



DİMETİL ETERİN BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA CO EMİSYONUNA ETKİLERİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

İsmet SEZER^{1,a,*}

¹Gümüşhane Üniversitesi MDBF Makine Mühendisliği Bölümü
^aisezer@gumushane.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7342-9172

ÖZET

Alkoller ve eterler gibi oksijen içerikli yakıtlar yanmayı iyileştirmek ve emisyonları azaltmak için içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanılabilirler. Bu alkol ve eter yakıtlar genellikle kömür, doğalgaz, biyokütle ve atık ürünler gibi bir kısmı yenilenebilir ve yerel olan çeşitli kaynaklardan üretilebilirler. Oksijen içerikli yakıtların çoğu daha temiz bir yanma sağlamalarının yanı sıra konvansiyonel petrol kökenli yakıtlara benzer tutuşma ve yanma karakteristiklerine sahiptirler. Etanol ve metil tersiyer bütül eter (MTBE) benzinin oktan sayısını ve oksijen içeriğini artırmak için düşük oranlarda kullanılan başlıca katkılardandır. Alkol ve eter yakıtların benzine katılması bu yakıtların yüksek oksijen içeriği sayesinde yanmanın iyileştirilmesini sağlamakta ve bu sayede yanma verimi artarken emisyonlarda azalmaktadır. Ancak, bu yakıtların enerji içeriği benzine göre düşük olduğundan katkı olarak kullanıldığında motorun yakıt tüketimini artırmaktadır. Dimetil eter (DME) buji ateşlemeli motorlarda yakıt katkısı olarak uzun bir geçmişe sahip değildir. Ancak, buji ateşlemeli motorlarda DME'yi benzinle birlikte kullanmak yanmayı iyileştirip motorun verimini artırmak için olası çözümlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, DME'nin buji ateşlemeli motorlarda benzinle birlikte kullanıldığında yakıt tüketimini ve emisyonları azaltabileceği düşünülmektedir. Öte yandan, ulaşımdan kaynaklanan karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonlarının ana kaynağı benzin motorlu taşıtlardır. Buji ateşlemeli motorlarda DME kullanımının yüksek oksijen içeriği sayesinde standart benzinli motorlara kıyasla daha düşük CO ve HC emisyonları üretebileceği belirtilmektedir. Bu nedenle, DME'nin buji ateşlemeli motorlarda kullanımına yönelik yapılmış çalışmaların sonuçlarının bir arada değerlendirilmesi yeni çalışmalar ve pratik uygulamalar için önem arz etmektedir. Bu çalışma, DME'nin buji ile

***Sorumlu Yazar (Corresponding Author)**

Geliş (Received): 14/05/2025

Atıf (Citation): Sezer, İ., "Dimetil Eterin Buji Ateşlemeli Motorlarda CO Emisyonuna Etkileri Üzerine Bir Araştırma", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 7(1): 31-60, 2025.

Kabul (Accepted): 09/07/2025

Yayın (Published): 18/07/2025

ateşlemeli motorlarda yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanılması üzerine yapılan çalışmaların sonuçlarından derlenmiştir. Bu derleme çalışması buji ateşlemeli motorlarda DME kullanımının özellikle CO emisyonu üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Buji ateşlemeli motorlar, yakıt katkısı, dimetil eter, CO emisyonu.

ABSTRACT

The oxygenated fuels such as alcohols and ethers can be used in internal combustion engine (ICE) as fuel and fuel additive for improving the combustion and reducing the exhaust emissions. These alcohol and ether fuels can usually be produced from a variety of sources, some of which are renewable and local, such as coal, natural gas, biomass and waste products. Most of the oxygenated fuels have similar ignition and combustion characteristics to conventional petroleum based fuels besides they give cleaner combustion. Ethanol and methyl tert-butyl ether (MTBE) are mainly used as additives at low blending ratio to enhance the octane number and oxygen content of gasoline. The addition of alcohol and ether fuels to gasoline lead to a more complete combustion due to the higher oxygen content, thereby leads to increased combustion efficiency and decreased engine out emissions. On the other hand, the energy content of alcohol and ether fuels is lower than gasoline; thereby fuel consumption of the engine will increase when using these alcohol and ether as a fuel additive. Dimethyl ether (DME) does not have a long history as a fuel or an additive to gasoline in spark ignition (SI) engines, but using of DME with gasoline in SI engines is considered as one of the possible solutions to improve combustion and increase the thermal efficiency of the engine. Moreover, it is considered that DME can enhance the economical and emissions performances of engine when it is used with gasoline in SI engines. On the other hand, the main sources of carbon monoxide (CO) and hydrocarbon (HC) emissions from transport are gasoline engine vehicles. It is stated that using of DME in SI engines can generate the lower CO and HC emissions compared to the standard gasoline engines due to the high oxygen content of DME. Therefore, it is important to evaluate together the results of the studies on the use of DME in SI engines for the future studies and practical applications. This study was compiled the results of the papers which completed on using of DME as a fuel or fuel additive in SI engines. The review study aims to investigate the effects of using DME in SI engines especially on carbon monoxide (CO) emission.

Keywords: Spark ignition engines, fuel additive, dimethyl ether, CO emission.

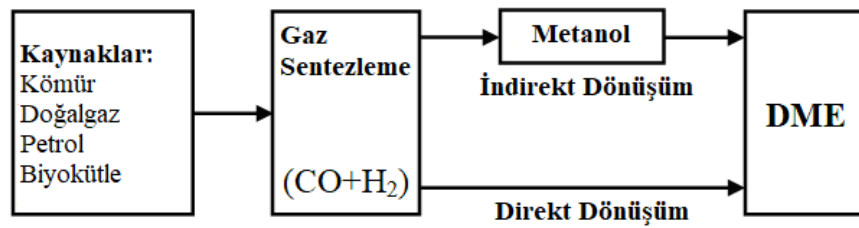
1. GİRİŞ

Ekolojik sorunlar ve petrolün yakın bir gelecekte tükenme riski araştırmacıları daha gelişmiş yakma teknolojileri ve emisyonları azaltmaya yönelik sistemlerin geliştirilmesi ile birlikte fosil kökenli olmayan alternatif yakıtlar aramaya yöneltmiştir. Temiz alternatif yakıtların kullanımı bahsedilen sorunların çözümüne yönelik umut verici yöntemlerden birisi olarak görülmektedir [1, 2]. Dimetil eter (DME) temiz ve verimli yanma sağlayarak zararlı emisyonları azaltabilecek alternatif yakıtlardan birisi olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, DME bir kısmı yenilenebilir olan ham petrol, doğalgaz, kömür, biyokütle, atık yağlar ve atık ürünler gibi çeşitli kaynaklardan yerel olarak da üretilebilmektedir [3, 4]. Biyokütle kaynaklardan üretilen DME'nin kullanımıyla ilgili bir diğer önemli husus yakıt üretim zincirindeki karbondioksit (CO_2) emisyonunun azaltılmasıdır. Biyokütleden DME üretim döngüsünün CO_2 emisyonunu yaklaşık %92 oranında azaltılabileceği ifade edilmektedir [5]. Öte yandan, ulaşımdan kaynaklanan karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonlarının ana kaynağının benzinli motorlu taşıtlar olduğu düşünülmektedir. Yüksek oksijen içeriğine sahip olduğundan buji ateşlemeli motorlarda benzin veya diğer yakıtlarla birlikte DME kullanımının yanmayı iyileştirerek standart benzinli motorlara kıyasla daha düşük CO ve HC emisyonları sağlayabileceği ileri sürülmektedir [6]. Aslında, DME yanma hızının yüksek olmasına rağmen yüksek setan sayısı nedeniyle vuruntu dayanımı düşük olduğundan buji ateşlemeli motorlarda kullanılmaya elverişli bir yakıt değildir [7]. Bununla birlikte, DME kolay tutuşabilmesi ve hızlı yanabilmesi nedeniyle fakir karışımla çalışma koşullarında yanma verimini ve motor performansını artırmak için buji ateşlemeli motorlarda tutuşmayı ve yanmayı iyileştirici olarak kullanılabilir [8]. Yapılan deneysel çalışmalar direkt püskürtmeli benzinli motorlarda fakir karışımla çalışma koşullarında emme kanalına DME püskürtülmesinin termik verimi artırıp çevrim farklılıklarını azaltarak motorun daha kararlı çalışmasını sağladığını göstermiştir [9, 10]. Bu nedenle, son yıllarda yenilenebilir alternatif yakıtların kullanımını teşvik etmek için çift yakıtlı motorlar geliştirilmektedir. Çift yakıtlı püskürtme sistemleri daha verimli bir yanma sisteminin geliştirilmesini amaçlayan sürdürülebilirlik ve çevrenin korunmasıyla ilgili sorunlara acil çözüm bulmaya yönelik yeni bir teknolojidir. Direkt püskürtmeli benzinli motorlarla karşılaştırıldığında çift yakıtlı püskürtme sistemlerinin termik verimi artırdığı, HC ve azot oksit (NO_x) emisyonlarını azalttığı ancak CO emisyonunu belli oranda artırdığı tespit edilmiştir [11, 12]. Bu nedenle, DME'nin buji ateşlemeli motorlarda yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanımına yönelik

yapılan çalışmaların sonuçlarının bir arada değerlendirilmesi yeni çalışmalar ve pratik uygulamalar için oldukça önemlidir. Bu derleme çalışması buji ateşlemeli motorlarda DME kullanımının özellikle CO emisyonu üzerindeki etkilerini literatüre dayalı olarak araştırmayı amaçlamaktadır.

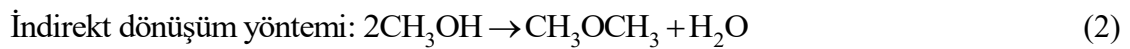
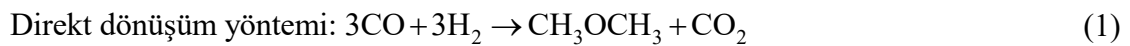
2. DİMETİL ETERİN ÜRETİMİ

Geleneksel olarak, DME doğalgaz, kömür, biyokütle, plastik atık ve benzeri çeşitli ham maddelerin Şekil 1’de görüldüğü gibi direkt veya indirekt metotlarla iki farklı şekilde dönüştürülmesi sonucu üretilir [13].



Şekil 1. DME'nin üretim yöntemleri [14]

Aşağıdaki reaksiyon denklemlerinde görüldüğü gibi direkt dönüşüm yönteminde DME doğrudan sentez gazından iki işlevli bir katalizör kullanılarak üretilirken indirekt üretim yönteminde ise metanolden çeşitli reaksiyonlarla suyun uzaklaştırılması (dehidrasyon veya kondenzasyon) ile üretilmektedir [15].

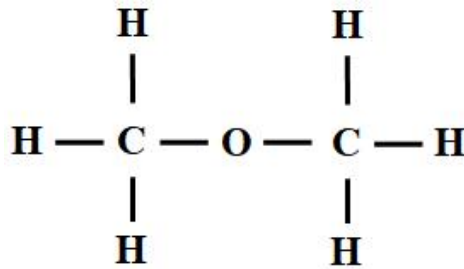


Her iki yöntemin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Tek aşamalı yöntem olarak da bilinen direkt dönüşüm yönteminde DME tek bir reaktörde doğrudan CO ve H₂ (hidrojen) karışımı olan sentez gazından tek aşamada üretilmektedir. Tek aşamalı üretim yöntemi ekzotermiktir ve bu nedenle işlemin sıcaklığı kaçakları önlemek için uygun şekilde kontrol edilmelidir [16]. İndirekt üretim yönteminde ise önce sentez gazından metanol üretilir daha sonra metanolün saflaştırılması ve dehidrasyonu sonucunda iki aşamada DME üretilir. Metanolün dehidrasyonu termodinamik ve ekonomik açısından daha uygun bir yöntem olarak değerlendirilmektedir [17]. Enerji eşdeğeri bazında düşünüldüğünde DME üretimi, benzin veya dizel yakıtından daha düşük maliyetlidir. Büyük ölçekli tesisler çapında üretim dikkate

alındığında ise DME'nin üretim maliyeti sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) veya sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) üretim maliyetlerine benzerdir [18].

3. DİMETİL ETERİN ÖZELLİKLERİ

Şekil 2'de görüldüğü gibi DME, $\text{CH}_3\text{--O--CH}_3$ ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) kimyasal formülüne sahip en basit eterlerden birisidir. Genel olarak, DME'nin fiziksel özellikleri sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ile benzerdir. Bu nedenle DME'nin taşınması, depolanması ve yakıt istasyonlarında araçlara dolumu ile ilgili olarak LPG ile benzer şartların sağlanması gerekmektedir [19, 20]. Neredeyse zehirsiz olan DME atmosferik basınç ve oda sıcaklığı koşullarında gaz fazında olup sıvılaştırılabilmesi için 5 barın üzerindeki basınçlarda sıkıştırılması gerekmektedir. Taşıt üzerinde kullanımı sırasında yakıt deposundan motora sevk edilirken buhar tıkaçı oluşumunu önleyebilmek için yakıt dağıtım hattında basıncın 17 ila 20 bar değerlerine çıkarılması gerekmektedir [21, 22].



Şekil 2. DME'nin kimyasal yapısı [16]

Benzin, LPG ve DME yakıtlarının özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi DME, LPG ile yakın değerlere sahip iken benzinden oldukça farklı değerlere sahiptir. DME oldukça yüksek buhar basıncı ve düşük kaynama noktası sıcaklığına sahip olması nedeniyle oda sıcaklığında ve atmosfer basıncı altında gaz fazındadır. Diğer taraftan, DME'nin ısı değeri (enerji içeriği) LPG ve benzine göre oldukça düşüktür. Bu nedenle, DME'nin kullanımı sırasında yakıt dağıtım ve püskürtme sistemleri ile yanma sisteminin uygun şekilde değiştirilmesi gerekmektedir [25]. DME'nin düşük oktan sayısı ve yüksek setan sayısı değerine sahip olması onun kolay tutuşabildiğini göstermektedir. Ayrıca, DME buharlaşma gizli ısının benzine göre oldukça yüksek olması nedeniyle emme kanalına püskürtüldüğünde dolgu sıcaklığının düşmesini sağlayarak motorun hacimsel veriminin artmasına katkı sağlayabilir. Bu özelliği sayesinde DME soğutucu akışkan (RE170) olarak da kullanılabilir. DME'nin içeriğinde %34,8 oranında oksijen bulunmakta, kimyasal

yapısında sadece C–H ve C–O kimyasal bağları olup direkt C–C bağı bulunmamaktadır. Bu kimyasal özelliği sayesinde DME’nin yanması sonucunda sifıra yakın partikül madde (PM) emisyonu ve daha düşük motor gürültüsü oluşur ve yüksek oranlarda egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) uygulanarak NO_x emisyonu önemli ölçüde azaltılabilir [18]. DME’nin düşük viskozitesi nedeniyle özellikle yüksek basınçlar altında yakıt besleme sisteminde sızıntılara neden olmaması için düşük toleranslı parçaların kullanılması gerekebilir. DME’nin zayıf yağlama özelliğine sahip olması nedeniyle yakıt püskürtme sistemindeki hareketli parçalarda aşınma oluşumunu önlemek için içerisine yağlayıcı ve sızıntıyı önleyici uygun katkıların katılması önerilmektedir. DME’nin sıkıştırılabilirliği sıvı yakıtlara kıyasla yüksek olduğundan yakıt besleme hattında nakledilebilmesi için daha fazla pompalama işi gerekmektedir. DME korozif yapısı nedeniyle kauçuk veya lastik esaslı malzemelerin kimyasal yapısını bozucu bir etkiye sahip olduğundan yakıt sistemindeki bu tür malzemelerin korozif etkilere dayanıklı malzemelerle değiştirilmesi gerekmektedir. Ancak, DME’in metal esaslı malzemeler üzerinde korozif etkiye sahip olmaması bir avantaj olarak değerlendirilmektedir [26].

Tablo 1. Benzin, LPG ve DME yakıtlarının özellikleri [23, 24]

Özellik	Benzin	LPG	DME
Kimyasal formülü	C _x H _y	C ₃ H ₈ –C ₄ H ₁₀	C ₂ H ₆ O
Molekül kütlesi, g/mol	46,07	44,1–58,2	46,07
Yoğunluğu (kg/L)	0,72–0,78	0,49–0,58	0,668
Viskozitesi (cP)	0,006	0,0074	0,15
Kaynama noktası (°C)	43–170	–27	–24,9
Donma noktası (°C)	–107,4	–189	–141,5
Parlama noktası (°C)	–42,78	–104	–41,1
Tutuşma sıcaklığı (°C)	300–450	470	350
Reid buhar basıncı (psi)	8–15	170	116
Kütleli oksijen içeriği (%)	–	–	34,8
Kükürt içeriği (ppm)	200	5–40	–
Yanma hızı (cm/s)	30–60	40	42,9–61
Tutuşabilir karışım oranları (%)	1,4–7,6	2,15–9,6	3,4–27
Stokiyometrik hava–yakı oranı	14,7	15,7	9
Buharlaştırma gizli ısı (kJ/kg)	290–420	358,2	461,6
Alt ısı değeri (MJ/kg)	44,1	46,3	28,43
Oktan sayısı	80–90	94–112	–
Setan sayısı	8,14	–	55–60

4. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA CO EMİSYONU OLUŞUMU

Ulaştırma ve ulaştırma dışı sektörlerde içten yanmalı motorların ürettiği emisyonlar hava kirliliğinde önemli bir paya sahiptir ve araştırmacılar ve hükümetler için önlem alınması

gereken bir konudur. İçten yanmalı motorlardan yayılan başlıca emisyonlar arasında karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HC), azot oksitler (NO_x) ve partikül madde (PM) ve karbondioksit (CO₂) yer almaktadır. Buji ateşlemeli motorlarla kıyaslandığında özellikle dizel motorlu ağır hizmet tipi taşıtlardan yayılan emisyonlar çevreye önemli zararlar vermektedir. Hem buji ateşlemeli (benzin) hem de dizel motorlu taşıtlardan yayılan emisyonlarla ilgili olarak sürekli emisyon kısıtlamaları yapılmakta olup bunlar Tablo 2’de görüldüğü gibi EURO emisyon düzenlemeleri ile standart hale getirilmiştir [27].

Tablo 2. Benzin ve dizel motorları için EURO emisyon standartları [27]

Emisyonlar [g/km]	EURO-I (1992)	EURO-II* (1996)	EURO-III (2000)	EURO-IV (2005)	EURO-V** (2011)	EURO-VI*** (2014)
BENZİN MOTORLARI						
CO	2,72	2,2	2,3	1	1	1
HC+NO _x	0,87	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1
HC	–	–	0,15	0,08	0,06	0,06
NO _x	–	–	–	–	0,05	0,05
PM	–	–	–	–	–	–
DİZEL MOTORLARI						
CO	2,72	1	1	0,64	0,5	0,5
HC+NO _x	0,97	0,7	0,56	0,3	0,23	0,17
NO _x	–	–	0,5	0,25	0,18	0,08
PM	0,14	0,08	0,1	0,05	0,025	0,005

* Dizel oksidasyon katalizörü (DOK) zorunlu hale getirilmiştir.

** Dizel partikül filtresi (DPF) zorunlu hale getirilmiştir.

*** Benzin partikül filtresi (BPF) zorunlu hale getirilmiştir.

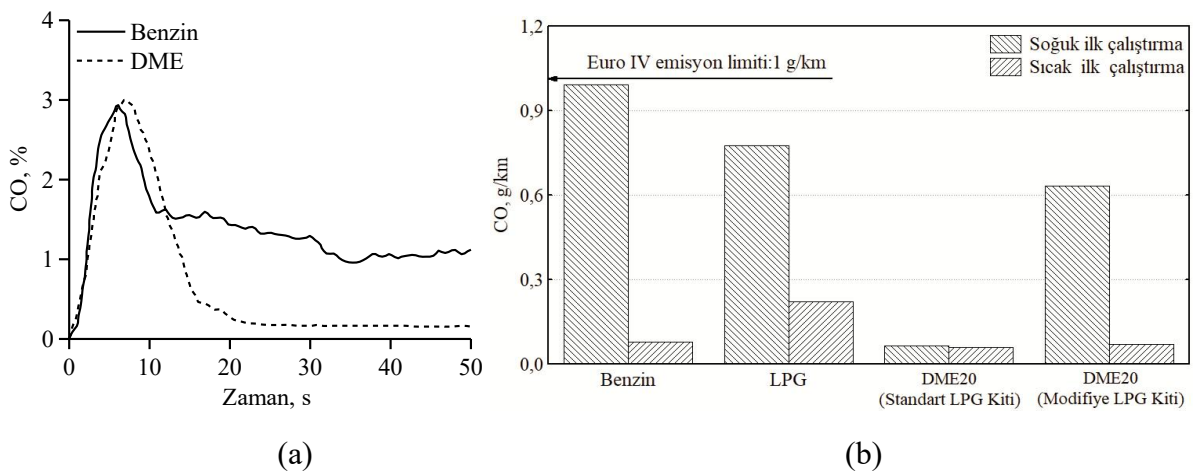
CO, hidrokarbon yakıtlarının oksidasyonu (yanması) sırasında oluşan bir ara üründür ve yanma sıcaklığı 1400 K’nin üzerinde olduğunda ve yeterli oksijen bulunduğunda CO₂’ye dönüştürülebilir. CO’da HC gibi eksik yanmadan kaynaklanır ve çok zengin veya çok zayıf karışım koşullarında meydana gelir. Buji ateşlemeli motorlarda CO oluşumu öncelikle yakıt–hava karışımının yapısına yani hava fazlalık katsayısına bağlıdır. Fakir karışımlar yanma kalitesi kötüleşene kadar genelde daha düşük emisyon değerleri verirken zengin karışımlar eksik yanmaya neden olduğundan egzoz gazları içerisindeki CO konsantrasyonunu artırır [28]. Motorun ilk çalışması sırasında buharlaşma çok yavaş olduğundan motora çok zengin bir karışım verilir ve bu emisyon seviyesini artırır. Bu nedenle, motor ısınana kadar zengin karışımla çalışmaya devam ettiğinden CO ve HC emisyonları yüksektir. Kısmi yük koşullarında çalışma durumunda ise HC ve CO emisyonlarını azaltacak ve NO_x emisyonlarını orta düzeyde tutacak şekilde fakir karışım kullanılabilir [29]. CO, yüksek konsantrasyonlarda solunduğunda zararlı olabilen renksiz ve kokusuz bir gazdır. Kanın oksijen taşıma yeteneğini bozarak sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, CO ve diğer emisyonların izin verilen düzeye indirilebilmesi için yanma sırasında veya sonrasında çeşitli yöntemler

uygulanmaktadır [30]. DME'nin yanması sonucu oluşan CO emisyonu değerlerinin daha düşük seviyede olduğu belirtilmektedir. Bunun, DME'nin moleküler yapısında karbon atomlarının hidrojen atomlarına oranının düşük olmasından ve yanma reaksiyonları sırasında oluşan ara türlerin daha iyi karışmasını ve hızlı oksidasyonunu kolaylaştıran yüksek oksijen içeriğine sahip olmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir. Öte yandan, DME'nin yanması sırasında CHO ve CH₂O gibi ara ürünler oluştuğundan reaksiyon sürecine bağlı olarak daha fazla miktarda CO emisyonu ortaya çıkabilmektedir. Egzoz gazları içindeki CO emisyonunun artması durumunda CO emisyonunun minimize edilebilmesi için katalitik konvertör gibi sistemlerin kullanılması gerektiği belirtilmektedir [31]. DME'nin düşük karbon hidrojen oranına sahip olmasının, kimyasal yapısında direkt bağlı karbon bulunmamasının ve yüksek oksijen içeriğine sahip olmasının ara türlerin daha hızlı ve daha etkili oksidasyonunu sağladığı ve bunun CO ve HC emisyonlarını azalttığı bildirilmiştir. Ancak, CO emisyonunun motorun çalışma koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebildiği de belirtilmektedir. Genel olarak DME'nin iyi karışım oluşturma özelliği sayesinde yanma sürecinde yakıt açısından zengin bölgelerin azaldığı ve böylece daha düşük CO emisyonu elde edildiği ifade edilmektedir [32].

5. DİMETİL ETERİN CO EMİSYONUNA ETKİLERİ

Şekil 3(a)'da benzin ve DME yakıtları için soğuk ilk çalışma sırasında CO emisyonunun zamanla değişimi verilmiştir. Soğuk ilk çalıştırma sırasında ortaya çıkan yüksek emisyon değerleri içten yanmalı motorlarda çözülmesi gereken en önemli sorunlardan birisidir. Düşük sıcaklık seviyesi ve soğukta ilk hareketi sağlamak için elektronik kontrol ünitesi (EKU) tarafından silindire yüksek miktarda yakıt gönderilmesi sonucu püskürtüldüğünde benzinin atomize olması ve yanma odasında buharlaşması zorlaşmaktadır. Bu nedenle, soğukta ilk çalıştırma sırasında yüksek oranda CO ve HC emisyonları ortaya çıkmaktadır. Şekil 3(a)'da görüldüğü gibi benzin ve DME yakıtları için CO emisyonu zamana bağlı olarak önce ani bir şekilde artmakta daha sonra hızla azalarak sabit bir değere ulaşmaktadır. CO emisyonunun maksimum değerleri benzin için %3,01 ve DME için %2,95 olarak elde edildiği bildirilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi soğukta ilk çalıştırma sırasında motorun ilk hareketini sağlayabilmek için silindire fazla miktarda yakıt gönderilmesi sonucunda oluşan zengin yakıt-hava karışımının eksik yanmaya neden olarak hem benzin hem de DME için yüksek CO emisyonunun oluşmasına neden olduğu ifade edilmiştir. İlk

hareket sağlandıktan sonra silindire gönderilen yakıt miktarının azaltılmasıyla yakıt–hava ekivalans oranının düşmesi ve silindir içi sıcaklığının yükselmesi sonucunda yanma odasında daha homojen bir yakıt–hava karışımı oluşarak yanma veriminin artması ile her iki yakıt için CO emisyonunun azaldığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, motorun ilk çalışmasından 15 saniye sonra DME’ye ait CO emisyonu değerleri benzine ait değerlerin yarısından daha düşüktür. Bu durumun, DME’in gaz fazında silindire girmesi ve içeriğinde oksijen bulunması sonucunda daha homojen bir yakıt–hava karışımı oluşturarak yanmayı iyileştirmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir [33].



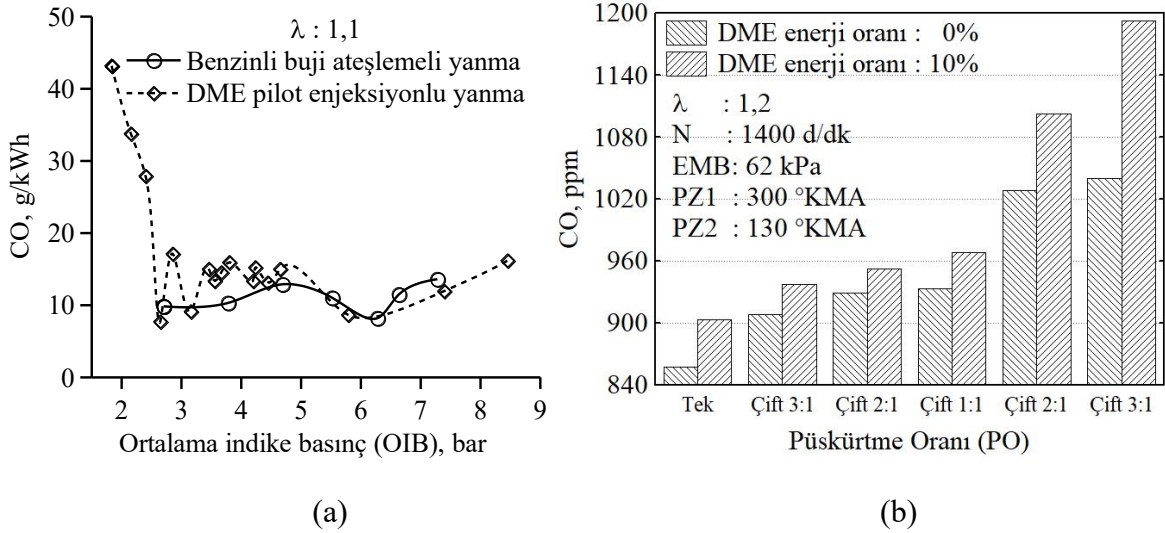
Şekil 3. CO emisyonunun a) benzin ve DME yakıtları için soğuk ilk çalışma sırasında zamanla değişimi [33] ve b) benzin, LPG ve DME20 yakıtları için soğuk ve sıcak ilk çalışma sırasında değişimi [34]

Şekil 3(b)’de benzin, LPG ve %80 LPG–%20 DME (DME20) yakıtları için soğuk ve sıcak ilk çalışma sırasında CO emisyonunun değişimi verilmiştir. DME20 karışımı için standart LPG kiti ve modifiye edilmiş LPG kiti olmak üzere iki farklı sistem kullanılmıştır. Standart LPG kitinin ayarları LPG yakıtının özelliklerine göre modifiye edilmiş LPG kitinin ayarları ise DME20 karışımına göre yapılmıştır. Şekil 3(b)’de görüldüğü gibi benzin yakıtı Euro IV emisyon limitine (1 g/km) oldukça yakın değer verirken LPG ve DME20 yakıtları oldukça düşük CO emisyonu değerleri vermiştir. Bu durumun LPG ve DME20 yakıtları kullanıldığında motorun fakir yakıt–hava oranı ile çalışabilmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Öte yandan, Şekil 3(b)’de görüldüğü gibi standart LPG kiti ile DME20 yakıtı haricinde genel olarak soğuk ilk çalıştırmada CO emisyonu değerlerinin sıcak ilk çalıştırmaya göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Soğuk ilk çalışma periyodunda düşük sıcaklık nedeniyle katalitik konvertör veriminin daha düşük olması sonucunda daha yüksek emisyon

değerlerinin ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Sonuç olarak DME20 yakıtıyla elde edilen CO emisyonu değerlerinin benzin ve LPG yakıtına göre önemli ölçüde düşük olduğu belirlenmiştir [34].

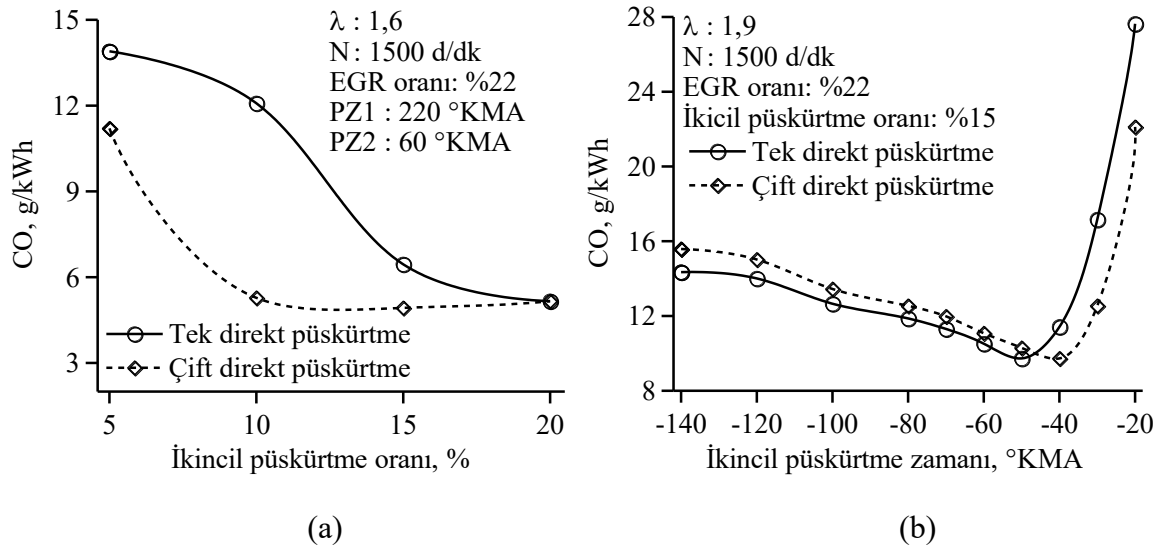
Şekil 4(a)'da benzin ve DME yakıtları kullanılması durumunda farklı yanma stratejileri için CO emisyonunun ortalama indike basınç (OIB–motor yükü) ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi düşük motor yükü değerlerinde DME'nin pilot enjeksiyonlu–kontrollü kendiliğinden ateşlemeli (CAI) veya diğer adıyla homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) yanma durumunda CO emisyonu oldukça yüksek değerler alırken motor yükü arttıkça buji ateşlemeli ve DME pilot enjeksiyonlu yanma durumlarında yaklaşık aynı CO emisyonu değerleri elde edilmiştir. Bu durumun, 3 barın altındaki motor yüklerinde DME pilot enjeksiyonlu yanma durumunda homojen olmayan fakir karışımla çalışma nedeniyle yanma veriminin nispeten düşük olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir [35]. Şekil 4(b)'de belirtilen çalışma koşullarında benzin ve DME yakıtları ile %10 DME–benzin karışımı kullanılması durumunda farklı püskürtme stratejileri için CO emisyonunun değişimi verilmiştir. İçten yanmalı motorlarda CO emisyonu genellikle yetersiz oksijenle çalışma koşullarında üretilir. Bu nedenle, tekli püskürtmenin homojen bir yakıt–hava karışımı oluşturarak fakir karışımla yanma sonucunda CO emisyonunun azalmasına katkıda bulunduğu belirtilmiştir. Çift püskürtme durumunda ise CO emisyonu tekli püskürtmeye göre artmakta ve ikincil püskürtme miktarının artması CO emisyonunun daha fazla artmasına neden olmaktadır. Çift püskürtme durumunda püskürtme oranının (PO) 1:3 değeri için maksimum CO emisyonu değerleri saf benzin ve benzine %10 DME katkısı için 1041 ppm ve 1192 ppm olarak elde edilmiş olup tekli püskürtme ile kıyaslandığında %21,4 ve %32,1 oranlarında artış olduğu belirlenmiştir. Çiftli püskürtme stratejisi uygulandığında sıkıştırma zamanında püskürtülen yakıtın bir kısmı ateşleme için kullanıldığından karışım oluşumu için gerekli sürenin azalması nedeniyle yakıtın atomizasyonu ve buharlaşmasının bozulduğu ve zengin karışım bölgesinin eksik yanmaya neden olması sonucunda yüksek oranda CO emisyonu üretildiği belirtilmiştir. Ayrıca, ikincil püskürtme oranının artırılmasının daha fazla CO emisyonu oluşmasına neden olabileceği ifade edilmiştir. Öte yandan, yerel olarak aşırı fakir karışımın bulunduğu bölgelerde yanma tamamlanmadan alevin sönmesinin de CO emisyonu açısından sorun oluşturduğu ve bu nedenle ikincil püskürtme oranının artmasıyla CO emisyonunda artış meydana geldiği bildirilmiştir. Diğer taraftan, benzinle birlikte DME kullanılması da CO emisyonunun artmasına neden olmuştur. Bunun muhtemel sebebinin yüksek

sıcaklık bölgelerinde DME'nin pirolizinin yani hidroksil (OH) ve CO gibi aktif radikalleri serbest bırakmasının olduğu ifade edilmiştir. Bu nedenle, direkt püskürtmeli benzin motorunda benzinle birlikte DME kullanılmasının CO emisyonun artmasına neden olduğu belirtilmiştir [11].



Şekil 4. CO emisyonunun benzin ve DME yakıtları kullanılması durumunda a) farklı yanma stratejileri [35] ve b) farklı püskürtme stratejileri için [11] değişimi

Şekil 5(a)'da CO emisyonunun DME'nin tek ve çift seferde püskürtülmesi durumunda ikincil püskürtme oranı ile değişimi verilmiştir. Şekil 5(a)'da görüldüğü gibi CO emisyonu ikincil püskürtme oranının artışı ile azalmış ve CO emisyonu değerlerinin OİB ile ters orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir. Böylece, %5 ikincil püskürtme oranındaki OİB değerinin %10 ikincil püskürtme oranındaki OİB değerinden düşük olmasına rağmen %5 ikincil püskürtme oranındaki CO emisyonunun %10 ikincil püskürtme oranındaki CO emisyonundan biraz daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu durumun OİB değeri arttıkça daha yüksek yanma sıcaklıkları ortaya çıkmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Öte yandan, genel olarak çoklu püskürtmenin tekli püskürtmeye göre daha düşük CO emisyonu değerleri verdiği belirlenmiş ve DME ile daha düşük CO emisyonu değerleri elde edilmesinin DME'nin içeriğinde oksijen bulunmasının yanı sıra daha düşük C/H oranına sahip olması ve kimyasal yapısında direkt C-C bağı olmaması sayesinde daha verimli bir yanma sağlamasından kaynaklandığı belirtilmiştir [36].



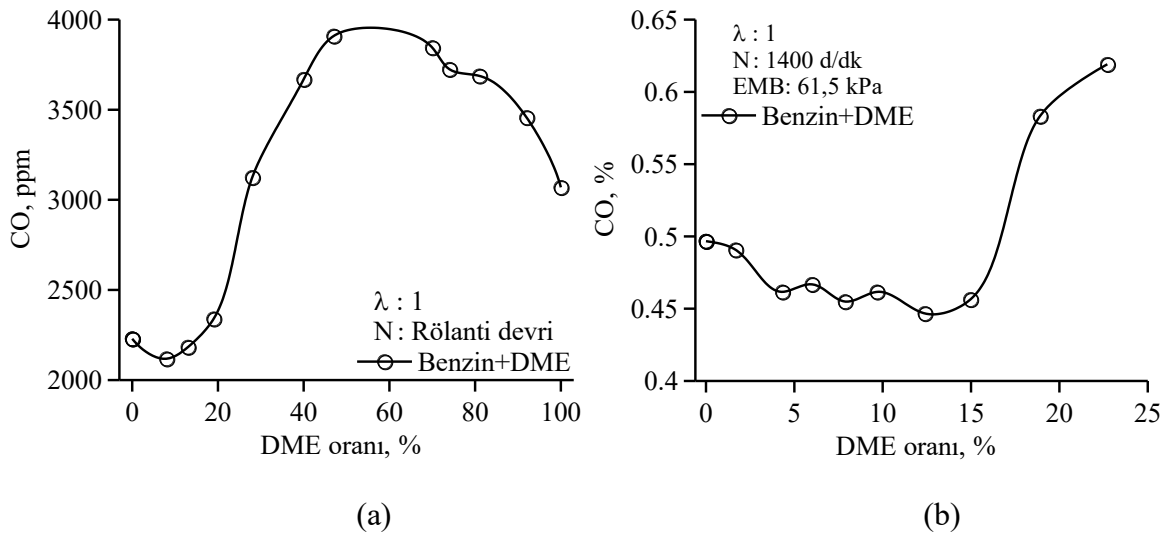
Şekil 5. CO emisyonunun tek ve çift püskürtme durumunda a) ikincil püskürtme oranıyla [36] b) ikincil püskürtme zamanıyla değişimi [37]

Şekil 5(b)'de CO emisyonunun DME'nin tek ve çift püskürtülmesi durumunda ikincil püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekil 5(b)'de görüldüğü gibi CO emisyonu minimum değerlere ulaşmaya kadar DME enjeksiyon zamanlamasının gecikmesi ile kademeli olarak azalmaktadır. Bunun başlıca nedeninin, yerel olarak yakıt bakımından zengin karışımlardan üretilen CO'nun daha sonra yüksek sıcaklıkta oksitlenmesi olduğu belirtilmiştir. DME'nin enjeksiyonunun geciktirilmesiyle ateşleme zamanlamasının geciktiği ve üst ölü nokta civarında daha fazla yanma gerçekleştiği ifade edilmiştir. Bunun sonucunda daha yüksek yanma sıcaklığı elde edildiği ve böylece oluşan CO'nun oksitlenerek daha fazla oranda CO₂'ye dönüşebildiği belirtilmiştir. Ancak, minimum CO emisyonu değerine ulaşıldıktan sonra DME enjeksiyonunun daha fazla geciktirilmesiyle yanma işleminin genişleme sürecine kayması sonucunda yanma sıcaklığının düştüğü ve CO'nun CO₂'ye dönüşüm oranının azaldığı bildirilmiştir. Ayrıca, Şekil 5(b)'de görüldüğü gibi -40 °KMA püskürtme zamanına kadar DME'nin tek enjeksiyonuyla çift püskürtmeye göre daha az CO emisyonu ortaya çıktığı belirlenmiş ve ateşlemenin daha erken gerçekleşmesi ve yanmanın daha uzun sürmesi nedeniyle daha yüksek yanma sıcaklığına ulaşılması sonucunda daha düşük CO emisyonu elde edildiği bildirilmiştir. Ancak, -40 °KMA'nın üzerindeki püskürtme zamanlarında tek enjeksiyon durumunda CO emisyonunun çift püskürtmeye kıyasla arttığı tespit edilmiş ve bu durumun DME katkısından kaynaklandığı ifade edilmiştir. DME daha düşük C/H oranına sahip oksijenli bir yakıt olduğundan ve kimyasal yapısında direkt C-C

bağı olmadığından DME katkısı kullanıldığında CO'nun nispeten daha düşük sıcaklık bölgelerinde ve daha fakir benzin-hava karışımıyla dahi oluşabildiği ve bunun sonucunda CO emisyonunun arttığı belirtilmiştir. Sonuç olarak; DME katkısıyla ateşlemenin üst ölü nokta civarında gerçekleşmesi ve yanma süresinin kısılmasıyla motorun ürettiği yararlı işin ve termik verimin arttığı ancak CO ve HC emisyonlarının biraz yükseldiği ifade edilmiştir [37].

Şekil 6(a)'da çeşitli benzin-DME karışımları için CO emisyonunun rölanti devrinde stokiyometrik (teorik) karışımla ($\lambda=1$) çalışma durumunda DME oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi CO emisyonu %49 DME oranına kadar artmış daha sonra azalmıştır. CO yanma reaksiyonunda DME'nin ara ürünü olup CO oluşumu kimyasal kinetik tarafından kontrol edildiğinden oldukça karmaşıktır. DME, oksijen içeren bir yakıt olmasına rağmen metoksimetil radikallerinin kesilmesinin formaldehit ve CO oluşumunu artırabileceği ifade edilmiştir. Bu nedenle, düşük DME oranlarında CO emisyonu artan DME oranı ile artmakta ancak %49 DME oranından sonra CO emisyonu bir miktar azalmaktadır. Bunun nedeninin, DME'nin düşük sıcaklıkta başlayan yanma reaksiyonunun DME oranı arttıkça silindir sıcaklığını artırarak CO'nun azalmasına katkı sağlaması olduğu şeklinde ifade edilmiştir. Bunun ise CO'nun CO₂'ye dönüşüm oranını artırıp DME oranının artmasıyla CO emisyonun önce artıp daha sonra azaldığı belirtilmiştir [38]. Şekil 6(b)'de benzin-DME karışımları için CO emisyonunun 61,5 kPa emme manifoldu basıncı (EMB) altında, 1400 d/dk devir sayısında ve stokiyometrik karışımla ($\lambda=1$) çalışma durumunda DME oranı ile değişimi verilmiştir. CO'nun eksik yanma ürünü olup sadece yakıt-hava oranından değil aynı zamanda silindir sıcaklığı ve reaksiyon süresinden de doğrudan etkilendiği belirtilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi CO emisyonu artan DME oranı ile önce azalmakta daha sonra hızlı bir şekilde artmaktadır. Saf benzin kullanılması durumunda CO emisyonu değeri %0,497 iken %12,4 DME oranında %0,447 minimum değerine ulaşmıştır. Ancak, DME oranının %15 değerinin üzerinde artırılması benzine kıyasla CO emisyonunun artmasına neden olmuştur. DME katkısı kullanıldığında CO emisyonundaki azalmanın temel nedeninin DME'nin kimyasal yapısında benzine göre daha düşük oranda karbon bulunmasının olduğu belirtilmiştir. Öte yandan, DME'nin içeriğinde oksijen bulunmasının yanmanın iyileşmesini sağlayıp CO emisyonunu azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca, DME silinire gaz halinde püskürtüldüğünden yüksek difüzyon hızı nedeniyle benzin ve hava ile homojen bir karışım oluşturarak yüksek yanma hızı ve kolay tutuşma özeliği sayesinde yanma süresini kısalttığı bildirilmiştir. Bunların sonucunda, CO'nun CO₂'ye dönüşüm oranı artarak ve DME katkısı kullanıldığında CO emisyonu azaldığı

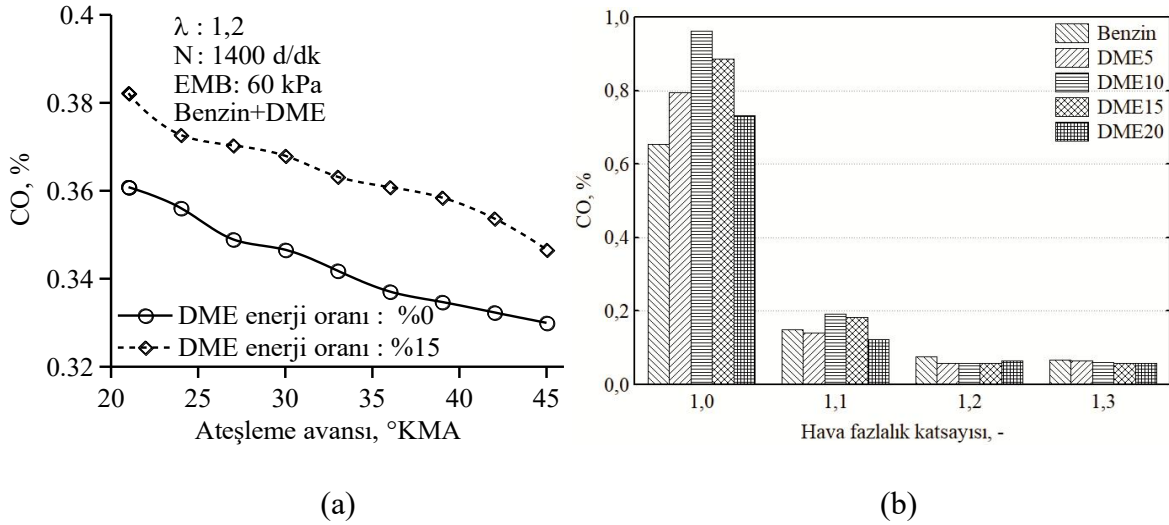
ifade edilmiştir. DME oranının %15 üzerine artırılması durumunda ise aşırı yüksek yanma hızı nedeniyle yanma odasındaki oksijen hızlıca tüketildiğinden özellikle oksijen eksikliği olan bölgelerde CO emisyonunun artış gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, HC ve CO emisyonlarının oluşumu arasında bir etkileşim olduğu, HC emisyonunun azalmasının özellikle bazı koşullar altında CO emisyonunun artışına neden olabileceği ifade edilmiştir. Yanma sırasında HC oksidasyonunun daha önce başladığı ve açığa çıkan ısı nedeniyle sıcaklık belli bir değerin üzerine ulaştığında CO oksidasyonunun başladığı bildirilmiştir. CO oksidasyonun başlaması ile daha fazla ısı salınımı nedeniyle CO'den CO₂'ye dönüşüm sürecinin hızlandığı belirtilmiştir. Ancak, DME oranının artmasıyla ateşleme avansı geciktirildiğinden CO'nun tamamen CO₂'ye dönüşmesi için kalan sürenin kısaldığı ve bunun sonucunda DME oranı artıkça HC emisyonu azalmaya devam etmesine rağmen CO emisyonunun artış gösterdiği bildirilmiştir [39].



Şekil 6. CO emisyonunun benzin–DME karışımları için a) rölantide çalışma [38] ve b) yüklü çalışma [39] durumlarında DME oranı ile değişimi

Şekil 7(a)'da benzin ve benzin–DME karışımı için CO emisyonunun 60 kPa EMB–motor yükü altında, fakir karışımla ($\lambda=1,2$) ve 1400 d/dk devir sayısında çalışma durumunda ateşleme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ateşleme avansının artırılması CO emisyonunun bir miktar azalmasını sağlarken DME katkısı CO emisyonunun artmasına neden olmuştur. Reaksiyon kinetiği ilkesine göre; DME düşük sıcaklıktaki yanma safhasında sürekli olarak CO ve OH radikali salınımına neden olmakta ve oluşan OH radikalının alevin ilerle hızını ve yanma hızını artırarak CO emisyonunu artırabileceği

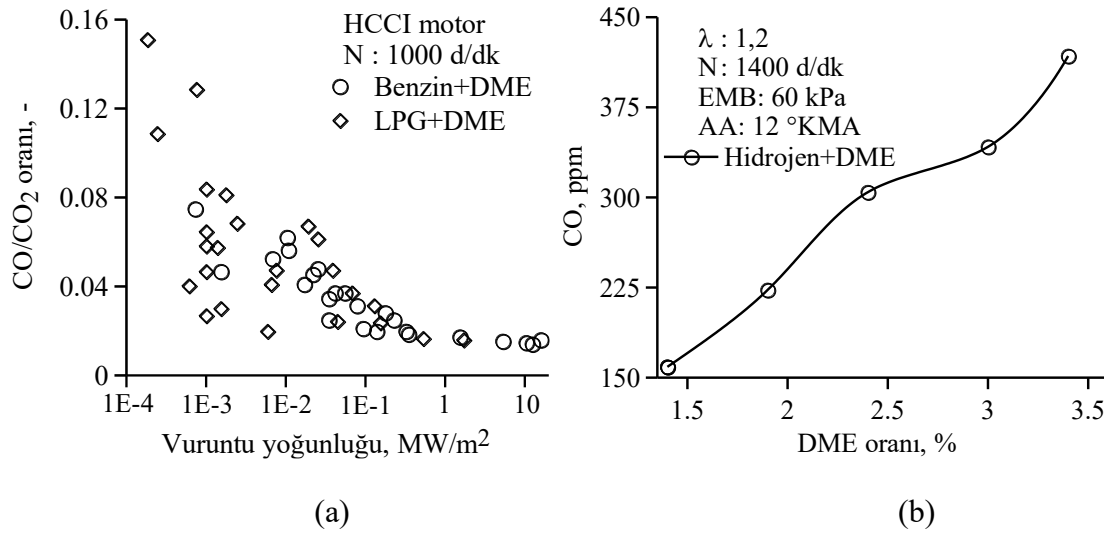
belirtilmiştir. Ayrıca, bir süre sonra metoksimetil radikallerinin kesilmesi de CO emisyonunu artırabilmektedir. Bu nedenle, DME katkısının CO emisyonunu artırdığı ifade edilmiştir [40]. Şekil 7(b)'de çeşitli benzin–DME karışımları için CO emisyonunun hava fazlalık katsayısı (λ) ile değişimi verilmiştir. Şekil 7(a)'da görüldüğü gibi stokiyometrik ($\lambda:1,0$) koşullarda saf benzin benzin–DME karışımları göre daha düşük CO emisyonu değerleri verirken fakir yakıt–hava karışımı koşullarında ($\lambda>1,0$) benzin–DME karışımları saf benzine göre daha düşük CO emisyonu değerleri vermiştir. Bu durumun, DME'nin daha düşük stokiyometrik hava–yakıt oranına sahip olması nedeniyle yakıt–hava karışımını fakirleştirmesinden ve içeriğinde oksijen bulunması sayesinde yanmayı iyileştirmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Öte yandan DME'nin yüksek reaktiviteye ve adyabatik sıcaklığa sahip olmasının CO emisyonun azalmasına katkı sağladığı ifade edilmiştir. Bunların sonucunda belirli bir hava fazlalık katsayısı oranında CO emisyonun artan DME oranı azaldığı bildirilmiştir. Stokiyometrik hava–yakıt oranında DME katkısı ile CO emisyonun artmasının ise DME'nin yüksek gizli buharlaşma ısısı nedeniyle yanma süresinin uzamasından ve ısı salınım oranının azalmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir [41].



Şekil 7. CO emisyonunun benzin–DME karışımı için a) ateşleme avansı ile [40] b) hava fazlalık katsayısı ile [41] değişimi

Şekil 8(a)'da benzin–DME ve LPG–DME karışımlarının HCCI motorda kullanılması durumunda CO emisyonunun 1000 d/dk devir sayısında vuruntu yoğunluğu ile değişimi verilmiştir. HCCI motorların CO emisyonu seviyelerinin buji ateşlemeli ve dizel motorlara göre daha yüksek olduğu ve bu yüksek CO emisyonunun genişleşme sırasındaki yanma sıcaklığıyla yakından ilişkili olan oksidasyon eksikliğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Diğer

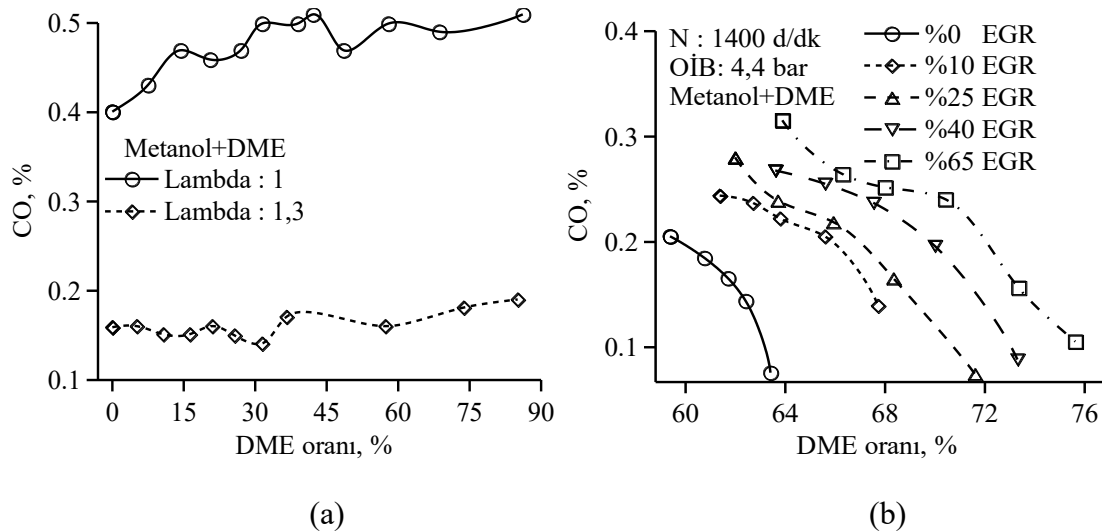
motorlara benzer biçimde HCCI motorlarda da CO emisyonunun eksik yanmanın bir göstergesi olduğu ve CO oksidasyonunun silindir içi sıcaklıktan etkilendiği bildirilmiştir. 1500 K'nin üzerindeki yanma sıcaklıklarının CO oksidasyon sürecine yardımcı olabileceği bildirilmiştir. Yüksek yanma basıncının yüksek yanma sıcaklığına ve vuruntunun artmasına yol açtığı ve vuruğu yoğunluğu arttıkça CO/CO₂ oranının dolayısıyla CO emisyonunun azaldığı belirtilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ihmal edilebilir düşük vuruğu yoğunluğu değerlerinde CO/CO₂ oranı yaklaşık 0,17 iken 0,5 MW/m² vuruğu yoğunluğu değerinden sonra yüksek yanma sıcaklığı nedeniyle CO oksidasyonunun artması sonucu CO emisyonu minimum değerlere ulaştığı belirlenmiştir [24]. Şekil 8(b)'de hidrojen–DME karışımları için CO emisyonunun 60 kPa motor yükü altında, fakir karışımla ($\lambda=1,2$) ve 1400 d/dk devir sayısında çalışma durumunda DME oranı ile değişimi verilmiştir. CO emisyonu ölçümünde Horiba marka MEXA–7100DEGR model ve ölçüm hassasiyeti 1 ppm ve hata oranı ± 1 olan bir ölçüm cihazı kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi hidrojene DME katkısı CO emisyonunun artmasına neden olmakta ve DME oranının artmasıyla CO emisyonu daha da artmaktadır. Hidrojenle çalışma durumunda yağlama yağının CO emisyonunun artmasına katkı sağladığı, ancak artan DME oranı ile CO emisyonunun artışından anlaşılabileceği gibi DME'nin CO emisyonu artışının temel nedeni olduğu belirtilmiştir. DME düşük karbon oranına sahip olup kimyasal yapısında direkt C–C bağı bulunmamaktadır. Bu ise DME'nin kimyasal bağlarının bölünmesi ve oksidasyonu için oldukça faydalıdır. Ayrıca, DME'nin düşük sıcaklıktaki oksidasyonu alev cephesinin ilerlemesini ve yakıt–hava karışımının yanmasını hızlandırabilmektedir. Bu nedenle, DME oranı artarken HC emisyonundaki artış belli bir değerde sabit kalırken CO emisyonu artan DME oranı ile sürekli artmaktadır. Ayrıca, hidrojen DME'den daha yüksek yanma sıcaklığına ve daha iyi alev cephesi sönme mesafesine sahiptir. Bu nedenle, DME oranının artmasıyla yanma odası duvarına yakın yerlerde alev cephesi sönme olasılığı artmaktadır. Ayrıca, DME oranı arttıkça yanma sıcaklığının düşmesi yakıt–hava karışımının tam oksidasyonunu olumsuz yönde etkilemektedir. Bunların sonucunda, DME oranının artmasının hem HC ve hem de CO emisyonlarını artırdığı ifade edilmiştir. Ancak, HC emisyonundaki artışın CO emisyonundaki artışın yaklaşık 1/3 kadar olduğu belirtilmiştir [42].



Şekil 8. CO emisyonunun a) benzin–DME ve LPG–DME karışımları için vuru­tu yoğunluğuyla [24] ve b) hidrojen–DME karışımları için DME oranı ile [42] değişimi

Şekil 9(a)'da metanol–DME karışımları için CO emisyonunun stokiyometrik ($\lambda=1$) ve fakir ($\lambda=1,3$) karışımlarla çalışma durumunda DME oranı ile değişimi verilmiştir. Şekil 9(a)'da görüldüğü gibi CO emisyonu artan DME oranı ile az miktarda artmaktadır. Saf metanol ile çalışma durumunda CO emisyonu değerleri stokiyometrik ve fakir karışımlar için sırasıyla %0,4 ve %0,16 iken %86,3 ve %85,2 DME oranlarında CO emisyonu değerleri %27,5 ve %18,75 oranlarında artmıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi CO emisyonu eksik yanma ürünü olup sadece yakıt–hava oranına bağlı olmayıp kullanılan yakıtın karbon içeriğinden doğrudan etkilenmektedir. DME'nin karbon oranının metanole göre daha yüksek olmasının CO emisyonunun artırmasına neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, DME'nin yüksek alev hızına sahip olması nedeniyle yanma odasındaki oksijeni hızla tüketerek CO emisyonunun artmasına katkı sağladığı ifade edilmiştir. Bu nedenlerle, CO emisyonunun artan DME oranı ile arttığı belirtilmiştir [43]. Şekil 9(b)'de metanol–DME karışımları için CO emisyonunun 4,4 bar motor yükü ve 1400 d/dk devir sayısında farklı egzoz gazı resirkülasyon (EGR) oranlarında DME oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi CO emisyonu aynı DME oranı için artan EGR oranı ile artarken aynı EGR oranı için artan DME oranı ile yanma sıcaklığının artması sonucu azalmıştır. Benzer değişimin HC emisyonu için de elde edildiği bildirilmiştir. CO emisyonu yanma sırasında oluşan ara ürünlerden biri olup oluşumu HC emisyonundan oldukça farklı ve karmaşıktır ve oluşumu kimyasal kinetik mekanizmalarıyla kontrol edilebilir. CO emisyonunun, sıcaklığın HC oksidasyonunun başlaması için yeterince yüksek olduğu silindir duvarları yakınında oluştuğu ancak silindir

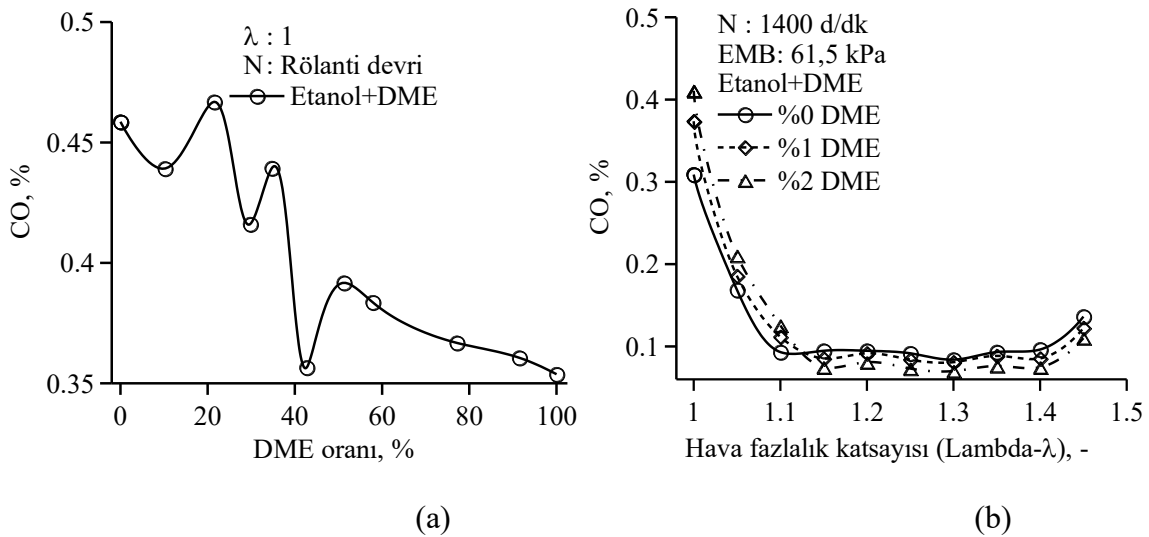
duvarlarının soğutma etkisinin CO emisyonunun tam olarak CO₂'ye dönüşümünü engellediği belirtilmiştir. Bu nedenle, hem ortalama silindir sıcaklığı hem de silindir duvarları sıcaklığının CO emisyonu oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan, EGR oranının artması ortalama silindir sıcaklığını düşürerek yanma reaksiyonun ilerleme hızını yavaşlatıp eksik yanmaya neden olmaktadır. Bunların sonucunda ara ürün olan CO'nun CO₂'ye dönüşümü tamamlanamadığından CO emisyonunun artan EGR oranı ile arttığı belirtilmiştir. Ancak, DME oranının artması ortalama silindir sıcaklığını artırdığından aynı EGR oranında DME oranının artırılması CO emisyonunun azaldığı belirtilmiştir. Bu nedenle, EGR oranı artırıldığında CO emisyonunu azaltabilmek için DME oranının artırılması gerektiği ifade edilmiştir [44].



Şekil 9. CO emisyonunun metanol–DME karışımları için a) farklı hava fazlalık katsayısı oranlarında [43] ve b) farklı egzoz gazı resirkülasyon (EGR) oranlarında [44] DME oranı ile değişimi

Şekil 10(a)'da etanol–DME karışımları için CO emisyonunun stokiyometrik karışımla ($\lambda=1$) rölantide (boşta) çalışma durumunda DME oranı ile değişimi verilmiştir. Boşta çalışma durumunda özellikle CO ve HC gibi yarı yanmış emisyonların seviyesi yüklü çalışma durumuna göre daha yüksektir ve bu durum motorun boşta çalışma performansının belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Şekil 10(a)'da görüldüğü gibi CO emisyonu artan DME oranı ile kademeli olarak azalmakta ve saf etanol için %0,46 seviyesinde iken %100 DME oranında %0,35 seviyesine düşerek %22,5'lik bir azalma göstermektedir. CO emisyonu eksik yanma nedeniyle silindirdeki yakıt–hava karışımının tamamen yanmaması sonucu ortaya çıkmakta olup CO'nun tamamen CO₂'ye dönüşebilmesi için zamana ihtiyaç olduğu ifade

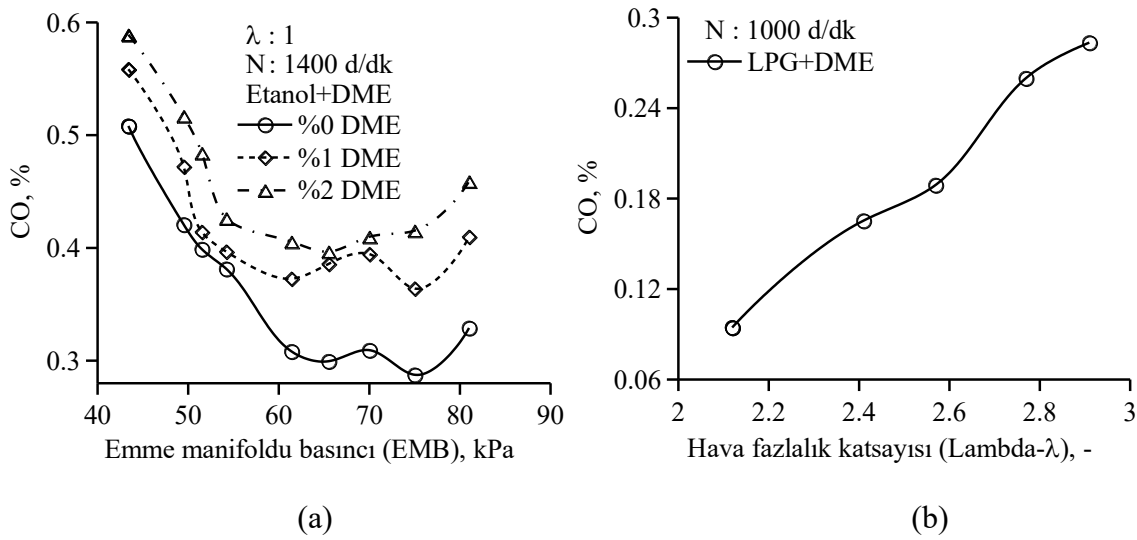
edilmiştir. DME'nin düşük sıcaklıkta oksidasyon hızı, yüksek alev hızı ve diğer özellikleri nedeniyle etanol–DME karışımları için yanmanın başlama süresi ve alev yayılımı süresinin saf etanole göre daha kısa olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan, son yanma aşamasında oksidasyon ve yanma hızının DME katkısı ile iyileştiği ve DME katkısının CO emisyonunun azalmasını sağladığı ifade edilmiştir [45]. Şekil 10(b)'de CO emisyonunun 61,5 kPa EMB altında farklı etanol–DME karışımları için hava fazlalık katsayısı (λ) ile değişimi verilmiştir. Şekil 10(b)'de görüldüğü gibi CO emisyonu $\lambda=1,1$ değerine kadar artan DME oranı ile artmış $\lambda=1,1$ değerinden sonra ise artan DME oranı ile azalmıştır. DME'nin yanma hızının yüksek olması nedeniyle özellikle son yanma fazında yakıtın oksidasyonu için yeterli süre kalmamakta ve $\lambda=1,1$ değerine kadar yanma odasındaki oksijen miktarı nispeten düşük olduğundan DME katkısının CO emisyonun artmasına neden olduğu belirtilmektedir. $\lambda=1,1$ değerinden sonra ise hava fazlalık katsayısının artmasıyla silindirde nispeten daha fazla hava/oksijen bulunması nedeniyle daha homojen bir yakıt–hava karışımı elde edilmekte ve DME'nin yüksek yanma hızı sayesinde daha verimli bir yanma olduğu belirtilmiştir. Bunun sonucunda, CO emisyonunun $\lambda=1,1$ değerinden sonra artan DME oranı ile azaldığı ifade edilmiştir [46].



Şekil 10. CO emisyonunun etanol–DME karışımları için a) DME oranı ile [45] ve b) hava fazlalık katsayısı ile [46] değişimi

Şekil 11(a)'da CO emisyonunun farklı etanol–DME karışımları için stokiyometrik karışım ($\lambda=1$) ve 1400 d/dk devir sayısında çalışma durumunda EMB–motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekil 11(a)'da görüldüğü gibi CO emisyonu tüm yakıtlar için EMB=70

kPa değerine kadar azalmış bu değerden sonra ise bir miktar artış eğilimi göstermiştir. Diğer taraftan, CO emisyonu artan DME oranı ile artmış, EMB=81 kPa değerinde saf etanol için %0,33 olan CO emisyonu değeri %2 DME katkısı ile %0,46 değerine yükselmiş ve %2 DME oranında tüm motor yüklerinde CO emisyonundaki ortalama artış oranının %30–40 olduğu belirtilmiştir. CO emisyonundaki bu artışın DME'nin yüksek yanma hızına sahip olması CO emisyonunun CO₂'ye dönüşebilmesi için yeterli zamanın kalmamasından kaynaklandığı ve bunun sonucunda artan DME oranı ile CO emisyonun arttığı ifade edilmiştir [47].

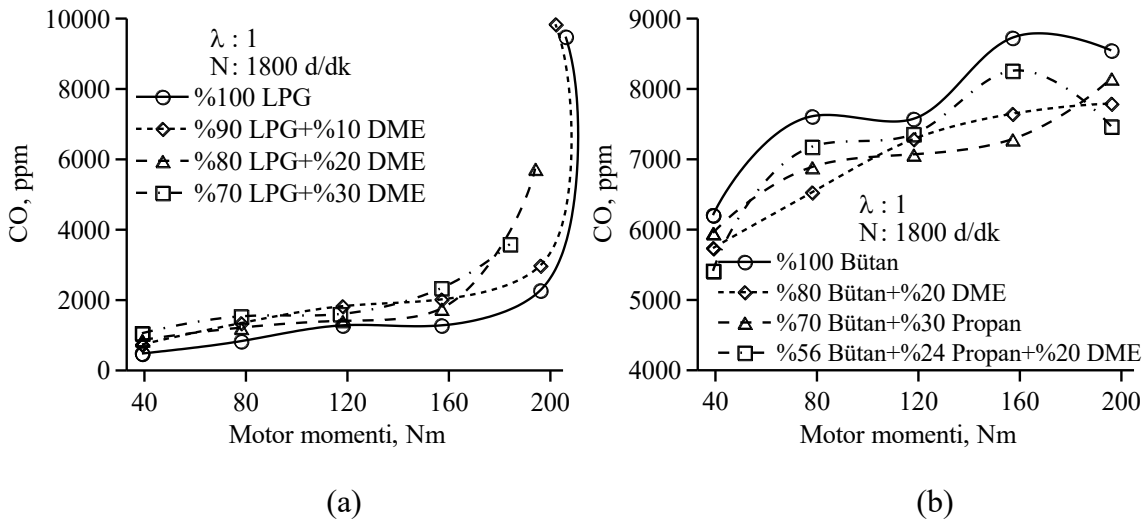


Şekil 11. CO emisyonunun a) farklı etanol–DME karışımları için emme manifoldu basıncı (EMB) ile [47] ve b) LPG–DME karışımı için hava fazlalık katsayısı ile [24] değişimi

Şekil 11(b)'de CO emisyonunun homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) bir motorda 1000 d/dk devir sayısında LPG–DME karışımı için hava fazlalık katsayısı (λ) ile değişimi verilmiştir. Şekil 11(b)'de görüldüğü gibi CO emisyonu LPG–DME karışımı için artan hava fazlalık katsayısı ile sürekli olarak artmıştır. Bu durumun, hava fazlalık katsayısının artması nedeniyle fakir yakıt–hava karışımıyla çalışma sonucunda düşen yanma sıcaklığından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Hızlı yanma sonucu ani olarak yükselen basınç ve sıcaklık nedeniyle HCCI motorların CO emisyonu değerlerinin buji ateşlemeli ve dizel motorlardan daha yüksek olduğu bilinmektedir. Diğer motorlarda olduğu gibi HCCI motorlarda da CO emisyonu eksik yanmanın bir göstergesi olup CO oksidasyonunun artmasıyla azalmakta ve CO oksidasyonu için yeterli süresinin olmaması durumunda artmaktadır. CO oksidasyonu süresi ise yanma sıcaklığına bağlı olup 1500 K ve üzerindeki sıcaklıkların CO oksidasyonunu ve vuruntu oluşumunu artırdığı bildirilmiştir. Diğer taraftan,

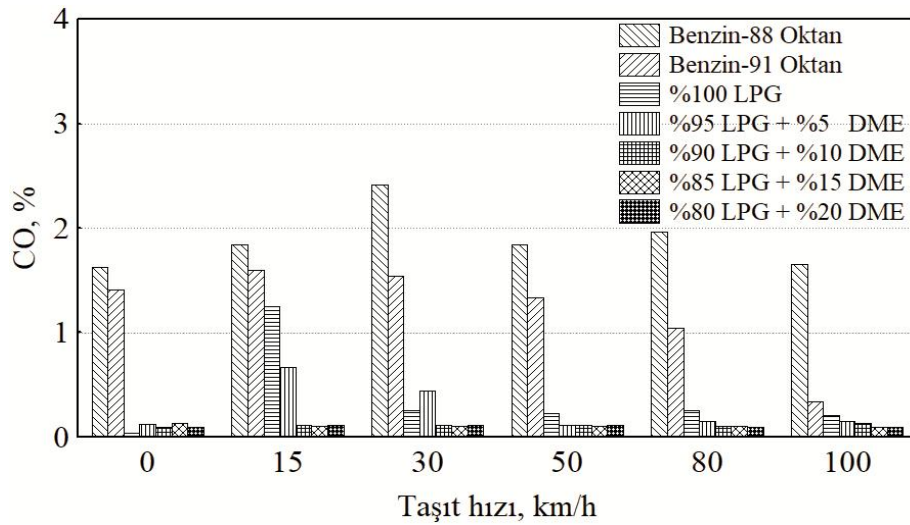
CO/CO₂ oranının vuruntu indeksine bağlı olduğu ve tolere edilebilir düşük vuruntu indeksi değerlerinde CO/CO₂ oranının dolayısıyla CO emisyonunun oldukça düşük değerlere ulaşabileceği ifade edilmiştir. HCCI motorlarda CO ve HC emisyonlarını minimum değerde tutabilmenin yüksek sıcaklıkta kısa süreli ve güçlü yanma ile mümkün olabileceği ifade edilmiştir [24].

Şekil 12(a)'da CO emisyonunun 1800 d/dk devir sayısında LPG ve farklı LPG–DME karışımları için motor momenti ile değişimi verilmiştir. Şekil 12(a)'da görüldüğü gibi CO emisyonu 160 Nm motor momentinden sonra ani olarak artmıştır. Bunun 160 Nm moment değerinden sonra zengin yakıt–hava karışımı kullanılması nedeniyle ortaya çıkan eksik yanmadan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Diğer taraftan, LPG–DME karışımları kullanıldığında CO emisyonu değerleri saf LPG yakıtına göre bir miktar artmıştır. Bu durumun ise DME'nin düşük oktan sayısına sahip olması nedeniyle motorun vuruntulu çalışmasına neden olması sonucu ortaya çıktığı ifade edilmiştir [48].



Şekil 12. CO emisyonunun a) LPG ve farklı LPG–DME karışımları için [48] ve b) Bütan ve farklı Bütan–Propan–DME karışımları için [49] motor momenti ile değişimi

Şekil 12(b)'de CO emisyonunun 1800 d/dk devir sayısında bütan ve farklı bütan–propan–DME karışımları için motor momenti ile değişimi verilmiştir. Şekil 12(b)'de görüldüğü gibi CO emisyonu farklı bütan–propan–DME karışımları kullanıldığında saf bütana kıyasla azalmıştır. Bunun, propanın yüksek oktan sayısına sahip olmasından ve DME'nin başta içeriğinde oksijen bulunması ve diğer yanmayı iyileştirici özelliklerinden kaynaklandığı ifade edilmiştir [49].



Şekil 13. CO emisyonunun buji ateşlemeli bir motorda benzin, LPG ve farklı LPG–DME karışımları kullanılması durumunda taşıt hızı ile değişimi [50]

Şekil 13’de CO emisyonunun buji ateşlemeli bir motorda benzin, LPG ve farklı LPG–DME karışımları kullanılması durumunda taşıt hızı ile değişimi verilmiştir. Şekil 13’de görüldüğü gibi CO emisyonu değerleri tüm yakıt ve karışımlar için 30 km/h taşıt hızına kadar artmış bu değerden sonra ise azalmıştır. Bu durumun ilgili taşıt hızlarında motorun çalıştığı yakıt–hava karışımından diğer bir ifadeyle hava fazlalık katsayısından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Diğer taraftan, saf LPG ve LPG–DME karışımları 88 ve 91 oktanlı saf benzin yakıtlarına göre daha düşük CO emisyonu değerleri vermiştir. Saf LPG ve LPG–DME karışımları kullanıldığında CO emisyonundaki azalmaların LPG ve DME’nin gaz fazında silindire girmesi nedeniyle daha homojen bir yakıt–hava karışımı oluşturması ve LPG’nin oktan sayısının benzine göre daha yüksek olması nedeniyle yanmayı iyileştirmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Benzer şekilde 91 oktanlı benzin kullanıldığında 88 oktanlı benzine göre daha düşük CO emisyonu değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, LPG ve DME’nin molekül yapılarının benzine göre daha basit olmasının yani daha düşük karbon içeriğine sahip olmasının ve DME’nin içeriğinde oksijen bulunmasının CO emisyonunun azalmasına katkı sağladığı belirtilmiştir [50].

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada buji ateşlemeli motorlarda benzin veya diğer yakıtlarla birlikte DME kullanılmasının CO emisyonuna etkileri literatüre dayalı olarak incelenmiştir. Bulguların

ışığında DME'nin buji ateşlemeli motorlarda kullanılabilirliğinin olduğu görülmüş olup aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir.

- Soğuk ilk çalışma sırasında CO emisyonunun başlangıçta benzin için %3,01 ve DME için %2,95 gibi yüksek değerlerde iken birkaç saniye sonra hızlı bir şekilde azaldığı ve DME'nin benzinin yaklaşık yarısı kadar CO emisyonu değerleri verdiği tespit edilmiştir. %80 LPG-%20 DME (DME20) karışımı için soğuk ve sıcak ilk çalışma sırasında da CO emisyonunun önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.
- Stokiyometrik karışımla ($\lambda=1$) rölantide çalışma durumunda benzinle birlikte DME kullanılması durumunda %49 karışım oranına kadar CO emisyonunun hızlı bir şekilde arttığı bu karışım oranından sonra artan DME oranıyla sürekli azaldığı belirlenmiştir.
- Benzinli buji ateşlemeli yanma ve DME pilot enjeksiyonlu yanma için aynı hava fazlalık katsayısı ($\lambda=1,1$) altında düşük yükte çalışma durumunda DME oldukça yüksek CO emisyonu değerleri verirken orta ve yüksek yüklerde benzin ve DME'nin yaklaşık aynı CO emisyonu değerleri verdiği tespit edilmiştir.
- Direkt püskürtmeli buji ateşlemeli motorda saf benzin ve %10 oranında DME kullanılması durumunda çoklu (çift) püskürtmenin tekli püskürtmeye kıyasla daha yüksek CO emisyonu verdiği ve ikincil püskürtme oranının artırılmasının ve DME katkısının CO emisyonunu daha fazla artırdığı tespit edilmiştir. 1:3 oranında çiftli püskürtme yapıldığında maksimum CO emisyonu değerlerinin saf benzin için 1041 ppm ve %10 DME oranı için 1192 ppm olarak elde edildiği ve %10 DME katkısının %12,7 oranında artışa neden olduğu belirlenmiştir.
- Buji ateşlemeli motorlarda CO emisyonunun ateşleme zamanının değişiminden önemli ölçüde etkilenmediği aynı ateşleme avansı ve hava fazlalık katsayısı ($\lambda=1,2$) değerinde benzinle birlikte %15 oranında DME kullanıldığında CO emisyonunun yaklaşık %5 arttığı belirlenmiştir.
- Stokiyometrik karışımla ($\lambda=1$) çalışma durumunda CO emisyonunun artan DME oranıyla önce azalıp sonra arttığı, benzinle çalışma durumunda %0,497 olan CO emisyonunun %12,4 DME oranında %0,447 minimum değerine ulaşarak yaklaşık %10 azaldığı ve DME oranının %15 ve üzerinde artırılmasının CO emisyonunu artırdığı tespit edilmiştir.

- Buji ateşlemeli bir motorda $\lambda=1,2$ hava fazlalık katsayısı değerinde hidrojen ile birlikte DME kullanıldığında CO emisyonunun artan DME oranı ile sürekli olarak arttığı saf hidrojen için yaklaşık 154 ppm olan CO emisyonu değerinin %3,4 DME oranında yaklaşık %173 aratarak 420 ppm değerine ulaştığı tespit edilmiştir.
- Buji ateşlemeli bir motorda stokiometrik ($\lambda=1$) ve fakir karışımla ($\lambda=1,3$) çalışma durumlarında metanol ile birlikte DME kullanıldığında CO emisyonunun az miktarda arttığı belirlenmiştir. Stokiometrik ve fakir karışımla çalışma durumunda saf metanol için sırasıyla %0,4 ve %0,16 olan CO emisyonunun stokiometrik karışım için %86,3 DME oranında %27,5 ve fakir karışım için %85,2 DME oranında %18,75 oranlarında arttığı tespit edilmiştir
- Buji ateşlemeli bir motorda rölantide stokiometrik karışımla ($\lambda=1$) çalışma durumunda etanol ile birlikte DME kullanılmasının CO emisyonunu azalttığı belirlenmiş ve saf etanol için %0,46 olan CO emisyonunun %100 DME oranında yaklaşık %22,5 azalarak %0,35 değerine düştüğü belirlenmiştir.
- $\lambda=1,1$ hava fazlalık katsayısında yüklü çalışma durumunda etanol ile birlikte %1–2 oranında DME kullanılmasının CO emisyonunun artmasına neden olduğu ancak hava fazlalık katsayısının 1,1 değerinin üzerine çıkarılmasıyla CO emisyonunun az miktarda azaldığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, CO emisyonunun 70 kPa emme manifoldu basıncına (motor yüküne) kadar azalma eğilimi gösterdiği ancak 70 kPa'nın üzerindeki yüklerde CO emisyonunun arttığı ve aynı motor yükü değerinde DME katkısıyla CO emisyonunun arttığı 81 kPa motor yükünde saf etanol için %0,33 olan CO emisyonunun %2 DME oranında yaklaşık %28,3 aratarak %0,46 değerine ulaştığı belirlenmiştir.
- Buji ateşlemeli bir motorda LPG ile birlikte %30 oranına kadar DME kullanılmasının artan motor yüküyle özellikle de yüksek yüklerde CO emisyonunu az miktarda artırdığı tespit edilmiştir. Ancak, buji ateşlemeli motora sahip bir taşıtla farklı hızlarda yapılan yol testlerinde LPG ile birlikte %20 oranına kadar DME kullanılmasının özellikle yüksek taşıt hızlarında CO emisyonunu benzine kıyasla önemli oranlarda LPG'ye kıyasla daha düşük oranlarda azalttığı belirlenmiştir.
- Ani ve hızlı gerçekleşen yanma nedeniyle yakıtın tamamen oksitlenmesi için yeterli zaman olmadığından kontrollü kendiliğinden ateşlemeli (CAI) veya diğer adıyla homojen dolgulu

sıkıştırırmayla ateşlemeli (HCCI) motorların CO emisyonu değerlerinin geleneksel buji ateşlemeli ve dizel motorlardan daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

- HCCI motorlarda LPG–DME karışımları kullanıldığında CO emisyonu değerlerinin hava fazlalık katsayısının artırılmasıyla yani yakıt–hava karışımının fakirleşmesiyle arttığı ancak vuruntu yoğunluğunun artması ile azaldığı belirlenmiştir.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

λ	: Lambda–Hava fazlalık katsayısı	HCCI	: Homojen dolgulu sıkıştırırmayla ateşlemeli
$^{\circ}$	: Derece	K	: Kelvin
AA	: Ateşleme avansı	KMA	: Krank mili açısı
C	: Karbon	LNG	: Sıvılaştırılmış doğalgaz
CAI	: Kontrollü kendiliğinden ateşlemeli	LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı
CNG	: Sıkıştırılmış doğalgaz	N	: Devir sayısı
CO	: karbon monoksit	NO _x	: Azot oksitler
CO ₂	: Karbondioksit	O	: Tek atomlu oksijen
DME	: Dimetil eter	O ₂	: Çift atomlu oksijen
EGR	: Egzoz gazı resirkülasyonu	OİB	: Ortalama indike basınç
EKU	: Elektronik kontrol ünitesi	OH	: Hidroksil
EMB	: Emme manifoldu basıncı	PM	: Partikül madde
H	: Tek atomlu hidrojen	PO	: Püskürtme oranı
H ₂	: Çift atomlu hidrojen	PZ	: Püskürtme zamanı
HC	: Hidrokarbon		

KAYNAKÇA

- [1] Denys Stepanenko, Zbigniew Kneba, “DME as alternative fuel for compression ignition engines–a review”, Combustion Engines, 177(2), ss. 172–179, 2019.
- [2] Troy A. Semelsberger, Rodney L. Borup, Howard L. Grene, “Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel”, Journal of Power Sources, 156, ss. 497–511, 2006.
- [3] Omar I. Awad, R. Mamat, Thamir K. Ibrahim, Ali Thaeer Hammid, I. M. Yusri, Mohd Adnin Hamidi, Ali M. Humada, A. F. Yusop, “Overview of the oxygenated fuels in

- spark ignition engine: Environmental and performance”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, ss. 394–408, 2018.
- [4] Omar I. Awad, R. Mamat, Obed M. Ali, N. A. C. Sidik, T. Yusaf, K. Kadirgama, Maurice Kettner, “Alcohol and ether as alternative fuels in spark ignition engine: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, ss. 2586–2605, 2018.
- [5] Stanisław Kruczyński, Marcin Ślęzak, Wojciech Gis, Piotr Orliński, Andrzej Kulczycki, Wojciech Dzięgielewski, Mateusz Bednarski, “Problems in fuelling spark ignition engines with dimethyl ether”, *Combustion Engines*, 170(3), ss. 154–158, 2017.
- [6] Yanuandri Putrasari, Ocktaeck Lim, “Dimethyl ether as the next generation fuel to control nitrogen oxides and particulate matter emissions from internal combustion engines: A review”, *ACS Omega*, 7, ss. 32–37, 2022.
- [7] Constantine Arcoumanis, Choongsik Bae, Roy Crookes, Eiji Kinoshita, “The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review”, *Fuel*, 87, ss. 1014–1030, 2008.
- [8] Lei Shi, Changwei Ji, Shuofeng Wang, Teng Su, Xiaoyu Cong, Du Wang, Chuanqi Tang, “Effects of second injection timing on combustion characteristics of the spark ignition direct injection gasoline engines with dimethyl ether enrichment in the intake port”, *Energy*, 180, ss. 10–18, 2019.
- [9] Yuhan Huang, Nic C. Surawski, Yuan Zhuang, John L. Zhou, Guang Hong, “Dual injection: An effective and efficient technology to use renewable fuels in spark ignition engines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, ss. 110921, 2021.
- [10] Yong Qian, Zilong Li, Liang Yu, Xiaole Wang, Xingcai Lu, “Review of the state-of-the-art of particulate matter emissions from modern gasoline fueled engines”, *Applied Energy*, 238, 1269–1298, 2019.
- [11] Lei Shi, Changwei Ji, Shuofeng Wang, Xiaoyu Cong, Teng Su, Cheng Shi, “Impacts of dimethyl ether enrichment and various injection strategies on combustion and emissions of direct injection gasoline engines in the lean-burn condition”, *Fuel*, 254, ss. 115636, 2019.
- [12] F. Zhao, M.-C. Lai, D. L. Harrington, “Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 25, ss. 437–562, 1999.

- [13] Karittha Imorb, Amornchai Arpornwichanop, “Comparative techno-economic assessment of bio-methanol and bio-DME production from oil palm residue”, *Energy Conversion and Management*, 258, 115511, 2022.
- [14] Zoha Azizi, Mohsen Rezaeimanesh, Tahere Tohidian, Mohammad Reza Rahimpour, “Dimethyl ether: A review of technologies and production challenges”, *Chemical Engineering and Processing*, 82, ss. 150–172, 2014.
- [15] M. Fazlollahnejad, M. Taghizadeh, A. Eliassi, G. Bakeri, “Experimental study and modeling of an adiabatic fixed-bed reactor for methanol dehydration to dimethyl ether”, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 17(4), 630–634, 2009.
- [16] Su Han Park, Chang Sik Lee, “Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel”, *Energy Conversion and Management*, 86, ss. 848–863, 2014.
- [17] Seyyed Ya’ghoob Hosseini, Mohammad Reza Khosravi Nikou, “Modeling of industrial fixed bed reactor to produce dimethyl ether from methanol and determination of optimum operating conditions”, *Journal of American Science*, 8(5), ss. 218–225, 2012.
- [18] Kanit Wattanavichien, “Implementation of DME in a small direct injection diesel engine”, *International Journal of Renewable Energy*, 4(2), ss. 1–12, 2009.
- [19] M. Alam, S. Kajitani, “DME as an alternative fuel for direct injection diesel engine”, 4th International Conference on Mechanical Engineering, Dhaka–Bangladesh, 87–92, December 26–28, 2001.
- [20] Peng Geng, Erming Cao, Qinming Tan, Lijiang Wie, “Effects of alternative fuels on the combustion characteristics and emission products from diesel engines: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 523–534, 2017.
- [21] Junfa Duan, Yongsheng Sun, Zhenzhong Yang, Zhiqiang Sun, 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*, 27, ss. 463–466, 2012.
- [22] A. Kowalewicz, M. Wojtyniak, “Alternative fuels and their application to combustion engines”, *Journal of Automobile Engineering*, 219, ss. 103–125, 2005.
- [23] Ping Sun, Jincheng Feng, Song Yang, Chao Wang, Kexin Cui, Wei Dong, Yaodong Du, Xiumin Yu, Jiangdong Zhou, “Particulate number and size distribution of dimethyl

- ether/gasoline combined injection spark ignition engines at medium engine speed and load”, *Fuel*, 313, ss. 122645, 2022.
- [24] Kitae Yeom, Choongsik Bae, “Knock characteristics in liquefied petroleum gas (LPG)–dimethyl ether (DME) and gasoline–DME homogeneous charge compression ignition engines”, *Energy & Fuels*, 23, ss. 1956–1964, 2009.
- [25] Zhen Huang, Xinqi Qiao, Wugao Zhang, Junhua Wu, Junjun Zhang, “Dimethyl ether as alternative fuel for CI engine and vehicle”, *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 3(1), ss. 99–108, 2009.
- [26] Seung Hyun Yoon, June Pyo Cha, Chang Sik Lee, “An investigation of the effects of spray angle and injection strategy on dimethyl ether (DME) combustion and exhaust emission characteristics in a common–rail diesel engine.”, *Fuel Processing Technology*, 91, ss. 1364–1372, 2010.
- [27] Johannes Claßen, Sascha Krysmon, Frank Dorscheidt, Stefan Sterlepper, Stefan Pischinger, “Real driving emission calibration–review of current validation methods against the background of future emission legislation”, *Applied Science*, 11, ss. 5429, 2021.
- [28] Marco Valério Kuhlmann Raggi, José Ricardo Sodré, “Model for kinetic formation of CO emissions in internal combustion engines”, *SAE Technical Papers*, ss. 2003–01–3138, 2003.
- [29] Shete Yogesh Shreekrushna, “Engine emissions and their control: review”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 6(1), ss. 450–456, 2019.
- [30] Ketan Bhabad, Sumedh Aher, Sahil Mhaiske, Samarth Nagapurkar, “Review on emission control system in IC engine by 3 way catalytic converter with aluminum oxide and titanium dioxide”, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 10(11), ss. 505–518, 2023.
- [31] Patrycja Makoś, Edyta Ślupek, Joanna Sobczak, Dawid Zabrocki, Jan Hupka, Andrzej Rogala, “Dimethyl ether (DME) as potential environmental friendly fuel”, *E3S Web of Conferences*, 116, Wrocław, Poland, June 9–12, 2019.
- [32] Sanjoy Maji, Sirajuddin Ahmed, Weqar Ahmad Siddiqui, Sanjeev Aggarwal, Anil Kumar, “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), ss. 48–52, 2015.

- [33] Changwei Ji, Chen Liang, Binbin Gao, Baojian Wei, Xiaolong Liu, Yongmimng Zhu, “The cold start performance of a spark-ignited dimethyl ether engine”, *Energy*, 50, ss. 187–193, 2013.
- [34] Sunil Kumar Pathak, Vineet Sood, Yograj Singh, Shubham Gupta, Salim Abbasbhai Channiwala, “Application of DME 20 fuel in a gasoline passenger car to comply with Euro IV emission legislation”, *SAE Technical Paper*, 2017–01–0872, 2017.
- [35] H. F. Zhang, K. Seo, H. Zhao, “Combustion and emission analysis of the direct DME injection enabled and controlled auto-ignition gasoline combustion engine operation”, *Fuel*, 107, ss. 800–814, 2013.
- [36] Xue-Qing Fu, Bang-Quan He, Hong-Tao Li, Tao Chen, Si-Peng Xu, Hua Zhao, “Effect of direct injection dimethyl ether on the micro-flame ignited (MFI) hybrid combustion and emission characteristics of a 4-stroke gasoline engine”, *Fuel Processing Technology*, 167, ss. 555–562, 2017.
- [37] Xue-Qing Fu, Bang-Quan He, Si-Peng Xu, Tao Chen, Hua Zhao, Yan Zhang, Yufeng Li, Honglin Bai, “Multi-point micro-flame ignited hybrid lean-burn combustion of gasoline with direct injection dimethyl ether”, *International Journal of Engine Research*, 22(1), ss. 140–151, 2021.
- [38] Changwei Ji, Lei Shi, Shuofeng Wang, Xiaoyu Cong, Teng Su, Menghui Yu, “Investigation on performance of a spark-ignition engine fueled with dimethyl ether and gasoline mixtures under idle and stoichiometric conditions”, *Energy*, 126, ss. 335–342, 2017.
- [39] Changwei Ji, Chen Liang, Shuofeng Wang, “Investigation on combustion and emissions of DME/gasoline mixtures in a spark-ignition engine”, *Fuel*, 90, ss. 1133–1138, 2011.
- [40] Lei Shi, Changwei Ji, Shuofeng Wang, Xiaoyu Cong, Teng Su, Du Wang, “Combustion and emissions characteristics of a S.I. engine fueled with gasoline–DME blends under different spark timings”, *Fuel*, 211, ss. 11–17, 2018.
- [41] Song Yang, Ping Sun, Jincheng Feng, Kexin Cui, Chao Wang, Wei Dong, Xiumin Yu, Ye Gu, “Combustion and emissions characteristics of combined injection gasoline engine with direct injection dimethyl ether enrichment in lean burn conditions”, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4147182>.

- [42] Xiaoyu Cong, Changwei Ji, Shuofeng Wang, “Investigation into engine performance of a hydrogen–dimethyl ether spark–ignition engine under various dimethyl ether fractions”, *Fuel*, 306, ss. 121429, 2021.
- [43] Chen Liang, Changwei Ji, Xiaolong Liu, “Combustion and emissions performance of a DME–enriched spark–ignited methanol engine at idle condition”, *Applied Energy*, 88, ss. 3704–3711, 2011.
- [44] Mingfa Yao, Zheng Chen, Zunqing Zheng, Bo Zhang, Yuan Xing, “Study on the controlling strategies of homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and methanol”, *Fuel*, 85, ss. 2046–2056, 2006.
- [45] Changwei Ji, Chen Liang, Yongming Zhu, Xiaolong Liu, Binbin Gao, “Investigation on idle performance of a spark–ignited ethanol engine with dimethyl ether addition”, *Fuel Processing Technology*, 94, ss. 94–100, 2012.
- [46] Chen Liang, Changwei Ji, Binbin Gao, Xiaolong Liu, Yongming Zhu, “Investigation on the performance of a spark–ignited ethanol engine with DME enrichment”, *Energy Conversion and Management*, 58, ss. 19–25, 2012.
- [47] Chen Liang, Chanwei Ji, Binbin Gao, “Load characteristics of a spark–ignited ethanol engine with DME enrichment”, *Applied Energy*, 112, ss. 500–506, 2013.
- [48] Seokhwan Lee, Seungmook Oh, Young Choi, “Performance and emission characteristics of an SI engine operated with DME blended LPG fuel”, *Fuel*, 88, ss. 1009–1015, 2009.
- [49] Seokhwan Lee, Seungmook Oh, Young Choi, Kernyong Kang, “Effect of n–Butane and propane on performance and emission characteristics of an SI engine operated with DME–blended LPG fuel”, *Fuel*, 90, ss. 1674–1680, 2011.
- [50] Riesta Anggarani, Maymuchar, Cahyo S. Wibowo, Reza Sukaraharja, “Performance and emission characteristics of dimethyl ether (DME) mixed liquefied gas for vehicle (LGV) as alternative fuel for spark ignition engine”, *Energy Procedia*, 65, ss. 274–281, 2015.