



## Dizel Motorlarda Dimetil Eter Kullanımının CO Emisyonuna Etkisi Üzerine Bir Derleme Çalışması

İsmet SEZER<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-000-342-9172>

\*Sorumlu yazar: isezer@gumushane.edu.tr

### Derleme

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 31.05.2022

Kabul tarihi: 30.10.2022

Online Yayınlanma: 05.07.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Dizel motor performansı

Dimetil eter

Yakıt katkıları

CO emisyonu

### ÖZ

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 ( $\text{NO}_x$ ) 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 katkı olarak kullanımının karbon monoksit (CO) emisyonuna etkilerinin incelenmesine odaklanmıştır.

## A Review Study on the Effect of Using Dimethyl Ether on CO Emissions in Diesel Engines

### Review Article

#### Article History:

Received: 31.05.2022

Accepted: 30.10.2022

Published online: 05.07.2023

#### Keywords:

Diesel engine performance

Dimethyl ether

Fuel additives

CO emission

### 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 ( $\text{NO}_x$ ) and particulate matter (PM). It is very difficult to reduce  $\text{NO}_x$  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 additive. This study investigates the effect of using dimethyl ether on carbon monoxide (CO) emission.

**To Cite:** Sezer İ. Dizel Motorlarda Dimetil Eter Kullanımının CO Emisyonuna Etkisi Üzerine Bir Derleme Çalışması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2023; 6(2): 1641-1661.

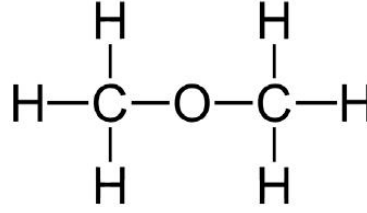
## 1. Giriş

Dizel motorlar yüksek tork, düşük yakıt tüketimi ve benzin motorlarına kıyasla daha düşük hidrokarbon (HC), karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonu seviyeleri nedeniyle taşıtlar için başlıca güç kaynağıdır (Yoon ve ark., 2010). Ancak, dizel motorları atmosfere benzin motorlarından daha yüksek seviyede partikül madde (PM) ve azotdioksit (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 ve ark., 2011). Çeşitli alternatifler arasında, dimetil eter (DME) kömürden, doğalgazdan ve farklı biyokütle kaynaklarından üretilmesi nedeniyle oldukça umut verici bir alternatif yakıt olarak görülmektedir. Ayrıca, DME'nin yüksek setan sayısı ve içeriğinde oksijen bulunması dizel motor yakıtı olarak onu cazip hale getirmektedir (Alam ve 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 ve ark., 2014). Bu nedenle, DME'in kullanımı üzerine yapılmış çalışmaların sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi pratik uygulamalar açısından oldukça önemlidir. Bu çalışma dizel motorlarda DME kullanımının CO emisyonuna etkilerinin incelenmesini amaçlamaktadır.

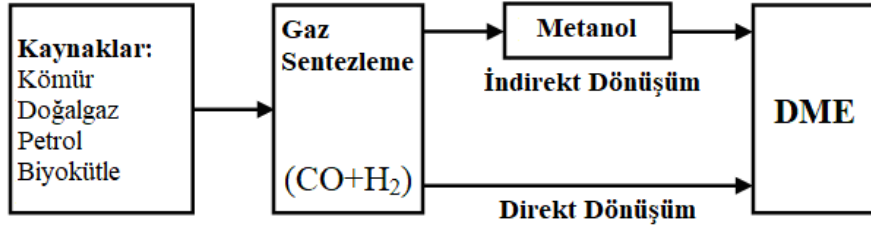
## 2. Dimetil Eterin Karakteristikleri

DME, Şekil 1'de verildiği gibi CH<sub>3</sub>-O-CH<sub>3</sub> (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) 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 ile ilgili gereklilik ve şartlar LPG ile aynıdır (Alam ve Kajitani, 2001). Şekil 2'de görüldüğü gibi, DME direkt veya endirekt sentetik metotlarla üretilmektedir. Direkt üretim yönteminde DME doğrudan doğalgazdan üretilirken, endirekt üretim yönteminde metanolün sentetik dehidrasyonu ile üretilmektedir (Park ve Lee 2014). Enerji eşdeğerli değerlendirme yapıldığında DME'in üretimi benzin veya dizel yakıtından daha ucuza mal olmaktadır. Büyük çaplı 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 fazındadır. 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 MPa aralığına yükseltilmesi gerekir (Kowalewicz ve Wojtyniak, 2005; Duan ve ark., 2012).



Şekil 1. DME'in kimyasal yapısı (Park ve Lee, 2014).



Şekil 2. DME'in üretim yöntemleri (Azizi ve ark., 2014).

Dizel yakıtı ve DME'in yakıt özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi DME'in yakıt özellikleri dizel yakıtından oldukça farklıdır. Yüksek buhar basıncı ve düşük kaynama noktası değerlerine sahip olduğundan DME atmosferik basınç ve oda sıcaklığında gaz fazındadır. Diğer taraftan, DME'in ısı değeri dizel yakıtının yarısı kadardır. Bu nedenle, yakıt besleme sistemi, yakıt püskürtme sistemi ve yanma odasının yeniden tasarlanması gerekmektedir (Huang ve ark., 2009). DME'nin setan sayısı dizel yakıtından yüksek olduğundan daha iyi tutuşma özelliklerine sahiptir. DME'in buharlaşma gizli ısısının yüksek olması yakıt-hava karışımının sıcaklığının düşürülmesine ve motorun hacimsel veriminin artmasına yardımcı olur. Bu özelliği sayesinde DME soğutucu akışkan (RE170) olarak da kullanılabilir (Kowalewicz ve Wojtyniak, 2005).

Tablo 1. Dizel, DME ve LPG yakıtlarının özellikleri (Kowalewicz ve Wojtyniak, 2005).

Özellik	Dizel	DME	LPG
Kimyasal formülü	$C_xH_y$	$C_2H_6O$	$C_xH_y$
Moleküler kütlesi, g/mol	170	46,07	48,3
Kaynama noktası, °C	180-360	-24,9	-42
Sıvı fazdaki yoğunluğu, kg/L	0,84	0,668	0,536
Sıvı fazdaki viskozitesi, cP	4,4-5,4	0,15	1,08
Alt ısı değeri, kJ/kg	42500	28430	46050
Tutuşma sıcaklığı, °C	250	235	450-510
Setan sayısı	40-55	55-60	2
Stokiyometrik hava/yakıt oranı	14,6	9	15,7
Elastisite modülü, N/m <sup>2</sup>	$1,486 \times 10^9$	$6,37 \times 10^8$	$1,65 \times 10^8$
Kütlesel karbon oranı	86	52,2	82,5
Kütlesel hidrojen oranı	14	13	17,5
Kütlesel oksijen oranı	0	34,8	0

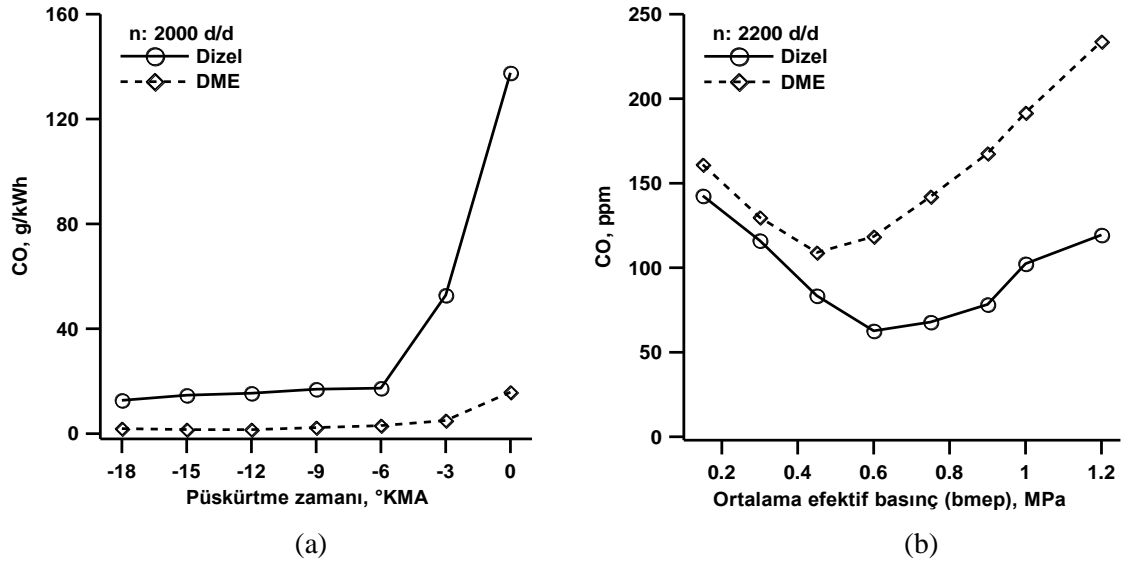
DME sadece C–H ve C–O kimyasal bağına sahip olup direkt C–C bağına sahip değildir ve içeriğinde %34.8 oksijen bulundurur. Bu özellikleri sayesinde, DME'nin yanması sırasında neredeyse hiç PM üretimi olmaz, düşük gürültü seviyesi ortaya çıkar ve yüksek oranda egzoz gazı resirkülasyonunu (EGR) tolere edilebildiğinden NOx emisyonunun azaltılmasında dizel yakıtından daha avantajlıdır (Wattanavichien, 2009). DME'in diğer avantajları ise metal malzemeler için korozif olmayışı ve zehirleyici olmamasıdır (Park ve Lee, 2014). 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 (Yoon ve ark., 2010). Bu nedenle, yakıt sistemindeki kauçuk esaslı materyaller DME'nin korozif etkilerine dayanıklı malzemelerle değiştirilmelidir.

### **3. Dimetil Eter ile İlgili Literatürdeki Çalışmalar**

Literatürde DME'in üretim teknolojileri (Azizi ve ark., 2014; Lecksiwilai ve ark., 2016; Inayat ve ark., 2017), yakıt özellikleri (Teng ve ark., 2001; Park ve Lee 2013; Park ve Lee, 2014; Maji ve ark., 2015), püskürtme karakteristikleri (Suh ve Lee, 2008; Kim ve ark., 2011; Genbao ve ark., 2012; Xu ve ark., 2012; Guangxin ve ark., 2013; Jalanapurkar ve ark., 2015; Lim ve Iida, 2015; Mohan ve ark., 2017), yanma karakteristikleri (Oda ve ark., 2004; Song ve ark., 2004; Ying ve ark., 2005; Arcoumanis ve ark., 2008; Chapman ve Boehman, 2008; Park, 2012; Khunaphan ve ark., 2013; Park ve Lee, 2013; El-Hagar, 2014; Jeon ve ark., 2014; Baskaran, 2015; Wang ve ark., 2015; Lamani ve ark., 2017; Benajes ve ark., 2018a; Benajes ve ark., 2018b), motor performans karakteristikleri (Chen ve ark., 2000; Kajitani ve Chen, 2003; Kajitani, 2004; Semelsberger ve ark., 2006; Jang ve Bae, 2009; Namasivayam ve ark., 2010; Ying ve ark., 2010; Li, 2011; Sezer, 2011; Patil ve Thipse 2012; Wang ve ark., 2013; Ryu ve ark., 2014; Taghavifar ve ark., 2014; Deepak ve ark., 2015; Prabhakaran ve ark., 2015; Vispute ve Pawar, 2016; Abhishek ve ark., 2017; Hewu ve Longbao 2017; Kropiwnicki ve ark., 2017; Smolec ve ark., 2017; Theinnoi ve ark., 2017) ve egzoz emisyonu karakteristikleri (Wang ve ark., 2000; Longbao ve ark., 2002; Ying ve ark., 2006; Xinling ve Zhen, 2009; Park ve ark., 2010; Kim ve ark., 2012; Loganathan ve ark., 2012a; Loganathan ve ark., 2012b; Zhu ve ark., 2012; Yoon ve ark., 2013; Hou ve ark., 2014; Park ve ark., 2014; Thomas ve ark., 2014; Wang ve ark., 2014; Yanju ve ark., 2014; Zhao ve ark., 2014; Roh ve ark., 2015; Kim ve Park, 2016; Park ve ark., 2016; Bogdan ve ark., 2017; Geng ve ark., 2017; Ambekar ve Hole, 2018) üzerine yapılmış oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır.

#### 4. Dimetil Eterin CO Emisyonuna Etkileri

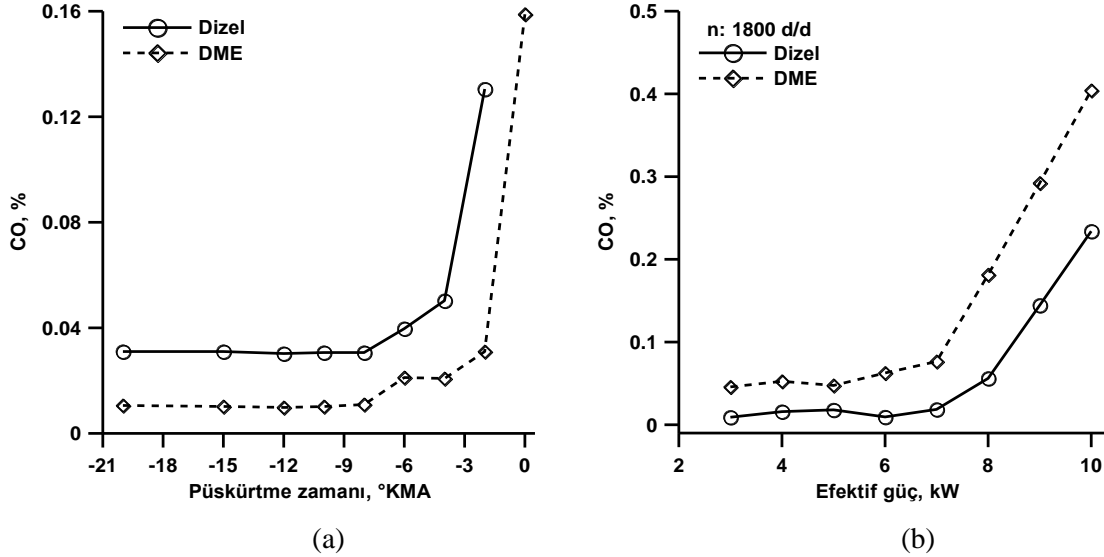
Şekil 3(a)'da CO emisyonunun dizel yakıtı ve DME için 2000 d/d devir sayısında püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. CO emisyonu hidrokarbon yakıtların yanması sırasında eksik yanma sonucunda ortaya çıkan bir yanma ürünü olup miktarı yakıt-hava oranına bağlıdır. Stokiyometrik karışım oranından uzaklaşıp yakıtça zengin karışımlar kullanıldığında CO emisyonu artış eğilimi gösterir. Şekilden görüldüğü gibi DME dizel yakıtına göre daha düşük CO emisyonu değerleri vermiştir. DME'in içeriğinde bulunan oksijenin yanmayı iyileştirerek CO emisyonunun azalmasını sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca, DME'in hızlı buharlaşması ve düşük tutuşma sıcaklığı sayesinde erken tutuşması ve yakıt demeti uzunluğunun kısa olması sebebiyle silindire püskürtüldüğünde silindir duvarlarının sıvı yakıtla ıslatılmamasının da düşük CO emisyonu değerlerinin elde edilmesine katkı sağladığı ifade edilmiştir (Youn ve ark., 2011). Şekil 3(b)'de CO emisyonunun dizel yakıtı ve DME için 2200 d/d devir sayısında motor yükü (bmep) ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME özellikle orta ve yüksek yük değerlerinde dizel yakıtından daha yüksek CO emisyonu değerleri vermiştir. Bu durumunun motor yükü arttıkça silindire daha fazla yakıt (DME) püskürtülmesi sonucu motorun zengin karışımla çalışmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Huang ark., 2009).



**Şekil 3.** CO emisyonunun dizel yakıtı ve DME için (a) püskürtme zamanı ile (Youn ark., 2011) ve (b) ortalama efektif basınç (bmep) ile (Huang ark., 2009) değişimi

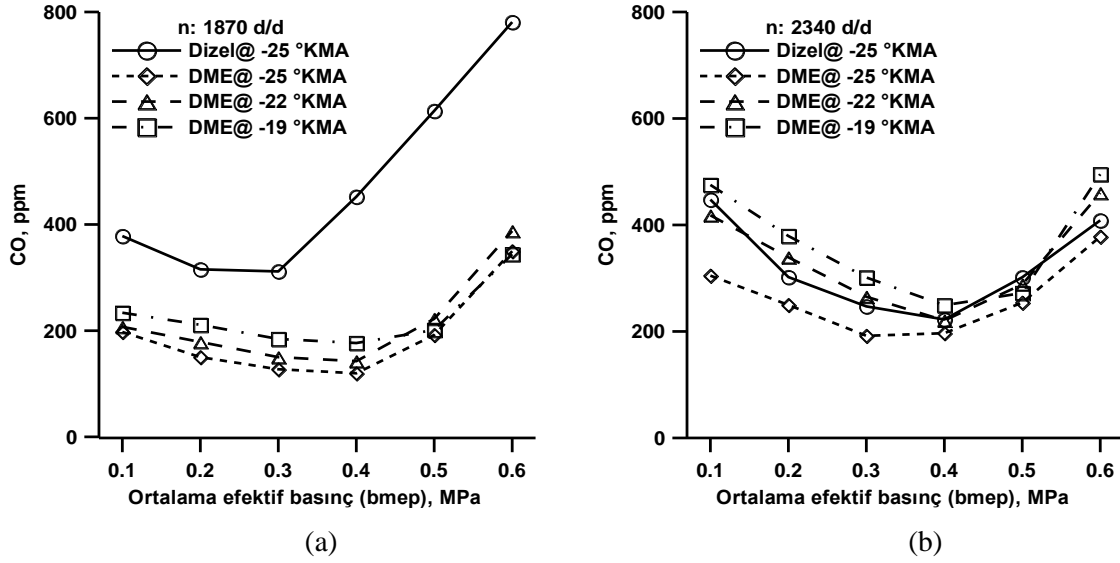
Şekil 4(a)'da CO emisyonunun dizel yakıtı ve DME için püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME kullanıldığında daha düşük CO emisyonu değerleri elde edilmiştir. DME'in kolay buharlaşması sayesinde daha homojen bir yakıt-hava karışımı oluşturması sonucu yanma odası içerisinde yakıtça zengin bölgelerin azalması ve içeriğinde oksijen bulunması CO emisyonunun azalmasını sağlamıştır. Ayrıca, DME'in düşük tutuşma sıcaklığı sayesinde erken tutuşarak tutuşma gecikmesi süresini kısaltıp daha verimli bir yanma sağladığı ve CO emisyonunu azalttığı bildirilmiştir (Park ve Lee, 2013). Şekil 4(b)'de CO emisyonunun dizel yakıtı ve DME için 1800 d/d devir sayısında efektif güç ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME özellikle orta

ve yüksek güç değerlerinde dizel yakıtından daha yüksek CO emisyonu değerleri vermiştir. Bu durum, DME kullanıldığında aynı gücü elde etmek için daha fazla yakıt (DME) kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Şöyle ki DME'in ısı değeri düşük olduğundan aynı gücü elde etmek için daha fazla yakıtın (DME) silindire püskürtülmesi gerekmektedir. Bu fazla yakıtı püskürtmek daha uzun püskürtme süresi gerektirir ve yanma işlemi uzadığından genişleme sürecinde de yanma devam eder. Bunun ise yanma sıcaklığının düşmesi sebebiyle eksik yanmaya ve CO emisyonunun artmasına neden olduğu bildirilmiştir (Wang ve ark., 2000).

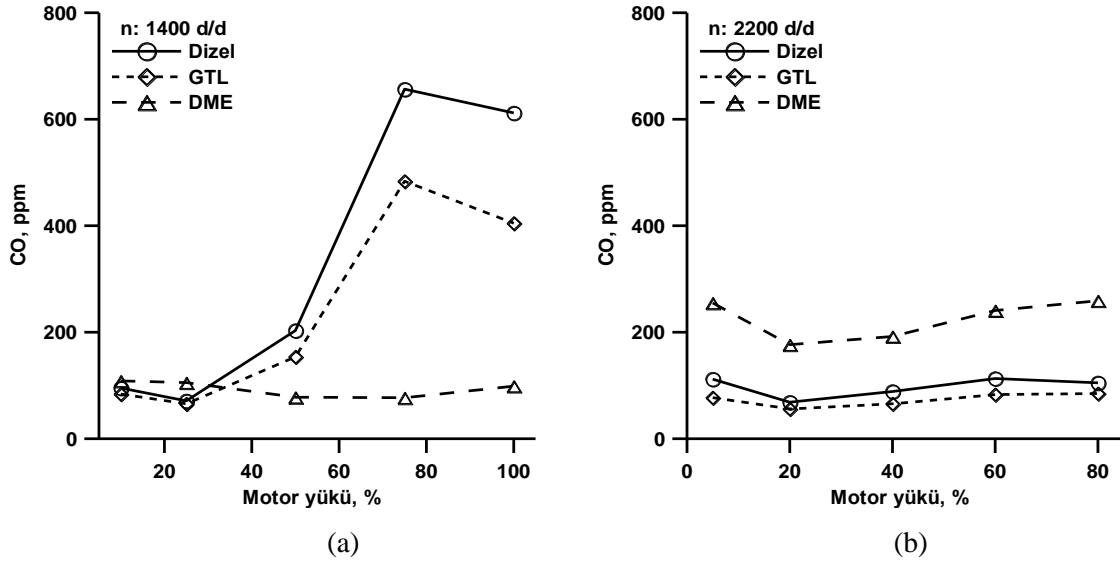


**Şekil 4.** CO emisyonunun dizel yakıtı ve DME için (a) püskürtme zamanı ile (Park ve Lee, 2013) ve (b) efektif güç ile (Wang ve ark., 2000) değişimi

Şekil 5(a) ve (b)'de CO emisyonunun sırasıyla 1870 d/d ve 2340 d/d devir sayılarında ortalama efektif basınç (motor yükü) ile değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi 1870 d/d devir sayısında tüm püskürtme avansı değerlerinde DME dizel yakıtına göre daha düşük CO emisyonu değerleri verirken 2340 d/d devir sayısında dizel yakıtına yakın hatta püskürtme avansı azaldıkça dizel yakıtından daha yüksek CO emisyonu değerleri vermiştir. CO emisyonu eksik yanma ürünü olup büyük ölçüde yerel yakıt-hava oranına bağlıdır. Yakıtça aşırı zengin veya aşırı fakir yakıt-hava karışımı bölgelerinde eksik yanma nedeniyle yanma sıcaklığının düşmesi sonucu CO emisyonu üretimi gerçekleşir. DME'in yoğunluğunun ve viskozitesinin düşük olması sebebiyle daha iyi püskürtme özelliklerine sahip olması ve içeriğinde %34,8 oranında oksijen bulunması sayesinde daha verimli bir yanma sağlaması sonucu 1870 d/d motor devrinde CO emisyonunun azalmasını sağlamıştır. Ancak, 2340 d/d motor devrinde silindire daha fazla miktarda DME püskürtülmesi püskürtme ve yanma süresinin uzaması sonucunda yanma sıcaklığını düşürerek CO emisyonunun artmasına neden olmuştur (Zhu ve ark., 2012).



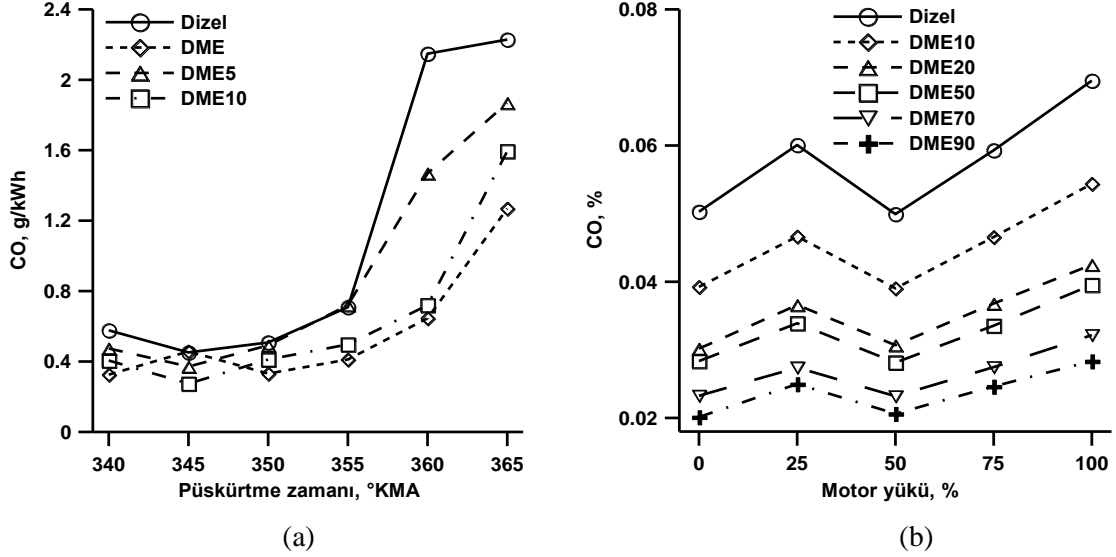
Şekil 5. CO emisyonunun dizel yakıtı ve DME için a) 1870 d/d ve b) 2340 d/d devir sayılarında ortalama efektif basınç (bmeP) ile değişimi (Zhu ve ark., 2012)



Şekil 6. CO emisyonunun dizel yakıtı, gazdan türetilmiş likit (GTL) yakıt ve DME için a) 1400 d/d ve b) 2200 d/d devir sayılarında motor yükü ile değişimi (Xinling ve Zhen, 2009)

Şekil 6(a) ve (b)'de CO emisyonunun dizel yakıtı, gazdan türetilmiş likit (GTL) yakıt ve DME için 1400 d/d ve 2200 d/d devir sayılarında motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi 1400 d/d devir sayısında CO emisyonu düşük motor yükü değerlerinde tüm yakıtlar için düşük değerler almış ancak motor yükü arttıkça dizel ve GTL yakıtları için CO emisyonu önemli ölçüde artarken DME için yaklaşık aynı kalmıştır. Diğer taraftan, 2200 d/d motor devrinde tüm yük değerlerinde dizel ve GTL yakıtları için CO emisyonu düşük değerler alırken DME oldukça yüksek CO emisyonu değerleri vermiştir. GTL yakıtı dizel yakıtıyla kıyaslandığında CO emisyonunda %10-30 oranında azalma sağlamıştır. Bu durumun, GTL yakıtının dizel yakıtına göre yüksek setan sayısına ve düşük aromatik içeriğe sahip olmasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Xinling ve Zhen, 2009). DME ise düşük devir sayısında dizel yakıtına göre oldukça düşük CO emisyonu vermesine rağmen

yüksek devir sayısında dizel yakıtına kıyasla oldukça yüksek CO emisyonu vermiştir. DME'in içerisinde oksijen bulunması ve diğer olumlu yakıt özellikleri düşük devir sayısında CO emisyonunun azalmasını sağlamıştır. Ancak, yüksek devir sayısında püskürtülen DME miktarının artması püskürtme ve yanma sürelerini uzatarak CO emisyonunun artmasına neden olmuştur (Xinling ve Zhen, 2009).



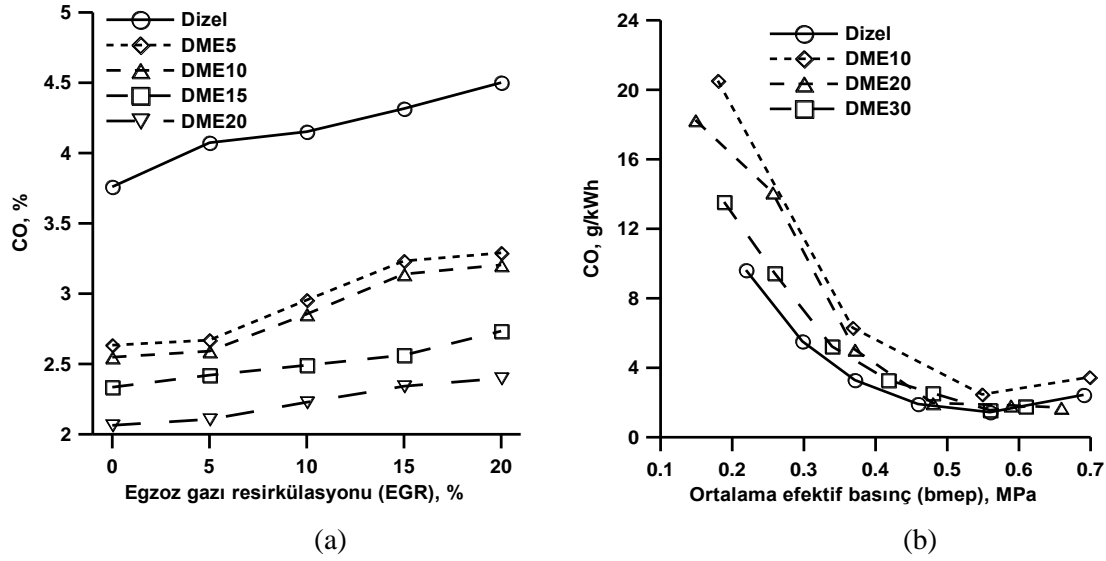
**Şekil 7.** CO emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için a) püskürtme zamanı ile (Lim ve Iida, 2015) ve b) motor yükü ile (Ambekar ve Hole, 2018) değişimi

Şekil 7(a)'da CO emisyonunun dizel yakıtı, DME ve dizel-DME karışımları için püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME ve dizel-DME karışımları dizel yakıtı ile kıyaslandığında özellikle püskürtme zamanı geciktirildikçe CO emisyonunda azalma sağlamıştır. Bu durumun, DME'in yakıt demeti uzunluğunun kısa olması ve hızlı buharlaşması sebebiyle silindire püskürtüldüğünde silindir duvarlarını ıslatma olayının dizel yakıtına göre çok düşük olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Lim ve Iida, 2015). Şekil 7(b)'de CO emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dizel-DME karışımları dizel yakıtına göre daha düşük CO emisyonu değerleri vermiş ve karışımdaki DME oranı arttıkça CO emisyonu daha da azalmıştır. CO emisyonu oluşumunu etkileyen iki önemli faktör vardır. Bunlardan ilki yanma odasında yetersiz oksijen nedeniyle meydana gelen eksik yanma diğeri ise homojen olmayan yakıt-hava karışımıdır. DME hızlı buharlaşması sayesinde daha homojen bir yakıt-hava karışımı oluşturmakta ve içeriğindeki oksijen sayesinde de daha verimli bir yanma sağlayarak CO emisyonunun azalmasını sağlamaktadır (Ambekar ve Hole, 2018).

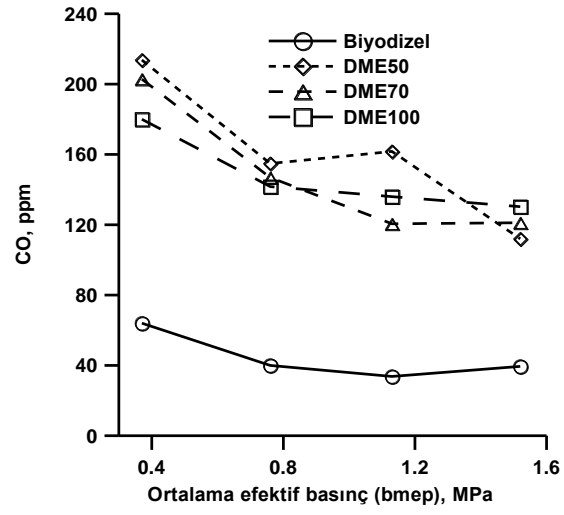
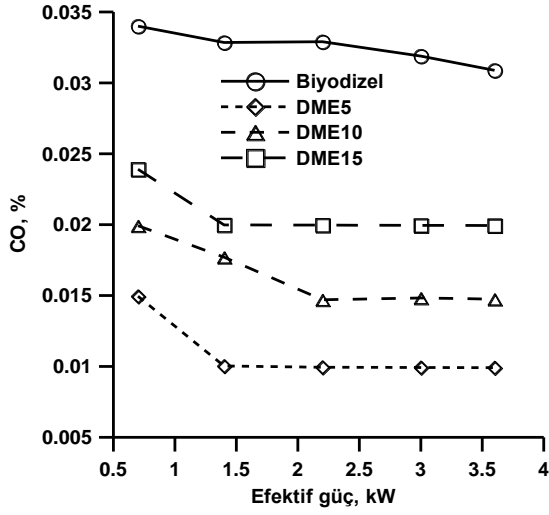
Şekil 8(a)'da CO emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi CO emisyonu karışımdaki DME oranı arttıkça önemli ölçüde azalırken EGR oranı arttıkça bir miktar artmıştır. Dizel yakıtı ile kıyaslandığında CO emisyonunda en yüksek düşüş DME20 karışımı ile %5 EGR oranında %48 olarak elde edilmiştir. DME karışımları kullanıldığında CO emisyonundaki düşüşün DME'in içeriğinde bulunan oksijen sayesinde yanmayı iyileştirmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. EGR oranı



artıkça CO emisyonundaki artışın ise yanma odasındaki oksijen miktarının azalmasından kaynaklandığı bildirilmiştir (Lamani ve ark., 2017). Şekil 8(b)'de CO emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME karışımları kullanıldığında CO emisyonu bir miktar artmıştır. Bu durumun DME karışımları kullanıldığında aynı gücü elde etmek için daha fazla yakıt püskürtülmesi sebebiyle püskürtme işleminin ve buna bağlı olarak yanma işleminin uzaması sonucu yanma sıcaklığının düşmesiyle eksik yanmanın meydana gelmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ancak, karışımdaki DME oranı arttıkça oksijen miktarının artmasına bağlı olarak CO emisyonunda azda olsa azalma olduğu belirtilmiştir (Ying ve ark., 2006).



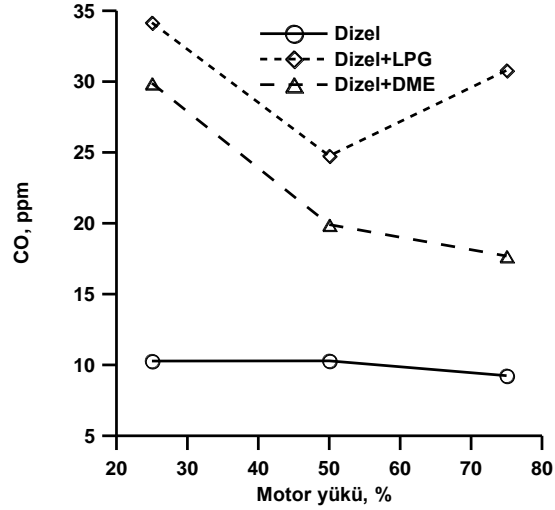
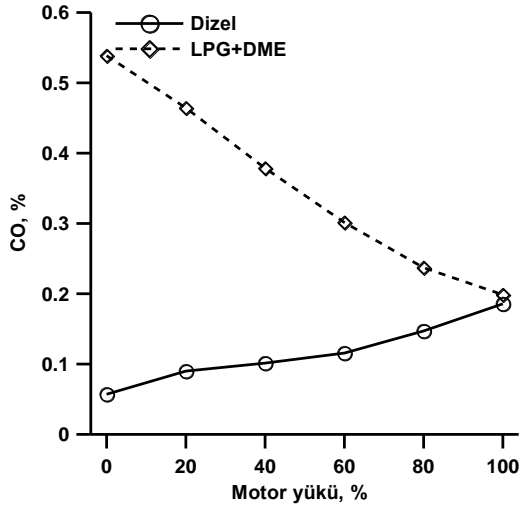
**Şekil 8.** CO emisyonunun dizel ve dizel-DME karışımları için (a) egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) oranı ile (Lamani ve ark., 2017) ve (b) ortalama efektif basınç (bmeP) ile (Ying ve ark., 2006) değişimi Şekil 9(a)'da CO emisyonunun biyodizel ve biyodizel-DME karışımları için efektif güç ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME karışımları biyodizel yakıtına göre daha düşük CO emisyonu değerleri vermiştir. Tam yük durumunda CO emisyonundaki azalmalar DME5, DME10 ve DME15 karışımları için sırasıyla %67, %51 ve %35 civarındadır. Bu durumun hem biyodizelin hem de DME'in içeriğinde oksijen bulunması sayesinde yanmayı iyileştirerek CO emisyonunu azaltmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Loganathan ve ark., 2012a). Şekil 9(b)'de CO emisyonunun biyodizel ve biyodizel-DME karışımları için motor yükü (bmeP) ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME karışımları biyodizel yakıtına göre daha yüksek CO emisyonu değerleri vermiştir. 0.76 MPa motor yükü değerinde biyodizel, DME50, DME70 ve DME100 için CO emisyonu değerleri sırasıyla 40 ppm, 150 ppm, 143 ppm and 143 ppm olarak elde edilmiştir. Bu durum, yüksek oranda DME kullanımıyla oluşan aşırı fakir karışımın eksik yanmaya neden olarak yanma sıcaklığını düşürüp CO emisyonunu artırdığı şeklinde değerlendirilmiştir (Hou ve ark., 2014).



(a)

(b)

**Şekil 9.** CO emisyonunun biyodizel ve biyodizel-DME karışımları için (a) efektif güç ile (Loganathan ve ark., 2012b) ve (b) ortalama efektif basınç (bmeP) ile (Hou ve ark., 2014) değişimi



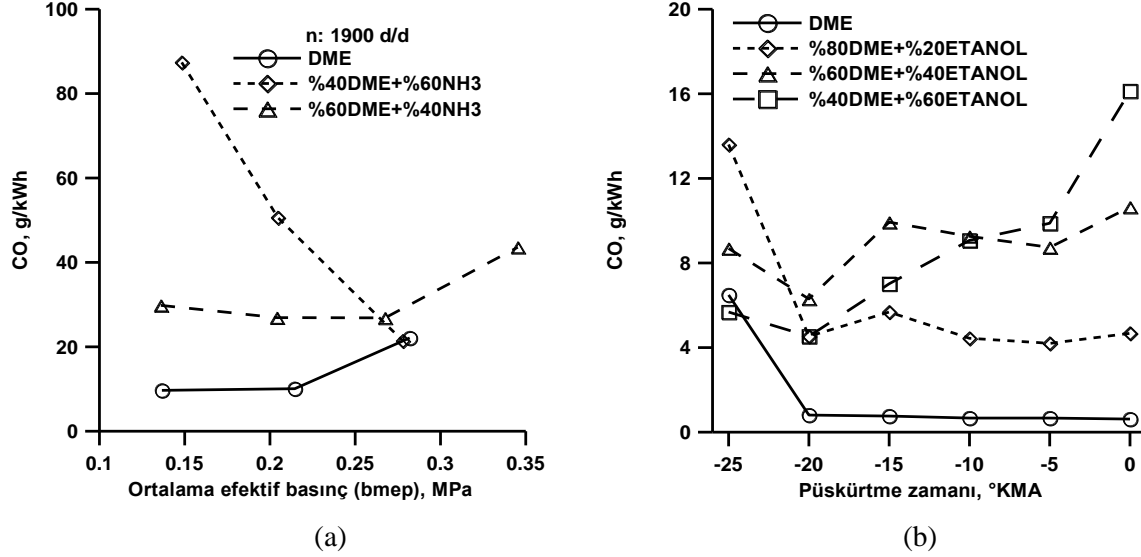
(a)

(b)

**Şekil 10.** CO emisyonunun a) dizel yakıtı ve LPG-DME karışımı için (El-Hagar, 2014) ve b) dizel yakıtı, dizel-LPG ve dizel-DME karışımları için (Khunaphan ve ark., 2013) motor yükü ile değişimi

Şekil 10(a)'da CO emisyonunun dizel yakıtı ve LPG-DME karışımı için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi LPG-DME karışımı özellikle %60 motor yükü değerine kadar dizel yakıtına kıyasla oldukça yüksek CO emisyonu vermiş motor yükü arttıkça CO emisyonu azalmıştır. Düşük motor yükü değerlerinde silindire gönderilen az miktarda yakıtın (LPG) fakir karışım oluşturması sebebiyle yanma sıcaklığının düşmesi eksik yanmaya neden olmakta ve CO emisyonu artmaktadır. Motor yükü arttıkça silindire gönderilen yakıt (LPG) miktarının artması yanma odasında daha homojen bir karışım oluşturmakta ve yakıt karışımı içinde bulunan DME kolay tutuşma özelliği sayesinde yanmanın birçok noktada aynı anda başlamasını sağlayarak daha verimli bir yanma ve daha düşük CO emisyonu elde edilmesini sağlamaktadır (El-Hagar, 2014). Şekil 10(b)'de CO emisyonunun

dizel yakıtı, dizel-LPG ve dizel-DME karışımları için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dizel-LPG ve dizel-DME karışımları dizel yakıtına kıyasla daha yüksek CO emisyonu değerleri vermiştir. Bu durumun, LPG ve DME yakıtlarının yüksek buharlaşma gizli ısıları nedeniyle yanma sıcaklığını düşürerek eksik yanmaya sebep olmasından kaynaklandığı belirtilmektedir. Ancak, DME'nin içeriğinde oksijen bulunması ve setan sayısının yüksek olması sayesinde yanma işlemini nispeten iyileştirerek LPG'ye göre daha düşük CO emisyonu değerleri elde edilmesini sağladığı ifade edilmiştir (Khunaphan ve ark., 2013).

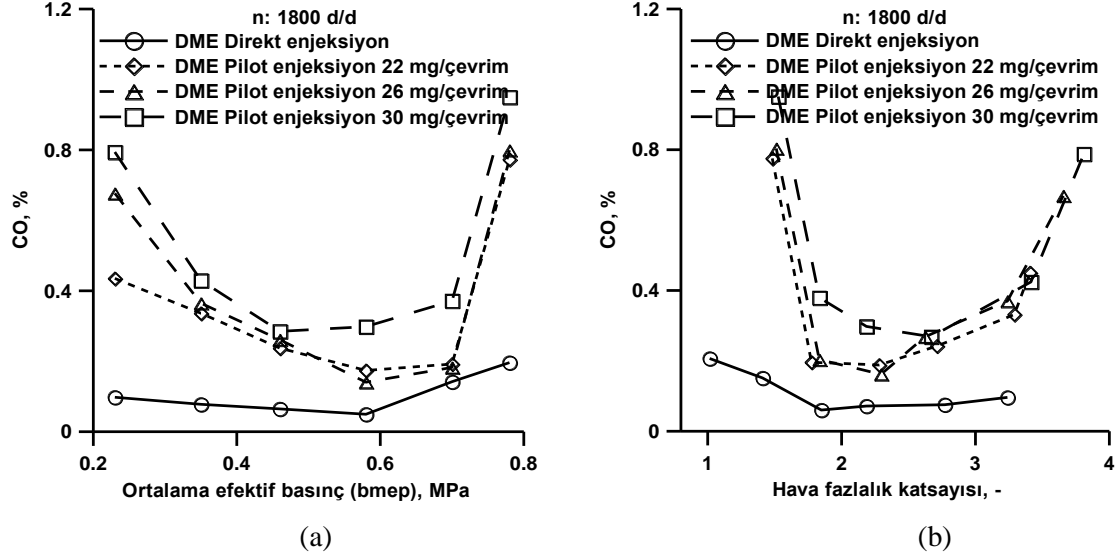


**Şekil 11.** CO emisyonunun a) DME ve DME-NH<sub>3</sub> (Amonyak) karışımları için ortalama efektif basınç (bmeP) ile (Ryu ve ark.,2014) ve b) DME ve DME-etanol karışımları için püskürtme zamanı ile (Park ve ark., 2016) değişimi

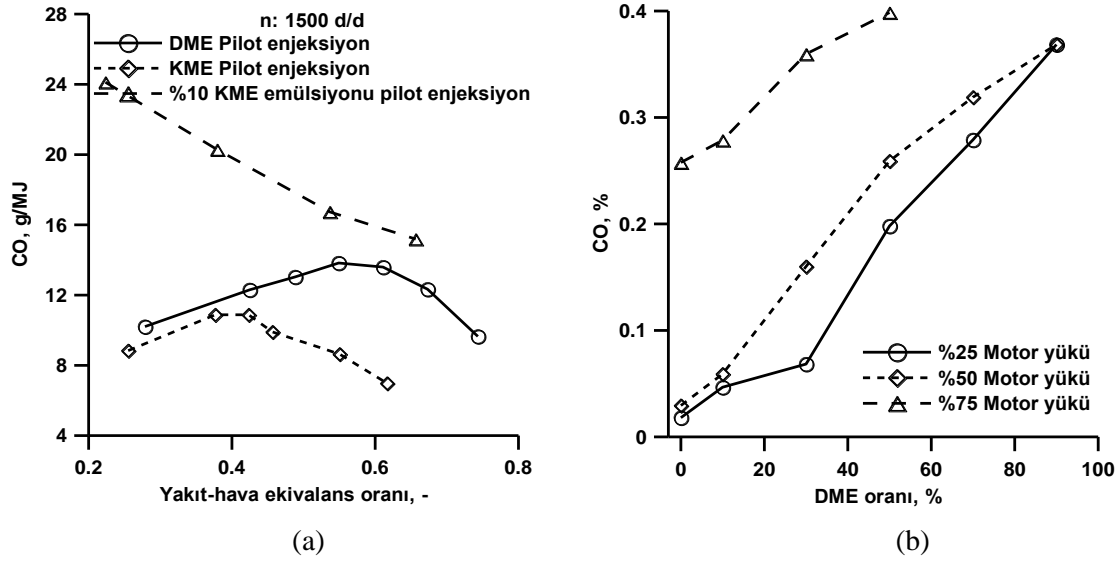
Şekil 11(a)'da CO emisyonunun DME ve DME-Amonyak (NH<sub>3</sub>) karışımları için 1900 d/d devir sayısında motor yükü (bmeP) ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME-NH<sub>3</sub> karışımları saf DME'ye göre daha yüksek CO emisyonu değerleri vermiştir. Düşük motor yükü değerinde DME, 60%DME+40%NH<sub>3</sub> ve 40%DME+60%NH<sub>3</sub> için CO emisyonu değerleri sırasıyla 10 g/kWh, 30 g/kWh ve 90 g/kWh şeklindedir. Bu değerlerden görüldüğü gibi karışımdaki amonyak oranı arttıkça CO emisyonu da artmıştır. Bu durumun, amonyağın eksik yanmaya neden olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Ryu ve ark., 2014). Şekil 11(b)'de CO emisyonunun DME ve DME-etanol karışımları için püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME-etanol karışımları saf DME'ye göre daha yüksek CO emisyonu değerleri vermiştir. Bu durumun, etanolün yüksek buharlaşma gizli ısıları nedeniyle yanma sıcaklığını düşürüp eksik yanmaya neden olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ayrıca, DME-etanol karışımı içerisindeki etanol oranının artması yakıt-hava karışımını fakirleştirerek yanma sıcaklığını düşürmesiyle oluşan eksik yanmanın CO emisyonunun artmasına katkı sağladığı belirtilmiştir (Park ve ark., 2016).

Şekil 12 (a) ve (b)'de CO emisyonunun DME'in direkt enjeksiyonu ve pilot enjeksiyonu için 1800 d/d devir sayısında sırasıyla motor yükü (bmeP) ve hava fazlalık katsayısı ile değişimleri verilmiştir.

Şekillerde görüldüğü gibi DME'in pilot enjeksiyonu direkt enjeksiyona göre daha yüksek CO emisyonu değerleri vermiş ve DME'nin pilot enjeksiyonu sırasında enjekte edilen yakıt miktarı arttıkça CO emisyonu da artmıştır. DME'in pilot enjeksiyonunun yanma odasında yakıt-hava karışımının fakirleşmesi sonucu oluşan eksik yanmanın CO emisyonunu artırdığı ifade edilmiştir (Ying ve ark., 2010).



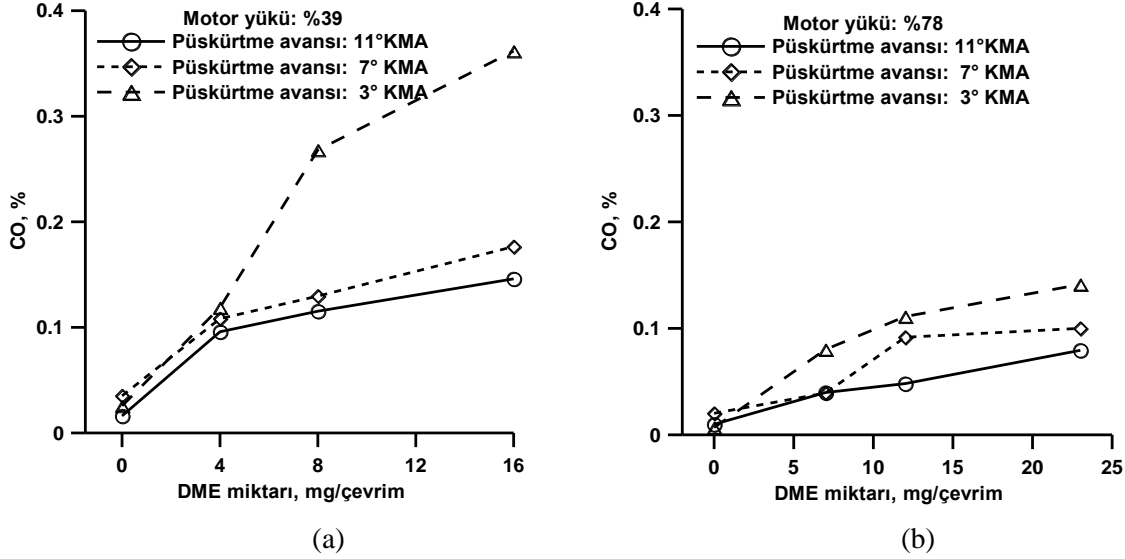
Şekil 12. CO emisyonunun DME'in direkt ve pilot enjeksiyonu için a) ortalama efektif basınç (bmeP) ile ve b) hava fazlalık katsayısı ile değişimi (Ying ve ark., 2010)



Şekil 13. CO emisyonunun (a) DME, kolzayağı metil esteri (KME) ve %10 KME emülsiyonu yakıtlarının pilot enjeksiyonu için yakıt-hava ekivalans oranı ile (Namasivayam ve ark., 2010) ve (b) DME oranı ile (Theinnoi ve ark., 2017) değişimi

Şekil 13(a)'da CO emisyonunun DME, kolzayağı metil esteri (KME) ve %10 KME emülsiyon yakıtlarının pilot enjeksiyonu için 1500 d/d devir sayısında ekivalans oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek CO emisyonu değerleri %10 KME emülsiyon yakıtının pilot enjeksiyonu durumunda elde edilmiş KME ve DME yakıtları daha düşük CO emisyonu değerleri

vermiştir. %10 emülsiyon yakıtının içerisinde bulunan su yanma sıcaklığını düşürüp eksik yanmaya neden olarak CO emisyonunu artırmıştır. Diğer taraftan, DME'in pilot enjeksiyonu yanma odasında daha homojen bir yakıt-hava karışımı oluşturup yanma verimini artırdığından CO emisyonunun azalmasını sağlamıştır (Namasivayam ve ark., 2010). Şekil 13(b)'de CO emisyonunun farklı motor yükü değerlerinde DME oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME enjeksiyon oranı ve motor yükü arttıkça CO emisyonu değerleri artmıştır. Bu durumun, DME oranı arttıkça silindirin uzak noktalarında ve segman yuvalarında hapsedilen yakıt miktarının artmasıyla oluşan eksik yanmadan kaynaklandığı ifade edilmiştir (Theinnoi ve ark., 2017).

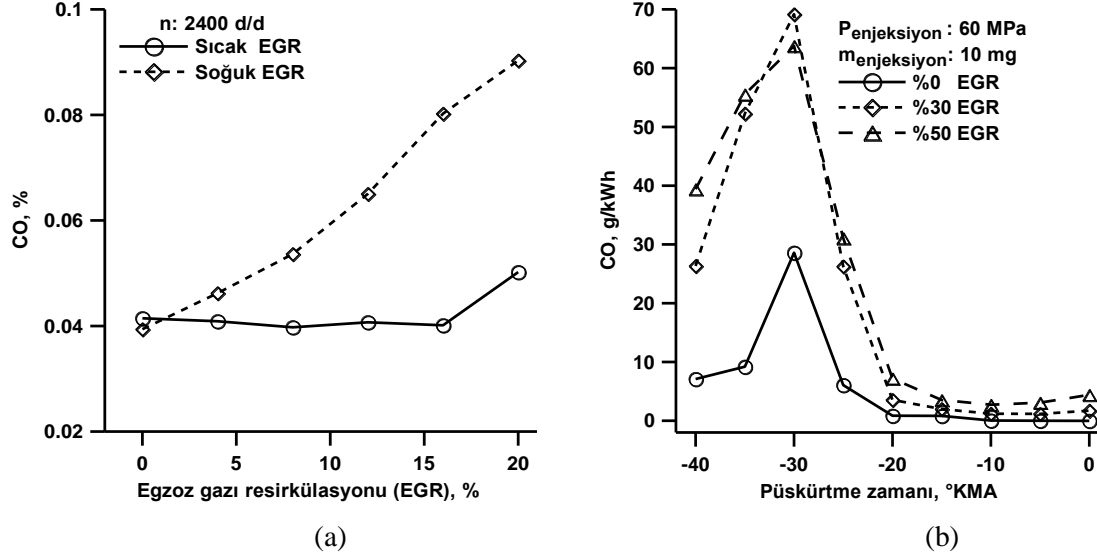


**Şekil 14.** CO emisyonunun farklı motor yükü ve püskürtme avansı değerleri için DME miktarı ile değişimi (Wang ve ark., 2014)

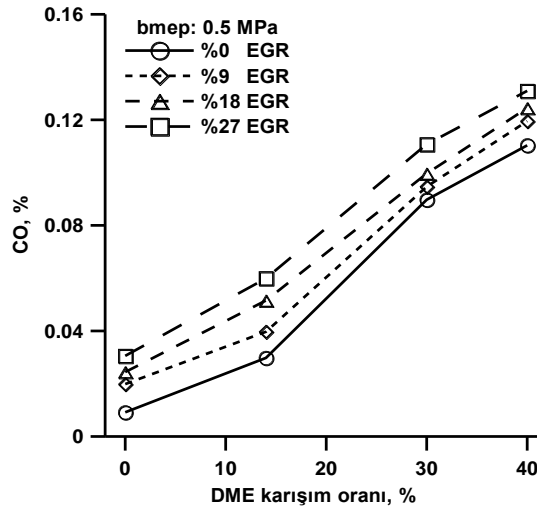
Şekil 14(a) ve (b)'de CO emisyonunun farklı motor yükleri ve püskürtme avansı değerleri için DME miktarı ile değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi motor yükünün ve DME miktarının artması CO emisyonunu artırırken püskürtme avansının artırılması CO emisyonunu azaltmaktadır. Motor yükünün artırılması püskürtülen yakıt miktarını artırdığından CO emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Püskürtme avansının erkene alınmasının ise yanma sıcaklığını artırarak CO emisyonunun azalmasını sağladığı belirtilmiştir (Wang ve ark., 2014).

Şekil 15(a)'da CO emisyonunun 2400 d/d devir sayısında sıcak ve soğutulmuş EGR oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi CO emisyonu özellikle soğutulmuş EGR kullanıldığında artan EGR oranı ile önemli ölçüde artmıştır. Bu durumun, EGR oranının artmasının yanma sıcaklığını ve yanma odasındaki oksijen miktarını düşürmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Diğer taraftan, sıcak EGR kullanılması belli bir orana kadar CO emisyonunun azaltılmasını sağlamıştır. Belli bir oranda sıcak EGR kullanımının CO emisyonunu kontrol etmede etkili olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir (Ying ve ark., 2005). Şekil 15(b)'de CO emisyonunun farklı EGR oranları için püskürtme avansı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 20–40 °KMA püskürtme avansı aralığında %30 ve %50 EGR oranları için CO emisyonu bir miktar artmıştır. Püskürtme avansının erkene alınmasının yanma

sıcaklığını düşürmesiyle oluşan eksik yanma sonucunda CO emisyonunun arttığı ifade edilmiştir. Benzer şekilde, EGR oranının artırılmasının da yanma sıcaklığını ve yanma odasındaki oksijen miktarını düşürerek oluşan eksik yanma nedeniyle CO emisyonunu artırdığı belirtilmiştir (Yoon ve ark., 2013).



Şekil 15. CO emisyonunun a) EGR oranı ile (Ying ve ark., 2005) ve b) püskürtme zamanı ile (Yoon ve ark., 2013) değişimi



Şekil 16. CO emisyonunun farklı EGR oranları için DME oranı ile değişimi (Zhao ve ark., 2014)

Şekil 16'da CO emisyonunun bmep=0.5 MPa motor yükünde ve farklı EGR oranlarında DME oranı ile değişimi verilmiştir. Hidrokarbon (HC) emisyonundan farklı olarak CO emisyonu zehirleyicidir ve kontrol altına alınması gerekir. Konvansiyonel direkt enjeksiyonlu dizel motorlarda CO emisyonu oldukça düşük olup %0.01 civarındadır. Ancak, homojen dolgulu sıkıştırılmayla ateşlemeli (HCCI) motorlarda şekilde görüldüğü gibi 0.5 MPa motor yükü için %40 DME oranında CO emisyonu %0.12 değerine ulaşmıştır. Bu durum, HCCI yanma işleminin doğasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, şekilde görüldüğü gibi artan EGR oranı CO emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Bu durumun

ise EGR oranının artmasıyla CO'nun yanma odasında CO<sub>2</sub>'ye dönüşebilecek yeterli oksijeni bulamamasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Zhao ve ark., 2014).

## 5. Sonuçlar

Bu derleme çalışmasında dizel motorlarda dimetil eter kullanımının CO emisyonu üzerindeki etkileri literatüre dayalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir.

- CO emisyonu eksik yanma ürünü olup düşük yanma sıcaklıklarında hava fazlalık katsayısına bağlı olarak aşırı fakir veya aşırı zengin karışım bölgelerinde yetersiz oksijen sebebiyle oluşmaktadır. CO zehirli bir gaz olup yanma sırasında mutlaka kontrol altına alınmalıdır.
- DME saf olarak kullanıldığında özellikle yüksek motor yükü ve devirlerinde dizel yakıtıyla kıyaslandığında CO emisyonunun artmasına neden olmaktadır.
- DME, dizel veya biyodizel yakıtı ile birlikte kullanıldığında özellikle düşük karışım oranlarında (%20'ye kadar) dizel veya biyodizel yakıtlarının saf kullanılmasına kıyasla CO emisyonunun azalmasını sağlamaktadır.
- DME'in amonyak, etanol ve LPG gibi alternatif yakıtlarla birlikte kullanılması genellikle CO emisyonunu artırmaktadır.
- Çift yakıtlı motorlarda DME'in pilot yakıt olarak kullanılması CO emisyonunu artırırken püskürtme avansının uygun şekilde ayarlanması ile CO emisyonu azaltılabilmektedir.
- DME'in saf veya diğer yakıtlarla birlikte kullanılması sırasında egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) oranının artırılması CO emisyonunu artırmaktadır. Ancak, uygun oranda sıcak EGR kullanılarak CO emisyonu kontrol altına alınabilmektedir.

## SEMBOL LİSTESİ

CNG: Sıkıştırılmış doğalgaz

CO: Karbonmonoksit

CO<sub>2</sub>: Karbondioksit

DME: Dimetil eter

EGR: Egzoz gazı resirkülasyonu

GTL: Gazdan türetilmiş likit yakıt

LNG: Sıvılaştırılmış doğalgaz

LPG: Sıvılaştırılmış petrol gazı

NH<sub>3</sub>: Amonyak

NO<sub>x</sub>: Azot oksitler

PM: Partikül madde

KME: Kolzayağı metil esteri

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale tek yazarlıdır dolayısıyla makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederim.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Makale tek yazarlıdır dolayısıyla makaleyle ilgili tüm işlemlerin tek yazara ait olduğunu beyan ederim.

### **Kaynakça**

- Abhishek Rahul K., Santosh K., Martha O. Blending impacts of biogas and dimethyl ether (DME) on compressed ignition engine. *International Research Journal of Engineering and Technology* 2017; 4(4): 2174-2177.
- Alam M., Kajitani S. DME as an alternative fuel for direct injection diesel engine. 4th International Conference on Mechanical Engineering, 26-28 December 2001, Dhaka., Bangladesh, pp. 87-92.
- Ambekar Y., Hole JA. Preliminary optimization of duel fuel engine using dimethyl ether premixed combustion. *International Research Journal of Engineering and Technology* 2018; 5(10): 274-278.
- Arcoumanis C., Bae C., Crookes R., Kinoshita E. The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review. *Fuel* 2008; 87(7): 1014-1030.
- Azizi Z., Rezaeimanesh M., Tohidian T., Rahimpour MR. Dimethyl ether: A review of technologies and production challenges. *Chemical Engineering and Processing* 2014; 82: 150-172.
- Baskaran R. Analysis on synthesis, storage & combustion characteristics of DME as fuel in CI engines. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology* 2015; 3(1): 133-140.
- Benajes J., Novella R., Pastor JM., Hernández-López A., Kokjohn SL. Computational optimization of the combustion system of a heavy duty direct injection diesel engine operating with dimethyl-ether. *Fuel* 2018a; 218: 127-139.
- Benajes J., Novella R., Pastor JM., Hernández-López A., Kokjohn SL. Computational optimization of a combustion system for a stoichiometric DME fueled compression ignition engine. *Fuel* 2018b; 223: 20-31.
- Bogdan J., Nicolae B., Călin I., Vlad BN. Study of emissions for a compression ignition engine fueled with a mix of DME and diesel. *Materials Science and Engineering* 2017; 252: 1-9.
- Chapman EM., Boehman AL. Pilot ignited premixed combustion of dimethyl ether in a turbodiesel engine. *Fuel Processing Technology* 2008; 89: 1262-1271.
- Chen Z., Konno M., Kajitani S. Performance and emissions of DI compression ignition engines fueled with dimethyl ether. *JSME International Journal* 2000; 43(1): 82-88.



- Deepak KM., Karthick M., Dineshababu D., Srikanth P., Ramachandran MG. Investigation on the effect of dimethyl ether in compression ignition engine. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2015; 4(2): 401-407.
- Duan J., Sun Y., Yang Z., Sun Z. Combustion and emissions characteristics of diesel engine operating on composite combustion mode of DME and diesel. *Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering and Material Science, Shanghai, China, 2012*; 463-466.
- El-Hagar MMEG. 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* 2014; 2(3): 193-198.
- Genbao L., Jianming C., Minglong L., Yuhua Q., Zhaoyang C. Experimental study on the size distribution characteristics of spray droplets of DME/diesel blended fuels. *Fuel Processing Technology* 2012; 104: 352-355.
- Geng P., Cao E., Tan Q., Wie L. Effects of alternative fuels on the combustion characteristics and emission products from diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017; 71: 523-534.
- Guangxin G., Zhulin Y., Apeng Z., Shenghua L., Yanju W. Effects of fuel temperature on injection process and combustion of dimethyl ether engine. *Journal of Energy Resources Technology* 2013; 135: 1-5.
- Hewu W., Longbao Z. Performance of a direct injection diesel engine fuelled with a dimethyl ether/diesel blend. *Journal of Automobile Engineering* 2017; 217(9): 819-824.
- Hou J., Wen Z., Jiang Z., Qiao X. Study on combustion and emissions of a turbocharged compression ignition engine fueled with dimethyl ether and biodiesel blends. *Journal of the Energy Institute* 2014; 87: 102-113.
- Huang Z., Qiao X., Zhang W., Wu J., Zhang J. Dimethyl ether as alternative fuel for CI engine and vehicle. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China* 2009; 3(1): 99-108.
- Inayat A., Ghenai C., Naqvi M., Ammar M., Ayoub M., Hussin MNB. Parametric study for production of dimethyl ether (DME) as a fuel from palm wastes. *Energy Procedia* 2017; 105: 1242-1249.
- Jalanapurkar M., Patel K., Patel T., Rathod G., Granipa H. 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* 2015; 2(1): 262-266.
- Jang J., Bae C. Effects of valve events on the engine efficiency in a homogeneous charge compression ignition engine fueled by dimethyl ether. *Fuel* 2009; 88: 1228-1234.
- Jeon J., Kwon S., Park YH., Oh Y., Park S. Visualizations of combustion and fuel/air mixture formation processes in a single cylinder engine fueled with DME. *Applied Energy* 2014; 113: 294-301.

- Kajitani S. A study of low compression ratio diesel engines operated with neat dimethyl ether (DME). *JSME TED Newsletter* 2004; 42: 1-14.
- Kajitani S., Chen Z. Fundamental research on next generation fuel (dimethyl ether) engines. *Journal of Scientific & Industrial Research* 2003; 62: 133-144.
- Khunaphan S., Hartley UW., Theinnoi K. Characterization and potential of dimethyl ether (DME) as dual fuel combustion in a compression ignition engine. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology* 2013; 2(3): 79-85.
- Kim HJ., Park SH. Optimization study on exhaust emissions and fuel consumption in a dimethyl ether (DME) fueled diesel engine. *Fuel* 2016; 182: 541-549.
- Kim HJ., Park SH., Lee KS., Lee CS. A study of spray strategies on improvement of engine performance and emissions reduction characteristics in a DME fueled diesel engine. *Energy* 2011; 36: 1802-1813.
- Kim HJ., Park SW., Lee CS. Numerical and experimental study on the combustion and emission characteristics of a dimethyl ether (DME) fueled compression ignition engine. *Oil & Gas Science and Technology* 2012; 67(3): 479-489.
- Kowalewicz A., Wojtyniak M. Alternative fuels and their application to combustion engines. *Journal of Automobile Engineering* 2005; 219: 103-125.
- Kropiwnicki J., Dominiczak P., Kneba Z. Analysis of the possibilities of using of DME fuel in motor boat drive systems. *Combustion Engines* 2017; 171(4): 74-80.
- Lamani VT., Yadav AK., Narayanappa KG. 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* 2017; 24: 15500-15509.
- Lecksiwilai N., Gheewala SH., Sagisaka M., Yamaguchi K. 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* 2016; 134: 523-531.
- Li G. Dimethyl ether (DME): a new alternative fuel for diesel vehicle. *Advanced Materials Research* 2011; 156-157: 1014-1018.
- Lim OT., Iida N. A study on the spray and engine combustion characteristics of diesel-dimethyl ether fuel blends. *Journal of Automobile Engineering* 2015; 229(6): 782-792.
- Loganathan M., Anbarasu A., Velmurugan A. Emission characteristics of jatropha-ethanol and jatropha-dimethyl ether fuel blends on a DI diesel engine. *Journal of Mechanical Engineering* 2012a; 42(1): 38-46.
- Loganathan M., Anbarasu A., Velmurugan A. Emission characteristics of jatropha-dimethyl ether fuel blends on a DI diesel engine. *International Journal of Scientific & Technology Research* 2012b; 1(8): 28-32.

- Maji S., Ahmed S., Siddiqui WA., Kumar A. 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* 2014; 3(11): 17221-17228.
- Maji S., Ahmed S., Siddiqui WA., Aggarwal S., Kumar A. 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* 2015; 3(2): 48-52.
- Mohan B., Yang W., Yu W., Tay KL. Numerical analysis of spray characteristics of dimethyl ether and diethyl ether fuel. *Applied Energy* 2017; 185: 1403-1410.
- Namasivayam AM., Korakianitis T., Crookes RJ., Bob-Manuel KDH., Olsen J. Biodiesel, emulsified biodiesel and dimethyl ether as pilot fuels for natural gas fuelled engines. *Applied Energy* 2010; 87: 769-778.
- Oda Y., Osafune Y., Ueda H., Fujimura K. Clean combustion technology in diesel engines operated with dimethyl ether. *Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review* 2004; 40(6): 1-5.
- Park S. Optimization of combustion chamber geometry and engine operating conditions for compression ignition engines fueled with dimethyl ether. *Fuel* 2012; 97: 61-71.
- Park SH., Lee CS. Combustion performance and emission reduction characteristics of automotive DME engine system. *Progress in Energy and Combustion Science* 2013; 39: 147-168.
- Park SH., Lee CS. Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel. *Energy Conversion and Management* 2014; 86: 848-863.
- Park SH., Kim HJ., Lee CS. 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* 2010; 91: 504-513.
- Park SH., Shin D., Park J. Effect of ethanol fraction on the combustion and emission characteristics of a dimethyl ether-ethanol dual-fuel reactivity controlled compression ignition engine. *Applied Energy* 2016; 182: 243-252.
- Park SH., Yoon SH., Cha J., Lee CS. Mixing effects of biogas and dimethyl ether (DME) on combustion and emission characteristics of DME fueled high-speed diesel engine. *Energy* 2014; 66: 413-422.
- Patil KR., Thipse SS. The potential of DME-diesel blends as an alternative fuel for CI engines. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2012; 2(10): 35-41.
- Prabhakaran B., Thennarasu P., Karthick S. Performance and characteristics of a CI engine using DME (Dimethyl Ether). *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2015; 4(2): 31-34.
- Roh HG., Lee D., Lee CS. 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* 2015; 88: 376-385.

- Ryu K., Zacharakis-Jutz GE., Kong S-C. Performance characteristics of compression- ignition engine using high concentration of ammonia mixed with dimethyl ether. *Applied Energy* 2014; 113: 488-499.
- Semelsberger TA., Borup RL., Grene HL. Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. *Journal of Power Sources* 2006; 156: 497-511.
- Sezer I. Thermodynamic, performance and emission investigation of a diesel engine running on dimethyl ether and diethyl ether. *International Journal of Thermal Sciences* 2011; 50: 1594-1603.
- Smolec R., Idzior M., Karpiuk W., Kozak M. Assessment of the potential of dimethyl ether as an alternative fuel for compression ignition engines. *Combustion Engines* 2017; 169(2): 181-186.
- Song J., Huang Z., Qiao X., Wang W. Performance of a controllable premixed combustion engine fueled with dimethyl ether. *Energy Conversion and Management* 2004; 45: 2223-2232.
- Suh HK., Lee CS. 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* 2008; 87: 925-932.
- Taghavifar H., Khalilarya S., Mirhasani S., Jafarmadar S. 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* 2014; 39: 9515-9526.
- Teng H., McCandless JC., Scheneyer Jeffrey B. Thermochemical characteristics of dimethyl ether alternative fuel for compression-ignition. *Society of Automotive Engineers* 2001; Paper no 2001-01-0154.
- Theinnoi K., Suksompong P., Temwutthikun W. Engine performance of dual fuel operation with in-cylinder injected diesel fuels and in-port injected DME. *Energy Procedia* 2017; 142: 461-467.
- Thomas G., Feng B., Veeraragavan A., Cleary MJ., Drinnan N. Emissions from DME combustion in diesel engines and their implications on meeting future emission norms: A review. *Fuel Processing Technology* 2014; 119: 286-304.
- Vispute KM., Pawar TJ. Study and prospects of di-methyl ether as an alternative fuel in C.I. engine: review. *International Journal of Trend in Research and Development* 2016; 3(4): 134-138.
- Wang HW., Zhou LB., Jiang DM., Huang ZH. Study on the performance and emissions of a compression ignition engine fuelled with dimethyl ether. *Journal of Automotive Engineering* 2000; 214: 101-106.
- Wang Y., Xiao F., Zhao Y., Li D., Lei X. Study on cycle-by-cycle variations in a diesel engine with dimethyl ether as port premixing fuel. *Applied Energy* 2015; 143: 58-70.
- Wang Y., Zhao Y., Yang Z. Dimethyl ether energy ratio effects in a dimethyl ether-diesel dual fuel premixed charge compression ignition engine. *Applied Thermal Engineering* 2013; 54: 481-487.

- Wang Y., Zhao Y., Xiao F., Li D. Combustion and emission characteristics of a diesel engine with DME as port premixing fuel under different injection timing. *Energy Conversion and Management* 2014; 77: 52-60.
- Wattanavichien K. Implementation of DME in a small direct injection diesel engine. *International Journal of Renewable Energy* 2009; 4(2): 1-12.
- Xinling L., Zhen H. Emission reduction potential of using gas-to-liquid and dimethyl ether fuels on a turbocharged diesel engine. *Science of the Total Environment* 2009; 407: 2234-2244.
- Xu S., Wang Y., Zhang X., Zhen X., Tao C. Development of a novel common-rail type dimethyl ether (DME) injector. *Applied Energy* 2012; 94: 1-12.
- Yanju W., Kun W., Wenrui W., Shenghua L., Xiao C., Yajing Y., Shanwen B. Comparison study on the emission characteristics of diesel- and dimethyl ether-originated particulate matters. *Applied Energy* 2014; 130: 357-369.
- Ying W., Li H., Longbao Z., Wei L. Effects of DME pilot quantity on the performance of a DME PCCI-DI engine. *Energy Conversion and Management* 2010; 51: 648-654.
- Ying W., Longbao Z., Hewu W. Diesel emission improvements by the use of oxygenated DME/diesel blend fuels. *Atmospheric Environment* 2006; 40: 2313-2320.
- Ying W., Longbao Z., Zhongji Y., Hongyi D. Study on combustion and emission characteristics of a vehicle engine fuelled dimethyl ether. *Journal of Automotive Engineering* 2005; 219: 263-269.
- Yoon SH., Cha JP., Lee CS. 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* 2010; 91: 1364-1372.
- Yoon SH., Han SC., Lee CS. Effects of high EGR rate on dimethyl ether (DME) combustion and pollutant emission characteristics in a direct injection diesel engine. *Energies* 2013; 6: 5157-5167.
- Youn IM., Park SH., Roh HG., Lee CS. 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* 2011; 92: 1280-1287.
- Zhao Y., Wang Y., Li D., Lei X., Liu S. Combustion and emission characteristics of a DME (dimethyl ether)-diesel dual fuel premixed charge compression ignition engine with EGR (exhaust gas recirculation). *Energy* 2014; 72: 608-617.
- Zhu Z., Li D.K., Liu J., Wei YJ., Liu SH. Investigation on the regulated and unregulated emissions of a DME engine under different injection timing. *Applied Thermal Engineering* 2012; 35: 9-14.