

Atf İçin: Sezer, İ. (2023). Dizel Motorlarda Dimetil Eter Kullanımının Partikül Madde Emisyonlarına Etkileri Üzerine Bir Derleme. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(2), 1212–1229.

To Cite: Sezer, İ. (2023). A Review on the Effects of Using Dimethyl Ether on Particulate Matter Emissions in Diesel Engines. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(2), 1212–1229.

Dizel Motorlarda Dimetil Eter Kullanımının Partikül Madde Emisyonlarına Etkileri Üzerine Bir Derleme

İsmet SEZER^{1*}

Öne Çıkanlar:

- Dizel yakıtı–DME karışımlarının dizel motorlarda kullanımı
- Dizel yakıtı–DME karışımlarının PM emisyonlarına etkileri
- Çeşitli alternatif yakıtlar ile DME karışımlarının PM emisyonlarına etkileri

Anahtar Kelimeler:

- Dizel motor
- Dimetil eter
- Motor performansı
- Yakıt katkıları
- PM emisyonları

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 konvertör 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_x) ve partikül madde (PM) emisyonlarıdır. 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 PM emisyonları üzerindeki etkilerinin incelenmesine odaklanmıştır. Yapılan derleme çalışması sonucunda; DME saf olarak kullanıldığında yüksek oksijen içeriği, kimyasal yapısında direkt bağlı karbon bulunmaması, hızlı buharlaşma, yüksek setan sayısı ve düşük tutuşma sıcaklığı gibi özellikleri sayesinde sifıra yakın PM emisyonu elde edilmesini sağladığı belirlenmiştir. Saf DME'nin dizel yakıtına kıyasla PM emisyonunu %13–228 ve biyodizel yakıtına kıyasla %88.6–227.6 azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, farklı oranlarda DME içeren dizel–DME karışımlarının dizel yakıtına kıyasla PM emisyonunu %4.7–509 azalttığı ve farklı oranlarda DME içeren biyodizel–DME karışımlarının PM emisyonunu biyodizel yakıtına kıyasla %38.2 azalttığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, LPG–DME karışımının dizel yakıtına kıyasla PM emisyonunu %269–493 azalttığı ve farklı oranlarda DME içeren DME–NH₃ karışımlarının saf DME'ye kıyasla PM emisyonunu %40.7–96.7 artırdığı tespit edilmiştir. Öte yandan, egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) oranının %10–50 aralığında değiştirilmesinin PM emisyonunu %13.1–48.4 artırdığı tespit edilmiştir.

A Review on the Effects of Using Dimethyl Ether on Particulate Matter Emissions in Diesel Engines

Highlights:

- The use of diesel fuel–DME blends in diesel engines
- Effects of diesel fuel–DME blends on PM emissions
- Effects of various alternative fuels and DME blends on PM emissions

Keywords:

- Diesel engine
- Dimethyl ether
- Engine performance
- Fuel additive
- PM emissions

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_x) and particulate matter (PM). It is very difficult to reduce 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 fuel additive. This review study investigates the effects of using dimethyl ether on particulate matter (PM) emissions. As a result of this review study; it was determined that when DME is used in pure form, it provides nearly zero PM emission due to its features such as high oxygen content, the absence of directly bonded carbon in its chemical structure, rapid evaporation, high cetane number and low ignition temperature. It was determined that pure DME was found to reduce the PM emissions by 13–228% compared to diesel fuel and 88.6–227.6% compared to biodiesel fuel. It was also determined that diesel–DME blends containing different ratios of DME reduced the PM emissions by 4.7–509% compared to diesel fuel, and biodiesel–DME blends containing different ratios of DME reduced the PM emissions by 38.2% compared to biodiesel fuel. On the other hand, it was determined that the LPG–DME blend decreased the PM emissions by 269–493% compared to diesel fuel, and the DME–NH₃ blends containing different amounts of DME increased the PM emissions by 40.7–96.7% compared to pure DME. Moreover, it was determined that changing the exhaust gas recirculation (EGR) ratio between 10–50% increased PM emissions by 13.1–48.4%.

¹ İsmet SEZER (Orcid ID: 0000-0001-7342-9172), Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

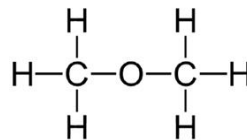
*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: İsmet SEZER, e-mail: isezer@gumushane.edu.tr

GİRİŞ

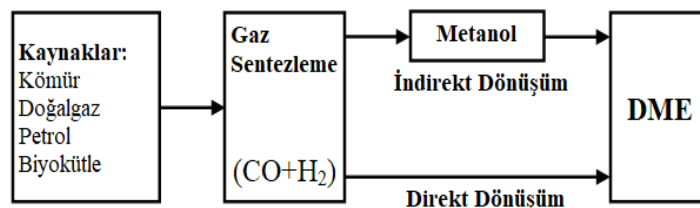
Dizel motorların yüksek tork, düşük yakıt tüketimi ve benzin motorlarına kıyasla daha düşük hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO₂) emisyonu seviyeleri sayesinde daha tercih edilebilir olduğu söylenebilir (Yoon ve ark., 2010). Ancak, dizel motorları atmosfere benzin motorlarından daha yüksek seviyede partikül madde (PM) ve azot oksit (NO_x) emisyonu yaymaktadırlar. Bu nedenle, birçok araştırmacı daha düşük emisyon değerlerine sahip dizel motorlar geliştirmeye yönelik alternatif yakıtlar üzerine araştırmalar yapmaktadır (Youn ve ark., 2011). Çeşitli alternatif yakıtlar arasında, dimetil eter (DME) kömürden, doğalgazdan ve farklı biyokütle kaynaklarından üretilmesi sayesinde oldukça umut verici bir alternatif yakıt olarak görülmektedir (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'nin kullanımı üzerine yapılmış çalışmaların sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi pratik uygulamalar açısından oldukça önemlidir. Bu derleme çalışması DME kullanımının PM emisyonları üzerindeki etkilerinin incelenmesini amaçlamaktadır.

Dimetil Eterin Karakteristikleri

DME, Şekil 1'de kimyasal yapısından da görüleceği gibi CH₃-O-CH₃ (C₃H₆O) kimyasal formülüne sahip basit eterlerden birisidir. Genel olarak, DME'nin fiziksel özellikleri sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)'nin özelliklerine çok benzerdir. Bu nedenle, DME'nin depolanması, nakliyesi ve yakıt istasyonlarında taşıtların deposuna aktarılması ilgili gereklilik ve şartlar LPG ile aynıdır (Alam ve Kajitani, 2001). Şekil 2'de gösterildiği gibi, DME direkt veya indirekt sentetik metotlarla üretilmektedir. Direkt üretim yönteminde DME doğrudan doğalgazdan üretilirken, indirekt üretim yönteminde metanolün sentetik dehidrasyonu ile üretilmektedir (Park ve Lee 2014). Enerji eşdeğeri değerlendirildiğinde DME'nin 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'nin taşıt üzerinde yakıt tankından motora sevk edilebilmesi sırasında buhar tıkaçı oluşumunu engellemek için yakıt enjeksiyon sisteminde basıncın 1.7–2 MPa aralığına yükseltilmesi gerekir (Duan ve ark., 2012; Kowalewicz ve Wojtyniak, 2005).



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



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

Dizel yakıtı ve DME'nin 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'nin ısıl 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 daha yüksek olması nedeniyle daha iyi tutuşma özelliklerine sahiptir. DME'nin buharlaşma gizli ısı dizel yakıtına kıyasla oldukça yüksek olduğundan yakıt-hava karışımının sıcaklığının düşürülmesine yardımcı olur.

Çizelge 1. DME ve dizel yakıtının özellikleri (Huang ve ark., 2009)

Özellik	DME	Dizel
Kimyasal formülü	CH ₃ -O-CH ₃	C _x H _y
Moleküler ağırlığı, g/mol	46.07	170
Kaynama noktası, °C	-24.9	180-360
Sıvı fazdaki yoğunluğu, kg/m ³	668	840
Sıvı fazdaki viskozitesi, cP	0.15	4.4-5.4
Alt ısıl 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 ²	6.37x10 ⁸	1.486x10 ⁹
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 neredeyse hiç PM üretimi olmaz. Düşük gürültü seviyesine sahip, yüksek oranda egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) oranını tolere edilebilir ve NO_x 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'nin yetersiz yağlama özelliği yakıt sistemindeki hareketli parçalarda aşınmalara neden olabilir. Bu nedenle, DME'nin içerisine sızıntı ve aşınmayı önleyici katkıları katılması gereklidir. DME'nin 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 ve ark., 2010). Ek olarak, DME metal malzemeler için korozif değildir (Park ve Lee, 2014).

Yukarıda belirtilen edilen avantajlı yakıt özelliklerine rağmen, yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda DME'nin taşıtlar üzerinde uygulamasının yaygınlaşabilmesi için aşağıdaki sorunların çözüme kavuşturulması gerektiği görülmüştür.

- İhtiyaç duyulan motor gücü ve araç türüne göre istenen gereksinimleri karşılayacak şekilde DME yakıt sisteminde bir yakıt besleme pompası ve yüksek basınç pompasının tasarımı gereklidir. Bu pompaların tasarım ve üretiminde, DME'nin yüksek buhar basıncı, yüksek sıkıştırılabilirliği, düşük viskozite ve kauçuk ve bazı plastikler gibi sızdırmazlık elemanlarını çözebilme eğilimi gibi özelliklerinin göz önünde bulundurulması gereklidir.
- DME'nin düşük viskozitesinden dolayı ortaya çıkan yetersiz yağlayıcılığı yakıt pompası elemanlarında aşınma ve sızıntılara yol açabilir. Bunu önlemek için DME yakıtına uygun yağlayıcı katkı maddeleri eklenmelidir. Ayrıca, DME'nin yüksek buhar basıncının düşük viskozitesiyle birleşmesi sonucunda yakıt iletim hattında buhar tıkaçı ve kavitasyon oluşabilir. Bu olumsuzlukları

önlemek için yakıt soğutma ve sıcaklık kontrol ünitesinin DME yakıt sistemine eklenmesi gereklidir.

- DME, dizel yakıtından daha düşük yoğunluğa ve ısıl değere sahip olduğundan, motorun aynı gücü üretmesi için silindire daha fazla miktarda DME gönderilmesi gerekir. Bu nedenle, DME için daha büyük yakıt enjektörleri, yakıt pompaları ve yakıt tankları kullanılması gereklidir.
- DME'nin püskürtme ve buharlaşma özellikleri dizel yakıtından farklı olduğundan dizel yakıtı için kullanılan aşırı yüksek basınçlı püskürtme teknolojisi DME için uygun değildir. Ayrıca, DME için en uygun enjektör memesi çapı ve yanma odası geometrisinin tasarımı için önceden bir püskürtme stratejisinin belirlenmesi gerekir. DME için maksimum püskürtme basıncı 300 barı geçmeyen ortak hatlı (common rail) elektronik kontrollü yakıt püskürtme sistemleri oldukça uygundur. Bu sistem sayesinde püskürtme zamanı ve süresi en uygun şekilde ayarlanabilir.

Sonuç olarak, DME çok düşük PM emisyonu sağlaması nedeniyle dizel motor yakıtı olarak oldukça cazip bir alternatiftir. Çünkü PM emisyonu motor performansı ve çevre açısından önemli olumsuz etkilere sahip olduğundan dizel motorlar için en önemli sorunlardan birisidir. DME'nin dizel motorlara uygulanabilmesi için sadece yakıt sisteminde değişiklikler yapılması gereklidir. Ayrıca, turbo şarj sistemi sayesinde motor performansı ile ilgili olumsuzluklar ortadan kaldırılabileceği ve egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) sistemi sayesinde NO_x emisyonlarının önemli ölçüde azaltılabileceği belirtilmektedir. Tüm bu değişiklikler motorun temel yapısında ve ana elemanlarında önemli bir değişikliğe gerek kalmadan karşılanabilir bir maliyetle yapılabilir. Ayrıca, DME çevre dostu ve yenilenebilir bir seçenek olarak daha düşük bir maliyetle benzin-LPG uygulamasına benzer şekilde çift yakıtlı motor uygulamalarında dizel yakıtı veya diğer yakıtlarla birlikte kullanılabilir (Maji ve ark., 2014; Park ve Lee, 2014; Thomas ve ark., 2014).

Dimetil Eter ile İlgili Literatür Çalışmaları

Literatürde, DME'nin üretim teknolojileri, yakıt özellikleri, yanma karakteristikleri, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerine yapılmış oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Üretim teknolojileri üzerine yapılmış çalışmalarda (Azizi ve ark., 2014; Lecksiwilai ve ark., 2016; Inayat ve ark., 2017) farklı üretim teknikleri incelenmiş ve bunlar maliyet açısından değerlendirilmiştir. Yakıt özellikleri üzerine yapılmış çalışmalarda (Park ve Lee, 2014; Park ve Lee 2013; Teng ve ark., 2001; Maji ve ark., 2015) özellikle DME'nin 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 (Guangxin ve ark., 2013; Jalanapurkar ve ark., 2015; Kim ve ark., 2011; Xu ve ark., 2012; Lim ve Iida, 2015; Suh ve Lee, 2008; Genbao ve ark., 2012; Mohan ve ark., 2017) DME'nin düşük yoğunluk ve düşük viskozite sayesinde püskürtme karakteristiklerini nasıl iyileştirdiğiyle ilgili incelemeler yapılmıştır. Yanma karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalarda (Park ve Lee, 2013; El-Hagar, 2014; Wang ve ark., 2015; Jeon ve ark., 2014; Baskaran, 2015; Park, 2012; Benajes ve ark., 2018; Oda ve ark., 2004; Song ve ark., 2004; Khunaphan ve ark., 2013; Lamani ve ark., 2017; Chapman ve Boehman, 2008; Ying ve ark., 2005; Benajes ve ark., 2018) DME'nin tutuşma gecikmesi süresi, yanma süresi, kütleli yanma oranı, silindir basıncı ve yanma sıcaklıkları gibi parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Motor performans karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalarda (Kropiwnicki ve ark., 2017; Smolec ve ark., 2017; Namasivayam ve ark., 2010; Jang ve Bae, 2009; Ryu ve ark., 2014; Semelsberger ve ark., 2006; Li, 2011; Sezer, 2011; Wang ve ark., 2013; Ying ve ark., 2010; Chen ve ark., 2000; Arcoumanis ve ark., 2008; Taghavifar ve ark., 2014; Patil ve Thipse 2012; Vispute ve Pawar, 2016; Theinnoi ve ark., 2017; Deepak ve ark., 2015; Kajitani, 2004; Hewu ve

Longbao 2017; Prabhakaran ve ark., 2015; Kajitani ve Chen, 2003; Abhishek ve ark., 2017) DME'nin 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 (Loganathan ve ark., 2012; Kim ve Park, 2016; Park ve ark., 2016; Geng ve ark., 2017; Loganathan ve ark., 2012; Zhao ve ark., 2014; Hou ve ark., 2014; Ying ve ark., 2006; Xinling ve Zhen, 2009; Yanju ve ark., 2014; Wang ve ark., 2014; Park ve ark., 2010; Thomas ve ark., 2014; Yoon ve ark., 2013; Roh ve ark., 2015; Zhu ve ark., 2012; Park ve ark., 2014; Bogdan ve ark., 2017; Kim ve ark., 2012; Wang ve ark., 2000; Ambekar ve Hole, 2018; Longbao ve ark., 2002) DME'nin daha çok karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC), partikül madde (PM) veya is, azot oksitler (NO_x) ve karbondioksit (CO₂) gibi genel emisyonlar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

DME'nin saf olarak veya diğer yakıtlarla birlikte dizel motorlarda kullanımına yönelik deneysel çalışmalarda genellikle deneysel çalışmalar için özel üretilmiş deney motorları kullanılarak DME'nin püskürtme, yanma, performans ve emisyon karakteristiklerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir (Song ve ark., 2004; Oda ve ark., 2004; Chapman ve Boehman, 2008; Genbao ve ark., 2012; Xu ve ark., 2012; Khunaphan ve ark., 2013; El-Hagar, 2014; Jeon ve ark., 2014; Ryu ve ark., 2014; Lim ve Iida, 2015). Simülasyon ve modelleme çalışmalarında ise kimyasal, termodinamik ve akışkanlar dinamiği esaslı modeller kullanılarak DME'nin saf olarak veya diğer yakıtlarla birlikte kullanılması durumunda yakıt sistemindeki akış hareketlerinin püskürtme, yakıt-hava karışımı oluşumu ve yanma üzerindeki etkileri incelenmektedir. Ayrıca, DME'nin kullanıma yönelik modelleme çalışmalarında emme ve egzoz kanallarındaki ve yanma odası içerisindeki akış hareketlerinin yanma, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir (Teng ve ark., 2001; Suh ve Lee, 2008; Jang ve Bae, 2009; Namasivayam ve ark., 2010; Sezer, 2011; Kim ve ark., 2011; Park, 2012; Wang ve ark., 2015; Mohan ve ark., 2017; Lamani ve ark., 2017; Benajes ve ark., 2018).

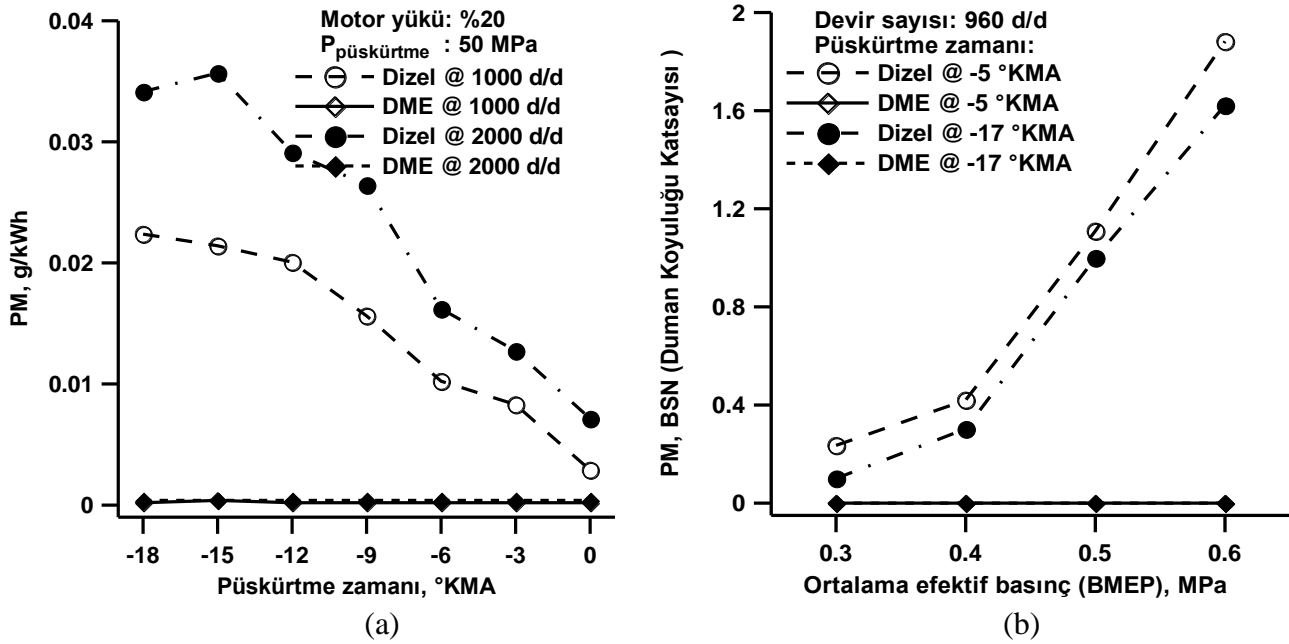
Çizelge 2. DME kullanımı ile PM emisyonundaki değişim oranları

Ana Yakıt–Karşılaştırma Yakıtı	DME oranı	PM Değişim Oranı (%)	Kaynak
Dizel–DME	%100	↓14–115	(Youn ve ark., 2011)
Dizel–DME	%100	↓13–228	(Huang ve ark., 2009)
Dizel–DME	%100	↓20–154	(Smolec ve ark., 2017)
Dizel–Dizel+DME	%10–40	↓17–180	(Wang ve ark., 2013)
Dizel–Dizel+DME	%10–90	↓4.7–74.5	(Theinnoi ve ark., 2017)
Dizel–Dizel+DME	% –	↓59–85.7	(Duan ve ark., 2012)
Dizel–Dizel+DME	% –	↓27–56.5	Khunaphan ve ark., 2013)
Dizel–Dizel+DME	%5–10	↓5.1–39.1	(Lim ve Iida, 2015)
Dizel–Dizel+DME	%5–20	↓10–33	(Lamani ve ark., 2017)
Dizel–Dizel+DME	%10–20	↑2–10.1	(Prabhakaran ve ark., 2015)
Dizel–Dizel+DME	%10–30	↓76.5–509	(Ying ve ark., 2006)
Dizel–Dizel+DME	%15–40	↓26.9–300	(Zhao ve ark., 2014)
Biyodizel–DME	%100	↓88.6–227.6	(Hou ve ark., 2014)
Biyodizel–Biyodizel+DME	%50	↑19.2–42	(Hou ve ark., 2014)
Biyodizel–Biyodizel+DME	%70	↑10.2–↓38.2	(Hou ve ark., 2014)
Dizel–Biyodizel+DME	%80	↓483–857	Roh ve ark., 2015)
Dizel+Biyodizel–Biyodizel+DME	%80	↓216–571	Roh ve ark., 2015)
Dizel–LPG+DME	% –	↓269–493	(El-Hagar, 2014)
DME–DME+NH ₃	%40	↑40.7–89.6	(Ryu ve ark., 2014)
DME–DME+NH ₃	%60	↑78.4–96.7	(Ryu ve ark., 2014)

PM emisyonu motor performansı ve çevre açısından önemli olumsuz etkilere sahip olduğundan dizel motorlar için en önemli sorunlardan birisidir. Ayrıca, dizel motorlarda PM emisyonlarını azaltmak için kullanılan partikül filtreleri oldukça pahalı donanımlar olup belli bir kullanım süresi sonunda tıkanıklarında motor performansı önemli ölçüde azalmakta ve temizlenmeleri veya değişimleri oldukça maliyetli olmaktadır. Çizelge 2'de görüldüğü gibi DME saf veya yakıt katkısı

olarak kullanıldığında PM emisyonunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada DME'nin PM emisyonlarına etkileri üzerine bir değerlendirme yapılmıştır.

Dimetil Eterin Pm Emisyonlarına Etkileri

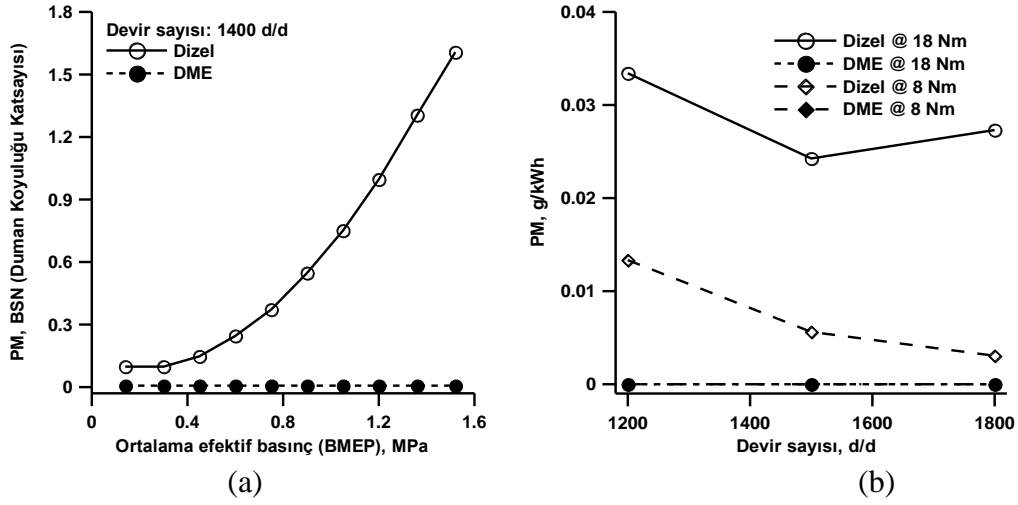


Şekil 3. Dizel ve DME yakıtları için PM emisyonunun a) püskürtme zamanı (Youn ve ark., 2011) ve b) BMEP (Alam ve Kajitani, 2001) ile değişimi

Şekil 3(a)'da dizel ve DME yakıtlarına için PM emisyonunun farklı devir sayılarında püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekil üzerindeki KMA krank mili açısıdır. Şekilde görüldüğü gibi DME yakıtı kimyasal karakteristiklerinden dolayı sıfıra çok yakın PM emisyonu değerlerine sahiptir. DME'nin kimyasal yapısında direkt karbon bağı bulunmaz ve %34.8 oranında oksijen içerir. Bu nedenle PM emisyonu oluşumunu doğal olarak önler. Diğer taraftan, çok hızlı gerçekleşen difüzyon (kontROLSÜZ) yanma fazı da PM emisyonunun sıfıra yakın değerlerde olmasını sağlar. Grafikte, motor devri arttıkça PM emisyonun da arttığı açıkça görülmektedir. Bu durum devir sayısı arttıkça yanma işlemi için gerekli sürenin kalmamasından kaynaklanmaktadır (Youn ve ark., 2011). Şekil 3(b)'de dizel ve DME yakıtları için PM emisyonunun farklı püskürtme avansı değerlerinde BMEP (Ortalama Efektif Basınç) ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME yakıtı sıfıra çok yakın PM emisyonu değerleri vermiştir. DME yakıtının en önemli avantajlarından birisi de dizel motorlarda kullanıldığında oldukça fakir yakıt-hava karışımı sağlaması ve yukarıda bahsedilen yakıt özellikleri sayesinde PM emisyonunu azaltmasıdır (Alam ve Kajitani, 2001).

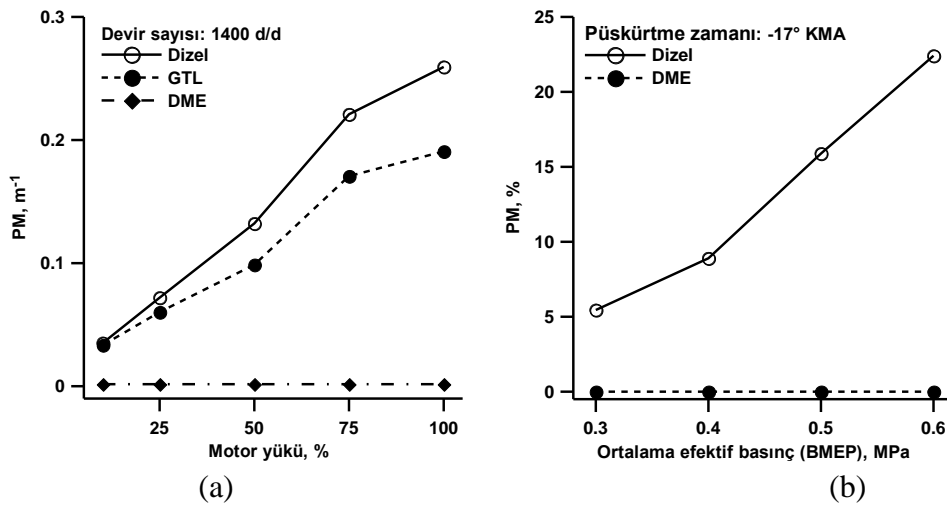
Şekil 4(a)'da 1400 d/d devir sayısında dizel ve DME yakıtları için PM emisyonunun BMEP (motor yükü) ile değişimi verilmiştir. Şekil üzerindeki BSN Duman Koyuluğu Katsayısı olup PM emisyonu miktarını gösteren boyutsuz bir birimdir. Şekilde görüldüğü gibi DME yakıtı tüm motor yüklerinde sıfıra yakın PM emisyonu değerlerine sahiptir. Bu durum DME'nin kimyasal yapısında direkt karbon bağı bulunmaması ve içeriğinde oksijen bulunması nedeniyle PM emisyonunu azalttığından kaynaklanmaktadır (Huang ve ark., 2009). Şekil 4(b)'de dizel ve DME yakıtları için PM emisyonunun farklı moment değerlerinde devir sayısı ile değişimi verilmiştir. DME kimyasal özellikleri sayesinde tüm motor devri ve yüklerinde neredeyse sıfır PM emisyonu değerleri vermiştir. Yakıtın yapısında bulunan asetilen ve aromatik hidrokarbonlar PM emisyonu oluşumunda önemli rol oynar ve PM oluşumu yakıtın kimyasal yapısında direkt karbon bağı bulunmasına bağlıdır. DME'nin içeriğinde oksijen bulunması ve kimyasal yapısında direkt karbon bağı olmaması PM emisyonu

oluşumunu önemli ölçüde engeller ve DME yakıtı kullanıldığında sifıra yakın PM emisyonu ortaya çıkar. Diğer taraftan, dizel yakıtı kullanıldığında PM emisyonu düşük devir sayısında ve özellikle motor yükü arttıkça püskürtülen yakıt miktarının artması nedeniyle artmıştır (Jeon ve ark., 2014).

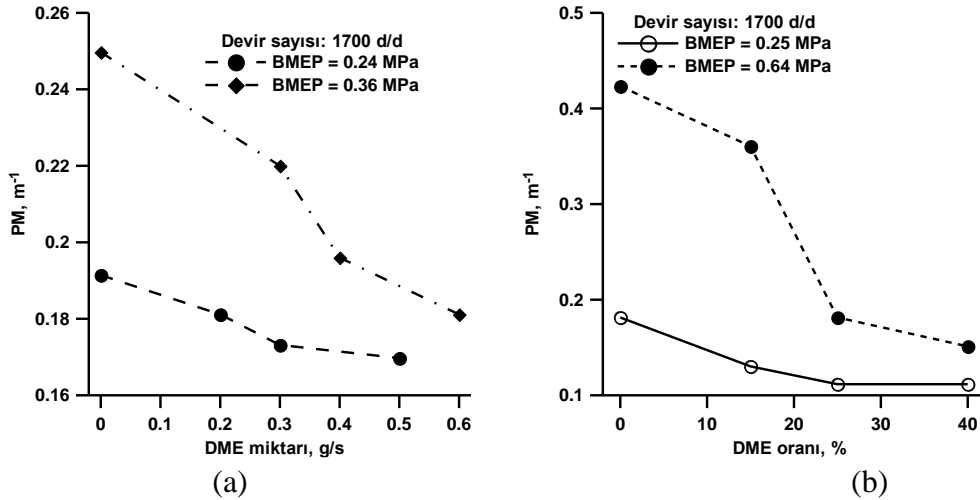


Şekil 4. Dizel ve DME yakıtları için PM emisyonunun a) BMEP (Huang ve ark., 2009) ve b) devir sayısı (Jeon ve ark., 2014) ile değişimi

Şekil 5(a)'da 1400 d/d motor devrinde dizel, gazdan türetilmiş likit (GTL) ve DME yakıtları için PM emisyonunun farklı motor yükü ile değişimi verilmiştir. DME ile ilgili yapılan çalışmaların çoğu DME'nin dizel yakıtından daha iyi emisyon değerleri verdiğini bildirmektedir. Şekilde görüldüğü gibi dizel motorlar için önemli sorun olan PM emisyonu DME kullanıldığında sifıra yakın değerler almıştır. Bu durum DME'nin düşük kaynama noktası sıcaklığına sahip olması sayesinde kolayca buharlaşması sonucu daha iyi bir yakıt-hava karışımı oluşturmasından, içeriğinde oksijen bulunması ve kimyasal yapısında direkt karbon bağı bulunmamasından kaynaklanmaktadır (Smolec ve ark., 2017). Şekil 5(b)'de 17° KMA (Krank Mili Açısı) püskürtme avansında dizel ve DME yakıtları için PM emisyonunun BMEP ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dizel yakıtı için PM emisyonu artan motor yükü ile artarken DME tüm yük değerlerinde sifıra yakın PM emisyonu sağlamıştır. Bunun sebebinin DME'nin içeriğinde oksijen bulunması ve kimyasal yapısında direkt bağlı karbon bulunmaması olduğu belirtilmiştir (Chen ve ark., 2000).

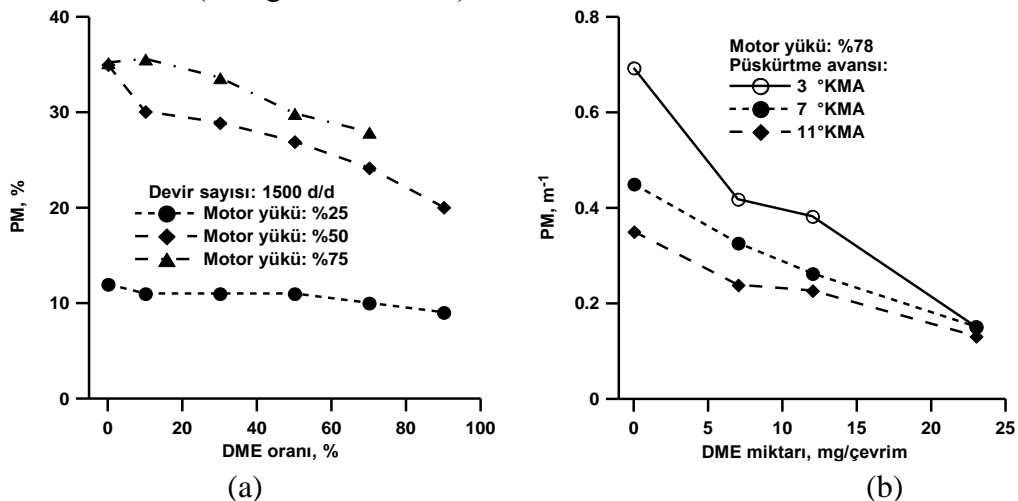


Şekil 5. Dizel, gazdan türetilmiş likit (GTL) ve DME yakıtları için PM emisyonunun a) motor yükü (Smolec ve ark., 2017) ve b) BMEP (Chen ve ark., 2000) ile değişimi



Şekil 6. Farklı DME oranlarında PM emisyonunun motor yükü ile değişimi a) (Wang ve ark., 2015) ve b) (Wang ve ark., 2013)

Şekil 6(a)'da 1700 d/d devir sayısında PM emisyonunun farklı BMEP değerlerinde DME miktarı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi her iki yük değerinde DME oranının artması PM emisyonunun azalmasını sağlamıştır. DME'nin dizel yakıtı ile birlikte kısmen ön karışımli bir dizel motorda kullanılması kontrolsüz yanma süresini kısaltarak DME'nin kimyasal özelliklerinden kaynaklanan avantajları sayesinde PM emisyonunun azalmasını sağlamıştır (Wang ve ark., 2015). Şekil 6(b)'de 1700 d/d devir sayısında PM emisyonunun farklı BMEP değerlerinde DME oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dizel–DME çift yakıtla çalışma durumunda her iki yük değerinde dizel yakıtına göre daha düşük PM emisyonu değerleri elde edilmiştir. Dizel motorlarda PM emisyonu çoğunlukla difüzyon yanma fazında zengin yakıt–hava karışımının bulunduğu püskürtülen yakıt demetinin merkezinde oluşur. DME oranının artması difüzyon yanma süresini kısalttığından PM emisyonunun azalmasını sağlamaktadır. Gaz yakıtlar doğal olarak PM emisyonuz yanma sağlama özelliğine sahiptir. Bu nedenle dizel motorlarda dizel–DME çift yakıtla çalışma PM emisyonunun kontrolü için kullanılabilir (Wang ve ark., 2013).

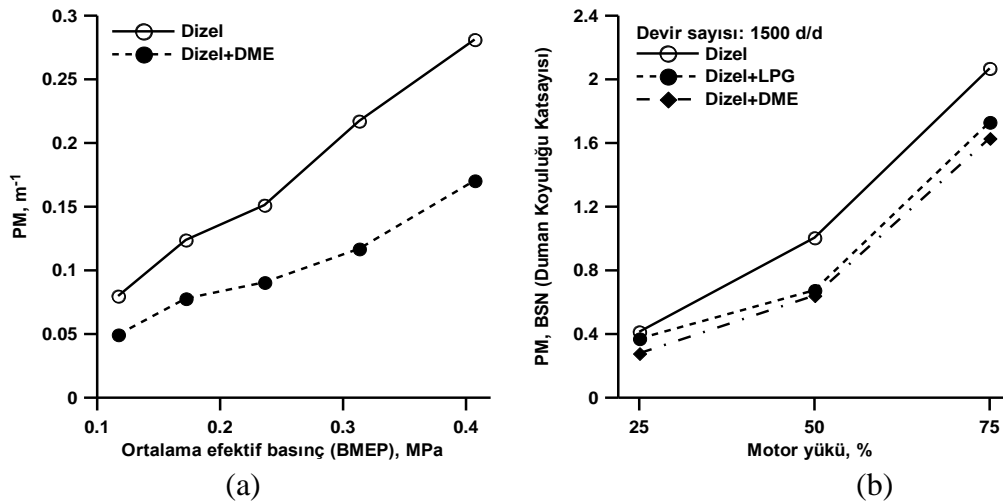


Şekil 7. Farklı DME oranlarında PM emisyonunun a) motor yükü (Theinnoi ve ark., 2017) ve b) püskürtme avansı (Wang ve ark., 2014) ile değişimi

Şekil 7(a)'da PM emisyonunun farklı motor yükü değerlerinde DME oranları ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tüm yük değerlerinde DME oranının artması PM emisyonunun azalmasını sağlamıştır. %25 motor yükü değerinde ve %90 DME oranında dizel yakıtına kıyasla PM emisyonunda %43.2 oranında azalma elde edilmiştir. DME'nin gaz fazında olması sebebiyle daha

homojen bir yakıt–hava karışımı oluşturması ve kimyasal yapısında direkt karbon bağı bulunmaması yanmayı iyileştirerek PM emisyonunun önemli oranda azalmasını sağlamaktadır (Theinnoi ve ark., 2017). Şekil 7(b)'de PM emisyonunun farklı püskürtme avansı değerlerinde DME miktarı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tüm püskürtme avansı değerlerinde DME oranının artması PM emisyonunun azalmasını sağlamıştır. Bu durum, DME'nin daha homojen bir yakıt–hava karışımı oluşturarak difüzyon (kontROLSÜZ) yanma safhasını kısaltması ve daha temiz yanma sağlayan diğer yakıt özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, püskürtme avansının artırılması yanma işlemi için daha fazla süre sağlayarak PM emisyonunu azalmasına katkı sağlamaktadır (Wang ve ark., 2014).

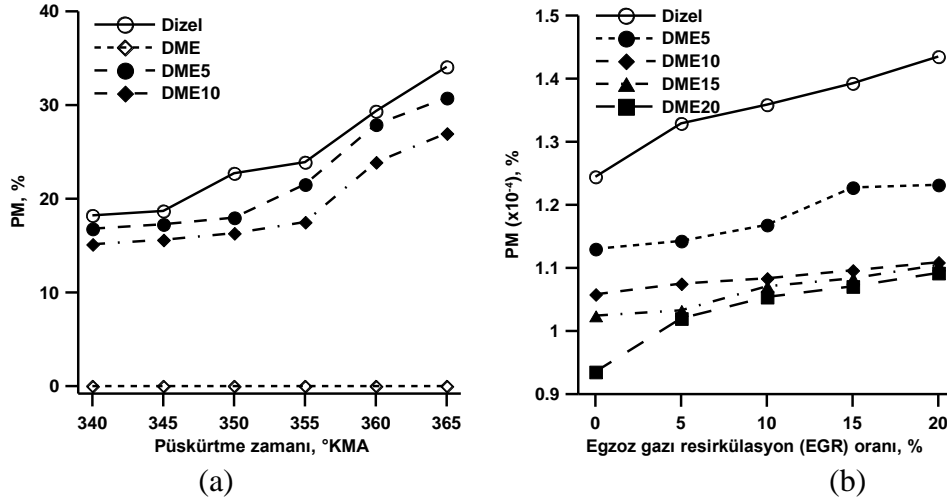
Şekil 8(a)'da dizel yakıtı ve dizel–DME karışımı için PM emisyonunun BMEP ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dizel–DME karışımı dizel yakıtının yaklaşık %50'si kadar PM emisyonu sağlamıştır. Bunun, DME'nin kimyasal yapısında direkt karbon bağı bulunmaması sayesinde daha temiz yanma sağlamasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Diğer taraftan, DME'nin içeriğinde bulunan oksijen ortamda bulunan karbonun kolayca yanmasını sağlar. Böylece, dizel–DME karışımı kullanıldığında daha düşük PM emisyonu elde edilmiştir (Duan ve ark., 2012). Şekil 8(b)'de 1500/d devir sayısında dizel yakıtı, dizel–LPG ve dizel–DME karışımları için PM emisyonunun motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dizel–LPG (Sıvılaştırılmış petrol gazı) ve dizel–DME karışımları dizel yakıtına göre daha düşük PM emisyonu değerleri vermiştir. %75 motor yükü değerinde PM değerleri sırasıyla dizel–DME karışımı için 1.6 BSN, dizel–LPG karışımı için 1.7 BSN ve dizel yakıtı için 2.1 BSN şeklindedir. Bu durum, DME'nin yüksek oksijen içeriğine sahip olması ve kimyasal yapısında direkt bağı karbon bulunmaması nedeniyle daha yüksek yanma sıcaklığı sağlamasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, LPG'nin gaz fazında olmasının daha homojen bir yakıt–hava karışımı oluşturarak PM emisyonunun azalmasını sağladığı belirtilmiştir (Khunaphan ve ark., 2013).



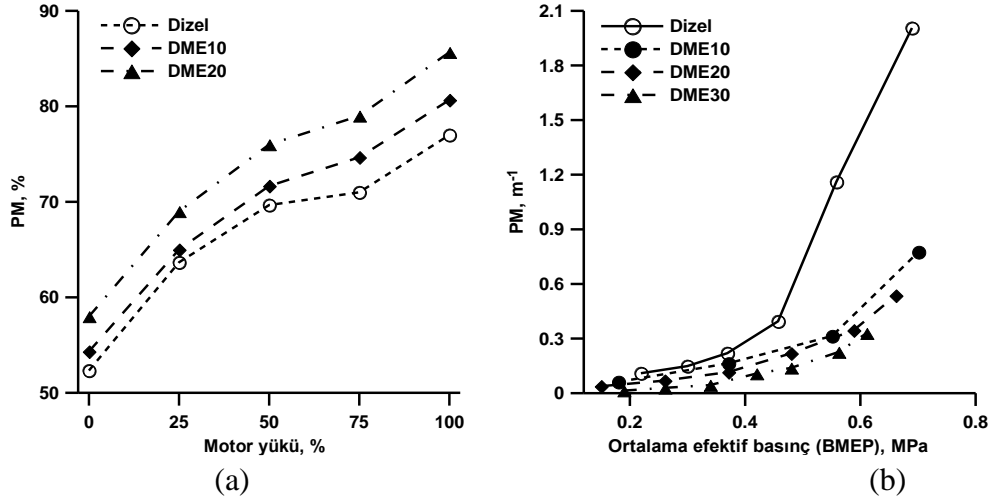
Şekil 8. Dizel–DME ve dizel–LPG karışımları için PM emisyonunun a) BMEP (Duan ve ark., 2012) ve b) motor yükü (Khunaphan ve ark., 2013) ile değişimi

Şekil 9(a)'da dizel yakıtı, DME ve farklı dizel–DME karışımları için PM emisyonunun püskürtme zamanına ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME yüksek oksijen içeriği sayesinde karbon atomlarının kolayca yanmasını sağlayarak sifıra yakın PM emisyonu sağlamıştır. Bu nedenle, dizel–DME karışımları içerisindeki DME oranı arttıkça PM emisyonu değerleri de azalmıştır. Dizel yakıtıyla kıyaslandığında DME5 ve DME10 karışımları PM emisyonunu yaklaşık %20 oranında düşürmüştür (Lim ve İda, 2015). Şekil 9(b)'de dizel yakıtı ve farklı dizel–DME karışımları için PM emisyonunun EGR oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME'nin kimyasal özellikleri sayesinde DME karışımları PM emisyonunu önemli ölçüde azaltmıştır. PM emisyonu yanma

odasındaki yakıtça zengin bölgelerde düşük yanma sıcaklıkları nedeniyle oluşmaktadır. Yakıtın içerisinde bulunan asetilen ve aromatik hidrokarbonlar PM emisyonu oluşumunda önemli rol oynar. PM emisyonu oluşumu yakıtın yapısındaki direkt bağlı karbon atomlarına önemli ölçüde bağlıdır. DME'nin yapısında direkt bağlı karbon atomu bulunmadığından PM emisyonu önemli ölçüde azalmaktadır. Diğer taraftan, EGR oranının artırılması yanma odası içerisindeki oksijen miktarını azalttığından PM emisyonu artmaktadır. Bu sayede en düşük PM emisyonu DME20 karışımı ile %0 EGR oranında elde edilmiştir. EGR oranı arttıkça DME'nin PM emisyonunu azaltıcı etkisi azalmaktadır. PM emisyonu oluşumu yanma sıcaklığı ve yanma odasındaki oksijen miktarının bileşik etkilerine bağlıdır. Yanma sıcaklığı arttıkça PM emisyonu azalırken EGR oranının artması PM emisyonunu artırmaktadır (Lamani ve ark., 2017).



Şekil 9. Dizel yakıtı ve farklı dizel–DME karışımları için PM emisyonunun a) püskürtme zamanı (Lim ve İda, 2015) ve b) EGR (Egzoz Gazı Resirkülasyon) oranı (Lamani ve ark., 2017) ile değişimi

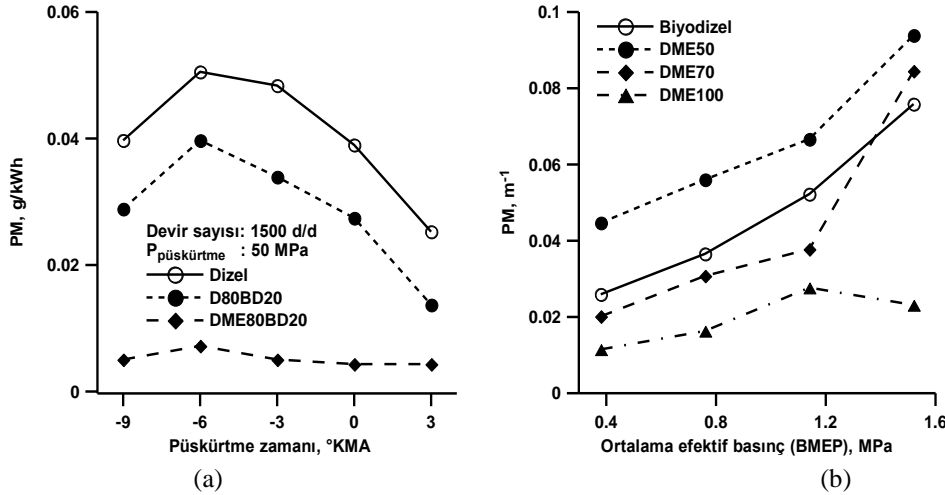


Şekil 10. Dizel yakıtı ve farklı dizel–DME karışımları için PM emisyonunun a) motor yükü (Prabhakaran ve ark., 2015) ve b) BMEP (Ying ve ark., 2006) ile değişimi

Şekil 10(a)'da dizel yakıtı ve farklı dizel–DME karışımları için PM emisyonunun motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PM emisyonu artan DME oranı ile artmıştır. Bu durum eksik yanmadan kaynaklanmaktadır. Dizel yakıtına DME katılması eksik yanmaya neden olmakta ve bunun sonucunda PM emisyonu artan DME oranı ile artmaktadır (Prabhakaran ve ark., 2015). Şekil 10(b)'de dizel yakıtı ve farklı dizel–DME karışımları için PM emisyonunun BMEP ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PM emisyonu özellikle yüksek yük değerlerinde artan DME oranı ile azalmıştır. Bu durum DME'nin içeriğindeki oksijen sayesinde yanma için ekstra oksijen sağlayarak

PM emisyonu oluşumunu baskılamasından kaynaklanmaktadır. DME'nin kimyasal yapısında direkt karbon bağı ve içeriğinde aromatik hidrokarbonların bulunmaması PM emisyonunun azalmasına katkı sağlamaktadır (Ying ve ark., 2006).

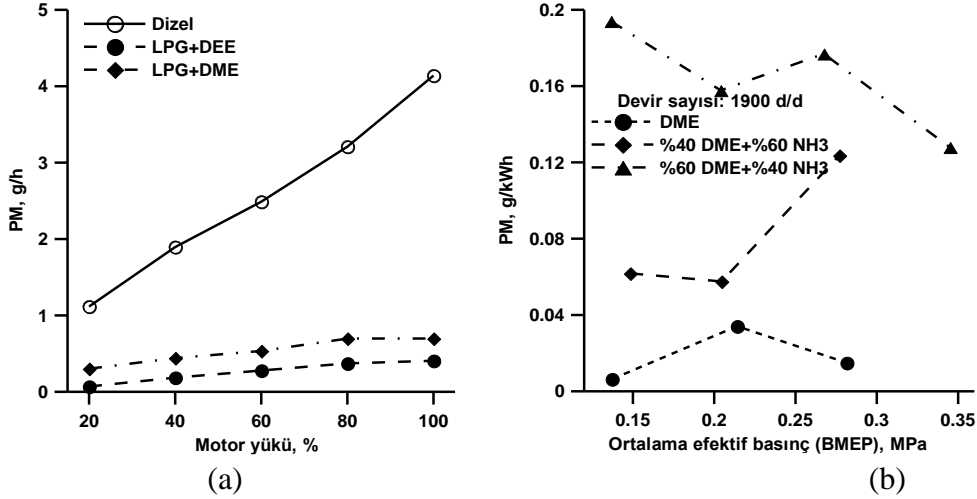
Şekil 11(a)'da dizel yakıtı, dizel–biyodizel ve biyodizel–DME karışımları için PM emisyonunun püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME80BD20 karışımı sifıra yakın PM emisyonu değerleri vermiştir. D80BD20 karışımı ise içeriğinde nispeten az oksijen bulunması nedeniyle DME80BD20 karışımından daha yüksek PM emisyonu değerleri vermiş ve her iki karışım da dizel yakıtından daha düşük PM emisyonu değerleri vermiştir (Roh ve ark., 2015). Şekil 11(b)'de biyodizel yakıtı ve farklı biyodizel–DME karışımları için PM emisyonunun BMEP ile değişimi verilmiştir. Tüm yakıtlar için artan motor yükü ile PM emisyonu artmıştır. Diğer taraftan, PM emisyonu artan DME oranı ile azalmıştır. Bu durum, DME'nin içeriğinde oksijen bulunması, yapısında direkt bağlı karbon bulunmaması, düşük tutuşma sıcaklığı ve hızlı buharlaşma gibi özelliklerinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Ancak, DME50 karışımında bulunan %50 oranındaki biyodizel yakıtı püskürtme sırasında yakıtın atomizasyonunu olumsuz etkileyerek PM emisyonunun artmasına neden olmuştur (Hou ve ark., 2014).



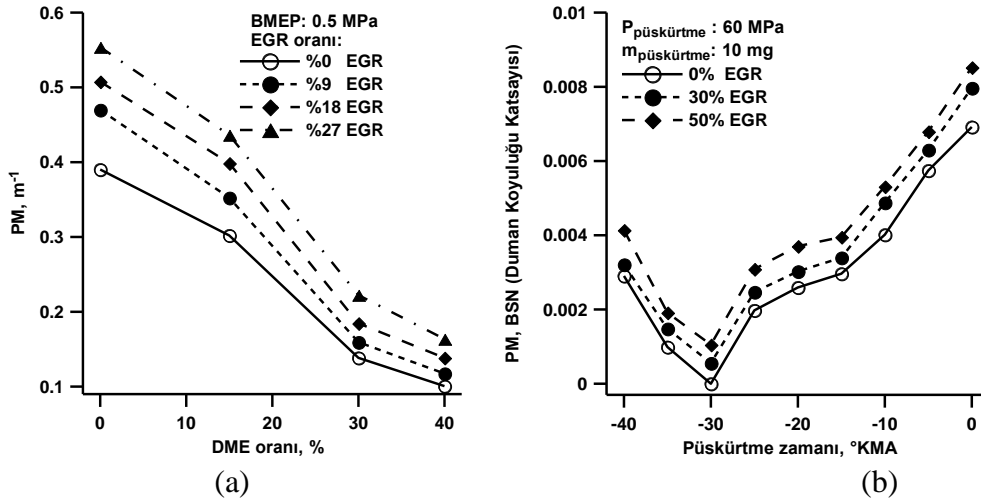
Şekil 11. PM emisyonunun a) dizel yakıtı, dizel–biyodizel ve biyodizel–DME karışımları için püskürtme zamanı ile (Roh ve ark., 2015) ve b) biyodizel yakıtı ve farklı biyodizel–DME karışımları için BMEP ile (Hou ve ark., 2014) değişimi

Şekil 12(a)'da dizel yakıtı, LPG–DEE ve LPG–DME karışımları için PM emisyonunun motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi LPG–DEE ve LPG–DME karışımları tüm motor yüklerinde PM emisyonunu önemli ölçüde azaltmıştır. Bu durum karışım yakıtların düşük C/H oranına sahip olması nedeniyle daha temiz yanma sağlamasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, karışım yakıtların kimyasal yapısında direkt bağlı karbon atomu sayısının az olması PM emisyonunun azalmasına katkı sağlamaktadır. Söz konusu karışım yakıtlar gaz fazında silindire girdiğinden daha homojen bir yakıt–hava karışımı ve daha verimli bir yanma sağlarlar. Bu nedenle, karışım yakıtları PM emisyonunda %85–89 oranında azalma sağlamıştır (El–Hagar, 2014). Şekil 12(b)'de DME ve farklı DME–NH₃ (amonyak) karışımları için PM emisyonunun BMEP ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME–NH₃ karışımları saf DME yakıtına göre daha yüksek PM emisyonu vermiştir. Karışım yakıtları içerisinde bulunan amonyakın eksik yanmaya neden olduğu için daha yüksek PM emisyonu değerleri elde edildiği belirtilmiştir (Ryu ve ark., 2014).

Şekil 13(a)'da PM emisyonunun farklı EGR oranlarında DME oranı ile değişimi verilmiştir. PM emisyonu artan DME oranı ile azalma gösterirken, artan EGR oranı ile artış göstermektedir.



Şekil 12. Farklı yakıt karışımları için PM emisyonunun a) motor yükü ile (El-Hagar, 2014) ve b) BMEP ile (Ryu ve ark., 2014) değişimi



Şekil 13. Farklı EGR oranlarında PM emisyonunun a) DME oranı (Zhao ve ark., 2014) ve b) püskürtme zamanı (Yoon ve ark., 2013) ile değişimi

DME'nin yapısında direkt bağlı karbon bulunmaması DME oranı arttıkça PM emisyonun azalmasını sağlamaktadır. Diğer taraftan, DME hızlı buharlaşma özelliği sayesinde daha homojen bir yakıt-hava karışımı oluşturup kontrolsüz yanma fazı süresinin kısalmasını sağlayarak daha verimli bir yanma gerçekleştirmektedir. Ancak, EGR oranının artması yanma odasındaki oksijen miktarını azalttığından PM emisyonu artmaktadır (Zhao ve ark., 2014). Şekil 13(b)'de PM emisyonunun farklı EGR oranlarında püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. PM emisyonunun oluşumu yanma sıcaklığına ve yanma sırasındaki kimyasal reaksiyonlara bağlıdır. EGR oranının artması yanma odasındaki oksijen miktarının ve yanma sıcaklığının düşürdüğünden PM emisyonunu artırmaktadır. Diğer taraftan, püskürtme avansının belli bir optimum değerinde PM emisyonu minimum değere ulaşmakta bu değer dışında püskürtme avansının artırılması veya azaltılması PM emisyonunu artırmaktadır (Yoon ve ark., 2013).

Son yıllarda ise homojen dolgu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI), ön karışimli sıkıştırma ile ateşlemeli (PCCI) ve reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli (RCCI) gibi yeni nesil yanma teknolojilerine sahip geliştirme aşamasındaki çift yakıtlı motorlarda DME'nin veya polioksimetilen dimetil eterlerin saf veya diğer yakıtlarla birlikte kullanımına yönelik çalışmaların literatürde yer aldığı görülmektedir (Tong ve ark., 2016; Wang ve ark., 2016; Putrasari ve ark., 2017; Barro ve ark., 2019; García ve ark., 2020; Liu ve ark., 2022).

SONUÇ

Bu çalışma dimetil eterin (DME) dizel motorlarda kullanımının partikül madde (PM) emisyonlarına etkileri üzerine yapılmış bir derlemedir. Yapılan derleme çalışmasından elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir.

- DME saf olarak kullanıldığında yüksek oksijen içeriği, kimyasal yapısında direkt bağlı karbon bulunmaması, hızlı buharlaşma, yüksek setan sayısı ve düşük tutuşma sıcaklığı gibi özellikleri sayesinde sifıra yakın PM emisyonu elde edilmesini sağlamaktadır. Saf DME'nin dizel yakıtına kıyasla PM emisyonunu %13–228 ve biyodizel yakıtına kıyasla %88.6–227.6 azalttığı tespit edilmiştir.
- Motor devri ve yükü arttığında silindire püskürtülen yakıt miktarı arttığından PM emisyonu artmaktadır. Yüksek motor devirlerinde yanma işlemi için yeterli süre olmaması nedeniyle oluşan eksik yanma PM emisyonunun artmasına neden olmaktadır.
- DME içeriğinde oksijen olması ve yapısında direkt bağlı karbon bulunmaması ve diğer olumlu yakıt özellikleri sayesinde dizel veya biyodizel yakıtları ile birlikte kullanıldığında genel olarak PM emisyonunun azalmasını sağlamaktadır. Farklı oranlarda DME içeren dizel–DME karışımlarının dizel yakıtına kıyasla PM emisyonunu %4.7–509 azalttığı tespit edilmiştir. Farklı oranlarda DME içeren biyodizel–DME karışımlarının dizel yakıtına kıyasla PM emisyonunu %483–857 azalttığı, biyodizel yakıtına kıyasla PM emisyonunu %38.2 azalttığı ve %20 biyodizel içeren dizel–biyodizel karışımına kıyasla PM emisyonunu %216–571 azalttığı tespit edilmiştir.
- DME'nin LPG yakıtı ile birlikte kullanılmasının PM emisyonunun azalmasını sağlarken amonyak (NH₃) ile birlikte kullanılmasının PM emisyonunun artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Dizel yakıtına kıyasla LPG–DME karışımının PM emisyonunu %269–493 azalttığı tespit edilmiştir. Farklı oranlarda DME içeren DME–NH₃ karışımlarının saf DME'ye kıyasla PM emisyonunu %40.7–96.7 artırdığı tespit edilmiştir.
- PM emisyonu oluşumu yanma sıcaklığına ve yanma odasındaki oksijen miktarına bağlı olarak oluşmaktadır. Bu nedenle egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) oranının artırılması yanma sıcaklığını ve yanma odasındaki oksijen miktarını düşürerek PM emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) oranının %10–50 aralığında değiştirilmesinin PM emisyonunu %13.1–48.4 artırdığı tespit edilmiştir.
- Yapılan çalışma sırasında DME'nin yakıt özellikleri, püskürtme ve yanma karakteristikleri, performans ve emisyon karakteristikleri üzerine bir çok çalışma yapılmış olduğu görülmüştür. Ancak, DME'nin dizel motorlarda yakıt olarak kullanımının ekonomiklik analizi ve DME'nin uzun süreli kullanımının motor ömrü üzerindeki etkileriyle ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Daha kapsamlı bir değerlendirme yapılabilmesi için bu konular üzerine de çalışmalar yapılması gereklidir.

KISALTMALAR

BD	: Biyodizel
BMEP	: Ortalama efektif basınç
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbondioksit
CNG	: Sıkıştırılmış doğalgaz
BSN	: Duman koyuluğu katsayısı
D	: Dizel
DME	: Dimetil eter

EGR	: Egzoz gazı resirkülasyonu
GTL	: Gazdan türetilmiş likit yakıt
HC	: Hidrokarbon
HCCI	: Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli
LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı
LNG	: Sıvılaştırılmış doğalgaz
NH ₃	: Amonyak
NO _x	: Azot oksitler
PCCI	: Ön karışımli sıkıştırma ile ateşlemeli
PM	: Partikül madde
RCCI	: Reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli

Çıkar Çatışması

Makale tek yazarlı olduğu için herhangi bir çıkar çatışması söz konusu değildir.

Yazar Katkısı

Makale tek yazarlı olduğu için makaleye ait tüm katkı sorumlu yazara aittir.

KAYNAKLAR

- Abhishek, Rahul, K., Santosh, K. ve 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. ve Kajitani, S. (2001). DME as an alternative fuel for direct injection diesel engine. 4th International Conference on Mechanical Engineering, December 26–28, Dhaka., Bangladesh, pp. 87–92.
- Ambekar, Y. ve 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. ve 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. ve Rahimpour, M. R. (2014). Dimethyl ether: A review of technologies and production challenges. *Chemical Engineering and Processing*, 82, 150–172.
- Barro, C., Parravicinia, M. ve Boulouchos, K. (2019). Neat polyoxymethylene dimethyl ether in a diesel engine; part 1: Detailed combustion analysis. *Fuel*, 256: 115892.
- 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. ve Kokjohn, S. L. (2018). 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. ve Kokjohn S. L. (2018). Computational optimization of a combustion system for a stoichiometric DME fueled compression ignition engine. *Fuel*, 223, 20–31.
- Bogdan, J., Nicolae, B., Călin, I. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve Sun, Z. (2012). 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, 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.
- García, A., Gil, A., Monsalve–Serrano, J. ve Sari, R. L. (2020). OME_x–diesel blends as high reactivity fuel for ultra–low NO_x and soot emissions in the dual–mode dual–fuel combustion strategy. *Fuel*, 275, 117898.
- Genbao, L., Jianming, C., Minglong, L., Yuhua, Q. ve 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. ve 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. ve 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. ve Longbao, Z. (2017). Performance of a direct injection diesel engine fuelled with a dimethyl ether/diesel blend. *Journal of Automobile Engineering*, 217(9), 819–824.
- Hou, J., Wen, Z., Jiang, Z. ve 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. ve 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. ve 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. ve Granipa, H. (2015). A literature review on combine effect of di–methyl 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve Wojtyniak, M. (2005). Alternative fuels and their application to combustion engines. *Journal of Automobile Engineering*, 219, 103–125.
- Kropiwnicki, J., Dominiczak, P. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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.
- Liu, J., Wang, L., Wang, P., Sun, P., Liu, H., Meng, Z., Zhang, L. ve Ma, H. (2022). An overview of polyoxymethylene dimethyl ethers as alternative fuel for compression ignition engines. *Fuel*, 318, 123582.
- Loganathan, M., Anbarasu, A. ve Velmurugan, A. (2012). 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. ve 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. ve Ying, W. (2002). Experimental study on performances and combustion characteristics of DME powered vehicle. Conference on Better Air Quality in Asian and Pacific Rim Cities (BAQ 2002), 16–18 December 2002, Hong Kong, p. 1–6.
- Maji, S., Ahmed, S., Siddiqui, W. A. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. H. (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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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.
- Putrasari, Y., Jamsran, N. ve Lim, O. (2017). An investigation on the DME HCCI autoignition under EGR and boosted operation. *Fuel*, 200, 447–457.
- Roh, H. G., Lee, D. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve Wang, W. (2004). Performance of a controllable premixed combustion engine fueled with dimethyl ether. *Energy Conversion and Management*, 45, 2223–2232.
- Suh, H. K. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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.

- Tong, L., Wang, H., Zheng, Z., Reitz, R. ve Yao, M. (2016). Experimental study of RCCI combustion and load extension in a compression ignition engine fueled with gasoline and PODE. *Fuel*, 181, 878–886.
- Xinling, L. ve 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. ve Tao, C. (2012). Development of a novel common-rail type dimethyl ether (DME) injector. *Applied Energy*, 94, 1–12.
- Vispute, K. M. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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.
- Wang, Z., Liu, H., Ma, X., Wang, J., Shuai, S. ve Reitz, R. D. (2016). Homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion of polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE). *Fuel*, 183, 206–213.
- Wattanavichien, K. (2009). Implementation of DME in a small direct injection diesel engine. *International Journal of Renewable Energy*, 4(2), 1–12.
- Yanju, W., Kun, W., Wenrui, W., Shenghua, L., Xiao, C., Yajing, Y. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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*, 9, 1364–1372.
- Yoon, S. H., Han, S. C. ve 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. ve 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. ve 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. ve 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.