

Atık hayvansal yağ kökenli biyomotorin yakıtların ortak-hat direkt püskürtmeli bir diesel motorda kullanımının incelenmesi: Performans ve yanma karakteristikleri

Investigation of waste animal fat based biodiesel fuels' usage in a common rail direct injection diesel engine: Performance and combustion characteristics

Hüseyin ŞANLI^{1*} 

¹Ford Otosan İhsaniye Otomotiv Meslek Yüksekokulu, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
hsanli1@hotmail.com

Geliş Tarihi/Received: 06.02.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 07.11.2018

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.54715

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, yüksek serbest yağ asidi içeriğine sahip atık tavuk yağı ve atık deri yağından biyomotorin yakıtları üretilmiş ve ortak-hat direkt püskürtmeli bir diesel motorda 2000 d/d sabit motor devrinde ve beş farklı motor yükünde (50, 75, 100, 125 ve 150 Nm) test edilmişlerdir. Biyomotorinlerin motor performans ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri referans yakıt olan petrol türevi diesel yakıtı (motorin) ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Motorine kıyasla; biyomotorin yakıtların fren özgül yakıt tüketimleri daha yüksek, termik verimleri ise daha düşük olmuştur. Performans karakteristikleri arasındaki farklar motor yükü ile daha belirgin bir hal almıştır. Pilot püskürtmede motorin ile tüm motor yüklerinde daha yüksek basınç değerlerine ulaşılırken, 125 ve 150 Nm yük şartlarında ana püskürtmede biyomotorinler ile daha yüksek basınçlar elde edilmiştir. Silindir içi basıncı ve ısı yayılım oranları arasındaki en kritik fark 125 Nm'de görülmüştür. Tutuşma gecikmesi süreleri motor yükü ile farklılıklar göstermiş; fakat tüm yakıtlar için genellikle motor yükü ile birlikte artmıştır. Biyomotorin yakıtların yanma süreleri birbirlerine yakınsa, tüm motor yüklerinde motorinin yanma süresi daha uzun olmuştur.

Anahtar kelimeler: Atık hayvansal yağ, Biyomotorin, Motor test, Performans, Yanma

Abstract

In this study, biodiesel fuels were produced from waste chicken fat and waste fleshing oil with high free fatty acids, and those were tested in a common rail-DI diesel engine at constant engine speed of 2000 rpm and five different engine loads (50, 75, 100, 125 and 150 Nm). The effects of biodiesel fuels on the engine's performance and combustion characteristics were investigated in comparison with petroleum-based diesel fuel (PBDF) which was the reference fuel. As compared to PBDF, brake specific fuel consumptions of biodiesels were higher but their thermal efficiencies were lower. The differences between performance characteristics became more pronounced with increasing engine load. In-cylinder pressures which were attained in pilot injection were higher with PBDF at all engine loads, while higher pressures were attained in main injection with biodiesel fuels at 125 and 150 Nm. The most critical differences between in-cylinder pressures and heat release rates were found at 125 Nm. The ignition delays varied with engine load; but for all test fuels it usually increased with engine load. While the combustion durations of biodiesel fuels were close to each other, PBDF's combustion durations were relatively higher at all engine loads tested.

Keywords: Waste animal fat, Biodiesel, Engine test, Performance, Combustion

1 Giriş

Hızlı endüstrileşme, nüfus ve hayat standartlarındaki artışla birlikte Türkiye'nin enerji tüketimi her geçen yıl artmaktadır. Enerji tüketiminin önemli bir kısmı taşımacılık sektöründe (özellikle karayolu taşımacılığı) kullanılmaktadır. Ülkemizde karayolu taşıtları içerisinde, diesel motorlu araç sayısında önemli bir artış görülmektedir. Bunun doğal sonucu olarak motorin tüketimi sürekli artmaktadır. 2016 yılı rakamları incelendiğinde motorin satışının (22.322.574 ton - toplam yurt içi satışının %83.55'i) benzin satışının (2.234.045 ton-toplam yurt içi satışının %8.36'sı) yaklaşık 10 katı olduğu görülmektedir [1].

Türkiye'nin enerjide büyük ölçüde dışa bağımlılığı göz önüne alındığında; yurt içi kaynaklarla üretilebilecek, sürdürülebilir, çevreci bir alternatif diesel yakıtının önemi ve stratejik pozisyonu açıkça anlaşılmaktadır. Biyolojik kökenli, yenilenebilir bir enerji kaynağı olan biyomotorin, tüm dünya genelinde her geçen yıl daha çekici bir hal almakta ve kullanım oranı artmaktadır. Ülkemizde de biyomotorin üzerine yoğun

çalışmalar yapılmakta ve çeşitli teşvikler sunulmaktadır. Örneğin; 16.06.2017 tarih ve 30098 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan tebliğ ile ithal edilen ve rafinericiden temin edilen motorinin toplamına en az %0.5 (hacimsel, v/v) oranında yerli tarım ürünlerinden ve/veya bitkisel atık yağlardan üretilmiş biyomotorinin harmanlanmış olması 01.01.2018 tarihi itibarı ile zorunlu hale getirilmiştir [2]. Bu makalenin yazıldığı tarih itibarı ile EPDK tarafından 2017 yılı yurt içi akaryakıt satış oranları açıklanmamış olmakla birlikte; önceki 5 yılın motorin tüketimindeki artış ortalaması (%8.59) ile 2018 yılında yaklaşık 130.833 ton biyomotorin ihtiyacı olacağı görülmektedir. Bununla birlikte; ülkemiz yağlı tohum sektöründe de, tıpkı fosil enerji kaynaklarında olduğu gibi, ithalata bağımlıdır. Örneğin; 2016 yılında Türkiye'deki yaklaşık 3 milyon tonluk gıda amaçlı yağ arzının ancak 780 bin tonu yerli üretimle karşılanabilmiş, geriye kalan bölümün ithalatı için 3.4 milyar \$ harcanmıştır [3]. Dolayısıyla; biyomotorin üretimi amacıyla bitkisel yağ kullanımının, ülkemizin dış kaynağa bağımlılığını azaltmaya bir katkısının olmayacağı açıktır. Nitekim; daha önce de 27.09.2011 tarih ve 28067 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan tebliğ ile yalnızca yerli tarım

ürünlerinden üretilen biyomotorinin motorine 2014'te en az %1 (v/v), 2015'te en az %2 (v/v) ve 2016'da en az %3 (v/v) harmanlanması zorunlu hale getirilmişti [4]. Ancak, yukarıda bahsedilen yerli üretim problemi nedeniyle, ülkemiz biyomotorin endüstrisi için çok önemli olabilecek bu iyi niyetli girişim uygulamaya alınamamıştı. Yeni tebliğde bitkisel atık yağ ibaresinin eklenmesi oldukça kritik olmuştur ve biyomotorin üretimi için oldukça önemli bir hammadde teşkil edecektir. Bununla birlikte; ilgili tebliğde atık hayvansal yağlardan üretilen biyomotorin ilgili bir genişletme yapılmamıştır. Ülkemizde önemli miktarda atık hayvansal yağ potansiyeli bulunmaktadır [5]. Bu atık hayvansal yağların hayvan yemi, sabun ve kozmetik endüstrilerinde kullanımı yasaklanmıştır. Ancak biyomotorin üretiminde hammadde olarak kullanılabilir durumdadırlar. Atık hayvansal yağlardan biyomotorin üretimi ile hem biyomotorin birim fiyatı düşürülecek ve hem de bu yağların çevreye verecekleri zararlar önlenmiş olacaktır.

Biyomotorin yağ asidi kompozisyonu ve buna bağlı olarak fiziksel-kimyasal yakıt özellikleri büyük oranda üretildikleri hammaddeye göre değişmektedir [6],[7]. Hayvansal yağlar, daha fazla oranda doymuş yağ asitlerinden oluştuğu için, bu yağlardan üretilen biyomotorin yakıtlarının bitkisel yağ kökenli biyomotorinlere kıyasla setan sayısı, oksidatif stabilite, yağlayıcılık gibi bazı özellikler bakımından üstünlükleri bulunurken, viskozite ve soğuk akış özellikleri noktasında dezavantajları olmaktadır [8]-[10]. Bu yakıt özelliklerinin motor performansı, yanma ve egzoz emisyon karakteristikleri üzerinde belirleyici etkileri bulunmaktadır [11]-[13]. Şahir ve diğ. [14]; atık hayvansal yağdan ürettikleri biyomotorin yakıtı, petrol türevi motorin ile %10-%20-%30-%40 ve %50 (v/v) oranlarında harmanlayarak dört silindiri, dört zamanlı, turboşarj-ara soğutmalı, ortak yakıt hatlı direkt püskürtmeli bir diesel motorda test etmişlerdir. Motor testleri, 2800 devir/dk. (d/d) sabit motor hızı ve %30-%60-%80 ve %100'lük dört farklı motor yükünde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, özgül yakıt tüketimi ve termik verim bakımından %30'luk biyomotorin karışımı ile en iyi sonuçların elde edildiği ve bu oranın üzerindeki karışımlarda sonuçların bozulduğu ifade edilmiştir. Ancak makalede silindir içi basınç ve yanma verileri belirtilmemiştir. Behçet ve diğ. [15]. Atık tavuk yağı ve atık balık yağından ürettikleri biyomotorinleri, petrol türevi motorin ile %20 oranında (v/v) karıştırarak tek silindiri, dört zamanlı, hava soğutmalı, direkt püskürtmeli bir diesel motorda tam yükte ve 1000 d/d, 1500 d/d, 2000 d/d ve 2500 d/d'lik dört farklı motor hızında test etmişlerdir. Motorine oranla; balık yağı biyomotorin-motorin karışımı torkun %3.2, gücün ise %4.3 düşmesine neden olurken, bu oran tavuk yağı biyomotorin-motorin karışımında sırasıyla %1.9 ve %2.4 olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca, özgül yakıt tüketimi balık yağı motorin için %8.3, tavuk yağı motorin için ise %5.2 artmıştır. Emiroğlu ve diğ. [16]; asit değeri 8.24 mg KOH.g⁻¹ olan atık hindi yağından iki aşamada (bir ön iyileştirme ve bir transesterifikasyon adımı) biyomotorin yakıtı üretmişler ve bu yakıtı petrol türevi motorin ile %10, %20 ve %50 (v/v) oranında karıştırarak, bu karışımların motor yanma ve performans karakteristikleri üzerindeki etkilerini motorin ile karşılaştırmışlardır. Motor testleri; tek silindiri, dört zamanlı, atmosferik, direkt püskürtmeli bir deney motorunda 2000 d/d sabit motor hızı ve 2.5 Nm, 5 Nm, 7.5 Nm ve 10 Nm'lik dört farklı motor yükünde gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda; tüm motor yüklerinde, biyomotorin karışımları ile daha yüksek silindir içi basınçları ve ısı yayılım oranlarına ulaşılırken, özgül

yakıt tüketiminde artış ve termik verimde ise azalış olduğu rapor edilmiştir.

İlgili literatür incelendiğinde; düşük kaliteli atık hayvansal yağlardan üretilen biyomotorin yakıtları ile gerçekleştirilen motor test çalışmalarının yüksek kaliteli bitkisel yağ ve atık kızartma yağı kökenli biyomotorinler ile gerçekleştirilen çalışmalara oranla oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, özellikle yakıt kalitesine karşı çok daha hassas olan günümüz ortak-hat direkt püskürtmeli diesel motorlar için daha belirgindir. Bu nedenle; yapılan bu çalışmada, literatürdeki bu eksikliği kısmen de olsa kapatılmak amacıyla, yüksek serbest yağ asidi içeriğine sahip düşük kaliteli atık tavuk yağı ve atık deri yağından üretilen biyomotorin yakıtları, dört silindiri, turboşarj-ara soğutmalı, ortak-hat direkt püskürtmeli bir diesel motorda test edilmiştir. Üretilen yakıtların motor performans ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri referans yakıt olarak motorin ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2 Materyal-Metot

Motor testlerinde referans yakıt olarak kullanılan motorin (euro-diesel) yerel bir akaryakıt istasyonundan alınmıştır. Biyomotorin üretiminde hammadde olarak kullanılan atık tavuk yağı (ATY) Beypiliç Bolu tesislerinden, atık deri yağı (ADY) ise İstanbul Deri Organize Sanayi Bölgesi atık işleme tesisinden temin edilmiştir. ATY ve ADY hammaddelerinin bazı kritik fiziksel-kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. Atık hayvansal yağlar içeriklerinde bulunan suyun buharlaştırılması için 110 °C'de 1 sa. süreyle ısıtıldıktan sonra ayrı ayrı hammadde tankına alınmışlardır.

Tablo 1: Atık tavuk yağı ve atık deri yağı hammaddelerinin bazı fiziksel-kimyasal özellikleri.

	Birim	ATY	ADY
Viskozite (40 °C)	mm ² .s ⁻¹	53.8	51.3
Yoğunluk	kg.m ⁻³	937.6	907.6
		(15 °C)	(25 °C)
Asit Değeri	mg KOH.g ⁻¹	52.3	24.7
Isıl Değer	MJ.kg ⁻¹	38.4	39.6
Peroksit Değeri	meq.kg ⁻¹	56.7	4.2
İyot Değeri	g I.100 g ⁻¹	85	52
Su İçeriği	ppm	400	300

Tabloda da görüldüğü gibi, her iki hayvansal yağın asit değerleri oldukça yüksektir. Bu değerler; baz (alkali) katalizör kullanılan transesterifikasyon reaksiyonunda sabunlaşma problemi yaşanmaması için genel olarak kabul edilen üst sınır olan 2 mg KOH.g⁻¹lık asit değerinin oldukça üzerinde olduğundan [8],[17], asit katalizör kullanılan ön iyileştirme reaksiyonları ile atık hayvansal yağların asit değerleri belirtilen üst sınırın altına düşürülmüştür. Yüksek asit değerine sahip atık hayvansal yağlar ile gerçekleştirilen biyomotorin üretim optimizasyon çalışmaları ışığında [18]-[23] ön iyileştirme ve transesterifikasyon reaksiyon şartları belirlenmiştir. Ön iyileştirme reaksiyonunda her iki hayvansal yağ için de %10 H₂SO₄, 30:1 molar metanol, 60 °C sıcaklık ve 1 sa. reaksiyon şartları kullanılmıştır. Bununla birlikte; deri yağında bir ön iyileştirme adımı asit değerini 2 mg KOH.g⁻¹ın altına düşürmeye yeterli olurken, tavuk yağının asit değeri daha yüksek olduğundan bu değere ancak iki ön iyileştirme adımı ile inilebilmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonunda ise; tavuk yağı için 6:1 molar metanol, %1 KOH, 60 °C sıcaklık ve 1 sa. reaksiyon şartları, deri yağı için 7.5:1 molar metanol, %1 KOH, 60 °C sıcaklık ve 1 sa. reaksiyon şartları kullanılmıştır. Ön

iyileştirme ve transesterifikasyon reaksiyonları, Kocaeli Üniversitesi Alternatif Yakıtlar Araştırma Geliştirme ve Uygulama (AYARGEM) Merkezi'nde bulunan pilot ölçekli biyomotorin üretim tesisinde gerçekleştirilmiştir. Atık hayvansal yağ hammaddeleri ve üretilen biyomotorin yakıtların özellikleri (setan sayısı hariç) ilgili merkezde, setan sayıları ise TÜBİTAK-MAM Enerji Enstitüsü'nde Avrupa Biyomotorin standardı olan EN 14214'de istenilen ölçüm metotlarına göre tespit edilmiştir.

Motor deneylerinde kullanılan test yakıtları; motorin, atık tavuk yağı biyomotorin (ATYB), atık deri yağı biyomotorin (ADYB) olarak belirtilmiş ve bazı kritik yakıt özellikleri ile kimyasal formülleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Test yakıtlarının bazı kritik yakıt özellikleri ve kimyasal formülleri.

	Birim	Motorin	ATYB	ADYB
Kimyasal Formül	-	C ₁₂ H ₂₃	C _{18,6} H _{34,9} O ₂	C _{18,2} H _{35,1} O ₂
Viskozite (40 °C)	mm ² .s ⁻¹	2.96	5.30	4.70
Yoğunluk (15 °C)	kg.m ³	832.6	889.7	876.7
Asit Değeri	mg KOH.g ⁻¹	0.13	0.43	0.28
Parlama Noktası	°C	57	169	168
Alt Isıl Değer	kJ.kg ⁻¹	43013	37045	37188
İyot Değeri	g l.100 g ⁻¹	11.7	95.5	53.6
Su İçeriği	ppm	49.6	340	310
Monogliserit	% (küt.)	-	0.02	0.06
Digliserit	% (küt.)	-	0.05	0.02
Trigliserit	% (küt.)	-	0.06	0.20
Serbest Gliserin	% (küt.)	-	0.008	0.01
Toplam Gliserin	% (küt.)	-	0.03	0.05
Metanol İçeriği	% (küt.)	-	0.05	0.01
Setan Sayısı	-	59.9	52.3	58.8
Bakır Şerit Korozyon Derecesi	Korozyon	No 1	No 1	No 1
Soğuk Filtre	°C	-16	3	10
Tıkanma Noktası				

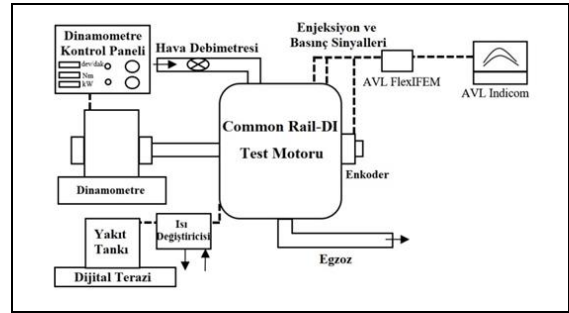
Test yakıtları; dört silindirli, su soğutmalı, turboşarj- arasağutmalı, ortak-hat direkt püskürtmeli bir diesel motorda birbirleriyle karıştırılmadan (saf halde) kullanılmışlardır. Bu uygulama ile test yakıtlarının birbirlerinden farklı olan yakıt özelliklerinin, motorun performans ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkilerinin doğrudan gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Test motorunun teknik özellikleri Tablo 3'te sunulmaktadır. Motor testleri 2000 d/d sabit motor devri ve 50 Nm, 75 Nm, 100 Nm, 125 Nm ve 150 Nm'lik beş farklı motor yükünde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3: Test motorunun teknik özellikleri.

Motor	1.9 litre, Fiat JTD
Tip	Turboşarj, Intercooler, 4 zamanlı, Su soğutmalı, Ortak-hat Direkt Püskürtme
Silindir Sayısı	4
Çap-Strok	82 mm - 90.4 mm
Sıkıştırma Oranı	18.45:1
Maksimum Güç	77.5 kW (4000 d/d)
Maksimum Tork	205 Nm (1750 d/d)

Motor bir hidrolik dinamometre ile yüklenmiştir. Krank açısı (°KA) ve pozisyonu AVL 365C marka bir shaft enkoder ile tespit edilmiştir. Silindir içi basıncı; kızdırma bujisi yuvasına takılan AVL GH13P basınç sensörü ile ölçülmüş, veriler ise AVL FlexiFEM veri toplayıcı ile alınmıştır. Püskürtme zamanları Fluke marka bir akım probu ile tespit edilmiştir. Püskürtme

süreleri, enjektör akım değişimine bağlı olarak belirlenmiştir. Silindir içi basıncı ve püskürtme zamanlamasının analizi AVL Indicom yanma analiz programı ile sağlanmıştır. Silindir içi gaz basıncı ve püskürtme verileri 50 çevrimin ortalaması alınarak 0.2 °KA hassasiyetinde tespit edilmiştir. Dolgu havası, yakıt, yağlama yağı ve soğutma suyu sıcaklıkları K tipi termokupullar ile ölçülmüştür. Dolgu havasının kütleli debisi AVL-Howsonix debi ölçer ile tespit edilmiştir. Yakıt tüketimi ise dijital bir terazi ve kronometre kullanılarak belirlenmiştir. Yakıt özelliklerinin sıcaklıktan etkilenmemesi için, test yakıtlarının sıcaklıkları su soğutmalı bir ısı değiştiricisi ile 40±3 °C'de sabit tutulmuştur. Motor test sistemi şematik olarak Şekil 1'de gösterilmektedir. Tüm motor testleri 3 defa tekrarlanmış ve ortalama sonuçlar verilmiştir.



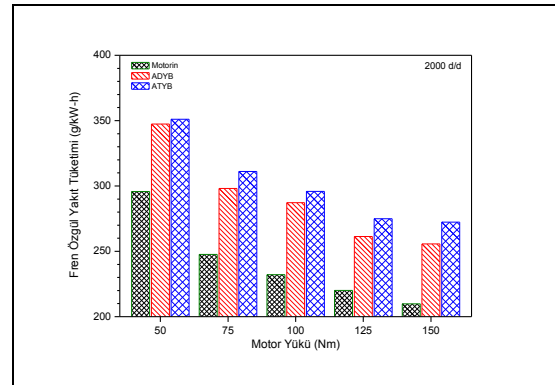
Şekil 1: Test sistemi şematik görünümü.

3 Sonuçlar ve tartışma

3.1 Performans karakteristikleri

3.1.1 Fren özgül yakıt tüketimi

Fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT), içten yanmalı bir motorun tükettiği yakıtı karşılık ürettiği efektif güce oranı olarak tanımlanabilir. Yakıtın ne kadar verimli bir şekilde krank milinde faydalı güce dönüştüğünün ölçüsü olduğundan, özellikle farklı yakıtlar ile motor performansının karşılaştırılması için kritik bir özelliktir. Motor testlerinde elde edilen FÖYT sonuçları Şekil 2'de sunulmaktadır.



Şekil 2: Fren özgül yakıt tüketiminin motor yükü ile değişimi.

Şekilde görüldüğü gibi, tüm test yakıtlarının FÖYT değerleri motor yükü ile azalmıştır. Motor yükü ile yakıt debisi artmasına rağmen FÖYT'deki bu düşüş, motorda üretilen efektif gücün artması ile açıklanabilir. Bununla birlikte, motor yükü artışı ile püskürtme basıncının artması sonucu atomizasyon iyileşmekte ve daha küçük çaplı yakıt damlacıkları elde edilmektedir [24]. Ayrıca, yük arttıkça motora daha fazla hava girmekte ve silindir içi hava hareketleri (türbülans) iyileşmektedir [25]. Bunların sonucunda daha homojen bir karışım elde edilebilir ve daha iyi

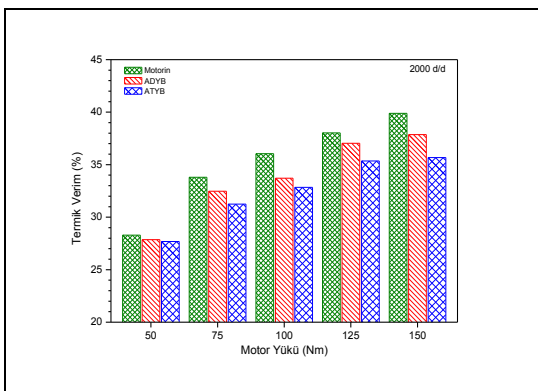
bir yanma gerçekleşir. FÖYT'deki bu düşüşün, motorin için daha belirgin olduğu görülmektedir. Motor yükü 50 Nm'den 150 Nm'ye çıkartıldığında, FÖYT; motorin için 295.80 g/kW-h'den 209.81 g/kW-h'ye (%29.07 azalma), ADYB için 347.39 g/kW-h'den 255.67 g/kW-h'ye (%26.40 azalma) ve ATYB için ise 351.03 g/kW-h'den 272.34 g/kW-h'ye (%22.42 düşüş) azalmıştır.

Test edilen tüm motor yüklerinde biyomotorin yakıtların FÖYT değerleri motorininkinden daha yüksek olmuştur. Bu fark motor yükü ile daha da artmıştır. ATYB'nin FÖYT değeri, motorine oranla 50 Nm'de %18.67 daha fazla iken bu oran 150 Nm'de %29.80 olmuştur (ortalama %25.28). ADYB için ise %17.44'den %21.86'ya (ortalama %20.42) çıkmıştır. Biyomotorinlerin ısı değerleri motorine göre daha düşük olduğundan (Tablo 2), aynı motor gücüne ulaşabilmek için bu yakıtlar ile daha fazla FÖYT değerleri beklenen bir sonuçtur. Motorinin ısı değerine oranla; ATYB'nin ısı değeri %13.87, ADYB'nin ısı değeri ise %13.54 daha azdır. Bununla birlikte; biyomotorin yakıtların FÖYT değerlerinin motorinden daha fazla olmasının diğer bir sebebi, bu yakıtların yoğunluklarıdır. ATYB'nin yoğunluğu motorininkinden %6.42, ADYB'nin ise %5.03 daha fazladır. Barrios ve diğ. [26], Jeong ve diğ. [27] ve Alptekin ve diğ. [28] de; atık hayvansal yağ kökenli biyomotorin yakıtları ile gerçekleştirdikleri çalışmalarında motorine oranla fren özgül yakıt tüketiminin arttığını rapor etmişlerdir.

Biyomotorin yakıtları kendi aralarında karşılaştırıldıklarında ise, ATYB'nin FÖYT değerinin ADYB'den daha fazla olduğu ve bu farkın motor yükü ile arttığı anlaşılmaktadır. Motor yükü 50 Nm'de %1.05 olan fark 150 Nm'de %6.52 olmuştur (ortalama %4.02). Tablo 2 incelendiğinde, ATYB'nin ısı değerinin ADYB'ninkinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle, ATYB yakıtına ait FÖYT değeri ADYB'den daha fazla olmuştur. Ayrıca, ATYB'nin viskozitesi ADYB'den daha fazladır. Yüksek viskozite, atomizasyonu ve buna bağlı olarak da yanmayı olumsuz etkileyen bir faktördür [29]. Dolayısıyla, ATYB'nin görece yüksek viskozitesi bu yakıtın daha yüksek FÖYT değeri üzerinde etkili olmuş olabilir.

3.1.2. Termik verim

Motorda alınan efektif gücün motora yakıt ile verilen enerji miktarına oranı olarak tanımlanan termik verim, değişik yakıtların motor performansları üzerindeki etkilerini görebilmek için önemli bir parametredir. Test yakıtlarının termik verimlerinin motor yüküne bağlı olarak değişimleri Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3: Termik verimin motor yükü ile değişimi.

Şekilde de görüldüğü gibi, tüm test yakıtlarının termik verimleri motor yükünün artışıyla artmıştır. Krank milinden

alınan efektif güç motor yükü ile arttığından, buna bağlı olarak termik verim de yükselmektedir. Şekil 2'den hatırlanacağı gibi, motor yükü ile ÖYT değerlerinde görülen düşüş eğilimi de termik verimdeki artış üzerinde etkili olmuştur. Test yakıtlarının termik verimlerinde motor yükü ile görülen artış motorin için daha belirgindir. Motor yükü 50 Nm'den 150 Nm'ye yükseltildiğinde; motorinin termik verimi %41 artarken (%28.29'dan %39.89'a), ADYB'nin %35.89 (%27.86'dan %37.86'ya) ve ATYB'nin ise %28.90 (%27.68'den %35.68'e) artmıştır.

Şekil 3 incelendiğinde, motorin ile biyomotorin yakıtlarının termik verimleri arasındaki farkların motor yükü ile giderek belirginleştiği görülmektedir. Örneğin; 50 Nm'de ATYB'nin termik verimi motorininkinden %2.16 düşükken, bu fark 150 Nm'de %10.55 olmuştur. ADYB için ise fark %1.51'den %5.08'e yükselmiştir. Test yakıtlarının termik verimleri arasındaki farkların belirginleşmesi, motorin ve biyomotorin yakıtların yakıt tüketim değerleri arasındaki farkın motor yüküne bağlı olarak artması ile açıklanabilir. Ayrıca, biyomotorinlerin viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilimi değerlerinin motorininkine göre daha yüksek olmasının da bu durum üzerinde belirleyici olduğu söylenilebilir. Bu yakıt özelliklerinin atomizasyona, silindir içi karışım oluşumuna ve buna bağlı olarak yanmaya olumsuz etkisi bilinmektedir [30]. ATYB ve ADYB yakıtlarının termik verimleri kendi aralarında karşılaştırıldıklarında bu etki daha net bir şekilde anlaşılmaktadır. Tablo 2'de görüldüğü gibi, ATYB'nin viskozite ve yoğunluk değeri ADYB'ye göre daha yüksektir. Bunun sonucunda ATYB'nin termik verimi bütün motor yüklerinde ADYB'den daha yüksek çıkmış ve motor yükü artışı ile bu fark artmıştır. Selvam ve Vadivel [31] ile Awad ve diğ. [32]; hayvansal yağ kökenli biyomotorin yakıtları ile ortak-hat direkt püskürtmeli motorlarda gerçekleştirdikleri çalışmalarında, motorinin termik veriminin daha yüksek olduğu ve motor yükü ile farkın arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Burada üzerinde durulması ve dikkatle irdelenmesi gereken bir durum ortaya çıkmaktadır. Çeşitli hammaddelerden üretilen biyomotorin yakıtlarının, mekanik kontrollü yakıt püskürtme sistemlerine sahip diesel motorlarda kullanıldığı çalışmaları kapsayan literatür incelendiğinde; biyomotorin yakıtların ÖYT değerlerinin motorine oranla daha yüksek olmasına karşılık, termik verimlerinin genellikle daha iyi olduğu görülmektedir [33]-[35]. Termik verimlerle bu olumlu durum; biyomotorin yakıtlarının sıkıştırılabilirlikleri (bulk modulus) daha düşükses iletim hızları (speed of sound) daha yüksek olduğundan yakıt hattı basınçlarının daha erken yükselmesi sonucu görece daha erken püskürtülmeye başlamaları, setan sayılarının da etkisiyle daha erken yanma başlangıçları ve oksijen içeriklerinden dolayı daha uzun yanmaları ile açıklanmaktadır. Nitekim; ilgili çalışmalarda bu durum silindir içi gaz basınç eğrileri ve ısı yayılım eğrilerinde net bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte, yakıt enjeksiyon başlangıcının yakıt basıncı ile belirlendiği mekanik püskürtme sistemlerden farklı olarak ortak-hat sisteminde yakıt enjeksiyonu enjektöre gönderilen sinyal ile kumanda edilmektedir. Dolayısıyla, yakıttan kaynaklı enjeksiyon başlangıcının öne kayması olmayacaktır. Bu durumda, ortak hatlı sistemler ile gerçekleştirilen çalışmalardaki yorumlar da değişecektir. Bir sonraki bölümde verilecek olan yanma karakteristikleri incelendiğinde biyomotorin yakıtlarının termik verimlerinin neden motorininkinden daha düşük olduğu net bir şekilde anlaşılmaktadır.

3.2 Yanma karakteristikleri

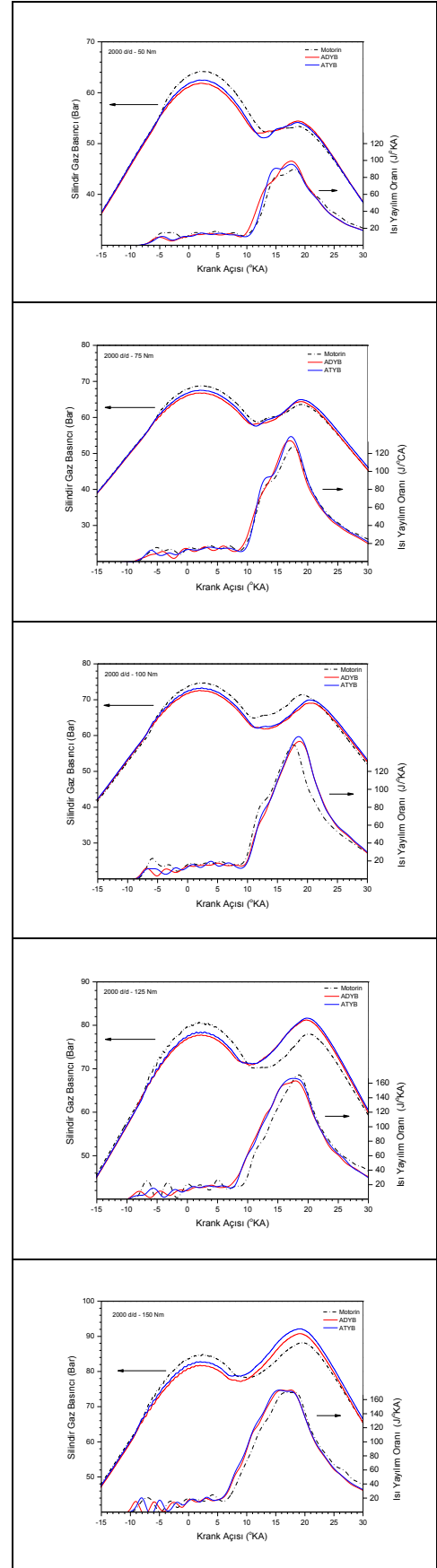
Silindir içi gaz basıncı değerleri ve özellikle ulaşılan pik basıncın Üst Ölü Noktaya (ÜÖN) göre pozisyonu, motor verimi üzerinde oldukça kritik ve belirleyici bir etkiye sahiptir. Motor testlerinde ulaşılan silindir gaz basınç değerleri ve ısı yayılım oranları (IYO) Şekil 4'te verilmiştir. Test motoru iki enjeksiyon (bir pilot enjeksiyon, bir ana enjeksiyon) stratejisi ile çalıştığından silindir gaz basıncı grafiklerinde iki adet pik bulunmaktadır.

Şekiller incelendiğinde, tüm test yakıtları için ulaşılan maksimum silindir içi gaz basıncı (P_{max}) değerlerinin motor yükü ile arttığı görülmektedir. Bu durum motor yükü ile silindir içi sıcaklıklarının artması ile açıklanabilir. Birinci piklerde, test edilen tüm motor yüklerinde, motorin ile daha yüksek değerlere ulaşılmaktadır. İkinci pik değerleri 50 ve 75 Nm'lerde hemen hemen aynı iken, 100 Nm'de motorin için daha yüksek, 125 ve 150 Nm'lerde ise biyomotorin yakıtlar için daha yüksek olmuştur. Burada en dikkat çekici sonuç 125 Nm'de elde edilmiştir. P_{max} ve maksimum basınçların elde edildiği krank açılarının ($^{\circ}KA_{Pmax}$) verildiği Tablo 4'te görüldüğü gibi; tüm test yakıtları için, 50-75-100 Nm'lerde P_{max} değerine birinci piklerde, 150 Nm'de ikinci piklerde ulaşılmıştır. Bununla birlikte; 125 Nm'de motorin için P_{max} birinci pikte elde edilirken biyomotorinlerin ikisi için de ikinci pikte elde edilmiştir.

Tablo 4: P_{max} (bar) ve $^{\circ}KA_{Pmax}$ değerleri.

	Motorin		ATYB		ADYB	
	P_{max}	$^{\circ}KA_{Pmax}$	P_{max}	$^{\circ}KA_{Pmax}$	P_{max}	$^{\circ}KA_{Pmax}$
50 Nm	64.21	+2.0	62.48	+1.8	61.87	+2.0
75 Nm	68.78	+2.4	67.54	+2.2	66.76	+2.0
100 Nm	74.75	+2.2	73.32	+2.4	72.60	+2.0
125 Nm	80.69	+2.6	81.67	+19.8	81.23	+19.6
150 Nm	88.24	+19.8	92.14	+19.4	90.79	+19.0

ATYB ve ADYB ile 125 ve özellikle 150 Nm'lerde daha yüksek silindir içi gaz basınçları elde edilmesine rağmen bu yakıtlara ait termik verimlerin daha düşük olması $^{\circ}KA_{Pmax}$ değerleri ile açıklanabilir. ÜÖN'den uzaklaştıkça silindir içi basıncının faydalı işe dönüştürülme oranı da azalmaktadır. Bu çalışmada tüm yakıtlar için motor devri ve yükünün sabit olduğu göz önünde bulundurulduğunda, elektronik kontrol ünitesinin (EKÜ) motor gaz pedalı pozisyonuna bağlı olarak püskürtme karakteristiğine müdahale ettiği görülmektedir. Biyomotorin yakıtların ısı değerleri daha düşük olduğundan, motor testleri sırasında aynı motor yükü değerlerine ulaşabilmek için gaz pedalına daha fazla basılması gerekmektedir. EKÜ ise buna bağlı olarak kalibrasyonundaki stratejiye göre püskürtme süreleri, püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerini kumanda etmektedir. Farklı hammaddelerden üretilen biyomotorin yakıtların ortak hatlı motorlarda kullanımının incelendiği literatürde, biyomotorin yakıtları ile daha yüksek püskürtme basınçlarına ulaşıldığı ve püskürtmenin bir miktar daha öne kaydığını belirten çalışmalar bulunmaktadır [36],[37]. Şekil 4'teki IYO değerleri incelendiğinde, 50, 75 ve 100 Nm'lerde önemli bir fark yokken, özellikle 125 ve 150 Nm motor yüklerinde biyomotorinler ile yanmanın bir miktar daha önce başladığı ve bittiği görülmektedir. Bu durum püskürtme başlangıçları ile açıklanabilir.



Şekil 4: Silindir gaz basıncı ve ısı yayılım değerleri.

Motor yükündeki artış ile birlikte, tüm yakıtlar daha erken yanmaya başlamış ve daha yüksek IYO değerlerine ulaşılmıştır. Burada dikkat çekici bir diğer durum ise, 125 ve 150 Nm'lerde maksimum IYO eğrilerindeki düzlükten de anlaşılacağı üzere, motor yükü arttıkça motordaki yanmanın ön karışım-kontrollü yanmadan difüzyon-kontrollü yanmaya dönüştüğüdür.

Yakıtların motor testlerinde elde edilen tutuşma gecikmesi ve yanma süreleri Tablo 5'te verilmiştir. Tutuşma gecikmesi süreleri motor yükü ile farklı değerler almıştır. Bununla birlikte, tüm test yakıtları için en uzun tutuşma gecikmesi süresi 150 Nm'de gerçekleşmiştir. Bu durum püskürtme başlangıcı ve püskürtülen yakıt miktarı ile açıklanabilir. Motorin ve biyomotorin yakıtlarının tutuşma gecikmesi süreleri arasında en büyük fark 1.98 °KA ile 50 Nm'de ölçülmüştür. Diğer motor yüklerinde tutuşma gecikmesi değerleri arasında anlamlı farklar bulunmamaktadır. ATYB ve ADYB yakıtlarının motorine oranla daha yüksek viskoziteleri, düşük setan sayıları ve uçuculuklarına rağmen tutuşma gecikmesi sürelerindeki benzerlik biyomotorinlerin püskürtme basınçlarının daha yüksek olması ve görece daha erken (ÜÖN'ye daha yakın) püskürtülmeleri ile yorumlanabilir.

Yanma süresi değerleri incelendiğinde; en uzun yanma süresinin motorin ile 50 Nm'de gerçekleştiği, ATYB ve ADYB için ise 150 Nm'de olduğu görülmektedir. Motorin ve biyomotorin yakıtlarının yanma süresi değerleri arasındaki en büyük fark 3.54 °KA ile 50 Nm'de ölçülmüş ve bu fark motor yükü ile azalarak 150 Nm'de yaklaşık 1.0 °KA olmuştur. ATYB ve ADYB yakıtları ile daha fazla yakıt püskürtülmesi (düşük ısı değerlerinden dolayı) ve bu yakıtların oksijen içeriklerine rağmen yanma sürelerinin düşük olması, püskürtme başlangıcı ve püskürtme basıncı ile açıklanabilir. Biyomotorin yakıtlarının yanma süresi değerlerinin ise birbirlerine oldukça yakın olduğu anlaşılmaktadır. Motorinin termik veriminin biyomotorinlerden daha yüksek olması üzerinde görece daha uzun yanma sürelerinin de belirleyici bir parametre olduğu değerlendirilmiştir.

Tablo 5: Tutuşma gecikmesi (TG, °KA) ve Yanma süresi (YS, °KA) değerleri.

	Motorin		ATYB		ADYB	
	TG	YS	TG	YS	TG	YS
50 Nm	5.33	21.42	7.31	17.88	7.31	17.48
75 Nm	7.33	18.92	7.28	16.80	6.90	16.81
100 Nm	6.00	19.52	6.83	17.18	6.90	17.23
125 Nm	6.34	19.42	7.29	17.60	7.48	17.63
150 Nm	7.52	19.47	7.81	18.33	7.77	17.91

4 Değerlendirme

Bu çalışmada; düşük kaliteli, yüksek asit değerli atık tavuk yağı ve atık deri yağından üretilen biyomotorin yakıtlarının, yakıt kalitesine son derece hassas olan ortak-hat direkt püskürtmeli bir diesel motorun performans ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Testler sonucunda her iki biyomotorin yakıtının da performans karakteristiklerinin motorininkilere oranla daha kötü olduğu tespit edilmiştir. Tüm motor yüklerinin ortalaması alındığında, ATYB'nin FÖYT değerinin motorinden %25.28 daha fazla, termik veriminin ise %7.24 daha düşük; ADYB'nin ise FÖYT'sinin %20.42 daha fazla iken, termik veriminin ise %3.92 daha düşük olduğu görülmüştür.

Performans parametrelerindeki (özellikle FÖYT değerlerindeki) meydana gelen bu farkın sebebi, biyomotorinlerin ısı değerlerinin, motorinin ısı değerine kıyasla daha düşük olmasıdır. Bununla birlikte; her iki biyomotorin yakıtı ile daha yüksek Pmax değerlerine ulaşıldığı yüksek motor yüklerinde dahi düşük verim elde edilmiştir. Ortak-hat sistemi gaz pedalının pozisyonuna bağlı olarak püskürtme karakteristiklerine etki etmiştir. Bunun doğal sonucu olarak yanma başlangıçları, °KAPmax değerleri ve yanma süreleri yakıt tipine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Burada en önemli parametre; motorinin fiziko-kimyasal yakıt özelliklerine göre kalibre edilen EKÜ'nün, farklı yakıt özelliklerine sahip olan biyomotorinleri de aynı stratejiyle püskürtmesidir. Ortak hatlı diesel motorlarda biyomotorin yakıtları kullanıldığında daha yüksek verimlere ulaşılabilmesi için; EKÜ, biyomotorin yakıt özelliklerine göre kalibre edilmeli ve bu yakıtlara göre tasarlanan uygun enjeksiyon haritaları oluşturulmalıdır. Farklı yakıtlar ile farklı enjeksiyon stratejisinin gerçekleştirilebilmesi için ise depodaki yakıt türünün EKÜ'ye bildirilmesi gerekmektedir. Bunun için yakıtların di-elektrik sabitelerindeki farklılıktan yararlanılarak değişik yakıt türleri için EKÜ'ye farklı sinyaller gönderilebilir. Ayrıca, hayvansal kökenli biyomotorin yakıtları ile uzun süreli motor dayanım testleri gerçekleştirilmeli ve bu yakıtların egzoz emisyon sistemleri ile uyumu incelenmelidir.

5 Kaynaklar

- [1] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. "Petrol Piyasası Sektör Raporu 2016". www.epdk.org.tr/TR/Dokumanlar/Petrol/YayinlarRaporlar/Yillik (30.01.2018).
- [2] Resmi Gazete. "Motorin Türlerine Biodiesel Harmanlanması Hakkında Tebliğ". www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/06/20170616-8.htm (30.01.2018).
- [3] Bitkisel Yağ Sanayicileri Derneği Türkiye İstatistikleri. www.bsyd.org.tr/Istatistikler.aspx (30.01.2018).
- [4] Resmi Gazete. "Motorin Türlerine İlişkin Teknik Düzenleme Tebliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ". www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/09/20110927-4.htm (30.01.2018).
- [5] Alptekin E, Canakci M, Sanli H. "Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant". *Waste Management*, 34(11), 2146-2154, 2014.
- [6] Reddy ANR, Salah AA, Islam MS, Hamdan S, Rezaur MH, Masjuki HH. "Experimental evaluation of fatty acid composition influence on jatropha biodiesel physicochemical properties". *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(1), 0131103 2018.
- [7] Ramos MJ, Fernandez CM, Casas A, Rodriguez L, Perez A. "Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties". *Bioresource Technology*, 100(1), 261-268, 2009.
- [8] Canakci M, Sanli H. "Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties". *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35(5), 431-441, 2008.
- [9] Knothe G. "Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters". *Fuel Processing Technology*, 86, 1059-1070, 2005.

- [10] Martinez G, Sanchez N, Encinar JM, Gonzalez JF. "Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and oil mixtures. Influence of methyl ester distribution". *Biomass and Bioenergy*, 63, 22-32, 2014.
- [11] Buyukkaya E, Soyhan HS, Gokalp B. "Effects of rapeseed oil addition to a diesel fuel on thermodynamic efficiencies". *International Journal of Exergy*, 14(1), 101-124, 2014.
- [12] Can O. "Combustion Characteristics, Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fueled with a Waste Cooking Oil Biodiesel Mixture". *Energy Conversion and Management*, 87, 676-686, 2014.
- [13] Buyukkaya E. "Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics". *Fuel*, 89(10), 3099-3105, 2010.
- [14] Shahir VK, Jawahar CP, Suresh PR, Vinod V. "Experimental investigation on performance and emission characteristics of a common rail direct injection engine using animal fat biodiesel blends". *Energy Procedia*, 117, 283-290, 2017.
- [15] Behcet R, Oktay H, Cakmak A, Aydin H. "Comparison of exhaust emissions of biodiesel-diesel fuel blends produced from animal fats". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 157-165, 2015.
- [16] Emiroglu AO, Keskin A, Sen M. "Experimental investigation of the effects of turkey rendering fat biodiesel on combustion, performance and exhaust emissions of a diesel engine". *Fuel*, 216, 266-273, 2018.
- [17] Canakci M, Van Gerpen J. "Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids". *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 44, 1429-1436, 2001.
- [18] Adewale P, Dumont MJ, Ngadi M. "Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes and associated production techniques". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 574-588, 2015.
- [19] Kirubakaran M, Selvan VAM. "A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(1), 390-401, 2018.
- [20] Verma P, Sharma MP. "Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1063-1071, 2016.
- [21] Bankovic-Ilic IB, Stojkovic IJ, Stamenkovic OS, Veljkovic VB. "Waste animal fats as feedstocks for biodiesel production". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 238-254, 2014.
- [22] Alptekin E, Canakci M. "Optimization of pretreatment reaction for methyl ester production from chicken fat". *Fuel*, 89(12), 4035-4039, 2010.
- [23] Alptekin E, Canakci M. "Optimization of transesterification for methyl ester production from chicken fat". *Fuel*, 90(8), 2630-2638, 2011.
- [24] Sayin C, Gumus M, Canakci M. "Effect of fuel injection pressure on the injection, combustion and performance characteristics of a DI diesel engine fueled with canola oil methyl esters-diesel fuel blends". *Biomass and Bioenergy*, 46, 435-446, 2012.
- [25] Dhamele N, Parthasarathy RN, Gollahalli SR. "Effects of turbulence on the combustion of partially premixed flames of canola methyl ester and diesel blends". *Journal of Combustion*, 2011, 1-13, 2011.
- [26] Barrios CC, Dominguez-Saez A, Martin C, Alvarez P. "Effects of animal fat based biodiesel on a TDI diesel engine performance, combustion and particle number and size distribution". *Fuel*, 117, 618-623, 2014.
- [27] Jeong K, Lee D, Park S, Lee CS. "Effect of two-stage fuel injection parameters on NO_x reduction characteristics in a DI diesel engine". *Energies*, 4(12), 2049-2060, 2011.
- [28] Alptekin E, Canakci M, Ozsezen AN, Turkcan A, Sanli H. "Using waste animal fat based biodiesels-bioethanol-diesel fuel blends in a DI diesel engine". *Fuel*, 157, 245-254, 2015.
- [29] Li Z, Wu Y, Yang H, Cai C, Zhang H, Hashiguchi K. "Effect of liquid viscosity on atomization in an internal-mixing twin-fluid atomizer". *Fuel*, 103, 486-494, 2013.
- [30] Ejim CE, Fleck BA, Amirfazli A. "Analytic study for atomization of biodiesel and their blends in a typical injector: Surface tension and viscosity effects". *Fuel*, 86(10), 1534-1544, 2007.
- [31] Selvam DJP, Vadivel K. "Performance and emission analysis of a DI diesel engine fuelled with methyl esters of beef tallow and diesel blends". *Procedia Engineering*, 38, 342-358, 2012.
- [32] Awad S, Loubar K, Tazerout M. "Experimental investigation on the combustion, performance and pollutant emissions of biodiesel from animal fat residues on a direct injection diesel engine". *Energy*, 69, 826-836, 2014.
- [33] Sanli H, Canakci M, Alptekin E, Turkcan A, Ozsezen AN. "Effects of waste frying oil based methyl and ethyl biodiesel fuels on the performance, combustion and emission characteristics of a DI diesel engine". *Fuel*, 159, 179-187, 2015.
- [34] Oner C, Altun S. "Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in direct injection diesel engine". *Applied Energy*, 86(10), 2114-2120, 2009.
- [35] Hazar H. "Cotton methyl ester usage in a diesel engine equipped with insulated combustion chamber". *Applied Energy*, 87(1), 134-140, 2010.
- [36] Tziourtzioumis D, Stamatelos A. "Effect of a 70% biodiesel blend on the fuel injection system operation during steady-state and transient performance of a common rail diesel engine". *Energy Conversion and Management*, 60, 56-67, 2012.
- [37] Alptekin E. "Emission, injection and combustion characteristics of biodiesel and oxygenated fuel blends in a common rail diesel engine". *Energy*, 119, 44-52, 2017.