayısı değerlerinde NOx emisyonunun değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME aynı tork değerinde dizel yakıtına göre daha yüksek NOx değerleri vermiştir. DME yüksek setan sayısı, hızlı yanma özelliği ve oksijen içeriği sayesinde NOx emisyonunun artmasına neden olmaktadır. NOx emisyonu oluşumu yanma sıcaklığı ve hava fazlalık katsayısına kuvvetli şekilde bağlıdır. DME'in kısa tutuşma gecikmesi süresi ve hızlı buharlaşma karakteristikleri kısa süre içinde hızlı yanmaya neden olmaktadır. Diğer taraftan, DME'in içeriğindeki %38.4 oranındaki oksijen yanma için ekstra oksijen sağlayarak yüksek yanma sıcaklıklarının ortaya çıkmasına neden olmakta ve yüksek sıcaklıkta NOx emisyonu oluşumu artmaktadır. İlave olarak DME'in düşük hava-yakıt oranı fakir karışımla çalışma sayesinde daha verimli bir yanma ve daha yüksek yanma sıcaklığı sağlayarak DME kullanıldığında NOx emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Düşük devir sayılarında yanma işlemi üst ölü nokta civarında gerçekleştiğinden NOx emisyonu artmakta, yüksek devir sayılarında yanma işlemi genişleme zamanına kaydığından yanma sıcaklıkları düşer ve NOx emisyonu üretimi azalır (Jeon vd., 2014). Şekil 5(b)'de dizel, GTL ve DME yakıtları için 1450d/d devir sayısında motor yüküne bağlı olarak NOx emisyonunun değişimi verilmiştir. GTL ve DME yakıtları tüm motor yükü değerlerinde dizel yakıtına kıyasla daha düşük NOx emisyonu değerleri vermiş ve NOx emisyonunu ortalama %15.6 ve %48.2 oranında azaltmışlardır. GTL ve DME yakıtları kullanıldığında NOx emisyonundaki azalma bu yakıtların kısa tutuşma gecikmesi süresi sayesinde sağladığı düşük yanma sıcaklıklarından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, GTL ve DME yakıtlarının düşük yoğunluğu ve aromatik içeriklerinin NOx emisyonunun azalmasına katkı sağladığı düşünülmektedir (Xinling & Zhen, 2009).



Şekil 6. NOx Emisyonunun Dizel ve DME Yakıtları için A) 1870 d/d’da ve B) 2340 d/d’da Ortalama Efektif Basınç ile Değişimi (Zhu vd., 2012)

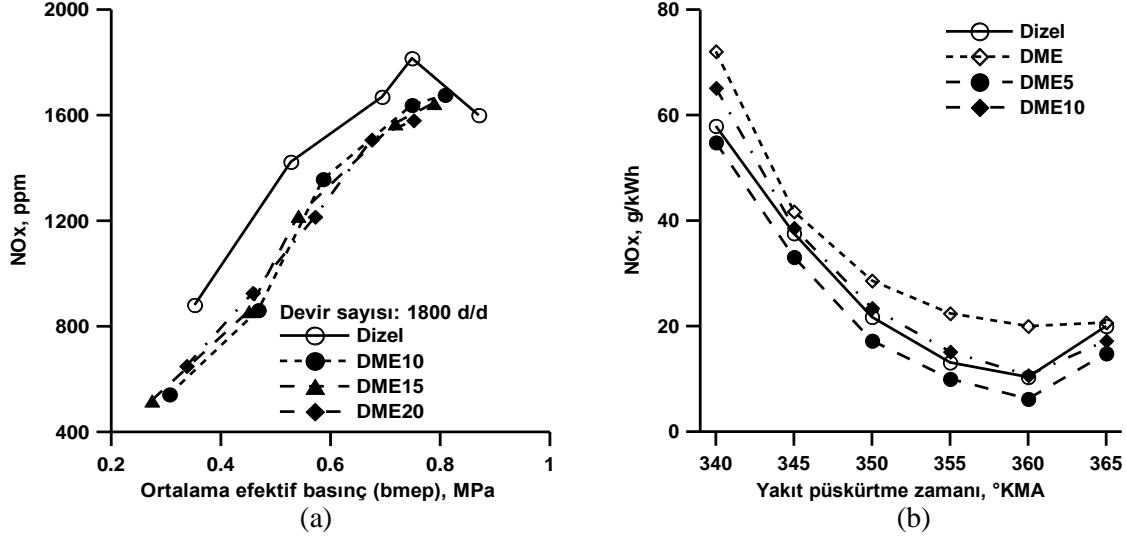
Şekil 6(a) ve (b)’de iki farklı devir sayısında dizel ve DME yakıtları için NOx emisyonunun ortalama efektif basınç ve yakıt püskürtme açısı ile değişimi verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi motor yükü arttıkça yanan yakıt miktarının artmasıyla yanma sıcaklığının yükselmesi NOx emisyonu miktarını artırmaktadır. Diğer taraftan, devir sayısı arttıkça NOx emisyonu azalmaktadır. Devir sayısının artması sürtünme kayıplarını artırmakta bu nedenle daha fazla güç elde etmek için daha fazla yakıt yakılması gerekir ve yanma sıcaklığı yükselir. Ancak bu yüksek sıcaklık kısa sürer ve reaksiyon süresi azaldığından NOx emisyonu oluşumu azalır. DME yakıtı kullanıldığında ise dizel yakıtına kıyasla NOx emisyonu %50’den daha fazla azalmaktadır. Bu durum DME’in yüksek setan sayısı ve yüksek buharlaşma gizli ısı gibi yakıt özelliklerinden kaynaklanmaktadır. DME’in yüksek setan sayısı sayesinde tutuşma gecikmesi süresini kısaltması böylece yanmanın daha kısa sürmesi ve hızlı buharlaşma sayesinde yanma sıcaklığı düşmektedir. Bunun sonucunda DME kullanıldığında NOx emisyonu azalmaktadır. Öte yandan, püskürtme avansının geciktirilmesi NOx emisyonunun %20-35 oranında azalmasını sağlamaktadır. Püskürtme zamanının geciktirilmesi DME’in kısa tutuşma gecikmesi süresi sayesinde üst ölü nokta civarında yanan yakıt miktarını azaltmakta ve böylece yanma sıcaklığı ve NOx emisyonu azalmaktadır (Zhu vd., 2012).



Şekil 7. NOx Emisyonunun A) Dizel ve DME Yakıtları için Hava Fazlalık Katsayısı ile (Oda vd., 2004) ve B) Dizel Yakıtı ve Dizel-DME Karışımı için Ortalama Efektif Basınç ile (Duan vd., 2012) Değişimi

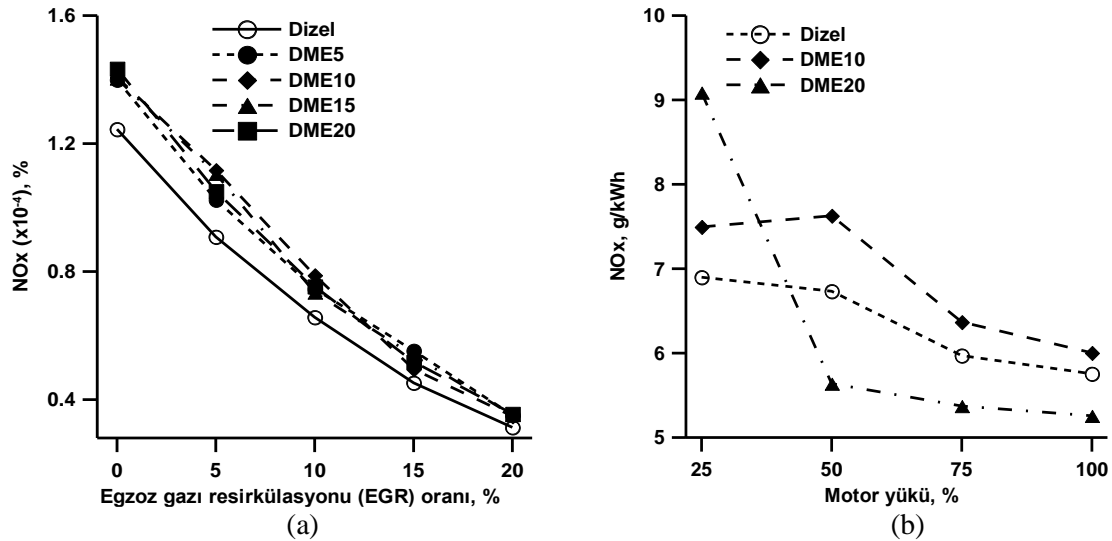
Şekil 7(a)’da NOx emisyonunun dizel ve DME yakıtları için hava fazlalık katsayısı ile değişimi verilmiştir. DME dizel yakıtına kıyasla biraz daha yüksek NOx emisyonu değerleri vermiştir. DME’in içeriğinde bulunan oksijen ve diğer yakıt özellikleri sayesinde daha verimli bir yanma sağlayıp yanma sıcaklığını artırması sebebiyle NOx emisyonu artmaktadır (Oda vd., 2004). Şekil 7(b)’de NOx emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımı için

ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME karışımı dizel yakıtına kıyasla daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonu vermiştir. Bu durum DME'in yüksek buharlaşma gizli ısısı ve düşük ısıl değeri nedeniyle yanma sıcaklığını düşürmesinden kaynaklanmaktadır. Yüksek yük değerlerinde egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) miktarı arttığından dizel-DME karışımı için NO<sub>x</sub> emisyonundaki düşüş daha fazla olmuştur (Duan vd., 2012).



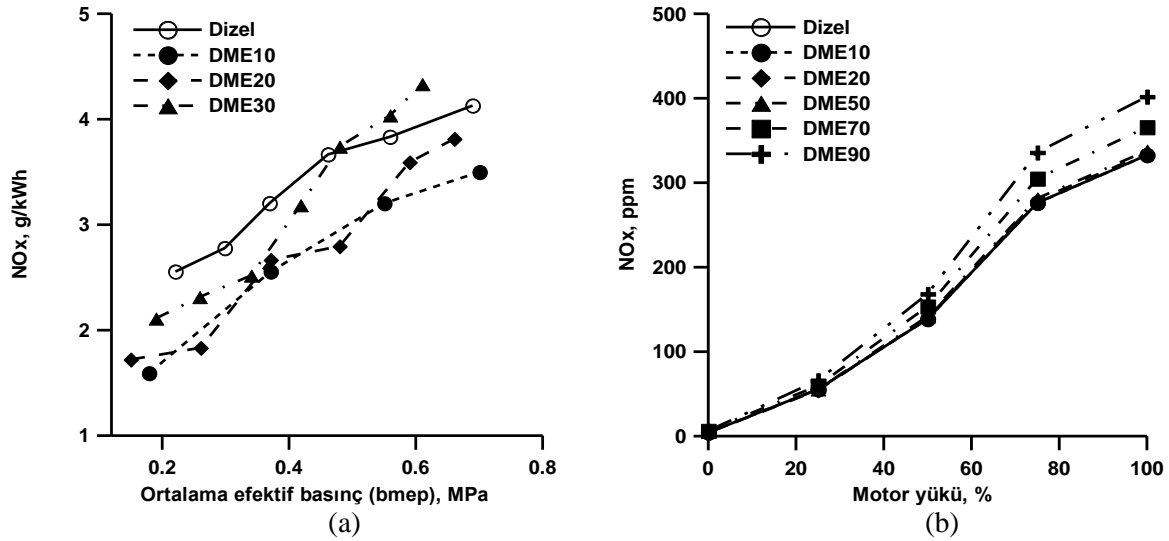
Şekil 8. NO<sub>x</sub> Emisyonunun Dizel Yakıtı ve Dizel-DME Karışımları için A) Ortalama Efektif Basınç ile (Jalanapurkar vd., 2015) ve B) Yakıt Püskürtme Zamanı ile (Lim & Iida, 2015) Değişimi

Şekil 8(a)'da NO<sub>x</sub> emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada DME10, DME15 ve DME20 olmak üzere üç farklı yakıt karışımı kullanılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi dizel yakıtına DME katılması NO<sub>x</sub> emisyonunun bir miktar azalmasını sağlamıştır. Bu durum DME'in buharlaşma gizli ısısının yüksek ve ısıl değerinin düşük olması sebebiyle yanma sıcaklığını düşürmesinden kaynaklanmaktadır (Jalanapurkar vd., 2015). Şekil 8(b)'de dizel yakıtı, DME ve dizel-DME karışımları için NO<sub>x</sub> emisyonunun yakıt püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi saf DME dizel yakıtına göre biraz yüksek NO<sub>x</sub> değerleri verirken DME karışımları NO<sub>x</sub> emisyonunun bir miktar azalmasını sağlamıştır. DME saf olarak kullanıldığında bazı yakıt özellikleri sayesinde yanma sıcaklığını artırması ve içeriğindeki oksijen nedeniyle NO<sub>x</sub> emisyonu artmaktadır. Diğer taraftan, DME dizel yakıtına katıldığında ısıl değeri düşük ve buharlaşma gizli ısısı yüksek olduğundan yanma sıcaklığını düşürerek NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmaktadır. Şekilden görülen diğer bir durum ise püskürtme zamanı geciktirildikçe yanma işleminin genişleme sürecine sarkması sonucu yanma sıcaklığının düşmesi nedeniyle NO<sub>x</sub> emisyonunun azalmasıdır (Lim & Iida, 2015).



Şekil 9. NO<sub>x</sub> Emisyonunun Dizel Yakıtı ve Dizel-DME Karışımları için A) EGR Oranı ile (Lamani vd., 2017) ve B) Motor Yüğü ile (Prabhakaran vd., 2015) Değişimi

Şekil 9(a)'da NO<sub>x</sub> emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için EGR oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME karışımları kullanıldığında NO<sub>x</sub> emisyonu bir miktar artmıştır. NO<sub>x</sub> oluşumu yanma odasındaki bölgesel sıcaklıklara, reaksiyon süresine ve oksijen miktarına bağlı olarak değişmektedir. DME yüksek setan sayısı sayesinde daha erken tutuşma sağlayarak yanma sıcaklığını artırdığından ve içeriğinde oksijen bulunması nedeniyle NO<sub>x</sub> emisyonunu artırmaktadır. Diğer taraftan EGR oranının artması yanma odasındaki oksijen miktarını düşürdüğünden NO<sub>x</sub> emisyonu azalmaktadır (Lamani vd., 2017). Şekil 9(b)'de NO<sub>x</sub> emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME10 karışımı kullanıldığında NO<sub>x</sub> emisyonu dizel yakıtına göre bir miktar artarken DME20 karışımı kullanıldığında genelde dizel yakıtından daha düşük NO<sub>x</sub> değerleri elde edilmiştir. Bu durum DME10 karışımı kullanıldığında DME'in içeriğindeki oksijen sayesinde yanma sıcaklığının artmasından DME20 karışımı kullanıldığında ise DME'in gizli buharlaşma ısısı nedeniyle yanma sıcaklığının azalmasından kaynaklanmaktadır (Prabhakaran vd., 2015).

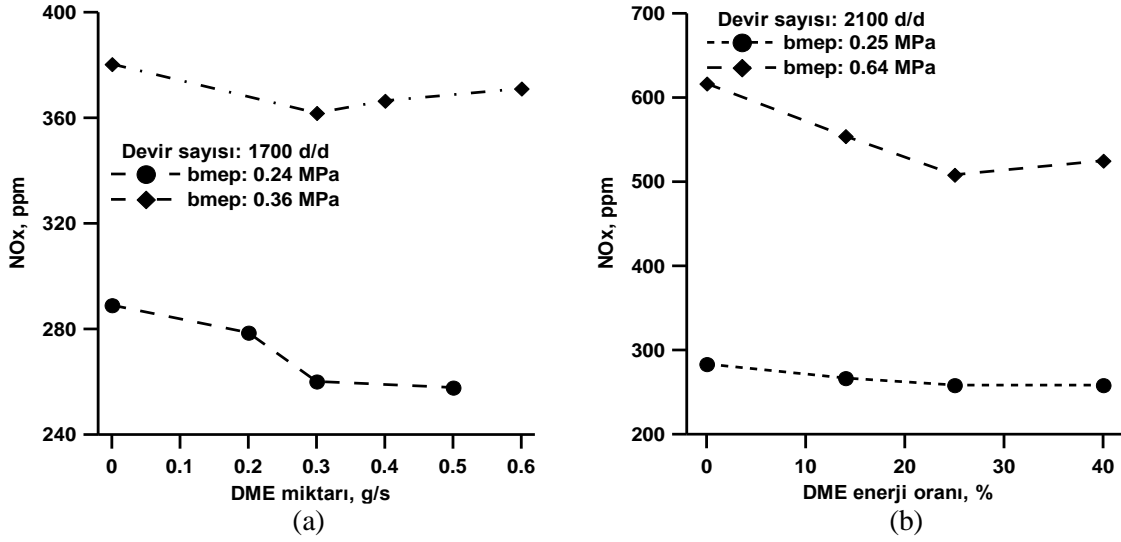


Şekil 10. NO<sub>x</sub> Emisyonunun Dizel Yakıtı ve Dizel-DME Karışımları için A) Ortalama Efektif Basınç ile (Ying vd., 2006) ve B) Motor Yükü ile (Ambekar & Hole, 2018) Değişimi

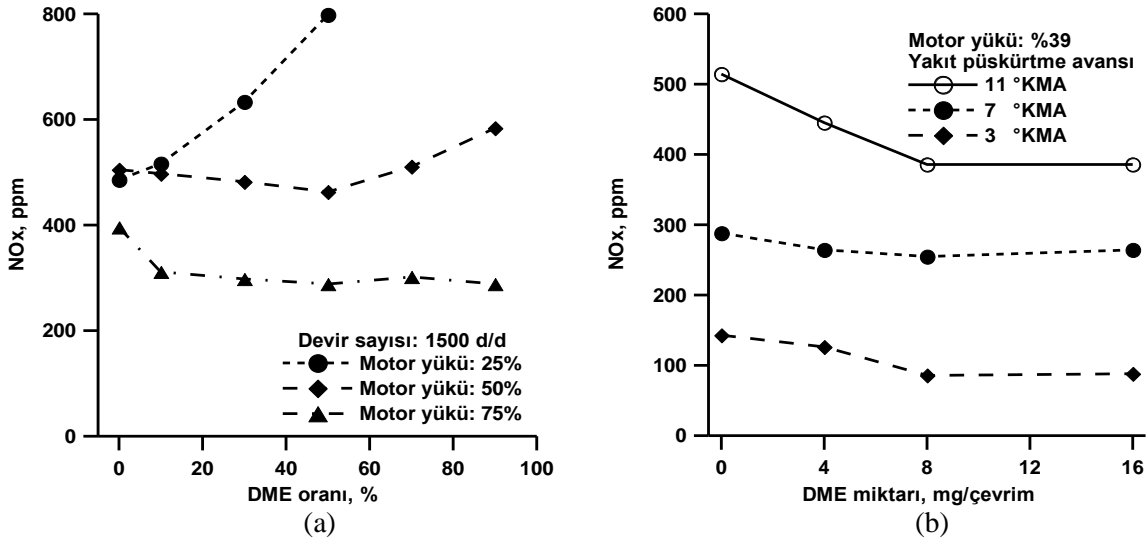
Şekil 10(a)'da NO<sub>x</sub> emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME karışımları dizel yakıtına göre daha düşük NO<sub>x</sub> değerleri vermiştir. DME yüksek setan sayısına ve düşük tutuşma sıcaklığına sahip olduğu için tutuşma gecikmesini kısaltmakta ve ilk yanma fazı kısa sürdüğünden yanma sıcaklığı düşük olmaktadır. Bu ise DME karışımları kullanıldığında daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonu değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Diğer taraftan, DME'in elastisite modülü düşük olduğundan DME karışımları kullanıldığında püskürtme zamanı geciktirilmekte ve yanma işlemi genişleme sürecine sarktığından yanma sıcaklığı düşmekte bu ise NO<sub>x</sub> emisyonunun azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Ying vd., 2006). Şekil 10(b)'de NO<sub>x</sub> emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME karışımları dizel yakıtına göre biraz daha yüksek NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri vermiş ve karışımdaki DME oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonu da artmıştır. Bu durum DME'in yanmayı iyileştirici yakıt özellikleri sayesinde yanma sıcaklığını artırmasından ve içeriğinde oksijen bulunmasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, motor yükü arttıkça silindire püskürtülen yakıt miktarının artması yanma sıcaklığını artırarak NO<sub>x</sub> emisyonunun artmasına neden olmaktadır (Ambekar & Hole, 2018).

Şekil 11(a)'da NO<sub>x</sub> emisyonunun iki farklı ortalama efektif basınç değerinde ve 1700 d/d devir sayısında dizel-DME çift yakıtlı motor için DME miktarı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME çift yakıtlı çalışma durumunda NO<sub>x</sub> emisyonu bir miktar azalmıştır. Bu durum DME'in yanma sıcaklığını düşüren etkilerinden kaynaklanmaktadır (Wang vd., 2015). Şekil 11(b)'de NO<sub>x</sub> emisyonunun iki farklı ortalama efektif basınç değerinde ve 2100 d/d devir sayısında dizel-DME çift yakıtlı motor için DME enerji oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME çift yakıtlı çalışma durumunda NO<sub>x</sub> emisyonu bir miktar azalmıştır. NO<sub>x</sub> emisyonu oluşumu kullanılan yakıtın özelliklerine ve yanma işlemine bağlı olup genellikle yüksek yanma sıcaklığında ve yanma odasındaki oksijen miktarı arttığında artar. Bu nedenle DME oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonu azalma eğilimi göstermiştir. Diğer taraftan, DME oranı arttıkça silindire gönderilen EGR oranı artırıldığından yanma odasındaki oksijen miktarı ve yanma sıcaklığı azalarak NO<sub>x</sub> emisyonu oluşumunu azaltmaktadır (Wang vd., 2013).





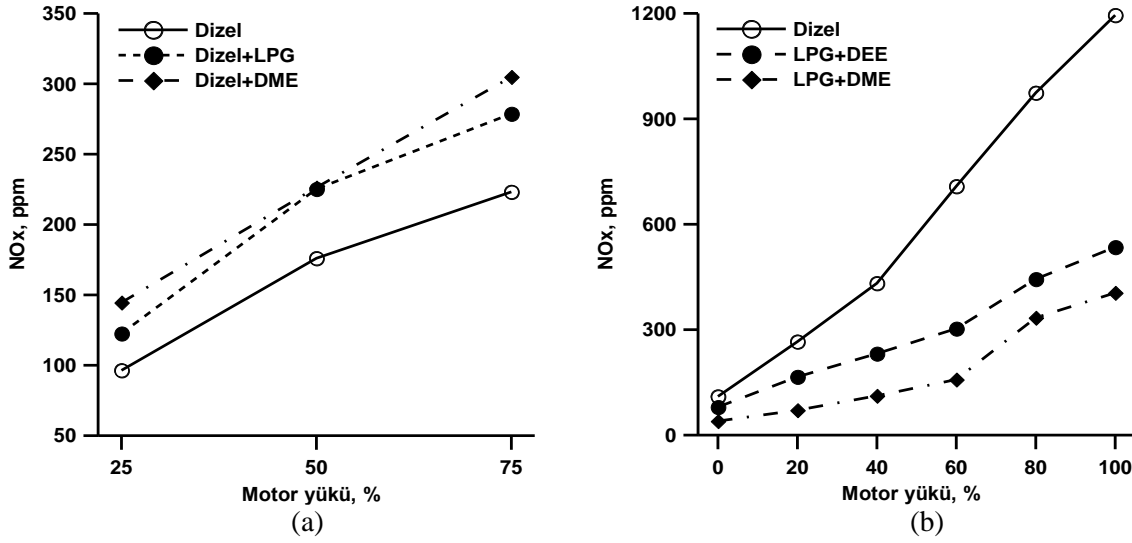
Şekil 11. NOx Emisyonunun Dizel-DME Çift Yakıtlı Motor için A) DME Miktarı ile (Wang vd., 2015) ve B) DME Enerji Oranı ile (Wang vd., 2013) Değişimi



Şekil 12. NOx Emisyonunun Dizel-DME Çift Yakıtlı Motor için A) DME Oranı ile (Theinnoi vd., 2017) ve B) DME Miktarı ile (Wang vd., 2014) Değişimi

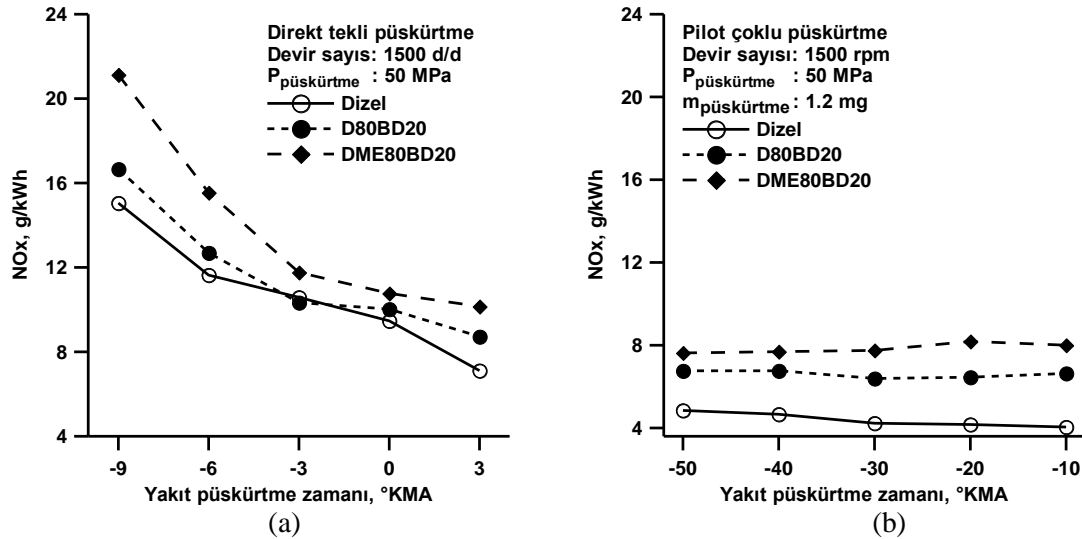
Şekil 12(a)'da NOx emisyonunun farklı motor yüklerinde ve 1500 d/d devir sayısında dizel-DME çift yakıtlı motor için DME oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME çift yakıtla çalışma durumunda özellikle %25 ve %50 motor yükü değerlerinde DME katkısı arttıkça NOx emisyonu bir miktar artmıştır. NOx emisyonu oluşumu temel olarak yüksek yanma sıcaklığına ve yanma odasındaki oksijen miktarına bağlıdır. DME'in yanmayı iyileştirici özellikleri sayesinde yanma sıcaklığının artması ve içeriğinde oksijen bulunması NOx emisyonunun artmasına neden olmaktadır (Theinnoi vd., 2017). Şekil 12(b)'de NOx emisyonunun %39 motor yükünde ve farklı yakıt püskürtme avansı değerlerinde dizel-DME çift yakıtlı motor için DME miktarı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DME çift yakıtla çalışma durumunda NOx emisyonu DME oranının artmasıyla azalmıştır. Bu durum DME'in yanma sıcaklığını düşürmesinden ve DME oranı arttıkça EGR oranının artırılması sonucu yanma odasındaki oksijen miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır (Wang vd., 2014). Şekil 13(a)'da NOx emisyonunun dizel yakıtı, dizel-LPG karışımı ve dizel-DME karışımı için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-LPG ve dizel-DME karışımları kullanıldığında NOx emisyonu dizel yakıtına kıyasla bir miktar artmıştır. Bu durum LPG ve DME'in daha yüksek yanma sıcaklıkları vermesinden ve DME'in içerinde oksijen bulunmasından kaynaklanmaktadır (Khunaphan vd., 2013). Şekil 13(b)'de NOx emisyonunun dizel yakıtı, dizel-DEE karışımı ve dizel-DME karışımı için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dizel-DEE ve dizel-DME karışımları kullanıldığında özellikle orta ve yüksek motor yüklerinde NOx emisyonu dizel yakıtına kıyasla önemli ölçüde azalmıştır. Bu durum DEE ve DME'in yüksek gizli

buharlaştırma ısıları ve düşük ısı değerleri nedeniyle yanma sıcaklığını düşürmesinden kaynaklanmaktadır (El-Hagar, 2014).



Şekil 13. NOx Emisyonunun A) Dizel Yakıtı, Dizel-LPG Karışımı ve Dizel-DME Karışımı için Motor Yüğü ile (Khunaphan vd., 2013) ve B) Dizel Yakıtı, LPG-DEE Karışımı ve LPG-DME Karışımı için Motor Yüğü ile (El-Hagar, 2014) Değişimi

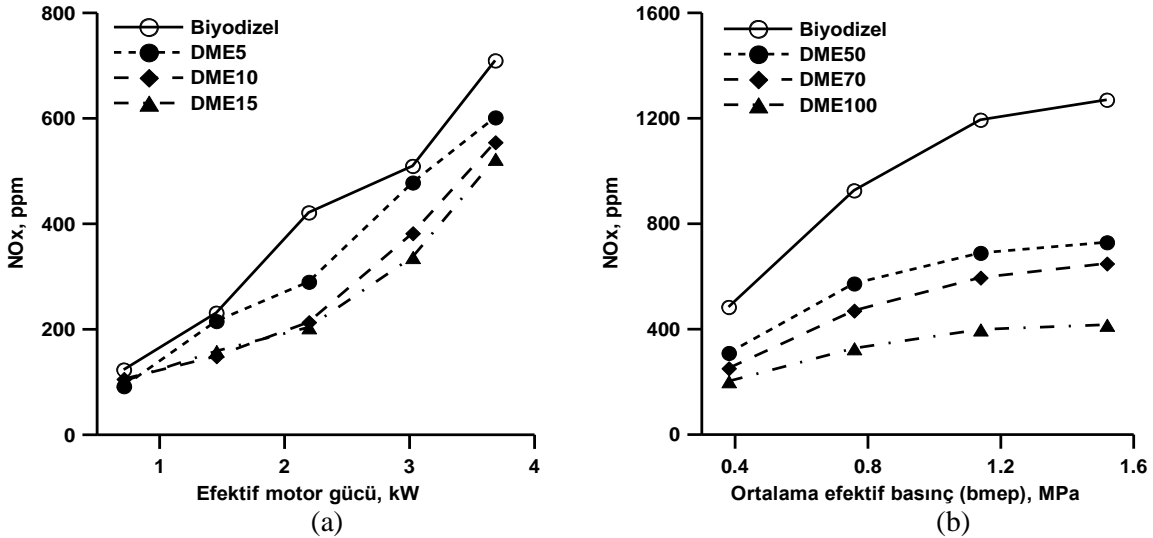
Şekil 14(a) ve (b)'de NOx emisyonunun dizel yakıtı, dizel-biyodizel (BD80D20) karışımı ve biyodizel-DME (DME80BD20) karışımı için direkt tekli püskürtme ve pilot çoklu püskürtme durumunda 1500 d/d devir sayısında değişimi verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi hem direkt tekli püskürtme hem de pilot çoklu püskürtme durumunda BD80D20 ve DME80BD20 karışımları dizel yakıtına göre daha yüksek NOx emisyonu değerleri vermiş pilot püskürtme durumunda NOx emisyonu değerleri tüm yakıtlar için önemli ölçüde azalmıştır. BD80D20 ve DME80BD20 karışımları kullanıldığında NOx emisyonundaki artış biyodizel ve DME yakıtlarının içeriğinde oksijen bulunmasından ve bu yakıtların yanma sıcaklığını artırmasından kaynaklanmaktadır (Roh vd., 2015).



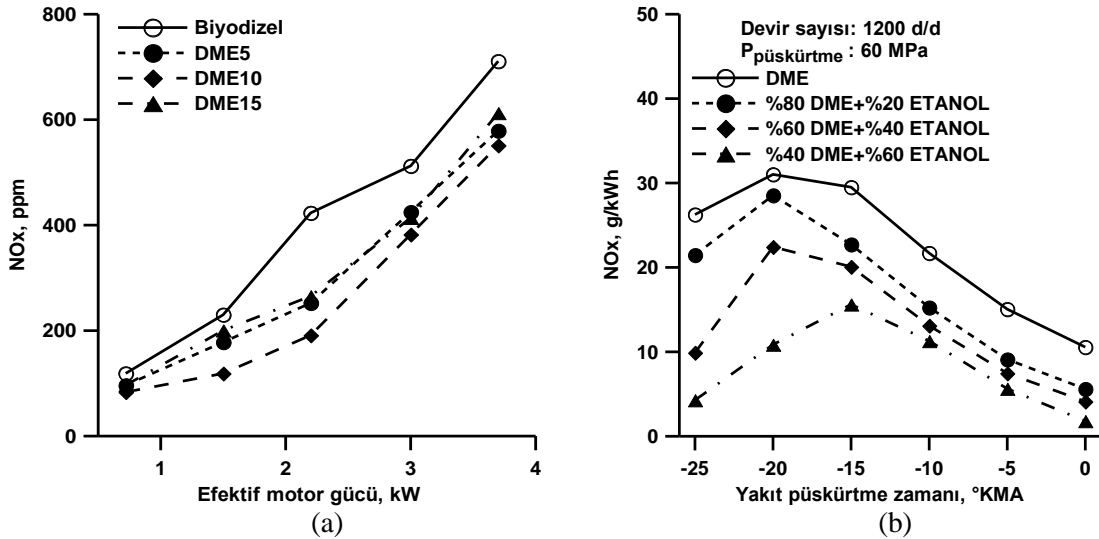
Şekil 14. NOx Emisyonunun Dizel Yakıtı, Dizel-Biyodizel Karışımı ve Biyodizel-DME Karışımı için A) Direkt Tekli Püskürtme ile ve B) Pilot Çoklu Püskürtme ile Değişimi (Roh vd., 2015)

Şekil 15(a)'da NOx emisyonunun biyodizel yakıtı ve biyodizel-DME karışımları için efektif motor gücü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi motor gücü artırıldıkça NOx emisyonu değerleri artmış ve biyodizel-DME karışımları kullanıldığında karışımdaki DME oranı arttıkça NOx emisyonu azalmıştır. NOx emisyonu oluşumu; yanma sıcaklığına, yanma odasındaki oksijen miktarına ve reaksiyon süresine bağlı olarak değişmektedir. DME'in buharlaştırma gizli ısısının yüksek olması nedeniyle oluşan soğutucu etki ve ısı değerinin düşük olması yanma sıcaklıklarını düşürerek NOx emisyonunu azaltmaktadır. Biyodizel yakıtına kıyasla DME5, DME10 ve

DME15 karışımları için NO<sub>x</sub> emisyonundaki azalma sırasıyla %17, %28 ve %35 civarında olmuştur (Loganathan vd., 2013). Şekil 15(b)'de NO<sub>x</sub> emisyonunun biyodizel yakıtı ve biyodizel-DME karışımları için ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ortalama efektif basınç artırıldıkça artan yanma sıcaklığı nedeniyle NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri artmış ve biyodizel-DME karışımları kullanıldığında karışımdaki DME oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonu azalmıştır. 1.52 MPa ortalama efektif basınç değerinde NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri biyodizel yakıtı, DME50, DME70 ve DME100 karışımları için sırasıyla 1266 ppm, 723 ppm, 649 ppm ve 413 ppm olarak elde edilmiş ve biyodizel yakıtı ile karşılaştırıldığında NO<sub>x</sub> emisyonu DME50, DME70 ve DME100 karışımları kullanıldığında %43, %49 ve %67 oranlarında azalmıştır. DME biyodizel yakıtına katıldığında püskürtme özelliklerini iyileştirerek yanma odasında daha homojen bir karışım oluşturup yüksek sıcaklıklı yanma bölgelerini azaltmakta ve DME'in yüksek buharlaşma gizli ısıyı yanma odasından daha yüksek miktarda ısı çekilmesini sağlayarak yanma sıcaklığını düşürüp NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmaktadır (Hou vd., 2014).



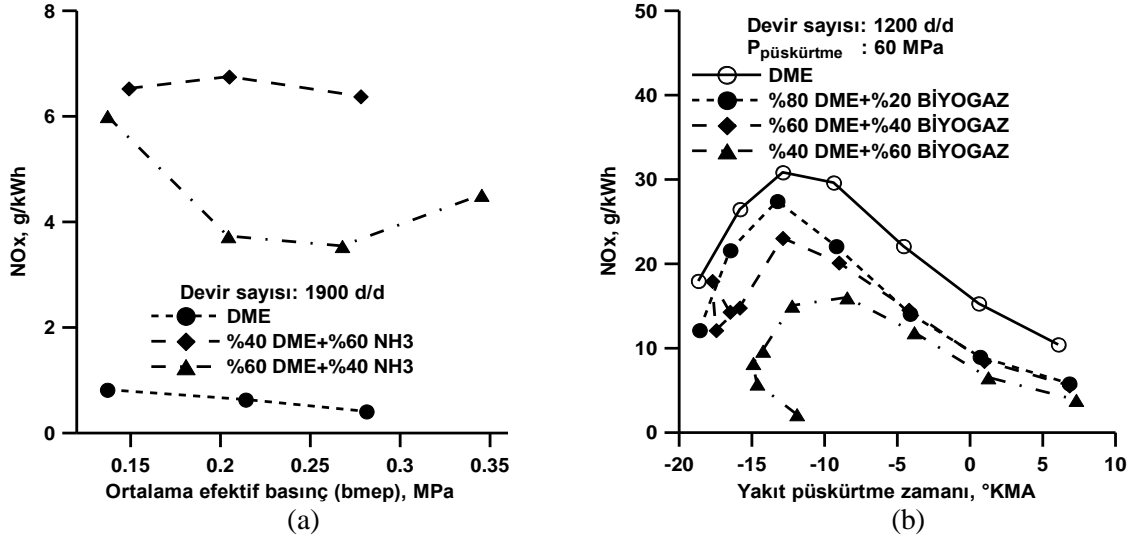
Şekil 15. NO<sub>x</sub> Emisyonunun Biyodizel Yakıtı ve Biyodizel-DME Karışımları için A) Efektif Motor Gücü ile (Loganathan vd., 2013) ve B) Ortalama Efektif Basınç ile (Hou vd., 2014) Değişimi



Şekil 16. NO<sub>x</sub> Emisyonunun A) Biyodizel Yakıtı ve Biyodizel-DME Karışımları için Efektif Motor Gücü ile (Loganathan vd., 2012) ve B) DME ve DME-Etanol Karışımları için Yakıt Püskürtme Zamanı ile (Park vd., 2016) Değişimi

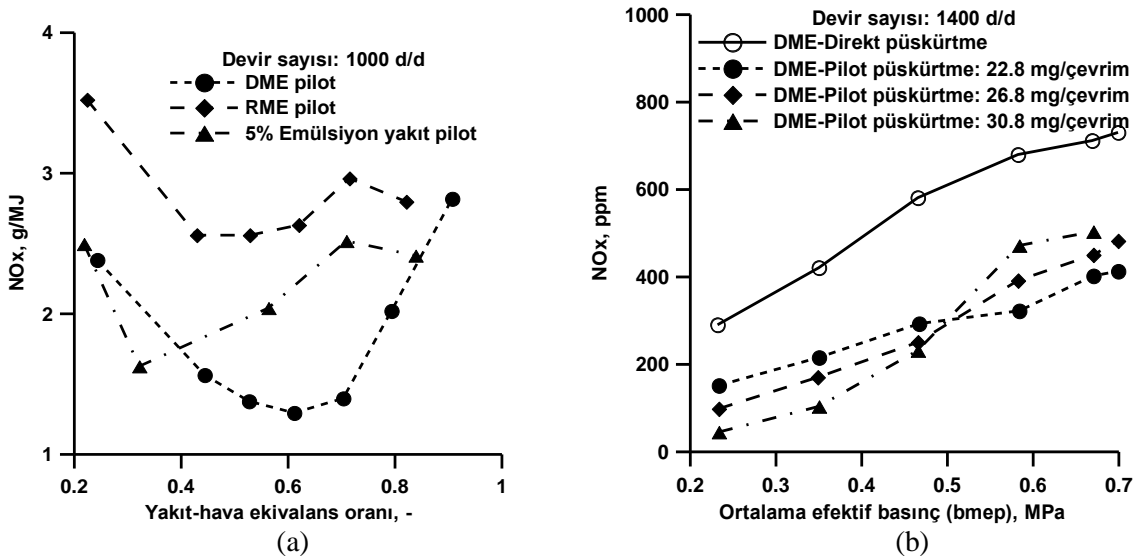
Şekil 16(a)'da NO<sub>x</sub> emisyonunun biyodizel yakıtı ve biyodizel-DME karışımları için efektif motor gücü ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi motor gücü artırıldıkça yanma sıcaklığının artması sebebiyle NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri artmış ve biyodizel-DME karışımları kullanıldığında karışımdaki DME oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonu azalmıştır. NO<sub>x</sub> emisyonu oluşumu; yanma sıcaklığına, yanma odasındaki oksijen miktarına ve reaksiyon süresine bağlı olarak değişmektedir. DME'in buharlaşma gizli ısısının yüksek olması nedeniyle oluşan

soğutucu etki ve ısı değerinin düşük olması yanma sıcaklıklarını düşürerek NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmaktadır. Biyodizel yakıtına kıyasla DME5, DME10 ve DME15 karışımları için NO<sub>x</sub> emisyonundaki azalma sırasıyla %14, %10 ve %7 civarlarında olmuştur (Loganathan vd., 2012). Şekil 16(b)'de NO<sub>x</sub> emisyonunun DME ve DME-etanol karışımları için yakıt püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME-etanol karışımları saf DME yakıtına göre daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri vermiş ve karışımdaki etanol oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonu giderek azalmıştır. NO<sub>x</sub> emisyonu oluşumu yanma sıcaklığının artmasına ve reaksiyon süresinin uzamasına bağlı olarak artmaktadır. Etanolün yüksek buharlaşma gizli ısı ve düşük ısı değeri nedeniyle yanma sıcaklığını düşürmesi NO<sub>x</sub> emisyonunun azalmasını sağlamaktadır (Park vd., 2016).



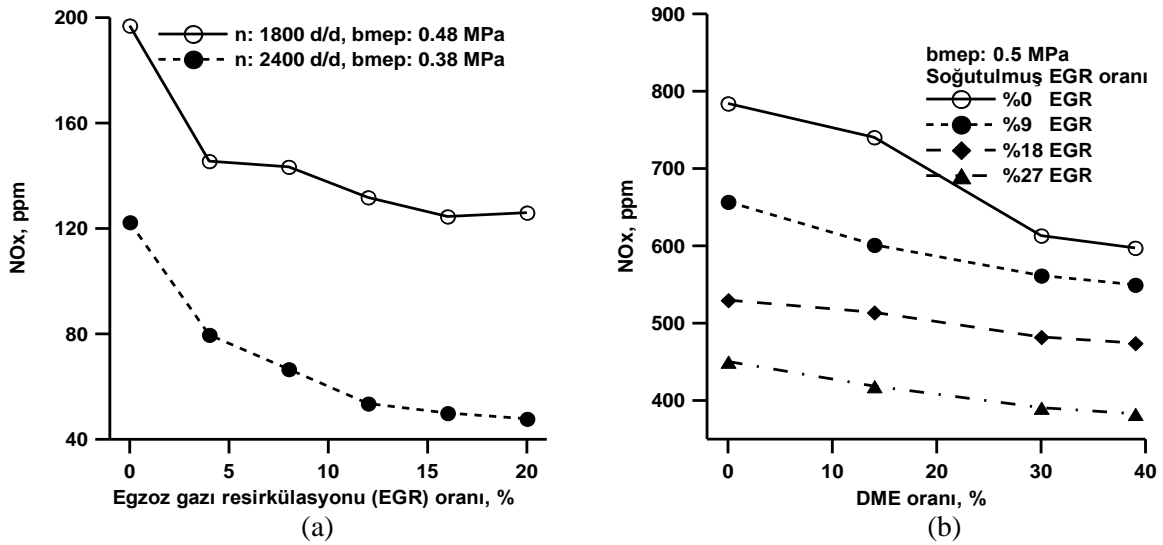
Şekil 17. NO<sub>x</sub> Emisyonunun A) DME ve DME-NH<sub>3</sub> Karışımları için Ortalama Efektif Basınç ile (Ryu vd., 2014) ve B) DME ve DME-Biyogaz Karışımları için Yakıt Püskürtme Zamanı ile (Abhishek vd., 2017) Değişimi

Şekil 17(a)'da NO<sub>x</sub> emisyonunun DME ve DME-NH<sub>3</sub> (amonyak) karışımları için 1900 d/d devir sayısında ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME ile kıyaslandığında DME-NH<sub>3</sub> karışımları kullanıldığında NO<sub>x</sub> emisyonu önemli oranda artmıştır. Bu durumun amonyağın yapısında bulunan azotun ve DME'in içeriğinde bulunan oksijenin NO<sub>x</sub> emisyonu oluşumunu artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Ryu vd., 2014). Şekil 17(b)'de NO<sub>x</sub> emisyonunun DME ve DME-biyogaz karışımları için yakıt püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME ile kıyaslandığında DME-biyogaz karışımları kullanıldığında NO<sub>x</sub> emisyonunda azalma sağlanmış ve karışımdaki biyogaz oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonu daha da azalmıştır. Bu durumun biyogazın içerisinde bulunan CO<sub>2</sub> gazının yanma sıcaklığını ve yanma odasındaki oksijen miktarını düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Abhishek vd., 2017).



Şekil 18. NO<sub>x</sub> Emisyonunun A) DME, RME ve %5 Emülsiyon Pilot Yakıtları için Yakıt-Hava Ekivalans Oranı ile (Namasivayam vd., 2010) ve B) DME Direkt ve DME Pilot Enjeksiyon için Ortalama Efektif Basınç ile (Ying vd., 2010) Değişimi

Şekil 18(a)'da NO<sub>x</sub> emisyonunun DME, RME ve %5 emülsiyon pilot yakıtları için 1000d/d devir sayısında yakıt-hava ekivalans oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi %5 emülsiyon yakıtının pilot enjeksiyonu RME pilot enjeksiyonuna göre daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonu üretmiş DME'in pilot enjeksiyonu ise ekivalans oranının 0.4 değerinden sonra en düşük NO<sub>x</sub> emisyonu değerlerini vermiştir. %5 emülsiyon yakıtı kullanıldığında yanma sırasında oluşan mikro patlamalar esnasında suyun buharlaşması yanma sıcaklığını düşürerek NO<sub>x</sub> emisyonunun azalmasını sağlamaktadır. Diğer taraftan, DME'in yüksek buharlaşma gizli ısısı sayesinde oluşan soğutucu etkisi ve nispeten düşük yanma hızı yanma sıcaklığını düşürerek düşük NO<sub>x</sub> emisyonu değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır (Namasivayam vd., 2010). Şekil 18(b)'de 1400 d/d devir sayısında DME'in direkt püskürtme (enjeksiyon) ve pilot püskürtme durumları için NO<sub>x</sub> emisyonunun ortalama efektif basınç ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DME'in pilot enjeksiyonu durumlarında direkt enjeksiyona göre NO<sub>x</sub> emisyonu önemli ölçüde azalmış ve NO<sub>x</sub> emisyonunda %29.2-48 arasında değişen oranlarda azalma elde edilmiştir. Bu durum pilot enjeksiyon durumunda daha homojen bir karışım elde edilmesi sonucu yanma odasında yüksek sıcaklıklı yerel bölgelerin azalmasından kaynaklanmaktadır (Ying vd., 2010).



Şekil 19. NO<sub>x</sub> Emisyonunun A) Farklı Motor Yüğü ve Devirleri için EGR Oranı ile (Park & Lee, 2013) ve B) Farklı EGR Oranları için DME Oranı ile (Zhao vd., 2014) Değişimi

Şekil 19(a)'da NO<sub>x</sub> emisyonunun farklı ortalama efektif basınç ve devir sayıları için EGR oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi EGR oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonu önemli oranda azalmış ve %20 EGR oranında NO<sub>x</sub> emisyonunda %40 oranında azalma elde edilmiştir. Bu durum EGR oranı arttıkça yanma odasındaki oksijen miktarının azalmasından ve yanma sıcaklığının düşmesinden kaynaklanmaktadır (Park & Lee, 2013). Şekil 19(b)'de NO<sub>x</sub> emisyonunun farklı EGR oranları için DME oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi EGR oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonu önemli ölçüde azalmaktadır. Diğer taraftan, DME oranının artırılması da NO<sub>x</sub> emisyonunun bir miktar azalmasını sağlamıştır. Bilindiği gibi, NO<sub>x</sub> emisyonu yanma sıcaklığına, yanma odasındaki oksijen miktarına ve reaksiyon süresine bağlı olarak değişmekte olup yüksek yanma sıcaklığı ve yüksek oksijen konsantrasyonu NO<sub>x</sub> emisyonu oluşumunu artırmaktadır. EGR oranının artması yanma odasındaki oksijen miktarını ve yanma sıcaklığını düşürerek NO<sub>x</sub> emisyonunun azalmasını sağlamaktadır. Diğer taraftan, DME oranının artırılması yanma odası içerisinde daha homojen bir karışım oluşturarak yüksek sıcaklıklı ve yüksek oksijen içerikli yerel bölgelerin azalmasına neden olmakta ve NO<sub>x</sub> emisyonu azalmaktadır (Zhao vd., 2014).

## SONUÇLAR

Bu derleme çalışmasında dizel motorlarda DME kullanımının NO<sub>x</sub> emisyonları üzerindeki etkileri literatüre dayalı olarak incelenmiştir. Yapılan derleme çalışması sonucunda aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir.

- Bazı çalışmalarda DME'in saf olarak kullanıldığında içeriğindeki oksijen sayesinde dizel yakıtına kıyasla daha yüksek NO<sub>x</sub> emisyonu verdiği tespit edilmekle birlikte bazı çalışmalarda DME'in düşük ısıl değeri, yüksek buharlaşma gizli ısısı, kısa tutuşma gecikmesi süresi, tutuşma gecikmesi süresinde daha az yakıt püskürtülmesi ve daha az yakıt yanması sayesinde dizel yakıtına göre daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonu sağladığı da tespit edilmiştir. Saf olarak kullanıldığında DME'in NO<sub>x</sub> emisyonlarında %50'ye varan azalma sağladığı literatürdeki çalışmalarda bildirilmiştir.

- DME, düşük yoğunluk, düşük viskozite ve %34,8'lik oksijen içeriği gibi olumlu yakıt özellikleri sayesinde dizel yakıtı veya biyodizel yakıtı ile birlikte kullanıldığında püskürtme ve yanma karakteristiklerini iyileştirerek genelde NOx emisyonunun azalmasını sağlamaktadır. DME'in dizel veya biyodizel yakıtları ile birlikte kullanıldığında %15 kadar olan düşük karışım oranlarında NOx emisyonunda %15'e kadar azalma sağlarken %50 veya daha yüksek karışım oranlarında kullanıldığında NOx emisyonunda %50'ye kadar azalma sağladığı bildirilmiştir.
- DME'in etanol, LPG ve biyogaz gibi alternatif yakıtlarla birlikte kullanılmasının NOx emisyonunda önemli oranda azalma sağladığı bildirilirken amonyak ile birlikte kullanılmasının NOx emisyonunda artışa neden olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, DME'in pilot enjeksiyonu durumunda direkt enjeksiyona kıyasla NOx emisyonunda %29-48 arasında değişen oranlarda azalma elde edildiği bildirilmiştir.
- DME'in saf veya diğer yakıtlarla birlikte kullanılması durumunda egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) oranının artırılması yanma sıcaklığını ve yanma odasındaki oksijen miktarını azaltarak NOx emisyonunun önemli oranda azalmasını sağlamaktadır. Literatürdeki çalışmalarda, %20 oranında EGR uygulanması durumunda NOx emisyonunda %40'a varan azalma elde edildiği bildirilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Abhishek, Rahul K., Santosh K. & Martha O. (2017). Blending impacts of biogas and dimethyl ether (DME) on compressed ignition engine. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(4), 2174-2177.
- Alam M. & Kajitani S. (2001-December). DME as an alternative fuel for direct injection diesel engine. In 2001 4th International Conference on Mechanical Engineering (pp. 87-92).
- Ambekar Y. & Hole, J. A. (2018). Preliminary optimization of duel fuel engine using dimethyl ether premixed combustion. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(10), 274-278.
- Arcoumanis C., Bae C., Crookes R. & Kinoshita E. (2008). The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review. *Fuel*, 87(7), 1014-1030.
- Azizi Z., Rezaeimanesh M., Tohidian T. & Rahimpour M. R. (2014). Dimethyl ether: A review of technologies and production challenges. *Chemical Engineering and Processing*, 82, 150-172.
- Baskaran R. (2015). Analysis on synthesis, storage & combustion characteristics of DME as fuel in CI engines. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 3(1), 133-140.
- Benajes J., Novella R., Pastor J.M., Hernández-López A. & Kokjohn S. L. (2018a). Computational optimization of the combustion system of a heavy duty direct injection diesel engine operating with dimethyl-ether. *Fuel*, 218, 127-139.
- Benajes J., Novella R., Pastor J.M., Hernández-López A. & Kokjohn S.L. (2018b). Computational optimization of a combustion system for a stoichiometric DME fueled compression ignition engine. *Fuel*, 223, 20-31.
- Bogdan J., Nicolae B., Călin I. & Vlad B. N. (2017). Study of emissions for a compression ignition engine fueled with a mix of DME and diesel. *Materials Science and Engineering*, 252, 1-9.
- Chapman E. M. & Boehman A. L. (2008). Pilot ignited premixed combustion of dimethyl ether in a turbodiesel engine. *Fuel Processing Technology*, 89, 1262-1271.
- Chen Z., Konno M. & Kajitani S. (2000). Performance and emissions of DI compression ignition engines fueled with dimethyl ether. *JSME International Journal*, 43(1), 82-88.
- Deepak K. M., Karthick M., Dineshbabu D., Srikanth P. & Ramachandran M. G. (2015). Investigation on the effect of dimethyl ether in compression ignition engine. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(2), 401-407.
- Duan J., Sun Y., Yang Z. & Sun Z. (2012, December). Combustion and emissions characteristics of diesel engine operating on composite combustion mode of DME and diesel. In 2012 Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (pp. 463-466).
- El-Hagar M. M. E-G. (2014). Effect of diethyl ether and dimethyl ether with liquefied petroleum gas on combustion and emissions characteristics of diesel engine. *International Journal of Computer Science and Engineering*, 2(3), 193-198.

- Genbao L., Jianming C., Minglong L., Yuhua Q. & Zhaoyang C. (2012). Experimental study on the size distribution characteristics of spray droplets of DME/diesel blended fuels. *Fuel Processing Technology*, 104, 352-355.
- Geng P., Cao E., Tan Q. & Wie L. (2017). Effects of alternative fuels on the combustion characteristics and emission products from diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 523-534.
- Guangxin G., Zhulin Y., Apeng Z., Shenghua L. & Yanju W. (2013). Effects of fuel temperature on injection process and combustion of dimethyl ether engine. *Journal of Energy Resources Technology*, 135, 1-5.
- Hewu W. & Longbao Z. (2017). Performance of a direct injection diesel engine fuelled with a dimethyl ether/diesel blend. *Journal of Automobile Engineering*, 819-824.
- Hou J., Wen Z., Jiang Z. & Qiao X. (2014). Study on combustion and emissions of a turbocharged compression ignition engine fueled with dimethyl ether and biodiesel blends. *Journal of the Energy Institute*, 87, 102-113.
- Huang Z., Qiao X., Zhang W., Wu J. & Zhang J. (2009). Dimethyl ether as alternative fuel for CI engine and vehicle. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 3(1), 99-108.
- Inayat A., Ghenai C., Naqvi M., Ammar M., Ayoub M. & Hussin M. N. B. (2017). Parametric study for production of dimethyl ether (DME) as a fuel from palm wastes. *Energy Procedia*, 105, 1242-1249.
- Jalanapurkar M., Patel K., Patel T., Rathod G. & Granipa H. (2015). A literature review on combine effect of dimethyl ether (DME) as an additive & the injection pressure on the performance & emission of 4 stroke C.I engine. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2(1), 262-266.
- Jang J. & Bae C. (2009). Effects of valve events on the engine efficiency in a homogeneous charge compression ignition engine fueled by dimethyl ether. *Fuel*, 88, 1228-1234.
- Jeon J., Kwon S., Park Y.H., Oh Y. & Park S. (2014). Visualizations of combustion and fuel/air mixture formation processes in a single cylinder engine fueled with DME. *Applied Energy*, 113, 294-301.
- Kajitani S. (2004). A study of low compression ratio diesel engines operated with neat dimethyl ether (DME). *JSME TED Newsletter*, 42, 1-14.
- Kajitani S. & Chen Z. (2003). Fundamental research on next generation fuel (dimethyl ether) engines. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 62, 133-144.
- Khunaphan S., Hartley U. W. & Theinnoi K. (2013). Characterization and potential of dimethyl ether (DME) as dual fuel combustion in a compression ignition engine. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 2(3), 79-85.
- Kim H. J. & Park S. H. (2016). Optimization study on exhaust emissions and fuel consumption in a dimethyl ether (DME) fueled diesel engine. *Fuel*, 182, 541-549.
- Kim H. J., Park S.H., Lee K. S. & Lee C. S. (2011). A study of spray strategies on improvement of engine performance and emissions reduction characteristics in a DME fueled diesel engine. *Energy*, 36, 1802-1813.
- Kim H. J., Park S. W. & Lee C. S. (2012). Numerical and experimental study on the combustion and emission characteristics of a dimethyl ether (DME) fueled compression ignition engine. *Oil & Gas Science and Technology*, 67(3), 479-489.
- Kowalewicz A. & Wojtyniak M. (2005). Alternative fuels and their application to combustion engines. *Journal of Automobile Engineering*, 219, 103-125.
- Kropiwnicki J., Dominiczak P. & Kneba Z. (2017). Analysis of the possibilities of using of DME fuel in motor boat drive systems. *Combustion Engines*, 171(4), 74-80.
- Lamani V. T., Yadav A. K. & Narayanappa K. G. (2017). Influence of low-temperature combustion and dimethyl ether-diesel blends on performance, combustion, and emission characteristics of common rail diesel engine: a CFD study. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 15500-15509.
- Lecksiwilai N., Gheewala S. H., Sagisaka M. & Yamaguchi K. (2016). Net energy ratio and life cycle greenhouse gases (GHG) assessment of bio-dimethyl ether (DME) produced from various agricultural residues in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 134, 523-531.

- Li G. (2011). Dimethyl ether (DME): a new alternative fuel for diesel vehicle. *Advanced Materials Research*, 156-157, 1014-1018.
- Lim O. T. & Iida N. (2015). A study on the spray and engine combustion characteristics of diesel-dimethyl ether fuel blends. *Journal of Automobile Engineering*, 229(6), 782-792.
- Loganathan M., Anbarasu A. & Velmurugan A. (2013). Emission characteristics of jatropha-ethanol and jatropha-dimethyl ether fuel blends on a DI diesel engine. *Journal of Mechanical Engineering*, 42(1), 38-46.
- Loganathan M., Anbarasu A. & Velmurugan A. (2012). Emission characteristics of jatropha-dimethyl ether fuel blends on a DI diesel engine. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 1(8), 28-32.
- Longbao Z., Hewu W. & Ying W. (2002-December). Experimental study on performances and combustion characteristics of DME powered vehicle. In 2002 Conference on Better Air Quality in Asian and Pacific Rim Cities (BAQ 2002) (pp. 1-6).
- Maji S., Ahmed S., Siddiqui W. A. & Kumar A. (2014). Impact of di-methyl ether (DME) as an additive fuel for compression ignition engine in reduction of urban air pollution. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(11), 17221-17228.
- Maji S., Ahmed S., Siddiqui W. A., Aggarwal S. & Kumar A. (2015). Impact of di-methyl ether (DME) as an additive fuel for compression ignition engine in reduction of urban air pollution. *American Journal of Environmental Protection*, 3(2), 48-52.
- Mohan B., Yang W., Yu W. & Tay K. L. (2017). Numerical analysis of spray characteristics of dimethyl ether and diethyl ether fuel. *Applied Energy*, 185, 1403-1410.
- Namasivayam A. M., Korakianitis T., Crookes R. J., Bob-Manuel K. D. H. & Olsen J. (2010). Biodiesel, emulsified biodiesel and dimethyl ether as pilot fuels for natural gas fuelled engines. *Applied Energy*, 87, 769-778.
- Oda Y., Osafune Y., Ueda H. & Fujimura K. (2004). Clean combustion technology in diesel engines operated with dimethyl ether. *Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review*, 40(6), 1-5.
- Park S. (2012). Optimization of combustion chamber geometry and engine operating conditions for compression ignition engines fueled with dimethyl ether. *Fuel*, 97, 61-71.
- Park S. H. & Lee C. S. (2013). Combustion performance and emission reduction characteristics of automotive DME engine system. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39, 147-168.
- Park S. H. & Lee C. S. (2014). Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel. *Energy Conversion and Management*, 86, 848-863.
- Park S. H., Kim H. J. & Lee C. S. (2010). Effects of dimethyl-ether (DME) spray behavior in the cylinder on the combustion and exhaust emissions characteristics of a high speed diesel engine. *Fuel Processing Technology*, 91, 504-513.
- Park S. H., Shin D. & Park J. (2016). Effect of ethanol fraction on the combustion and emission characteristics of a dimethyl ether-ethanol dual-fuel reactivity controlled compression ignition engine. *Applied Energy*, 182, 243-252.
- Park S. H., Yoon S. H., Cha J. and Lee C. S. (2014). Mixing effects of biogas and dimethyl ether (DME) on combustion and emission characteristics of DME fueled high-speed diesel engine. *Energy*, 66, 413-422.
- Patil K. R. & Thipse S. S. (2012). The potential of DME-diesel blends as an alternative fuel for CI engines. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2(10), 35-41.
- Prabhakaran B., Thennarasu P. & Karthick S. (2015). Performance and characteristics of a CI engine using DME (Dimethyl Ether). *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(2), 31-34.
- Roh H. G., Lee D. & Lee C. S. (2015). Impact of DME-biodiesel, diesel-biodiesel and diesel fuels on the combustion and emission reduction characteristics of a CI engine according to pilot and single injection strategies. *Journal of the Energy Institute*, 88, 376-385.
- Ryu K., Zacharakis-Jutz G. E. & Kong S.-C. (2014). Performance characteristics of compression- ignition engine using high concentration of ammonia mixed with dimethyl ether. *Applied Energy*, 113, 488-499.



- Semelsberger T. A., Borup R. L. & Grene H. L. (2006). Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. *Journal of Power Sources*, 156, 497-511.
- Sezer I. (2011). Thermodynamic, performance and emission investigation of a diesel engine running on dimethyl ether and diethyl ether. *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 1594-1603.
- Smolec R., Idzior M., Karpiuk W. & Kozak M. (2017). Assessment of the potential of dimethyl ether as an alternative fuel for compression ignition engines. *Combustion Engines*, 169(2), 181-186.
- Song J., Huang Z., Qiao X. & Wang W. (2004). Performance of a controllable premixed combustion engine fueled with dimethyl ether. *Energy Conversion and Management*, 45, 2223-2232.
- Suh H. K. & Lee C. S. (2008). Experimental and analytical study on the spray characteristics of dimethyl ether (DME) and diesel fuels within a common-rail injection system in a diesel engine. *Fuel*, 87, 925-932.
- Taghavifar H., Khalilarya S., Mirhasani S. & Jafarmadar S. (2014). Numerical energetic and exergetic analysis of CI diesel engine performance for different fuels of hydrogen, dimethyl ether, and diesel under various engine speeds. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 9515-9526.
- Teng H., McCandless J. C. & Scheneyer Jeffrey B. (2001). Thermochemical characteristics of dimethyl ether alternative fuel for compression-ignition. *Society of Automotive Engineers*, Paper no 2001-01-0154.
- Theinnoi K., Suksompong P. & Temwutthikun W. (2017). Engine performance of dual fuel operation with in-cylinder injected diesel fuels and in-port injected DME. *Energy Procedia*, 142, 461-467.
- Thomas G., Feng B., Veeraragavan A., Cleary M. J. & Drinnan N. (2014). Emissions from DME combustion in diesel engines and their implications on meeting future emission norms: A review. *Fuel Processing Technology*, 119, 286-304.
- Vispute K. M. & Pawar T. J. (2016). Study and prospects of di-methyl ether as an alternative fuel in C.I. engine: review. *International Journal of Trend in Research and Development*, 3(4), 134-138.
- Wang H. W., Zhou L. B., Jiang D. M. & Huang Z. H. (2000). Study on the performance and emissions of a compression ignition engine fuelled with dimethyl ether. *Journal of Automotive Engineering*, 214, 101-106.
- Wang Y., Xiao F., Zhao Y., Li D. & Lei X. (2015). Study on cycle-by-cycle variations in a diesel engine with dimethyl ether as port premixing fuel. *Applied Energy*, 143, 58-70.
- Wang Y., Zhao Y. & Yang Z. (2013). Dimethyl ether energy ratio effects in a dimethyl ether-diesel dual fuel premixed charge compression ignition engine. *Applied Thermal Engineering*, 54, 481-487.
- Wang Y., Zhao Y., Xiao F. & Li D. (2014). Combustion and emission characteristics of a diesel engine with DME as port premixing fuel under different injection timing. *Energy Conversion and Management*, 77, 52-60.
- Wattanavichien K. (2009). Implementation of DME in a small direct injection diesel engine. *International Journal of Renewable Energy*, 4(2), 1-12.
- Xinling L. & Zhen H. (2009). Emission reduction potential of using gas-to-liquid and dimethyl ether fuels on a turbocharged diesel engine. *Science of the Total Environment*, 407, 2234-2244.
- Xu S., Wang Y., Zhang X., Zhen X. & Tao C. (2012). Development of a novel common-rail type dimethyl ether (DME) injector. *Applied Energy*, 94, 1-12.
- Yanju W., Kun W., Wenrui W., Shenghua L., Xiao C., Yajing Y. & Shanwen B. (2014). Comparison study on the emission characteristics of diesel- and dimethyl ether-originated particulate matters. *Applied Energy*, 130, 357-369.
- Ying W., Li H., Longbao Z. & Wei L. (2010). Effects of DME pilot quantity on the performance of a DME PCCI-DI engine. *Energy Conversion and Management*, 51, 648-654.
- Ying W., Longbao Z. & Hewu W. (2006). Diesel emission improvements by the use of oxygenated DME/diesel blend fuels. *Atmospheric Environment*, 40, 2313-2320.
- Ying W., Longbao Z., Zhongji Y. & Hongyi D. (2005). Study on combustion and emission characteristics of a vehicle engine fuelled dimethyl ether. *Journal of Automotive Engineering*, 219, 263-269.

Yoon S. H., Cha J. P. & Lee C. S. (2010). An investigation of the effects of spray angle and injection strategy on dimethyl ether (DME) combustion and exhaust emission characteristics in a common-rail diesel engine. *Fuel Processing Technology*, 91, 1364-1372.

Yoon S. H., Han S. C. & Lee C. S. (2013). Effects of high EGR rate on dimethyl ether (DME) combustion and pollutant emission characteristics in a direct injection diesel engine. *Energies*, 6, 5157-5167.

Youn I. M., Park S. H., Roh H. G. & Lee C. S. (2011). Investigation on the fuel spray and emission reduction characteristics for dimethyl ether (DME) fueled multi-cylinder diesel engine with common-rail injection system. *Fuel Processing Technology*, 92, 1280-1287.

Zhao Y., Wang Y., Li D., Lei X. & Liu S. (2014). Combustion and emission characteristics of a DME (dimethyl ether)-diesel dual fuel premixed charge compression ignition engine with EGR (exhaust gas recirculation). *Energy*, 72, 608-617.

Zhu Z., Li D. K., Liu J., Wei Y. J. & Liu S. H. (2012). Investigation on the regulated and unregulated emissions of a DME engine under different injection timing. *Applied Thermal Engineering*, 35, 9-14.