

ATIK KIZARTMA YAĞINDAN ELDE EDİLEN METİL ESTERİN ÖN YANMA ODALI BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMININ PERFORMANS VE EMİSYONLARA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ahmet Necati ÖZSEZEN ve Mustafa ÇANAKÇI

Otomotiv ABD, Teknik Eğitim Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, 41380, Umuttepe, İzmit
Alternatif Yakıtlar Araştırma-Geliştirme ve Uygulama Birimi, Kocaeli Üniversitesi, 41040, İzmit
nozsezen@kocaeli.edu.tr, canakci@kocaeli.edu.tr

(Geliş/Received: 01.03.2007; Kabul/Accepted: 14.04.2008)

ÖZET

Bu çalışmada, palmiye yağı kökenli atık kızartma yağından elde edilen metil ester, dört silindirli, doğal emişli, ön yanma odalı bir dizel motorda alternatif dizel yakıtı olarak kullanılmıştır. Elde edilen motor test sonuçları, petrol kökenli dizel yakıt (PKDY) ile yapılan ölçümler referans alınarak karşılaştırılmıştır. Motor performansı ve egzoz emisyon seviyelerini belirlemek amacıyla, motor tam yük-değişik devir testlerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda, metil ester kullanımı ile motorun döndürme momenti, efektif gücü petrol kökenli dizel yakıtına kıyasla azalma gösterirken, özgül yakıt tüketiminde ise hafif bir artış olmuştur. Deneylerde, her bir yakıt için karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂), yanmamış hidrokarbon (HC), azot oksit (NO_x) ve duman koyuluğu değerleri ölçülmüştür. Emisyon testleri, metil esterin HC, CO ve duman koyuluğu emisyonlarında petrol kökenli dizel yakıtına kıyasla önemli azalmalar sağladığını göstermiştir. Fakat, metil ester kullanımı ile NO_x emisyonu PKDY'ya kıyasla artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık kızartma yağı, metil ester, ön yanma odalı dizel motor, performans, egzoz emisyonları.

AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF METHYL ESTER PRODUCED FROM WASTE FRYING OIL ON THE PERFORMANCE AND EMISSIONS OF AN IDI DIESEL ENGINE

ABSTRACT

In this study, methyl ester produced from waste frying oil based palm-oil was used as an alternative diesel fuel in a four-cylinder, naturally aspirated, indirect injection (IDI) diesel engine. Obtained engine test results were compared with reference values which were determined by using petroleum-based diesel fuel (PBDf). In order to determine the engine performance and emission levels, the engine was exposed with full load-varied speed tests. The test results showed that when methyl ester was used, the brake specific fuel consumption increased slightly, while the brake torque and power decreased by comparing to petroleum-based diesel fuel. In the experiments, carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), unburned hydrocarbon (HC), nitrogen oxides (NO_x) and smoke opacity values has been measured for each fuel. Emission results showed that the methyl ester has provided significant reduction in HC, CO and smoke opacity emissions. But, by using the methyl ester, the NO_x emissions have increased compared to PBDf.

Keywords: Waste frying oil, methyl ester, IDI diesel engine, performance, exhaust emissions.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dizel motorların endüstride ve taşıtlarda kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bununla birlikte, petrol türevleri kullanılan dizel motorlar çevre kirliliğine ve

küresel ısınmaya neden olmaktadır. Avrupa Birliği komisyonu dizel motorlu taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını sınırlamak için bazı direktifler (Euro 4/5 için 2005/55/EC vb. gibi) yayınlamıştır. Araştırmacılar bu direktifleri karşılayabilmek için

yüksek performanslı düşük emisyonlu dizel motorlar geliştirmeye yönelmiştir. Günümüzde taşıt üreticileri, yüksek basınçlı yakıt püskürtme sistemleri, kademeli püskürtme, üç yollu katalitik konvertör, egzoz gazı geri dönüşümü, partikül filtreleri, dizel motor yönetimi tarafından püskürtme başlangıcının kontrolü gibi sistemlerden yararlanarak dizel motorlu taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını kabul edilebilir sınırlar içerisine çekmeye çalışmaktadır [1]. Bununla birlikte, NO_x ve partikül emisyonu standardını karşılamak için kullanılan ek sistemler başka çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir. Dizel motorların emisyon problemini çözmek için bir yaklaşım oksijenli yakıtların kullanılmasıdır. Ayrıca oksijenli yakıtların genelde petrol kökenli kaynaklardan üretilmemesi (biyokütle, biyoyakıt vb. gibi) bu yakıtlara stratejik ve ekonomik bir önem kazandırmaktadır.

Biyodizel, çeşitli bitkisel ve hayvansal yağlardan üretilen alternatif bir dizel yakıttır. Biyodizelin özellikleri kullanılan yağ kaynağına ve üretiminde kullanılan alkol tipine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu durum her biyodizel için farklı tutuşma, yanma ve emisyon değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Genel olarak, biyodizelin moleküler yapısı petrol kökenli dizel yakıtına (PKDY) benzemektedir, sadece bir veya daha fazla oksijen atomu hidrokarbon zincirine bağlanmaktadır [2–4]. Biyodizelin oksijen içeriği sayesinde HC, CO ve is emisyonlarında önemli azalmalar sağlanmaktadır. Özellikle PKDY'nin aromatik bileşikler ve kükürt içermesi is ve partikül emisyonlarının oluşmasına neden olmaktadır. Birçok araştırmacı [5–9] 2 numaralı dizel yakıtına eklenen aromatiklerin yüzdesi ile orantılı olarak partikül ve is (duman koyuluğu) emisyonlarında artış gözlemlemiştir. Biyodizelin hemen hemen hiç aromatik ve sülfür bileşiği içermemesi poliaromatik hidrokarbon (PAH) ve is emisyonlarında önemli azalmalar sağlamaktadır. Genel olarak biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile motor performansında hafif bir düşme olduğu, HC, CO ve is emisyonlarında önemli azalmalar sağlandığı, bununla birlikte NO_x emisyonlarında %5–20 oranında bir artış olduğu belirtilmektedir [10–24]. Bazı çalışmalarda ise biyodizel kullanımı ile NO_x emisyonunda bir değişim olmadığı veya 2 numaralı dizel yakıtına göre daha düşük olduğu rapor edilmiştir. McDonald ve ark. [25] %50 biyodizel - %50 motorin (B50) karışımını bir ön yanma odalı dizel motorda (General Motor L65 GMT 600) test etmişlerdir. Araştırmacılar B50 kullanımı ile özgül yakıt tüketiminin 2 numaralı dizele göre %7 arttığını, motor gücünün %4 azaldığını ifade etmiştir. Emisyon testlerin sonucunda ise PAH emisyonlarında %35, is emisyonlarında %23 azalmanın olduğunu, NO_x emisyonlarında herhangi bir değişime rastlamadıklarını belirtmişlerdir. McDonald ve arkadaşlarının elde ettiği emisyon değerlerinin bir benzerini, Purcell ve ark. [25] ön yanma odalı bir dizel motorda soya yağı metil esterini kısa süreli test ettiklerinde görmüşlerdir. Bu çalışmada soya yağı metil esterini, 2 numaralı dizel

yakıtına göre %9 güç kaybı, özgül yakıt tüketiminde %13 artış göstermiştir. McDonald ve ark. [27] bir ön yanma odalı dizel motorda (Caterpillar 3304 PCNA) %100 soya metil esterini ve %30 soya metil esterini - %70 2 numaralı dizel yakıt (B30) karışımını incelemiştir. McDonald ve ark. B30 için NO_x emisyonlarında herhangi bir değişim olmadığını, %100 soya metil esterini kullanıldığında ise NO_x emisyonlarında azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Peterson ve ark. [28] Cummins marka 5,9 litrelik motor hacmine sahip hafif tip bir dizel hizmet aracını 160 kilometrelik yol testine tabi tutmuşlardır. Emisyon test sonucunda, NO_x emisyonlarında %11,8 oranında azalma, partikül emisyonlarında ise %10,3 artış tespit etmişlerdir.

Bazı araştırmacılar da biyodizel kullanımı ile NO_x emisyonundaki artışa sebep olarak, biyodizelin yakıt özelliklerini göstermişlerdir. Signer ve ark. [29] yakıtın yoğunluğundaki %3,5'lük artışın NO_x emisyonunda %3–4 oranında artışa sebep olduğunu ifade etmiştir. Peterson ve ark. [29] biyodizelin yapısındaki çift bağlı yağ asitleri ile ilişki olarak NO_x emisyonlarında değişim gözlemlemiştir. Peterson ve ark. iyot sayısını 7,88 den 129,5 çıkardıklarında NO_x emisyonlarında %29,3 artış tespit etmişlerdir. McCormick ve ark. [31] yaptıkları çalışmada Peterson ve arkadaşlarını destekleyecek nitelikte bulgular görmüşlerdir.

Dizel motorlarda egzoz emisyonları motor tipinin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Ön yanma odalı dizel motorlarda yakıt, ana yanma odası ile irtibatlandırılmış küçük bir odacığa püskürtülmektedir. Ön yanma odalı dizel motorlar, direkt püskürtmeli (DP) dizel motorlar ile karşılaştırıldığında, yakıt kalitesine bağımlı olmayan motorlar olarak dikkat çekmektedir. Aynı zamanda ön yanma odalı dizel motorlar, karışım oluşumu bakımından DP motorlara nazaran daha homojen bir yapı sergilediğinden, egzoz emisyonlarında iyileşme sağlamaktadır. Ön yanma odalı dizel motorların diğer önemli özellikleri de, DP dizel motorlara nazaran daha düşük tutuşma gecikmesine sahip olması, yanma hızının yüksek olması ve kontrollü yanma safhasının daha uzun olmasıdır. Bu durum gürültü emisyonlarında azalma sağlarken, yüksek hızlı dizel motorların gelişmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, ana yanma odası ile ön yanma odası arasındaki bağlantı kanalında meydana gelen ısı transferi kayıplarından dolayı ön yanma odalı dizel motorlar, DP dizel motorlara oranla daha yüksek yakıt tüketimine sahiptir [32–36]. Ön yanma odalı dizel motorların yakıt kalitesine bağımlı olmaması, egzoz emisyon seviyesinin DP motorlara göre daha düşük olması gibi temel iki kriter dikkate alınarak, bu çalışmada ön yanma odalı dizel motor kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, atık palmiye yağından üretilen metil esterini ve PKDY'nin, ön yanma odalı dizel

Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan yakıtların özellikleri (The properties of fuels used in the experimental)

Özellikler	Birim	TS EN 14214		ABD ASTM D 6751	
		Alt-Üst Sınır	Alt-Üst Sınır	Metil Ester	PKDY
Yakıtın kapalı formülü	-	-	-	C _{18,08} H _{34,86} O ₂	C _{14,16} H _{25,21}
Ortalama molekül ağırlığı	g/mol	-	-	284,17	195,50
Alt ısı değeri	kJ/kg	-	-	38730	42930
Yoğunluk	kg/m ³ , 15°C	860–900	-	875	840,3
Kinematik viskozite	mm ² /s, 40°C	3,5–5,0	1,9–6,0	4,401	3,177
Parlama noktası	°C	120 min	130 min	70,6	61,5
Sülfatlanmış kül içeriği	% kütleli	0,02 maks	0,02 maks	0,0004	0,0015
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	(-10) - 0 (Yaz) (-10) - (-20) (Kış)	-	+10	-14
Karbon kalıntısı	% kütleli	0,30 maks	0,50 maks	0,0004	0,067
Setan sayısı	-	51 min	47 min	60,4	56,5
Partikül madde	mg/kg	24 maks	-	9,03	4,14
Bakır şerit korozyonu	3 saat, 50°C	No.1 maks	No.3 maks	No.1A	No.1A
Oksitlenme kararlılığı	Saat, 110°C	6,0 min	-	10,1	-
Asit değeri	mgKOH/g	0,50 maks	0,80 maks	0,15	-
İyot sayısı	-	120 maks	-	62	-
Serbest gliserol	% kütleli	0,02 maks	0,02 maks	0,01	-
Toplam gliserol	% kütleli	0,25 maks	0,24 maks	0,06	-
Ester içeriği	%	96,5 min	-	96,5	-
Fosfor içeriği	mg/kg	10 maks	10 maks	2,9	-
Destilasyon					
İlk kaynama noktası	°C	-	-	331	164,7
%90 elde edilen sıcaklık	°C	-	360 maks	348	351,1

motordaki performans ve emisyon karakterlerini aynı devir ve tam yük şartlarında karşılaştırmaktır.

2. YAKIT ÖZELLİKLERİ (FUEL PROPERTIES)

Metil ester üretimi Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yakıt Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan palmiye kökenli atık kızartma yağı, Kocaeli Uzay Gıda (Frito-Lay) Cips Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Atık bitkisel yağ fabrikadan alındıktan sonra filtrelenerek içerisinde bulunan yabancı içerikli maddeler temizlenmiştir. Büyük ölçekli transesterifikasyon reaksiyonuna geçmeden önce laboratuvar şartlarında küçük ölçekli üretim yapılarak ana reaksiyon için temel girdiler; katalizör miktarı, alkol molar oranı, reaksiyon sıcaklığı ve zamanı tespit edilmiştir. Daha sonra, büyük ölçekli (80L) proseste, 6:1 molar oranda metanol, %1 alkali katalizör (KOH) miktarı ile transesterifikasyon reaksiyonu gerçekleştirilmiştir. Katalizörün ve alkolün aşındırıcı etkisi göz önüne alınarak tüm donanım elemanları paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Reaksiyon 55-60°C de, 4 saat sürmüştür. Reaksiyon sonrasında ayrıştırılan ester, 1/3 oranında 55-60°C'deki distile edilmiş su ile dört kez yıkanmıştır. PKDY ise ticari bir firmadan satın alınmıştır. Metil ester ve PKDY'nın yakıt özellikleri TÜBİTAK-MAM Enerji Enstitüsü tarafından tespit edilmiştir. Tablo 1'de metil ester yakıtın özellikleri, Ülkemizde TS EN 14214 ve ABD'de ASTM D 6751

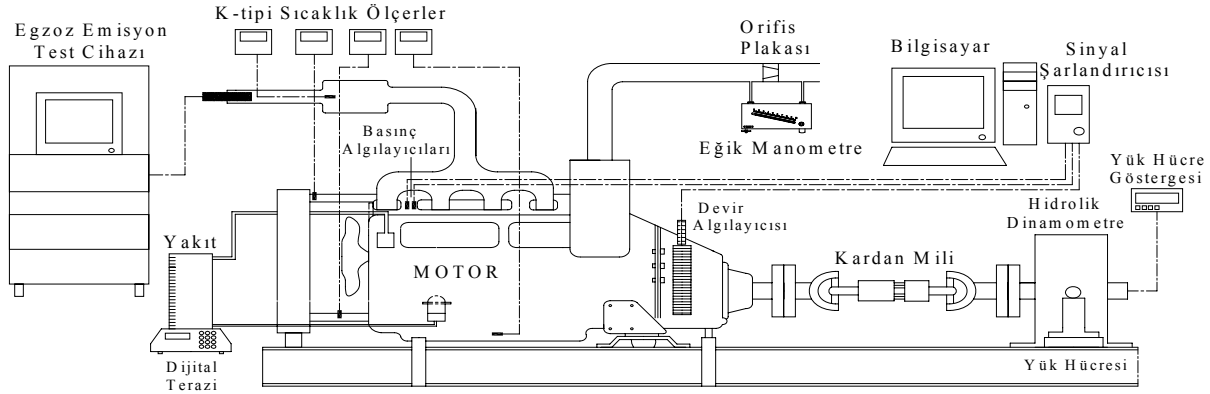
olarak geçerli olan biyodizel standart değerleri ve petrol kökenli dizel yakıtı özellikleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüldüğü gibi, metil ester yakıtı için tüm TS EN 14214 biyodizel testleri yapılmamıştır. Saptanan özellikler içinde parlama noktası standart değerden daha düşük olarak bulunmuştur. Bu durum ester ürünün rafinasyonunda metanolün iyi uzaklaştırılmadığını göstermektedir. Ayrıca, metil ester soğuk filtre tıkanma noktası da 10°C olarak bulunmuştur. Bu değer, ülkemizdeki kış koşullarında metil ester kullanılmayacağını göstermektedir.

3. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Deneyler BMC marka ön yanma odalı bir dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Test motorunun fabrika

Tablo 2. Test motorunun teknik özellikleri (Technical specifications of the test engine)

Motor	1,8 VD Dizel BMC
Yanma Odası Şekli	Ön Yanma Odalı
Tipi	4 zamanlı, su soğutmalı
Silindir Sayısı	4
Silindir Çap/Strok	80,26 / 88,9 mm
Sıkıştırma Oranı	21,47: 1
Püskürtme Pompası	Mekanik regülâtörlü, Distribütör pompa
Püskürtme basıncı	130 bar
Enjektör Delik Çapı	0,2 mm
Maksimum Güç	38,8 kW (4250 d/d)
Azami Moment	105,5 Nm (2400 d/d)



Şekil 1. Motor test düzeneğinin şematik görünüşü (Schematic diagram of the experimental setup)

tanımlı teknik özellikleri Tablo 2’de verilmektedir. Test sistemi hazırlanır iken tüm ölçüm cihazları kalibre edildikten sonra sisteme monte edilmiştir. Test sisteminde, motorun yüklenmesi için hidrolik dinamometre, yüklenme anındaki değerleri okuyabilmek için, 1 g hassasiyetinde, 0–200 kg aralığında ölçüm yapabilen, dijital göstergeli yük hücresi kullanılmıştır. Yakıt tüketimi, 1 g hassasiyetinde, 0–20 kg aralığında ölçüm yapabilen, dijital terazi ve süreölçer kullanılarak tespit edilmiştir.

Motor devri, manyetik devir algılayıcısı vasıtasıyla ölçülmüştür. Test sisteminde, hava tüketimini ölçmek için, emme manifold hattına ISO 5167 (1980) standardına uygun, orifis çapı 45 mm olan, flanşlı-keskin köşeli tip orifis plakası yerleştirilmiştir. Orifis plakasının giriş ve çıkış basınç farkını ölçmek için 0,1 mmH₂O hassasiyetinde, 0–70 mmH₂O çalışma aralığında ölçüm yapabilen eğik manometre kullanılmıştır. Test sisteminde tek hissedici girişli, NiCr-Ni elemanlı, 1°C hassasiyetli, 0–1200°C sıcaklık aralığında ölçüm yapabilen, K-tipi dijital göstergeli sıcaklık algılayıcıları (termokupul) kullanılarak yedi farklı noktadan sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Dijital sıcaklık algılayıcıları ile ölçülen sıcaklıklar; motor yağı, egzoz, yakıt, ortam, egzoz borusu yüzeyi, radyatör giriş ve çıkış sıcaklığıdır. Ayrıca, emisyon numunelerinin alındığı noktadaki egzoz akışkanlarının sıcaklığı, egzoz emisyon test cihazına bulunan dijital sıcaklık algılayıcısı ile ölçülmüştür. Bağıl nem ve ortam sıcaklığını ölçmek için bir higrometre cihazı kullanılmıştır. Ortam basıncını ölçmek için analog göstergeli barometre kullanılmıştır.

Egzoz emisyon ölçümlerinde CO, CO₂, HC ve hava fazlalık katsayısını ölçmek için infrared ölçüm sistemine sahip Bilsa marka MOD 500 model cihaz, NO_x değerlerini ölçmek için elektro-kimyasal ölçüm sistemine sahip Kane-May Quintox marka KM9006 model analiz cihazı ve duman koyuluğunu ölçmek için ise Bosch marka RTM 430 model opasimetre kullanılmıştır. Egzoz emisyon ölçüm hattında ısı kayıplarını ve yanmamış partiküllerin yüzeyde yoğunlaşmasını önlemek için egzoz hattı izole edilmiştir. Ayrıca, egzoz hattında biriken suyu almak için, hatta

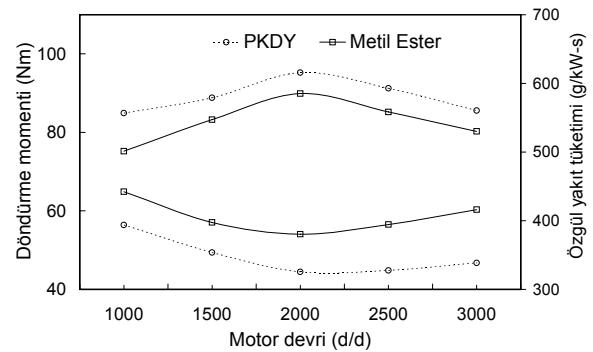
su toplayıcı hazne ilave edilmiştir. Şekil 1’de motor test düzeneğinin şematik görünüşü verilmektedir.

Hem PKDY hem de metil ester (B100) deneyleri için motorda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Tüm testler motor kararlı hale geldikten sonra gerçekleştirilmiştir. Motor çalışma sıcaklığına ulaştıktan sonra, B100 ve PKDY kullanılarak, 500 d/d aralıklar ile 1000 d/d’dan başlayarak 3000 d/d’ya kadar tam yükte, emisyon değerleri ölçülmüştür.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Döndürme momenti ve özgül yakıt tüketiminin karşılaştırılması (Comparison of the brake torque and specific fuel consumption)

Test motorunda metil ester kullanımı ile döndürme momentinde PKDY’ya kıyasla ortalama %7 kadar azalma olduğu tespit edilmiştir. Her iki yakıt içinde maksimum döndürme momenti 2000 d/d’da elde edilmiştir. Maksimum döndürme momenti metil ester için 89,91 Nm, PKDY için 95,23 Nm olarak ölçülmüştür. PKDY ve metil ester kullanımı sonucu döndürme momenti ve özgül yakıt tüketiminin motor devri ile değişimi Şekil 2’de gösterilmektedir.



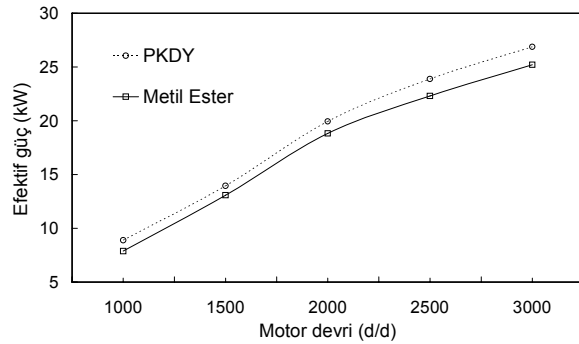
Şekil 2. Döndürme momenti ve özgül yakıt tüketiminin motor devri ile değişimi (The brake torque and specific fuel consumption versus engine speed)

Tüm devirlerde metil esterin özgül yakıt tüketiminin PKDY göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Ortalama olarak metil esterin özgül yakıt tüketimi, PKDY'ya oranla %16,76 daha fazla çıkmıştır. Metil esterin özgül yakıt tüketiminin yüksek olmasının temel nedeni metil esterin enerji içeriğinin PKDY göre daha az olmasıdır. Bu çalışmada kullanılan metil esterin ısı değeri PKDY'ya göre %9,78 daha düşüktür. Ayrıca, metil esterin yoğunluğunun PKDY göre daha yüksek olması hacimsel olarak püskürtülen yakıt miktarının kütsel olarak daha fazla çıkmasına neden olmuştur. Her iki yakıt içinde maksimum özgül yakıt tüketimi 1000 d/d'da metil ester için 442,24 g/kW-saat, PKDY için 393,81 g/kW-saat olarak ölçülmüştür. Motor gücü, hız ile doğru orantılı olarak arttığı için, motor devrinin 1000 d/d olduğu durumda birim güç başına tüketilen yakıt miktarı diğer devirlerle göre daha fazla çıkmıştır. Ayrıca, düşük motor hızlarında döngüsel hava hareketlerinin yavaş olması, metil esterin PKDY'ya göre daha yüksek kaynama noktasına sahip olması, atomizasyon oranının düşük olması, motorun hareketli parçalarındaki atalet ve sürtünme kuvvetlerinin fazla olması özgül yakıt tüketiminin artışıdaki diğer etkenlerdir.

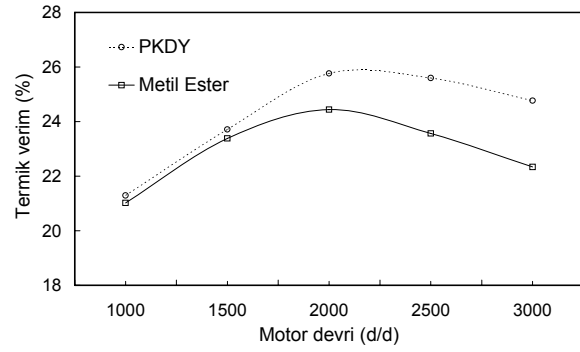
Efektif motor gücünün ve termik verimin karşılaştırılması (Comparison of the effective engine power and thermal efficiency)

Her iki yakıt için maksimum efektif motor gücü 3000 d/d'da, metil ester için 25,21 kW, PKDY için 26,88 kW olarak hesaplanmıştır. Ortalama olarak metil ester kullanımı ile efektif motor gücünde, PKDY kıyasla %7 kadar bir azalma olmuştur. Şekil 3'de PKDY ve metil ester kullanımı ile efektif gücün motor devri ile değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3. Efektif gücün motor devri ile değişimi (Effective power versus engine speed)

Bir dizel motorda termik verim, püskürtülen yakıtın kimyasal enerjisinin ne oranda yararlı işe dönüştüğünü göstermesi açısından önemli bir parametredir [37]. Termik verim, efektif gücün motora sürülen enerji miktarına bölünmesi ile hesaplanmıştır. Şekil 4'de PKDY ve metil ester kullanımı ile termik verimin motor devri ile değişimi gösterilmektedir.

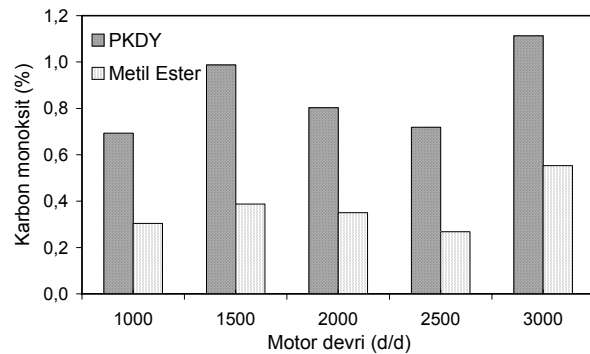


Şekil 4. Termik verimin motor devri ile değişimi (The thermal efficiency versus engine speed)

Her iki yakıt içinde maksimum termik verim, özgül yakıt tüketiminin minimum olduğu 2000 d/d'da elde edilmiştir. 2000 d/d'da termik verim, metil ester için %24,44, PKDY için %25,76 olarak hesaplanmıştır. Ortalama olarak metil ester kullanımı ile termik verimde, PKDY göre %1,28 oranında azalma göstermiştir. Tam yük şartlarında metil ester kullanımı ile termik verimdeki azalmanın nedeni, efektif iş azalması, özgül yakıt tüketiminin artması ve metil esterin enerji içeriğinin PKDY'ya göre daha az olmasıdır. Literatürde konu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, metil esterin ısı değerinin dizel yakıtla kıyasla düşük olmasının özgül yakıt tüketimini artırdığı, motor momenti ve gücünde ise azalmalara sebep olduğu vurgulanmaktadır [10-14, 25, 27], dolayısıyla elde edilen sonuçları teyit etmektedir.

CO Emisyonlarının Karşılaştırılması (Comparison of the CO emissions)

Yanma ürünleri arasında CO emisyonunun bulunmasının ana nedeni hava-yakıt oranının düşük olmasıdır [35]. Yakıt özellikleri, püskürtme karakteristikleri, motor yükü, hava-yakıt oranını önemli derecede etkilediğinden, CO oluşumu bu parametrelerin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. CO emisyonu motorda kullanılmayan kayıp kimyasal enerjiyi ifade ettiği için önemli bir parametredir [38, 39]. Şekil 5'de PKDY ve metil esterin CO emisyonu üzerine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 5. PKDY ve Metil Esterin CO emisyonu üzerine etkisi (The effect of PBDF and Methyl Ester on the CO emission)

Tüm devirlerde metil ester kullanımıyla elde edilen CO emisyonu, PKDY kullanımına göre azalma göstermiştir. Bu durum, metil esterin özgül yakıt tüketiminin PKDY'ya oranla daha yüksek olmasına rağmen gerçekleşmiştir. Metil esterin özgül yakıt tüketiminin fazla olması, aynı devir ve atmosfer şartlarında gerçekleştirilen testlerde, metil esterin hava-yakıt oranının PKDY kıyasla daha düşük çıkmasına neden olmuştur. Ester ve karışımlarının kullanımı ile CO emisyonlarında önemli azalmalar sağlandığı literatürde de belirtilmektedir [16, 18, 22]. Tablo 3'de test sonuçlarının elde edildiği hava-yakıt oranları gösterilmektedir.

Tablo3. Test şartlarındaki hava-yakıt oranları (Air-fuel ratios in the test conditions)

	1000	1500	2000	2500	3000
PKDY	15,31	14,17	15,31	15,18	14,65
Metil Ester	15,99	13,45	14,06	13,62	12,82

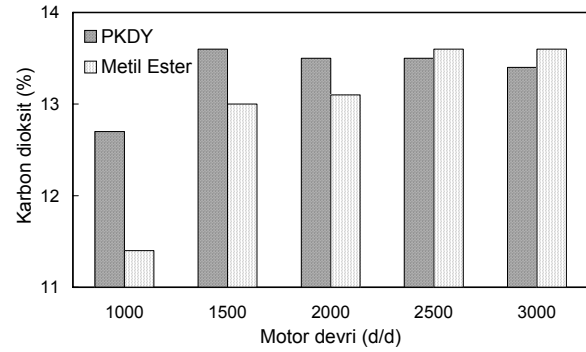
CO emisyonundaki azalma, metil ester kullanımı ile hava-yakıt oranının geliştiğini göstermektedir. Metil ester kullanılması ile hava-yakıt oranının gelişmesinin nedeni metil esterin içeriğindeki oksijendir. Metil ester kullanılan testlerde 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d'da sırasıyla %56,1, %60,8, %56,4, %62,7 ve %50,3 PKDY'ya oranla CO emisyonunda azalma gözlemlenmiştir. Her iki yakıt için de maksimum CO emisyonu 3000 d/d'da ölçülmüştür. 1500 ve 3000 d/d'da PKDY ile yapılan testlerde hava-yakıt oranı diğer devirlerdeki hava-yakıt oranlarına nazaran daha düşük seviyede olduğundan bu devirlerde CO oranında bir artış ortaya çıkmıştır. Ayrıca, motor devri yükseldikçe volumetrik verim azalması, silindir içerisinde artık egzoz gazı yüzdesi artması 3000 d/d'da CO oluşumunun artmasına neden olmuştur.

CO₂ emisyonlarının karşılaştırılması (Comparison of the CO₂ emissions)

Egzoz ürünleri arasında bulunan CO₂ tam yanmayı ifade ettiğinden önemli bir parametredir. Bugün dünyanın en önemli çevre sorunu olan küresel ısınmada temel etkenlerden biri, artan CO₂ emisyonunun atmosferde sera etkisi göstermesidir. Bazı araştırmacılar, metil ester kullanımı ile atmosfere salınan CO₂ emisyonunun fotosentez çevrimine katıldığını düşünmektedir [40]. Şekil 6'da PKDY ve metil esterin CO₂ emisyonu üzerine etkisi gösterilmektedir.

Metil ester kullanımı ile 1000, 1500 ve 2000 d/d'da sırasıyla %10,2, %4,4 ve %3 azalma görülürken, 2500 ve 3000 d/d'da ise sırasıyla %0,7 ve %1,5 artış olmuştur. Metil esterin PKDY'ya göre viskozitesinin ve yoğunluğunun daha yüksek olması, özellikle düşük motor devirlerinde atomizasyon oranını etkilemektedir. Motor devri yükseldikçe atomizasyon oranının artması, metil esterin PKDY kıyasla daha fazla CO₂ emisyonu üretmesine neden olmuştur. Ayrıca, yakıtların hidrojen/karbon oranları CO₂ oluşumunu etkile-

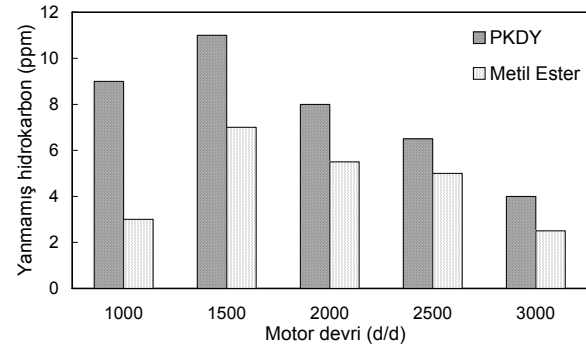
mektedir. Literatürde, Peterson ve Hustrulid [40] bu konuyu ayrıntılı olarak açıklamaktadır.



Şekil 6. PKDY ve Metil Esterin CO₂ emisyonu üzerine etkisi (The effect of PBDF and Methyl Ester on the CO₂ emission)

Yanmamış HC emisyonlarının karşılaştırılması (Comparison of the unburned HC emissions)

Yanma ürünleri arasında yanmamış HC'ların bulunmasının nedeni, yakıtın tutuşma sıcaklığına gelmemesi veya ortamda oksijenin yetersiz olmasından dolayı yakıtın okside olamaması veya yarı oksitlenmesidir [36]. Şekil 7'de PKDY ve metil esterin yanmamış HC emisyonu üzerine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 7. PKDY ve Metil Esterin yanmamış HC emisyonu üzerine etkisi (The effect of PBDF and Methyl Ester on the unburned HC emission)

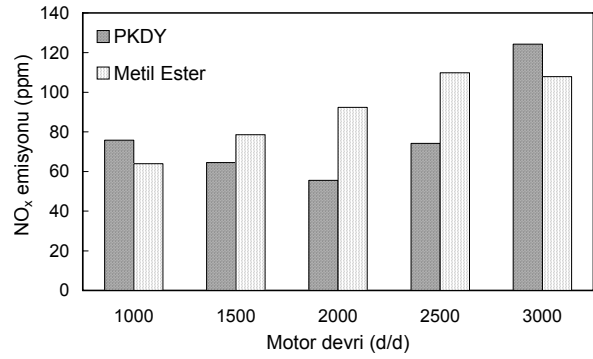
Tüm devirlerde metil ester kullanımıyla elde edilen HC emisyonu PKDY göre daha düşük seviyededir. PKDY'ya kıyasla metil ester kullanımı ile HC emisyonunda, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d'da sırasıyla %66,7, %36,4, %31,3, %23,1 ve %37,5 azalma sağlanmıştır. HC emisyonlarında meydana gelen azalmaları destekleyen sonuçlar diğer araştırmacılar [8, 15, 17, 21] tarafından da tespit edilmiştir. Metil ester kullanımı ile HC emisyonlarında azalmanın temel nedeni, metil esterin içeriğinde bulunan oksijenin zengin yakıt-hava karışım bölgelerinde yeterli oksitlenmeyi sağlamasıdır. Her iki yakıt için de düşük hızlarda maksimum HC emisyonunun elde edilmesinin temel nedeni bu devirlerde özgül yakıt tüketiminin yüksek

olmasıdır. Ayrıca, testlerde kullanılan dizel motorun mekanik kontrollü yüksek basınç pompasına sahip olması motor devrine bağlı olarak atomizasyon oranının değişmesine neden olmuştur. Mekanik kontrollü pompalarda, düşük devirlerde atomizasyon oranı daha az olduğundan, bu hızlarda ortalama yakıt çapında bir artış meydana gelmektedir. Bu durum daha yüksek HC emisyonlarının oluşmasına neden olmaktadır. Artan motor hızı ile birlikte her iki yakıt içinde HC emisyonunda bir azalma olmuştur. Bilindiği üzere dizel motorlar hava fazlalığı ile çalışmaktadır. Ayrıca, motor devri arttıkça silindir basınç ve sıcaklığı da artmaktadır. Bu iki temel etken yüksek devirlerde gidildikçe yakıt bileşimindeki HC'ların tam veya kısmi oksitlenmesini artırdığından, devir arttıkça HC emisyonlarında bir azalma meydana gelmiştir. Aynı zamanda, devir artışı ile hava hareketleri (türbülans) arttığından yanmamış HC emisyonunda azalma olmaktadır. Dizel motorlarda yanma odasının tipi ve şekli emisyon miktarını önemli derecede etkilemektedir. Ön yanma odalı dizel motorlar, DP dizel motorlara nazaran daha az yanmamış HC emisyonu üretmektedir [36]. Yapılan bu çalışmada görülmüştür ki, hem PKDY hem de metil ester kullanımı sırasında üretilen yanmamış HC emisyonu oldukça düşük seviyededir. Bu durum literatürü destekleyecek niteliktedir. Ayrıca test edilen dizel motorun sıkıştırma oranının yüksek olması (bkz. Tablo 2), egzoz sıcaklıklarının 500–650°C arasında olmasına neden olmuştur. Sıcak ortamdaki yanmamış hidrokarbonların egzoz çıkışına doğru oksidasyona uğradığı da düşünülebilir.

NO_x emisyonlarının karşılaştırılması (Comparison of the NO_x emissions)

Yanma sonucu ulaşılan yüksek sıcaklıklarda, havanın içerisindeki azotun oksijen ile reaksiyona girmesi sonucu azot oksitler meydana gelmektedir. Nemin NO_x emisyonlarını azaltıcı yönde bir etkisi olduğu bilinmektedir [34, 38]. Bu yüzden, yapılan deneysel çalışmalarda havanın sıcaklığı, bağıl nemi ve atmosfer basıncı her bir test için ölçülmüştür. Ölçüm değerleri kullanılarak SAE (Society of Automotive Engineers) tarafından tanımlanmış [41] nem düzeltme faktörü hesaplanmış ve gerçek NO_x değerleri bulunmuştur. Şekil 8'de düzeltme faktörü ile çarpılarak elde edilen PKDY ve metil esterinin NO_x emisyon değerleri gösterilmektedir. Literatür incelendiğinde genel olarak metil ester üzerine yapılan çalışmalarda NO_x emisyonlarının arttığı gözlenmektedir [10-16, 29, 31]. Bununla birlikte, bazı çalışmalarda ise bu emisyon miktarında değişim olmadığı veya azalmalar olduğu tespit edilmiştir [25, 27, 28]. Bu noktada motor test şartlarının (motor devri ve yükü gibi) önemi ortaya çıkmaktadır.

Yapılan bu çalışmada motor devri ve yükü değiştikçe NO_x emisyonunda farklı bir grafik ortaya çıkmıştır. Metil ester kullanımı ile elde edilen HC ve CO emisyonu PKDY'ye göre her devirde azalma gösterirken, NO_x



Şekil 8. PKDY ve Metil Esterin NO_x emisyonu üzerine etkisi (The effect of PBDF and Methyl Ester on the NO_x emission)

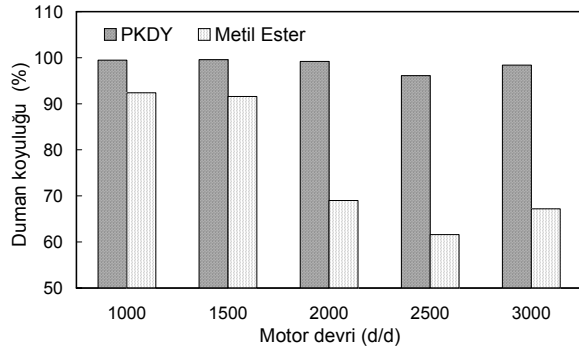
emisyon değerleri her devir için farklı bir yapı sergilemiştir. Dizel motorlarda karışım oluşumu heterojen olduğundan, stokiometrik şartlara yakın bölgelerde maksimum NO_x seviyesi oluşmaktadır [34]. Metil esterinin özgül yakıt tüketiminin PKDY'ye göre daha yüksek olması ve içeriğindeki oksijenin yakıtça zengin bölgelerde gerekli oksijeni sağlaması, tam yanma (stokiometrik) bölgelerinin sayısını artırmaktadır. Böylece, yüksek ortam sıcaklığının elde edildiği bölge sayısı arttığından, daha yüksek miktarda azot oksit oluşumu gerçekleşebilmektedir. Her iki yakıt içinde özgül yakıt tüketiminin en asgari olduğu 1500, 2000, 2500 d/d'da, metil esterinin PKDY'ye göre buharlaşma sıcaklığının daha yüksek, buharlaşma eğrisinin daha yatay olması ve içeriğinde oksijen bulundurulması, metil esterinin NO_x oluşumu üzerine etkisini daha çok hissettirmiştir. Metil ester kullanımı ile PKDY'ye kıyasla 1000 ve 3000 d/d'da sırasıyla %15,7 ve %13,2 azalma görülürken, 1500, 2000 ve 2500 d/d'da ise sırasıyla %21,7, %66,3 ve %47,9 artış olmuştur. Bu çalışmada, PKDY kullanılan 3000 d/d'lık tam yük testi stokiometrik orana en yakın şartlarda gerçekleşmiştir. Bu durum egzoz sıcaklığının 656°C çıkmasına neden olduğundan termal NO_x oluşumu maksimum seviyeye çıkmıştır.

Duman koyuluğunun karşılaştırılması (Comparison of the smoke opacity)

Oksijenin yetersiz olduğu yanma bölgelerinde uzun zincirli HC moleküllerin termal olarak kırılması sonucu partikül ve is (duman koyuluğu) emisyonları oluşmaktadır [42]. Metil esterinin moleküler yapısında oksijen içermesi duman koyuluğunu etkileyen önemli bir parametredir. Testlerde metil ester kullanımı ile PKDY oranla 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d'da sırasıyla %7,1, %8, %30,4, %35,9 ve %31,7 azalma görülmüştür. Şekil 9'da PKDY ve metil esterinin duman koyuluğu üzerine etkisi gösterilmektedir.

Daha önce de ifade edildiği gibi motor devri arttıkça yanma odasındaki akışkan hareketleri arttığından daha fazla yakıt hava ile reaksiyona girebilmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak her iki yakıt da

2500d/d'da minimum duman koyuluğu göstermiştir. 1000 ve 1500 d/d'da metil esterin özgül yakıt tüketiminin yüksek ve silindir içi hava hareketlerinin düşük olması, bu devirlerde metil ester için duman koyuluğunun yüksek çıkmasına neden olmuştur. Ayrıca, metil esterin PKDY'ya göre viskozitesinin yüksek olması püskürtme (atomizasyon) yüzdesini etkilediğinden, düşük devirlerde metil ester için duman koyuluğunun yüksek çıkmasına neden olan diğer önemli bir faktördür. PKDY kullanımı ile duman koyuluğunun yüksek çıkmasının ana nedeni olarak da, yakıtın içeriğindeki aromatik bileşikler gösterilebilir. Metil esterin yok denecek kadar az aromatik ve sülfür içermesi is emisyonlarında önemli azalmalar sağlamaktadır. Literatürde [5-9, 10-24] genel eğilim, oksijenli yakıtların is ve partikül emisyonlarını azalttığı yönündedir. Bu nedenle, bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürde yer alan çalışmalar tarafından da desteklendiği sonucuna varılabilir.



Şekil 9. PKDY ve Metil Esterin duman koyuluğu üzerine etkisi (The effect of PBDF and Methyl Ester on the smoke opacity)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Metil ester veya metil ester-PKDY karışımlarının dizel motorlu taşıtlarda kullanılması, hem çevre kirliliği hem de alternatif enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi açısından önemli bir konudur. Yapılan bu çalışmada, atık palmiye yağında üretilen metil ester ve PKDY, ön yanma odalı dizel motorda aynı devir ve tam yük şartlarında test edilmiştir. Tam yük testlerinin sonucunda, metil ester kullanımı ile PKDY'ya göre ortalama olarak motorun döndürme momentinde ve efektif motor gücünde %7 kadar, termik veriminde %1,28 azalma görülmüştür. Metil ester kullanımı ile özgül yakıt tüketiminde ise PKDY göre ortalama %16,76 oranında artış olmuştur. Metil esterin enerji içeriğinin PKDY göre daha düşük, yoğunluğunun ise daha yüksek olmasından dolayı, bu performans değerleri elde edilmiştir. Tüm devirlerde metil ester kullanımıyla elde edilen CO, HC ve duman koyuluğunda azalma olurken, NO_x ve CO₂ emisyonu motor devrine bağlı olarak değişim göstermiştir. Metil ester kullanımı ile HC, CO ve duman koyuluğu emisyonlarında azalmanın temel nedeni, metil esterin içeriğinde bulunan oksijenin, silindir içerisindeki

zengin yakıt-hava karışım bölgelerinde yeterli oksitlenmeyi sağlamasıdır. Bu durum, yanma bölgelerinin sayısını arttırdığından daha yüksek NO_x emisyonunun oluşmasına neden olduğu düşünülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yapılan bu çalışma, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından 2003/79 ve 2004/24 numaralı projelerle desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Çanakçı, M., Özsezen, A.N., "Dizel Motorları Yardımcı Ekipmanlarındaki Gelişmeler", **Mühendis ve Makina**, Cilt 45, Sayı 530, 37-42, 2004.
2. Knothe, G., Dunn, R.O., Bagby, M.O., "Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels, **In ACS Symp. Ser. 666** (Fuels and Chemicals from Biomass), American Chemical Society, Washington DC, 172-208, 1997.
3. Canakci, M., "Performance and Emissions Characteristics of Biodiesel from Soybean Oil", **Proc. IMechE Part D: Journal of Automobile Engineering**, Vol. 219, No.7, 915-922, 2005.
4. Çanakçı, M., Özsezen, A.N., "Atık Mutfak Yağlarının Alternatif Dizel Yakıtı Olarak Değerlendirilmesi", **G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi**, Cilt 18, No.1, 81-91, 2005.
5. Xiao, Z., Ladommatos, N. and Zhao, H., "The Effect of Aromatic Hydrocarbons and Oxygenates on Diesel Engine Emissions", **Proc. Instn. Mech. Eng., Part D**, Vol. 214, 307-332, 2000.
6. Asaumi, Y., Shintani, M., Watanabe, Y., "Effects of Fuel Properties on Diesel Engine Exhaust Emission Characteristics", **SAE Paper**, No.922214, 1992.
7. Betts, W.E., Floyssand, S.A., Kvinge, F., "The Influence of Diesel Fuel Properties on Particulate Emissions in European Cars", **SAE Paper**, No.922190, 1992.
8. Rosenthal, M.L., Bendinsky, T., "The Effects of Fuel Properties and Chemistry on the Emissions and Heat Release of Low-Emission Heavy Duty Diesel Engines", **SAE Paper**, No.932800, 1993.
9. Last, R.J., Krüger, M., Dürnholz, M., "Emissions and Performance Characteristics of a 4-Stroke, Direct Injected Diesel Engine Fueled with Blends of Biodiesel and Low Sulfur Diesel Fuel", **SAE Paper**, No.950054, 1995.
10. Canakci, M. and Van Gerpen, J.H., "Comparison of Engine Performance and Emissions for Petroleum Diesel Fuel, Yellow Grease Biodiesel, and Soybean Oil Biodiesel", **Transactions of the ASAE**, Vol.46, No.4, 937-944, 2003.
11. Haas, J.M., Scott, K.M., Alleman, T.L., McCormick R.L., "Engine Performance of Biodiesel Fuel Prepared from Soybean Soapstock:

- A High Quality Renewable Fuel Produced from a Waste Feedstocks”, **Energy and Fuels**, Vol.15, Issue 5, 1207-1212, 2001.
12. Graboski, M.S., Ross, J.D., McCormick, R.L., “Transient Emissions from No. 2 Diesel and Biodiesel Blends in a DDC Series 60 Engine”, **SAE Paper**, No.961166, 1996.
 13. Ziejewski, M., Goettler, H.J., Haines, H., Huang, C., “EMA Durability Tests on High Oleic Sunflower and Safflower Oils in Diesel Engines”, **SAE Paper**, No. 961846, 1996.
 14. Scholl, K.W., Sorenson, S.C., “Combustion of Soybean Oil Methyl Ester in a Direct Injection Diesel Engine”, **SAE Paper**, No.930934, 1993.
 15. Ulusoy, Y., Tekin, Y., Cetinkaya, M. and Karaosmanoğlu, F., “The Engine Tests of Biodiesel from Used Frying Oils”, **Energy Sources**, Vol.26, 927-932, 2004.
 16. Schumacher, L.G., Marshall, W., Krahl, J., Wetherell, W.B., Grabowski, M.S., “Biodiesel Emissions Data from Series 60 DDC Engines”, **Transactions of the ASAE**, Vol. 44, No.6, 1465–1468, 2001.
 17. Gomez Gonzales, M.E., Howard-Hildige, R., Leahy, J.J., O’Reilly, T.O., Supple, B., Malone, M., “Emission and Performance Characteristics of a 2 liter Toyota Van Operating on Esterified Waste Cooking Oil and Mineral Diesel Fuel”, **Environmental Monitoring and Assessment**, Vol. 65, 13–20, 2000.
 18. Dorado, M.P., Ballesteros, E., Arnal, J.M., Gomez, J., Gimenez Lopez, F.J., “Exhaust Emissions from a Diesel Engine Fueled with Transesterified Waste Olive Oil”, **Fuel**, Vol. 82, Issue 11, 1311–1315, 2003.
 19. Clark, N.N., Lyons, D.W., “Class 8 Truck Emissions Testing: Effects of Test Cycles and Data on Biodiesel Operation”, **Transactions of the ASAE**, Vol. 42, No.5, 1211-1220, 1999.
 20. Senatore, A., Cardone, M., Rocco, V., Prati, M.V., “A Comparative Analysis of Combustion Process in D.I. Diesel Engine Fueled with Biodiesel and Diesel Fuel”, **SAE Paper**, No.2000-01-0691, 2000.
 21. Schumacher, L., Borgelt, S.C., Hires, W.G., Wetherell, W., Nevils, A., “100,000 Miles of Fueling 5.9L Cummins Engines with 100% Biodiesel” **SAE Paper**, No.962233, 1996.
 22. Chang, Y.Z., Van Gerpen, J.H., Lee, I., Johnson, L.A., Hammond, E.G., Marley, S.J., “Fuel Properties and Emissions of Soybean Oil Esters as Diesel Fuel”, **J. Am. Oil Chem. Soc.** Vol. 73, No.11, 1549-1555, 1996.
 23. Sharp, C.A., Characterization of Biodiesel Exhaust Emissions for EPA 211(b), Report No.08-1039A, NBB, 1998.
 24. Sharp, C.A., Howell, S., Jobe, J., “The Effect of Biodiesel Fuels on Transient Emissions from Modern Diesel Engines-Part I: Regulated Emissions and Performance”, **SAE Paper**, No.2000-01-1967, 2000.
 25. McDonald, J.F., Evaluation of a Yellow Grease Methyl Ester and Petroleum Diesel Fuel Blend, Final Report to the Agricultural Utilization Research Institute, 1997.
 26. Purcell, D.L., McClure, B.T., McDonald, J., Basu, H.N., “Transient Testing of Soy Methyl Ester Fuels in an Indirect Injection Compression Ignition Engine”, **J. Am. Oil Chem. Soc.**, Vol. 73, No.3, 381-388, 1996.
 27. McDonald, J.F., Purcell, D.L. McClure, B.T., Kittelson, D.B., “Emissions Characteristics of Soy Methyl Ester Fuels in an IDI Compression Ignition Engine”, **SAE paper**, No.950400, 1995.
 28. Peterson, C.L., Reece, D.L., Thompson, J.C., Beck, S.M., Chase, C., “Ethyl Ester of Rapeseed Used as a Biodiesel Fuel - A Case Study”, **Biomass and Bioenergy**, Vol.10, Issues 5-6, 331-336, 1996.
 29. Graboski, M.S., McCormick, R.L., “Combustion of Fat and Vegetable Oil Derived Fuels in Diesel Engines”, **Prog. Eng. Comb. Sci.**, Vol.24, 125-164, 1998.
 30. Peterson, C.L., Taberski, J.S., Thompson, J.C., Chase, C.L., “The Effect of Biodiesel Feedstock on Regulated Emissions in Chassis Dynamometer Tests of a Pickup Truck” **Transactions of the ASAE**, Vol. 43, No.6, 1371-1381, 2000.
 31. R.L. McCormick, J.R. Alvarez, M.S. Graboski, “NO_x Solutions for Biodiesel”, Report No.NREL/SR-510-31465, National Renewable Energy Laboratory, 2003.
 32. Rakopoulos, C.D., Antonopoulos, K.A., Rakopoulos, D.C., Giakoumis, E.G., “Study of Combustion in a Divided Chamber Turbocharged Diesel Engine By Experimental Heat Release Analysis in its Chambers”, **Applied Thermal Engineering**, Vol.26, Issues 14-15, 1611-1620, 2006.
 33. Owen, K., Coley, T., **Automotive Fuels Reference Book**, Second Edition, SAE, USA, 1995.
 34. Heywood, J.B., **Internal Combustion Engine Fundamentals**, McGraw-Hill Int. Editions, New York, USA, 1988.
 35. Abdel-Rahman, A.A., “On the Emissions from Internal-Combustion Engines: A Review”, **Int. J. of Energy Res.**, Vol.22, 483-513, 1998.
 36. Challen, B., Baranescu, R., **Diesel Engine Reference Book, Second Edition**, Butterworth Heinemann, 1999.
 37. Pulkrabek, W.W., **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**, Prentice-Hall, New Jersey, 1997.
 38. Borman, G.L. and Ragland, K.W., **Combustion Engineering**, McGraw-Hill, New York, 1998.
 39. Monyem, A., Van Gerpen, J.H., “The Effect of Biodiesel Oxidation on Engine Performance and

- Emissions”, **Biomass and Bioenergy**, Vol.20, 317-325, 2001.
40. Peterson, C.L., Hustrulid, T., “Carbon Cycle for Rapeseed Oil Biodiesel Fuels” **Biomass and Bioenergy**, Vol.14 (2), 91-101, 1998.
41. Society of Automotive Engineers, **SAE Handbook**, Inc., Warrendale, MI, Vol.1, 1304 – 1306, 2001.
42. Schmidt, K., Van Gerpen, J., “The Effect of Biodiesel Fuel Composition on Diesel Combustion and Emissions”, **SAE Paper**, No.961086, 1996.