

ATIK PALMIYE VE KANOLA YAĞI METİL ESTERLERİNİN KULLANILDIĞI DİREKT PÜSKÜRTMELİ BİR DİZEL MOTORDA PERFORMANS VE YANMA

Ahmet Necati ÖZSEZEN ve Mustafa ÇANAKCI*

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: 20.10.2008 ; Kabul/Accepted: 02.12.2008)

ÖZET

Bu çalışmada, atık palmye metil esteri (APYME) ve kanola yağı metil esterinin (KYME) performans, yanma ve püskürtme karakteristikleri petrol kökenli dizel yakıtı (PKDY) referans alınarak incelenmiştir. Performans, yanma ve püskürtme karakteristiklerini belirlemek için, 6 silindirli, doğal emişli ve direkt püskürtmeli bir dizel motorda, 1000, 1500, 2000 d/d sabit motor hızlarında tam yük testleri gerçekleştirilmiştir. Test motorunda, APYME ve KYME kullanımı ile PKDY'ya göre motor gücünde ve ısı veriminde ortalama %2 oranında azalma meydana gelirken, özgül yakıt tüketiminde (ÖYT) ortalama %6 oranında artış olmuştur. Metil esterlerin ve PKDY'nin silindir gaz basıncı, ısı dağılımı ve yakıt hattı basınç grafikleri incelendiğinde, motorda meydana gelen mekanik yüklemeler açısından, yakıtların yanma grafiklerinin birbirlerine benzer olduğu görülmüştür. Bununla beraber, metil ester kullanımı ile PKDY'ya göre ön yanma safhasının daha erken başladığı, tutuşma gecikmesinin daha kısaldığı ve maksimum silindir gaz basıncı bölgesinin üst ölü noktaya (ÜÖN) biraz daha yaklaştığı belirlenmiştir. Ayrıca metil esterlerin kullanımı ile PKDY'ya göre yakıt sevk başlangıcının daha erken başladığı da tespit edilmiştir. Metil esterlerin kullanımı ile değişen püskürtme ve yanma karakterleri ve metil esterlerin yakıt özellikleri, hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve duman koyuluğu emisyonlarında azalma meydana getirirken, NO_x emisyonlarında ise kısmen artışa neden olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Atık palmye yağı, kanola yağı, metil ester, dizel motor, performans, yanma, püskürtme.

PERFORMANCE AND COMBUSTION IN A DIRECT INJECTION DIESEL ENGINE FUELLED WITH WASTE PALM AND CANOLA OIL METHYL ESTERS

ABSTRACT

In this study, the performance, combustion and injection characteristics of waste (frying) palm oil (WPOME) and canola oil (COME) methyl esters have been investigated, and compared to petroleum based diesel fuel (PBDF) as reference fuel. In order to determine the performance, combustion and injection characteristics, the experiments were carried out in a six-cylinder, naturally aspirated, direct injection diesel engine at 1000, 1500, 2000 rpm constant engine speeds under the full load condition. When the test engine was fueled with WPOME and COME, while the brake power and thermal efficiency reduced by 2%, the brake specific fuel consumption increased by 6% on average. When the cylinder gas pressure, heat release and fuel line pressure graphics of the methyl esters and PBDF are investigated, it will be seen that the combustion graphics of the fuels seem similar to each other with respect to mechanical loading. However, by using methyl ester, very little combustion differences took place such as earlier premixed combustion phase, shorter ignition delay and maximum cylinder gas pressure region closed to top dead center (TDC) compared to PBDF. In addition, when the test engine was fueled with methyl esters, the start of injection timing took place earlier than that of PBDF. The with usage of the methyl esters changes in the injection and combustion characteristics, and fuel properties of the methyl ester caused reductions in carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbon (HC) emissions and smoke opacity, but they caused to increases in nitrogen oxides (NO_x) emissions.

Keywords: Waste palm oil, canola oil, methyl ester, diesel engine, performance, combustion, injection.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dizel motorunun mucidi Alman mühendis Rudolf Diesel, icat ettiği motorda Afrika kökenli fıstık yağı kullanmasına karşın, dizel motor teknolojisinin gelişmesiyle birlikte daha ucuz ve enerji içeriği daha yüksek olan fosil kökenli yakıtlar dizel motorlarda daha yaygın hale gelmiştir. Bunun sonucu olarak da, içten yanmalı motorlarda fosil kökenli yakıtların kullanımı, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı üzerinde önemli bir üstünlük sağlamıştır. Son zamanlarda, Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü'nün (OPEC) petrol üretimini azaltması, petrol fiyatlarındaki artış ve çevresel problemler araştırmacıları alternatif yakıt arayışlarına sevk etmiştir. Alternatif yakıtlar içerisinde dizel motorlar için en büyük ilgiyi yağ asidi esterleri (biyodizel) ve etanol görmektedir. Biyodizelin dizel motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilmesi, uzun süreli performans testlerinde bir probleme rastlanmaması ve yöresel kaynaklara bağlı olması, biyodizelin öne çıkan olumlu özellikleridir. Ayrıca, biyodizelin egzoz emisyon standartlarını yakalamak için kullanılan katalitik konvertör ve partikül filtrelerine zarar vermemesi diğer bir önemli özelliğidir [1, 2].

Biyodizel, çeşitli bitkisel ve hayvansal yağlardan üretilen alternatif bir dizel yakıtıdır. Biyodizelin özellikleri kullanılan yağ kaynağına ve üretiminde kullanılan alkol tipine göre değişiklik gösterebilmektedir. Genel olarak, biyodizelin moleküler yapısı PKDY'ya benzemektedir, sadece bir veya daha fazla oksijen atomu hidrokarbon zincirine bağlanmaktadır [3-5]. Bununla beraber, biyodizellerin yakıt özellikleri arasındaki küçük farklar, farklı performans, yanma (silindir gaz basıncı, ısı dağılımı vb. gibi), püskürtme ve emisyon değerlerinin oluşmasına neden olabilmektedir [6]. Biyodizel üzerinde yapılan çalışmalarda genellikle, biyodizel PKDY benzer performans değerleri gösterirken, ÖYT'de artışa sebep olmaktadır [7-11]. Bazı çalışmalarda bunun tam tersi sonuçlar da elde edilmiştir [12, 13]. Ayrıca, bitkisel yağlar yerine esterlerinin, soğuk olmayan ortamlar haricinde uzun süreli testlerde, dizel motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilmesi, biyodizelin önemli bir alternatif dizel yakıtı olduğu göstermiştir.

Bu çalışmada, APYME ve KYME direkt püskürtmeli bir dizel motorda alternatif dizel yakıtı olarak kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, PKDY ile yapılan ölçümleri referans olarak metil ester kullanımı ile elde edilen performans, yanma ve püskürtme karakteristiklerini incelemektir. İnceleme sonucunda, metil esterlerin dizel motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilirliği, metil esterlerin PKDY'ya göre sağladığı avantajlar ve dezavantajlar yorumlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Atık palmiye yağından 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. Elde edilen esterden artık metanol ve nemin çıkarılması için atmosfer şartları altında yaklaşık 100°C'de kurutma işlemi yapılmıştır.

KYME ve PKDY ise ticari bir firmadan satın alınmıştır. APYME'nin yakıt özellikleri TÜBİTAK-MAM Enerji Enstitüsü tarafından tespit edilmiştir. KYME ve PKDY'nin yakıt özellikleri üretici firmadan temin edilmiştir. Tablo 1'de APYME, KYME ve PKDY'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmektedir.

Motor testleri Ford marka direkt püskürtmeli bir dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan test motorunun teknik özellikleri Tablo 2'de verilmektedir. Motor deney şartlarına hazırlanırken, fabrika değerleri dışında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Deneysel çalışma boyunca tüm datalar motor kararlı hale geldikten sonra toplanmıştır. Motor kararlılığını tespit etmek için egzoz sıcaklığındaki değişim gözlemlenmiştir. Motor çalışma sıcaklığına ulaştıktan sonra, APYME, KYME ve PKDY kullanılarak, 1000, 1500 ve 2000 d/d'da ve tam yükte, motor performans, yanma, püskürtme ve emisyon karakterleri belirlenmiştir.

Silindir gaz basıncı ve yakıt hattı basınç verileri 0,25° krank açısına (KA) karşılık gelen örnekleme oranında bilgisayara aktarılmıştır. Daha sonra aktarılan verilerden 50 çevrimin ortalaması alınmıştır. Egzoz, yakıt, ortam, radyatör giriş ve çıkış sıcaklığı, ortam basıncı, bağıl nem, emisyon değerleri motor kararlı rejime ulaştıktan sonra kaydedilmiştir. Şekil 1'de motor test düzeneğinin şematik görünüşü verilmektedir.

Tablo 1. Test yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri (Chemical and physical properties of the test fuels)

Özellik	Birim	Alt-Üst Sınır	TS EN 14214		
			APYME	KYME	PKDY
Yakıtın kapalı formülü			$C_{18,08}H_{34,86}O_2$	$C_{19}H_{35}O_2$	$C_{14,15}H_{25,26}$
Ortalama molekül ağırlığı	g/mol		284,17	295,5	194-206
Alt ısı değeri	MJ/kg		38,73	39	42-43
Yoğunluk	kg/m ³ , 15°C	860-900	875	883,2	820-860
Kinematik viskozite	mm ² /sn, 40°C	3,5-5	4,401	4,491	2-4,5
Parlama noktası	°C	120 min	70,6	176	>55
Sülfatlanmış kül içeriği	% kütleli	0,02 maks	0,0004	0,005	0,01
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	+5: -20	+10	-8	-15
Kükürt	mg/kg	10 maks	82	6	501-2000
Karbon kalıntısı	% kütleli	0,30 maks	0,0004	0,28	0,30
Setan sayısı		51 min	60,4		>46*
Oksitlenme kararlılığı	Saat, 110°C	6,0 min	10,1	12	<25
Asit değeri	mg KOH/g	0,50 maks	0,15	0,31	
Destilasyon					
İlk kaynama noktası	°C		331		160
%90 elde edilen sıcaklık	°C		348		360

*setan indisini ifade etmektedir.

Motorun yüklenmesi için NetFren marka hidrolik dinamometre kullanılmıştır. Silindir basıncını ölçmek için Kistler marka 6061B model su soğutmalı piezo kristalli basınç algılayıcısı, yakıt hattı basıncını ölçmek için Kistler marka 6005 model piezo kristalli basınç algılayıcısı test sistemine monte edilmiştir. Krank açısını belirlemek için kullanılan manyetik devir algılayıcısı ve basınç algılayıcılarından gelen sinyaller, Kistler marka 5064A1 model sinyal şartlandırıcı, Advantech PCI 1716 veri toplama kartı kullanılarak bilgisayara aktarılmıştır. Yakıt tüketimini tespit etmek için 1 gr hassasiyetli dijital terazi ve süreölçer kullanılmıştır. Hava tüketimini ölçmek için, emme manifoldu hattına ISO 5167 (1980) standardına uygun orifis çapı 45 mm olan, flanşlı-keskin köşeli tip

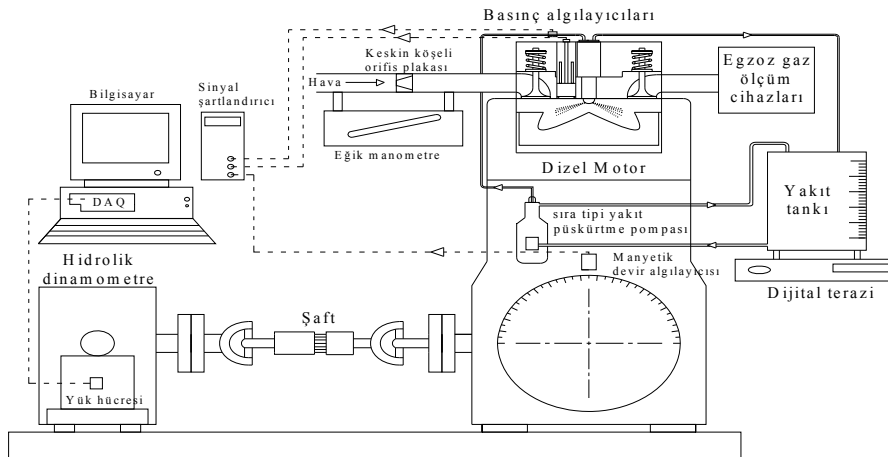
orifis plakası yerleştirilmiştir. Motor sıcaklıkları, tek hissedici girişli, NiCr-Ni elemanlı K tipi dijital göstergeli sıcaklık ölçerler kullanılarak belirlenmiştir. Dijital sıcaklık ölçer ile belirlenen sıcaklıklar; egzoz, yakıt, ortam, radyatör giriş ve çıkış sıcaklığıdır. Bağlı nem, ortam basıncı ve sıcaklığını ölçmek için dijital göstergeli bir cihaz kullanılmıştır. Egzoz emisyon ölçümlerinde kullanılan cihazlar ve deneysel belirsizlikler Tablo 3'de verilmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

3.1 Performans Değerlerinin Karşılaştırılması (Comparison of Performance Values):

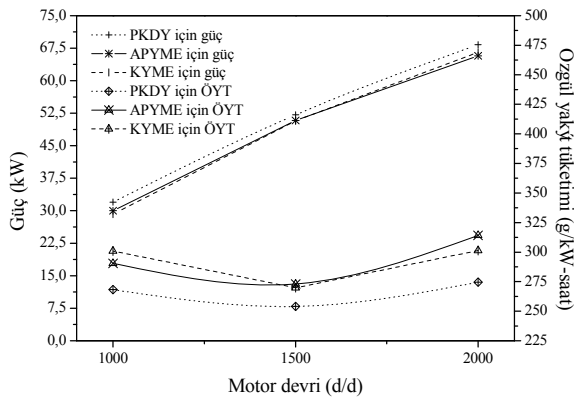
Tablo 2. Test motorunun teknik özellikleri (Technical specifications of the test engine)

Motor	6.0 LT Ford Cargo
Tipi	Direkt püskürtmeli, doğal emişli, 4 zamanlı, su soğutmalı
Silindir sayısı	6
Silindir çapı	104,8 mm
Piston kursu	114,9 mm
Sıkıştırma oranı	15,9: 1
Püskürtme pompası	Mekanik regülatörlü sıra tipi pompa
Püskürtme basıncı	197 bar
Enjektör delik çapı ve sayısı	0,3 mm, 4 delikli
Maksimum moment	335 Nm (1500 d/d)

**Şekil 1.** Motor test düzeneği (the experimental setup)

Tablo 3. Egzoz emisyon cihazları ve deneysel belirsizlikler (Exhaust emission instruments and experimental uncertainties)

Ölçüm ekipmanları ve teknolojileri	Emisyon	Hata	Belirsizlik
Kane-May Quintox KM9106 (Elektrokimyasal)	NO _x	±5ppm < 100ppm ±%5 > 100ppm	±%2,4
Bilsa MOD 500 (Infra-red)	CO	%0,001 (hacimsel)	±%2,1
	CO ₂	%0,01 (hacimsel)	±%2,1
	HC	1 ppm	±%1,6
Bosch RTM 430 (Bosch teknolojisi)	Duman koyuluğu	%0,1 koyuluk derecesi	±%1
<i>Ölçülen değerler</i>			
Yükleme miktarı		±%2 N	±%1,8
Motor devri		±10 d/d	±%2,4
Yakıt tüketimi (kütlesel)		±1gr	±%2,6
Hava tüketimi (hacimsel)		±%3 m ³	±%1,8
Bağıl nem		±%3 Rh	±%1,4
Sıcaklık		±1°C	±%2,1

**Şekil 2.** Güç ve ÖYT'nin karşılaştırılması (Comparison of brake power and specific fuel consumptions)

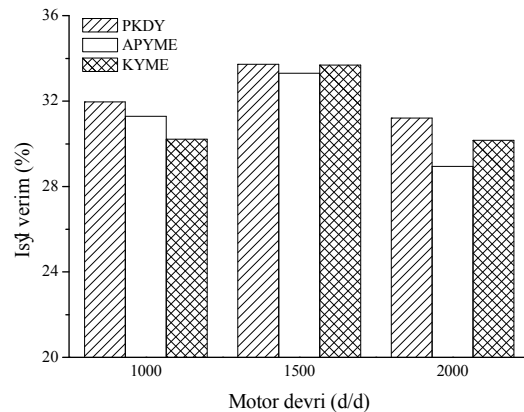
Bu çalışmada, performans parametreleri olarak motor gücü ve ÖYT seçilmiştir. Şekil 2'de tüm test yakıtları için tam yük ve değişik devirlerde motor gücü ve ÖYT'deki değişim gösterilmektedir.

Her iki metil esterinin kullanımı ile elde edilen motor gücü ve ÖYT'ndeki değişimler incelendiğinde, metil ester eğrilerinin birbirlerine çok benzer olduğu görülmektedir. Bu durum tüm motor hızları için elde edilen değerlerin ortalaması alındığında da ortaya çıkmaktadır. Test motorunda metil esterlerin kullanımı ile PKDY'a göre motor gücünde ortalama %2 azalma meydana gelirken, ÖYT'nde ise ortalama %6 artış olmuştur. Metil esterlerin kullanımı ile motor gücündeki azalmanın temel nedeni olarak metil esterlerin enerji içeriğinin PKDY'a göre %9,6 daha düşük olması gösterilebilir. Motor testleri tam yük şartlarında yapıldığından, metil ester kullanımı ile PKDY'a benzer motor gücü elde edebilmek için ÖYT'nde artış meydana gelmiştir. Ayrıca, metil esterlerin yoğunluğunun PKDY'a göre %4,6 daha yüksek olması, hacimsel olarak püskürtülen yakıt miktarının kütlesel olarak daha fazla çıkmasına neden olmuştur. Güç hızın bir fonksiyonu olduğundan tüm yakıtlar için 2000 d/d'da maksimum motor gücü elde edilmiştir. Tüm yakıtlar için minimum ÖYT maksimum motor momentinin elde edildiği 1500 d/d'daki test hızında bulunmuştur. Aslında motor testlerinde, rölantiye en yakın ve yüksek motor devirlerinde maksimum ÖYT elde edilmektedir. Bu çalışmada,

motorun pratikteki çalışma aralığı dikkate alındığından, rölanti ve maksimum motor devri bölgeleri grafikte görülmemekte, bu yüzden de tüm yakıtların ÖYT eğrisi yataya yakın seyretmektedir. Metil ester kullanımı ile ÖYT'nin yüksek çıkmasında diğer bir önemli faktör, testlerde kullanılan motorun mekanik kontrollü bir pompaya sahip olmasıdır. Metil esterlerin viskozitesinin, yoğunluğunun ve yüzey geriliminin PKDY'a oranla biraz daha yüksek olması, özellikle düşük motor hızlarında atomizasyon karakterlerini etkilemektedir. Lee ve ark., [14] yaptıkları bir çalışmada, biyodizelin atomizasyon kalitesinin PKDY'a göre daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Metil esterlerin kullanımı sırasında PKDY'a göre iyi atomize olamayan yakıt, reaksiyon bölgelerinde azalmaya neden olduğundan ÖYT'nde artışa sebep olabilmektedir.

İçten yanmalı motorlarda yanma sonucu elde edilen enerji, ısı transferi kayıpları nedeniyle tamamıyla yararlı işe dönüşmemektedir. Alternatif yakıt çalışmalarında motor performansının değerlendirilmesinde, ısıl verim önemli bir rol oynamaktadır. Isıl verim, motordan elde edilen efektif gücün motora sürülen enerji miktarına bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Şekil 3'de test yakıtları için ısıl verimin motor devri ile değişimi gösterilmektedir.

Şekil 3 incelendiğinde, tüm yakıtlar için maksimum

**Şekil 3.** Isıl verimlerin karşılaştırılması (Comparison of brake thermal efficiencies)

ısı verim, ÖYT'nin minimum olduğu 1500 d/d'da elde edildiği görülmektedir. 1500 d/d'daki maksimum ısı verim, PKDY için %33,73, KYME için %33,69, APYME için %33,30 olarak hesaplanmıştır. Oranlar incelendiğinde, hemen hemen yakıtların ısı değerleri ile orantılı olarak ısı verimde azalma olduğu tespit edilmiştir. Her bir yakıt için tüm motor hızlarında elde edilen ısı veriminin ortalaması alındığında, metil esterlerin kullanımı ile PKDY göre ısı verimde ortalama %2 azalma meydana gelmiştir.

Isı verimindeki azalmanın temel nedenleri olarak; metil esterlerin kullanılması ile elde edilen efektif işin azalması, ÖYT'nin artması ve metil esterlerinin ısı değerlerinin PKDY'a göre daha düşük olması gösterilebilir.

3.2 Silindir Gaz Basıncı Değerlerinin

Karşılaştırılması (Comparison of Cylinder Gas Pressure Values):

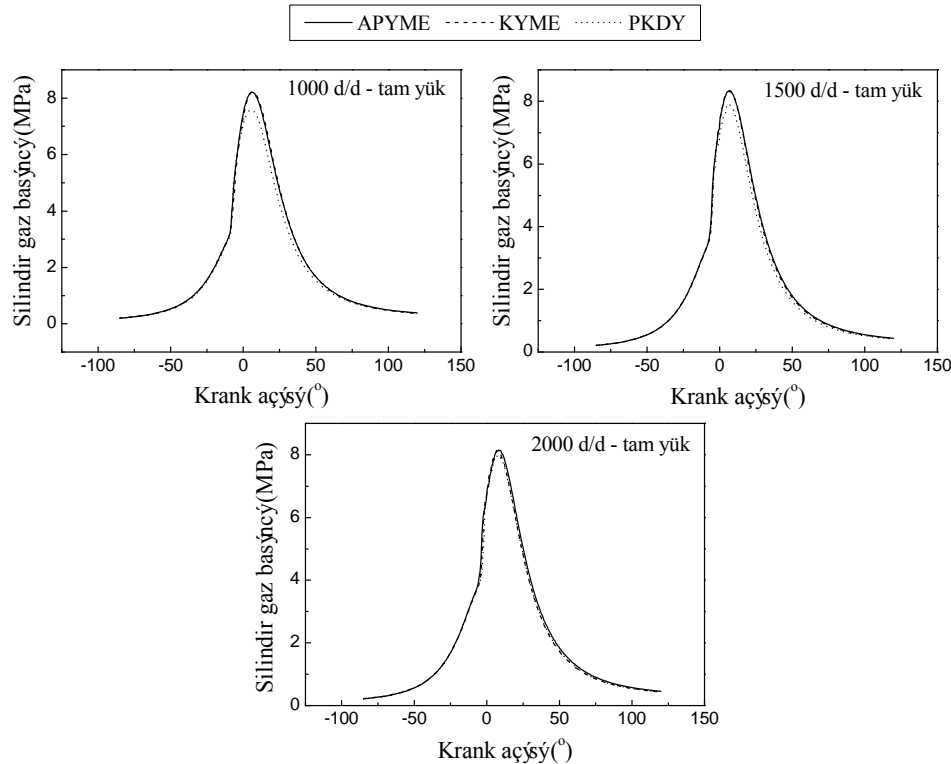
İçten yanmalı bir motorda herhangi bir yakıtın yanması sonucunda silindir içerisinde meydana gelen mekanik yüklemelerin krank açısına göre dağılımı silindir gaz basıncı eğrileri ile ifade edilmektedir. Özellikle tam yük testlerinde meydana gelen kritik mekanik yüklemelerin krank açısına göre değişimi, motor üreticilerinin motora ait hız limitlerini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Tam yük ve değişik devirlerde elde edilen silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi Şekil 4'de gösterilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi, metil esterlerin kullanımı ile

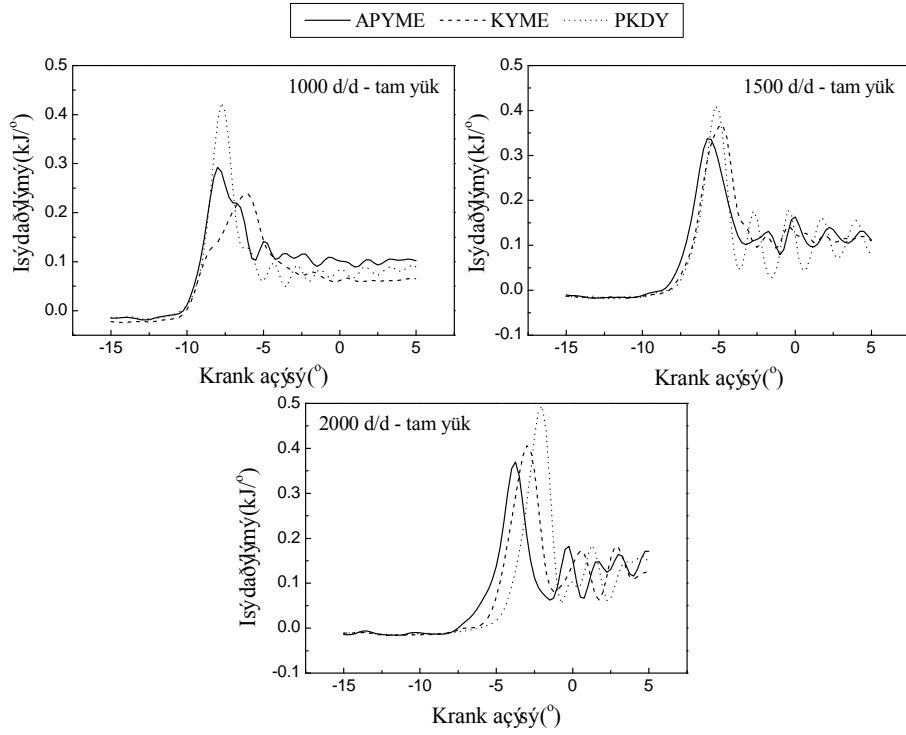
PKDY benzer yapıda silindir gaz basıncı değişimi meydana gelmiştir. Bu durum, tam yük şartlarında metil esterlerin kullanımı ile silindir içerisinde PKDY kullanımına benzer kritik mekanik yüklemeler olduğunu göstermektedir. Bununla beraber, metil esterlerin kullanımı ile PKDY'a göre maksimum silindir gaz basıncı bölgesinin ÜÖN'ya biraz daha yaklaştığı, silindir gaz basıncının biraz daha arttığı ve kontrollü yanma safhasının hafifçe genişlediği tespit edilmiştir.

Bu durum, motor devrinin düşük olduğu, 1000 ve 1500 devirlerde çok daha açık bir şekilde fark edilmektedir. Her bir metil ester kullanımı ile silindir gaz basıncının ÜÖN'ya yaklaşmasına neden olarak; metil ester kullanımı ile PKDY göre yanma veya oksitlenmenin daha erken başlaması (bkz. Şekil 5), püskürtme başlangıcının daha erken (bkz. Şekil 6), ve tutuşma gecikmesi süresinin daha kısa olması gösterilebilir. Bu çalışmada, PKDY kullanımı ile ortalama olarak 8,08 °KA tutuşma gecikmesi meydana gelirken, bu değer KYME kullanımı ile 7,75 °KA, APYME kullanımı ile 6,67 °KA olmuştur.

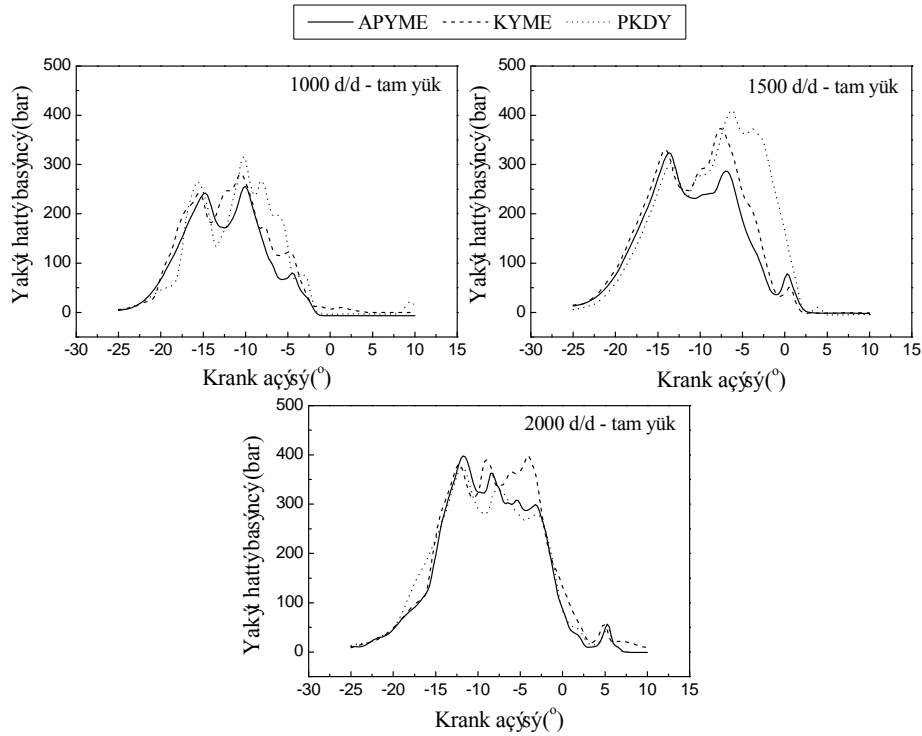
Her bir metil ester kullanımı ile silindir gaz basıncının artmasına ve kontrollü yanma safhasının genişlemesine neden olarak; metil ester kullanımı ile PKDY'a göre ÖYT'ndeki artış (bkz. Şekil 2) ve metil esterlerin kaynama derecesinin (bkz. Tablo 1) PKDY'a göre biraz daha yüksek olması gösterilebilir. Bununla beraber tüm test yakıtları, kontrollü yanma safhasında düzgün yanma eğrileri sergilemiştir. 2000 d/d test hızında, silindir içerisinde sıcaklığın diğer test hızlarına göre biraz daha yüksek olmasının bir sonucu



Şekil 4. Silindir gaz basınçlarının karşılaştırılması (Comparison of cylinder gas pressures)



Şekil 5. Isı dağılımlarını karşılaştırılması (Comparison of heat release ratios)



Şekil 6. Yakıt hattı basınçlarının karşılaştırılması (Comparison of fuel line pressures)

olarak, metil ester kullanımı ile ön yanma safhası daha erken tamamlanmış ve PKDY'ya benzer silindir gaz basınç eğrileri elde edilmiştir.

Şekil incelendiğinde, silindir gaz basıncının motor devrinin artması ile arttığı görülmektedir. Devir arttıkça silindir gaz basıncının daha yüksek olması; püskürtme başlangıcının daha erken, birim zamanda

tüketilen yakıt miktarının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, motor devri arttıkça silindir gaz basıncının yükselme anı daha erken başlarken, silindir gaz basıncının genişleme noktaları ÜÖN'dan uzaklaşmaktadır. Motor devri 2000 d/d'ya ulaştığında maksimum silindir basınç bölgesinin krank açısı cinsinden 1000 ve 1500 devire göre daha geniş bir aralıkta basıncını sürdürdüğü gözlemlenmiş-

tir. Bu durum, motor devri arttıkça silindir gaz basıncı altında kalan alanın büyüdüğünü göstermektedir.

Bu çalışmada Krieger and Borman [15] tarafından önerilen tek bölgeli yanma modeli kullanılarak, ısı dağılımı eğrileri elde edilmiştir. Isı dağılımında ani çıkışın olduğu aralık kontrolsüz yanma safhasını göstermektedir. Her bir yakıt için hesaplanan ısı dağılımının motor devrine göre değişimi Şekil 5’de gösterilmiştir.

Isı dağılımı incelendiğinde, her bir yakıt kullanımı ile elde edilen ön yanma safhalarının krank açısı cinsinden hemen hemen aynı bölgelerde gerçekleştiği görülmektedir. 2000 d/d’lik test hızında daha açık görüldüğü gibi, metil ester kullanımı ile ısı dağılımı başlangıcı PKDY’ya göre daha erken olmuştur. Bu durum, metil esterlerin PKDY’ya göre uçuculuğunun daha düşük olmasına rağmen gerçekleşmiştir. Bu duruma sebep olarak, yüksek devirlere gidildikçe silindir içerisindeki sıcaklığın artması ile metil esterlerin buharlaşma hızının artması gösterilebilir. Ayrıca, metil esterlerin bünyesinde bulunan oksijenin, buhar fazındaki yakıtın oksitlenme hızını arttırdığı da düşünülebilir. Metil esterlerin ani ısı dağılımındaki tepe noktasının biraz daha geniş olması, metil ester kullanımı ile ÖYT’nin artmasından ve metil esterlerin buharlaşma eğrisinin PKDY göre daha yatay olmasından (bkz. Tablo 1) kaynaklanmaktadır.

Isı dağılımı başlangıcından önce, ısı dağılımının negatif değerde seyretmesi, püskürtülen yakıtın buharlaşması için ortamdan ısı çekmesi sonucu silindir içerisindeki enerji değerinin düşmesinden kaynaklanmaktadır.

3.3 Yakıt Hattı Basıncı Değerlerinin

Karşılaştırılması (Comparison of Fuel Line Pressure Values):

Yakıt hattı basıncı eğrileri, yakıt sevk başlangıcından püskürtme sonuna kadarki yakıt hattındaki basıncı değişimleri hakkında bilgi vermektedir. Şekil 6’da her bir yakıt için tam yük ve değişik devirlerde elde edilen yakıt hattı basıncının KA’ya göre değişimi verilmiştir.

Şekil 6’da görüldüğü üzere, genelde metil ester kullanımı ile püskürtme başlangıcı PKDY’ya göre biraz daha erken olmuştur. Tüm devirlerde yakıtların maksimum yakıt hattı basıncı bölgeleri ve püskürtme karakteristikleri genelde birbirine benzer bir yapı sergilemiştir. Bu çalışma için seçilen motor devirlerinin 1000-2000 d/d arasında seçilmesi farkın az çıkmasında etkili olmuştur. 1000 ve 1500 d/d test hızlarında KYME kullanımı ile ÜÖN’dan önce ortalama 17,13 °KA, APYME kullanımı ile 16,63 °KA, PKDY kullanımı ile 16,38 °KA’da püskürtme başlar iken, 2000 d/d’lik test şartlarında PKDY kullanımı ile metil esterlere göre yaklaşık 0,5 °KA

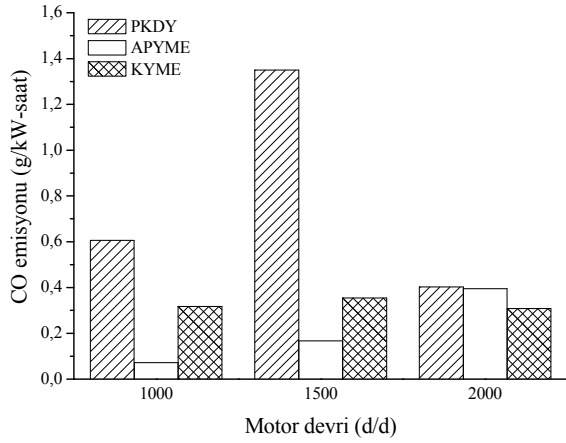
önce püskürtme başlangıcı gerçekleşmiştir. 1000 ve 1500 d/d’lik test hızlarında püskürtme basınçlarının 2000 d/d’a göre daha düşük olması, böyle bir sonucun ortaya çıkmasında etkili olmuştur. Keçil [16] yaptığı sayısal çalışmada, biyodizelin yüksek viskozitesinin püskürtme prosesini hızlandırdığını, böylece biyodizel kullanımı ile PKDY göre daha erken püskürtme başlangıcı gerçekleştiğini ifade etmektedir. Yamane ve diğ. [17], Tat ve diğ. [18], Rodriguez-Anton ve diğ. [19] püskürtme başlangıcındaki değişimin yakıtların sıkıştırılabilirliklerinden kaynaklandığını göstermişlerdir. Araştırmacılar, biyodizelin sıkıştırılabilirliğinin PKDY’ya göre daha az olduğunu, bu yüzden aynı püskürtme şartlarında biyodizel ile PKDY arasında farklılıklar bulunduğunu ifade etmişlerdir. Tüm yakıtlar için püskürtme süresi krank açısı cinsinden devir arttıkça artmıştır. İçten yanmalı motorlarda devir artışı silindire gönderilen yakıt miktarı ile ayarlandığından, devir arttıkça her yakıt için birim zamanda daha fazla yakıt püskürtülmesi gerekmektedir. Bu yüzden, püskürtme başlangıcı motor devri arttıkça ÜÖN’den çok azda olsa uzaklaşmıştır.

3.4 Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması

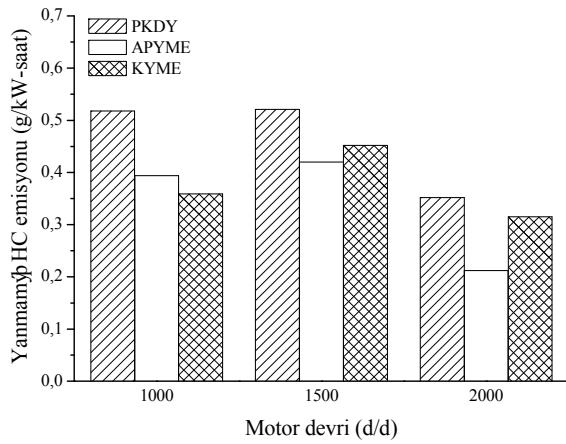
(Comparison of Emission Values):

Dizel motorlardan kaynaklanan CO, yanmamış HC, NO_x ve duman koyuluğu kirleticileri emisyon standartlarının temel parametrelerindedir. Bu emisyonlar, özellikle araç trafiğinin yoğun olduğu kentsel bölgelerde, insanlar üzerinde zihinsel ve bedensel yorgunluk oluşturması ile dikkati çekmektedir. Araştırmalar [20, 21], bu emisyonların kanserojen etkisinin de olduğunu göstermektedir. Özellikle, CO ve yanmamış HC emisyonu motorda kullanılmayan kayıp kimyasal enerjiyi ifade ettiği için, bu emisyonlardaki artış motor performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Yanma ürünleri arasında CO ve yanmamış HC’lerin bulunmasının ana nedeni, yakıtın tutuşma sıcaklığına gelmemesi veya ortamda oksijenin yetersiz olmasından dolayı yakıtın okside olamaması veya yarı oksitlenmesidir [22]. Yakıt özellikleri, püskürtme karakteristikleri, motor yükü vb. gibi etkenler hava-yakıt oranını önemli derecede etkilediğinden, dizel motorlardaki emisyon değerleri bu parametrelerin bir fonksiyonu olarak değişebilmektedir [23]. Şekil 7’de tam yük ve değişik devirlerde egzozdan salınan CO miktarının motor devrine göre değişimi gösterilmiştir.

Tüm devirlerde APYME ve KYME kullanımıyla elde edilen CO emisyonu, PKDY kullanımına göre önemli bir azalma göstermiştir. Özellikle her bir yakıt kullanımı ile maksimum döndürme momentinin elde edildiği 1500 d/d’lik motor hızında, bu durum çok daha açık bir şekilde görülmektedir. APYME ve KYME kullanımı ile PKDY’ya göre, tüm test hızlarının ortalaması alındığında %36 ve %29 oranında CO emisyonunda azalma tespit edilmiştir. Bu oranlar taşıt üreticilerinin oksijenli yakıtlara yönelmesindeki temel göstergedir.



Şekil 7. CO emisyonlarının karşılaştırılması (Comparison of CO emissions)

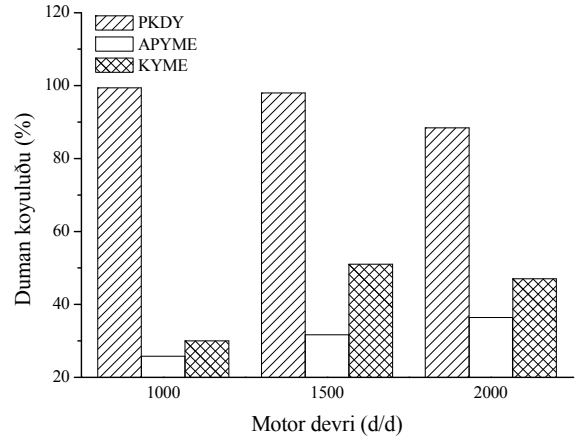


Şekil 8. Yanmamış HC emisyonlarının karşılaştırılması (Comparison of unburned HC emissions)

Şekil 8'de tam yük ve değişik devirlerde egzozdan salınan yanmamış HC miktarının motor devrine göre değişimi gösterilmiştir. Tam yük şartlarında, tüm devirlerde metil esterlerin kullanılmasıyla elde edilen yanmamış HC emisyonu PKDY'ya göre daha düşük seviyededir. Ortalama olarak, APYME ve KYME kullanımı ile HC emisyonunda PKDY'ya kıyasla sırasıyla %17 ve %11 oranında azalma olmuştur.

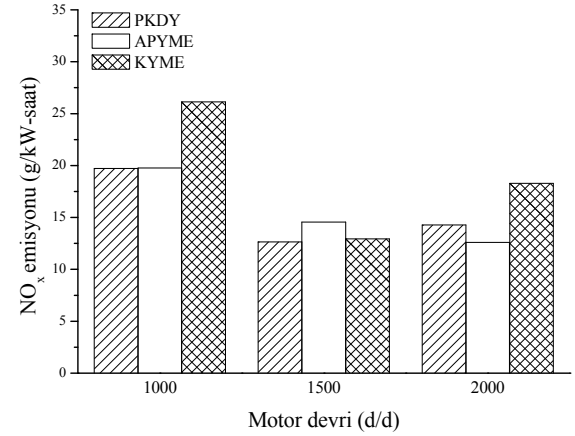
Partikül maddeler, is, birçok uçucu ve çözünmeyen maddelerin oluşturduğu yoğunluk duman koyuluğu ile ifade edilmektedir. Özellikle, oksijenin yetersiz olduğu yanma bölgelerinde uzun zincirli HC moleküllerin termal olarak kırılması sonucu duman koyuluğu oluşmaktadır [24]. Tam yük ve değişik devirlerde duman koyuluğunun değişimi Şekil 9'da gösterilmektedir. Tüm devirlerde metil ester kullanımı ile PKDY'ya göre duman koyuluğunda önemli azalmalar elde edilmiştir. Testlerde ortalama olarak, APYME ve KYME kullanımı ile PKDY'ya göre sırasıyla %40 ve %33 oranında duman koyuluğunda azalma sağlanmıştır.

Yanma sonucu ulaşılan yüksek sıcaklıklarda, havanın içerisindeki azotun oksijen ile reaksiyona girmesi sonucu azot oksitler meydana gelmektedir. Atmosfer-



Şekil 9. Duman koyuluklarının karşılaştırılması (Comparison of smoke opacities)

deki nemin NO_x emisyonlarını azaltıcı yönde bir etkisi olduğu bilinmektedir [25]. Bu yüzden, SAE [26] tarafından tanımlanan nem düzeltme faktörü kullanılarak gerçek NO_x değeri hesaplanmıştır. Tam



Şekil 10. NO_x emisyonlarının karşılaştırılması (Comparison of NO_x emissions)

yük ve değişik devirlerde düzeltme faktörü ile çarpılarak elde edilen azot oksitlerin değişimi Şekil 10'da verilmiştir.

Metil esterlerin kullanımı ile her devirde yanmamış HC, CO ve duman koyuluğu miktarında PKDY'ya oranla önemli azalmalar saptanırken, NO_x emisyonunda motor devrine göre farklı değerler ölçülmüştür. KYME her devirde PKDY'ya oranla daha fazla NO_x üretirken, APYME 1000 d/d PKDY benzer, 1500 d/d daha az, 2000 d/d daha fazla NO_x üretimi meydana getirmiştir. Tüm devirlerin ortalaması alındığında, APYME ve KYME kullanımı ile PKDY'ya göre NO_x emisyonunda sırasıyla %1 ve %13 oranında artış olduğu tespit edilmiştir.

Metil esterlerin kullanımı ile ölçülen CO, yanmamış HC ve duman koyuluğundaki azalmalar, metil esterlerin ÖYT'sinin daha yüksek ve hava-yakıt oranının PKDY'ya oranla daha düşük olmasına rağmen gerçekleşmiştir. Tablo 4'de testler sırasında her bir yakıt için belirlenen hava-yakıt oranlarının motor

devrine göre değişimi verilmektedir. Bu sonuç, metil esterlerin içeriğinde bulunan %10-12 oranında oksijenin silindir içerisinde hava-yakıt reaksiyon hızını ve miktarını arttırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, metil esterlerin ÖYT'nin PKDY'ya göre daha fazla olması ve içeriğindeki oksijenin yakıtça zengin bölgelerde gerekli oksijeni sağlaması, yanma bölgelerinin sayısını arttırdığından, NO_x emisyonlarında bir artış meydana gelmiştir.

Tablo 4. Tam yükte motor devrine göre hava-yakıt oranları (air-fuel ratios in terms of engine speed at full load condition)

Yakıt \ Devir	1000 d/d	1500 d/d	2000 d/d
APYME	17,48	14,65	11,66
KYME	17,42	14,65	11,84
PKDY	17,76	15,34	12,67

Metil esterlerin kullanımı ile CO, yanmamış HC ve duman koyuluğu miktarının azalmasıdaki diğer bir önemli etken; metil esterlerin kullanımı ile PKDY göre tutuşma gecikmesi süresinin kısılması ve püskürtme başlangıcının daha erken olmasıdır. Bu durum, egzoz supabının açılma zamanına kadar ki yakıt oksitlenme süresinin uzamasına yol açmıştır. Bu yüzden de, metil esterlerin kullanılması ile CO ve yanmamış HC ve duman koyuluğunda azalma sağlanır iken, bu etkenler silindir içerisindeki bölgesel sıcaklıkları arttırdığından, metil ester kullanımı ile üretilen NO_x emisyonunda bir miktar artış meydana gelmiştir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Oksijenli yakıtların alternatif dizel yakıtı olarak veya PKDY'ya karıştırılarak kullanılması, içten yanmalı motorlu araçlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını azaltmada, her zaman gündemde olan bir konu olmuştur. Bu çalışmada iki farklı kaynaktan üretilen metil esterinin, performans, yanma ve püskürtme karakteristikleri PKDY referans alınarak incelenmiştir. Metil esterler ile PKDY performans açısından karşılaştırıldıklarında, metil esterlerin kullanımı ile PKDY göre motor gücünde ve ısı veriminde ortalama %2 oranında azalma meydana geldiği, ÖYT'nde ise ortalama %6 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Yapılan testlerde, genelde metil ester kullanımı ile PKDY göre tutuşma gecikmesinin kısaldığı, ön yanma safhasının ve püskürtme başlangıcının daha erken olduğu belirlenmiştir. Metil esterler ile PKDY arasındaki bu farklılıklar, metil esterlerin ürettikleri silindir gaz basıncının daha yüksek olmasına ve maksimum silindir gaz basınç bölgesinin PKDY kullanımına göre ÜÖN'a biraz daha yaklaşmasına neden olmuştur. APYME ve KYME kullanımı ile her devirde yanmamış HC, CO ve duman koyuluğu miktarında PKDY'ya kıyasla önemli azalmalar sağlanırken, NO_x emisyonunda daha karmaşık bir yapı dikkati çekmektedir. Literatür incelendiğinde, araştırmacıların ve motor üreticilerinin dizel motorlardan

kaynaklanan partikül madde ve NO_x emisyonu üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Metil esterlerin kullanımı ile tüm devirlerde duman koyuluğunda azalma sağlanırken, NO_x kararlı bir durum gözükmemektedir. Ortalama değerler incelendiğinde, APYME ve KYME kullanımı ile PKDY'ya göre NO_x emisyonunda sırasıyla %1 ve %13 oranında artış olduğu görülmüştür. Bu yüzden, metil esterlerin kullanıldığı bir dizel motorlarda standartlara uygun NO_x miktarının sağlanabilmesi için, taşıt üreticilerinin egzoz sonrası sistemleri kullanmasına ihtiyaç duyulabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGE)

Bu çalışma TÜBİTAK 104M372 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın ortaya çıkmasına katkılardan dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Özsezen, A.N., Çanakçı, M., "Türkiye'de ve Dünyada Enerji Tüketimi-Biyodizel", **5. GAP Mühendislik Kongresi**, Cilt 1, 415-422, 2006.
2. Özsezen, A.N., **Atık Palmiye Yağından Üretilen Biyodizelin Motor Performans ve Emisyon Karakterleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi**, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
3. 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), ACS, Washington DC, 172-208, 1997.
4. Canakci, M., "Performance and Emissions Characteristics of Biodiesel from Soybean Oil", **Proc. IMechE Part D: Journal of Automobile Engineering**, 219, 7, 915-922, 2005.
5. 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.
6. Ozsezen, A.N., Canakci, M., Sayin, C., "Effects of Biodiesel from Used Frying Palm Oil on the Exhaust Emissions of an Indirect Injection (IDI) Diesel Engine", **Energy and Fuels**, 22, 4, 2796-2804, 2008.
7. Ozsezen, A.N., Çanakçı, M., Sayin, C. "Effects of Biodiesel from Used Frying Palm Oil on The Performance, Injection and Combustion Characteristics of an IDI Diesel Engine", **Energy and Fuels**, 22, 2, 1297-1305, 2008.
8. Canakci, M., Van Gerpen, J.H. "Comparison of Engine Performance and Emissions for Petroleum Diesel Fuel, Yellow Grease Biodiesel, and Soybean Oil Biodiesel", **Trans. of the ASAE**, 46, 4, 937-944, 2003.
9. 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.
10. Schumacher, L.G., Marshall, W., Krahl, J., Wetherell, W.B., Grabowski, M.S. “Biodiesel Emissions Data from Series 60 DDC Engines”, **Trans. of the ASAE**, 44, 6, 1465-1468, 2001.
 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 Feedstock”, **Energy and Fuels**, 15, 5, 1207-1212, 2001.
 12. Ulusoy, Y., Tekin, Y., Cetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F., “The Engine Tests of Biodiesel from Used Frying Oils”, **Energy Sources**, 26, 927-932, 2004.
 13. Yoshimoto, Y., Onodera, M., Tamaki, H., “Reduction of NO_x, Smoke, and bsfc in a Diesel Engine Fueled by Biodiesel Emulsion with Used Frying Oil”, **SAE Paper**, No.1999-01-3598, 1999.
 14. Lee, C.S., Park, S.W., Kwon, S.I., “An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-Blended Fuels”, **Energy and Fuels**, 19, 2201-2208, 2005.
 15. Krieger, R.B., Borman, G.L., “The Computation of Applied Heat Release for Internal Combustion Engines”, **ASME Paper**, No.66-WA/DGP-4, 1966.
 16. Kegl, B., “Numerical Analysis of Injection Characteristics Using Biodiesel Fuel”, **Fuel**, 85, 17-18, 2377-2387, 2006.
 17. Yamane, K., Ueta, A., Shimamoto, Y., “Influence of Physical and Chemical Properties of Biodiesel Fuels on Injection, Combustion and Exhaust Emission Characteristics in a Direct Injection Compression Ignition Engine”, **International Journal of Engine Research**, 2, 4, 249-261, 2001.
 18. Tat, M.E., Van Gerpen, J.H., Soylu, S., Canakci, M., Monyem, A., Wormley, S., “The Speed of Sound and Isentropic Bulk Modulus of Biodiesel at 21°C from Atmospheric Pressure to 35 MPa”, **Journal of the American Oil Chemists’ Society**, 77, 3, 285-289, 2000.
 19. Rodriguez-Anton, L.M., Casanova-Kindelan, J., Tardajos, G., “High Pressure Physical Properties of Fluids Used in Diesel Injection Systems”, **SAE Paper**, No.2000-01-2046, 2000.
 20. Morgan, W.K.C., Reger, R.B., Tucker, D.M., “Health Effects of Diesel Emissions”, **Ann. Occup. Hyg.**, 41, 6, 643-658, 1997.
 21. Steenland, K., Deddens, J., Leslie Stayner, L., “Diesel Exhaust and Lung Cancer in The Trucking Industry: Exposure-Response Analyses and Risk Assessment”, **American Journal of Industrial Medicine**, 34, 3, 220-228, 1998.
 22. Challen, B., Baranescu, R., **Diesel Engine Reference Book**, Second Edition, Butterworth Heinemann, 1999.
 23. Abdel-Rahman, A.A., “On the Emissions from Internal-Combustion Engines: A Review”, **Int. J. of Energy Res.**, Vol.22, 483-513, 1998.
 24. Schmidt, K., Van Gerpen, J., “The Effect of Biodiesel Fuel Composition on Diesel Combustion and Emissions”, **SAE Paper**, No.961086, 1996.
 25. Borman, G.L. and Ragland, K.W., **Combustion Engineering**, McGraw-Hill, New York, 1998.
 26. Society of Automotive Engineers, **SAE Handbook**, Inc., Warrendale, MI, Vol.1, 1304-1306, 2001.