

## Hardal Yağından Biyodizel Üretiminin Optimizasyonu ve Motor Performans Testleri

Faruk Emre Aysal<sup>1</sup>, Fatih Aksoy<sup>1</sup>, Adil Şahin<sup>1</sup>, Laçine Aksoy<sup>2</sup>, Harun Yıldırım<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 03200 Afyonkarahisar

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 03200 Afyonkarahisar  
eposta: faksoy@aku.edu.tr, faysal@aku.edu.tr, lacinetur@aku.edu.tr, hyildirim@aku.edu.tr

Geliş Tarihi:19.02.2014; Kabul Tarihi: 29.04.2014

### Özet

Bu çalışmada hardal yağından biyodizel üretim sürecinin optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon süreci metanol/yağ oranı, katalizör konsantrasyonu reaksiyonu süresi ve sıcaklığı gibi parametrelere göre ele alınmıştır. Değişen oranlarda hardal yağı-dizel karışımından elde edilen biyodizel yakıtının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkileri incelenmiştir. Biyodizel oranı arttıkça içten yanmalı motorun güç ve momentini azalırken, özgül yakıt tüketimi (SFC) artmıştır. Ayrıca, biyodizel, dizel yakıtları ve biyodizel-dizel yakıtlarının karışımlarının NO<sub>x</sub> ve CO emisyonları karşılaştırılmıştır. Hardal yağı biyodizelinin emisyon değerlerinin dizel yakıttan düşük olduğu görülmüştür..

### Anahtar kelimeler

Hardal Yağı;  
Optimizasyon; Biodizel;  
Motor performansı

## Optimization of Biodiesel Production from Mustard Oil and Engine Performance Tests

### Abstract

In this study mustard oil produced from biodiesel production process are optimized. Parameters such as methanol / oil ratio, the catalyst concentration, reaction time and temperature have been investigated in the optimization process. Mustard oil-diesel fuel consisting of blends at the different proportions has been examined effects on engine performance and exhaust emissions. While proportion of biodiesel rising, power and torque of the internal combustion engine are reduced and specific fuel consumption (SFC) is increased. In addition, biodiesel, diesel fuels and blends of biodiesel-diesel fuels were investigated and their compared to NO<sub>x</sub> and CO emissions. It is found that biodiesel of mustard oil emissions more less than that of diesel fuel.

### Keywords

Mustard Oil;  
Optimization;  
Biodiesel; Engine  
Performance Tests

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Günümüzde artan çevre kirliliği, petrol rezervlerinin azalması ve fiyatlarındaki artış araştırmacıları alternatif yakıtlar üzerine çalışmaya yönlendirmiştir. Ayrıca petrol kaynaklarının belli başlı bazı ülkelerde bulunması sebebiyle, enerji bağımlılığından kurtulmak isteyen ülkeler için

alternatif enerji kaynaklarının araştırılması oldukça önemlidir. (Nabi, Akhter ve Shahadat 2006).

Bu araştırmalardan biri de içten yanmalı motorlarda dizel yakıt yerine alternatif yakıt kullanımınıdır. Petrol fiyatlarındaki artış ve egzoz emisyonlarının çevreye karşı olumsuz etkisi karşısında alternatif yakıtlar dizele göre avantajlara sahiptir (Berrios ve Skelton 2008). Alternatif yakıt olarak karanja, jatropha ve mahua gibi

yenilemeyen ve kanola, kolza, soya, keten, ay çekirdeği gibi yenilebilir bitkilerin yağları da alternatif yakıt üretiminde kullanılmıştır (Yucesu, Altın ve Çetinkaya 2001) (Demirbas 2009) (Knothe ve Hanna 1999) (Biswas ve Parivesh 2002).

Bitkisel yağların sülfür içeriğinin az olması, yüksek setan sayısı, yapısında oksijen bulunması yüksek parlama noktasına sahip olması, yağlama özelliklerinin iyi olması gibi avantajları nedeniyle alternatif yakıt üretiminde kullanılmaktadır (Aktaş ve Segmen 2008). Alternatif yakıt olarak biyodizel, bitkisel veya hayvansal yağlardan transesterifikasyon ile elde edilen uzun zincirli mono alkil esterlerdir (Crabbe, et al. 2001).

Birçok araştırmacı dizel yakıtına alternatif bulmak için bitkisel yağlardan yararlanmış ve üretimin optimize edilmesi için çalışmalar yapmıştır. Usta ve ark. (2004) fındık yağı stoku ve kullanılmış ay çiçek yağı karışımından üretilen biyodizelin, dizel motorda yanmasını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada fındık yağı stoku ve atık ayçiçek yağı karışımından sülfürik asit ve sodyum hidroksit kullanarak iki basamaklı proses ile biyodizel üretilmiştir. Deneysel sonuçlar fındık ve ay çiçek yağı karışımlarının içten yanmalı motorlarda dizel yakıtına alternatif olarak kullanılabilirliğini göstermiştir (Usta, et al. 2004). Gürü ve ark. (2002) Mn, Mg, Cu ve Ca metallerinin organik esaslı metal bileşiklerini sentezlemiş ve bu bileşiklerin çözeltilerini dizel yakıtı katkı maddesi olarak test etmişlerdir (Gürü, Karakaya, et al. 2002). Kalam ve Masjuki'de (2002) yaptıkları çalışmada, hurma yağından elde ettikleri biyodizelin antikorozif katkı maddeleri eklenerek dizel motorlarda performans, emisyon ve aşınma - dayanıklılık niteliklerini incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda, üretilen biyodizelin motorda yağlayıcı özelliği olduğu belirlenmiştir (Kalam ve Masjuki 2002). Altıparmak ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada tall yağı biyodizeli dizel yakıtı karışımının dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Biyodizel - dizel yakıt karışımlarının, motor momentini ve motor gücünü sırasıyla %6.1 ve %5.9 oranında düşürdüğü belirlenmiştir. Ayrıca CO emisyonlarını %38.9

oranında düşürdüğü ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını %30 artırdığı gözlenmiştir (Altıparmak, et al. 2007). Lopez ve Goodwin (2005) değişik katalizörler için triasetinin metanol ile transesterifikasyonundaki kinetiğini ve seçiciliğini incelemişlerdir. Katı asit katalizör olarak Amberlyst-15, Nafion NR50, sülfatlanmış zirkon, tungstenlenmiş zirkon ve ETS-10 (H), katı baz katalizör olarak MgO ve ETS-10 (Na,K) kullanılmıştır. Katı katalizörler olarak NaOH ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'in reaksiyonları karşılaştırılmıştır. Amberlyst-15, Nafion NR50, sülfatlanmış zirkon ve ETS-10 (Na,K) uygun aktiviteler göstermelerinden dolayı alternatif olarak önerilmiştir (Lopez, et al. 2005). Wang ve ark. (2006) Çin restoranlarındaki atık yemek yağların ekonomik ve pratik bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla geleneksel asit ve yeni iki aşamalı kataliz işlemi karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır. Asit katalizli işlemde, atık yemek yağlarını sülfürik asit katalizörlüğünde 95°C'de metanol ile reaksiyona sokarak, reaksiyon süresi, metanol miktarı ve katalizör miktarının reaksiyon verimi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çift katalizli işlemde ise atık yemek yağlarını ilk aşamada demir sülfat katalizörlüğünde metanol ile karıştırmışlardır. İkinci aşamada ise ilk aşama sonunda elde edilen yağ fazını %1 potasyum hidroksit katalizörlüğünde metanol ile karıştırarak yine reaksiyon süresi, metanol miktarı ve katalizör miktarının reaksiyon verimi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma sonunda, iki aşamalı işlemin atık yemek yağlarının biyodizele dönüştürülmesinde kolay ve ekonomik bir metot olduğu sonucuna varılmıştır (Wang, et al. 2006). Meher ve ark. (2006) yaptıkları bir çalışmada Hindistan'da yetişen karanja bitkisinden elde edilen ve uzun süreli depoda bekleme sonucu serbest yağ asidi içeriği yükselmiş olup gıda amaçlı kullanılmayan yağdan biyodizel üretimi gerçekleştirmiştir. FFA değeri %17 civarında olan bu yağlardan bazik katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel elde edilmesinin mümkün olmaması nedeniyle asidik ön işlem uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmada ilk aşamada yüksek olan FFA değerini düşürmek için % 0.5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 6:1 mol oranında metanol ile asidik transesterifikasyon işlemi yapılmıştır. FFA değeri

düştükten sonra bazik transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretimi yapılmıştır. Neticede %97 oranında biyodizel verimi elde etmişlerdir (Meher, Sagar ve Naik 2006).

Antolin ve ark. (2002) ayçiçeğinden elde edilen biodizel yakıtının optimizasyonunu yapmıştır. Taguchi metodu ile yapılan optimizasyonda en yüksek proses veriminde yüksek kalitede biodizel elde edilmesi amaçlanmıştır. Ayçiçeği yağından elde edilen biodizelin viskozite, parlama noktası, asit içeriği gibi özelliklerinin karakterizasyonu yapılmıştır (Antolin, et al. 2002). Ghadge ve Raheman, (2006) mahua yağından elde edilen biyodizel yakıtın üretimini optimize etmişlerdir. İstatiksel analiz yöntemiyle yaptıkları çalışmada deneysel verilerden yararlanarak bir matematiksel model oluşturulmuştur (Ghadge ve Raheman 2006). Tashtoush ve ark. (2004) hayvansal atık yağlarının, etanol ve metanol ile biyodizel dönüşümünün optimizasyon koşullarını belirlemiştir. Reaksiyon sıcaklığı, alkol/yağ molar oranı, alkol ve katalizör cinsi gibi parametreler kullanılarak biyodizel üretim süreci optimize edilmiştir (Tashtoush, Al-Widyan ve Al-Jarrah 2004).

Bu çalışmada ise 1.67 serbest yağ asidi içeren (FFA) hardal yağından transesterifikasyon metodu kullanılarak üretim süreci optimize edilmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonunda sıcaklık, zaman, katalizör ve alkol miktarı değiştirilerek optimum koşullarda hardal yağından biyodizel elde edilmiştir. Biyodizel (B100) ve %50 Biyodizel-%50dizel (B50) karışımının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Motor performans testleri tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda gerçekleştirilmiştir.

## **2. Materyal ve Metot**

### **2.1 Biyodizel Optimizasyonu**

Hardal yağı ticari bir firmadan elde edilmiştir. Fenolftalein ve potasyum hidroksit kullanılarak hardal yağının FFA değeri ölçülmüştür. Yağın FFA

değeri %1.67 olarak bulunmuştur. Yağın FFA içeriği %3'ten düşük olduğundan tek basamaklı alkali transesterifikasyon metodu tercih edilmiştir. (Riberto, Castro ve Carvalho 2011)

Transesterifikasyon reaksiyonunda katalizör olarak NaOH kullanılmıştır. Bu reaksiyonda öncelikle CH<sub>3</sub>OH ve NaOH karıştırıcılı ısıtıcı kullanılarak geri soğutucu altında 40 °C de 30 dakika süreyle ısıtılmıştır. Böylece katalizör-metanol karışımı aktive edilmiştir. Bu karışıma hardal yağı eklenip tekrar geri soğutucu altında ısıtılmıştır. Yapılan tüm deneylerde karıştırma hızı 600 rpm seçilmiş, 150 g hardal yağı reaksiyona sokulmuştur.

Reaksiyon sonunda ayırma hunisi yardımıyla gliserin fazı ayrılmıştır. Hunide kalan biyodizeli saflaştırmak amacıyla 90 °C'de saf su ile yıkanmıştır. Bu işlem sonunda ortamda kalan su ve alkolün uzaklaştırılması için biyodizel 110 °C'ye kadar ısıtılmıştır.

Bu çalışmada katalizör kütlece metanol:yağ oranı, reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığı parametreleri kullanılarak optimum üretim koşulları belirlenmiştir. Katalizör derişimi yağ'a göre kütlece 0.25% - 1.25% değerleri arasında değiştirilmiştir. Metanol- hardal yağı oranı kütlece 10% -30% değerleri (%10-15-20-25-30) arasında değiştirilmiştir. Reaksiyon sıcaklığı ise 40 °C – 80 °C değerleri arasında değiştirilmiştir. Reaksiyon süresi ise 30 dakika ile 150 dakika aralığında 30 dakika aralıklarla değiştirilmiştir.

### **2.2 Motor Performans Test Düzenegi**

Deneyler tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı ve direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda gerçekleştirilmiştir. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

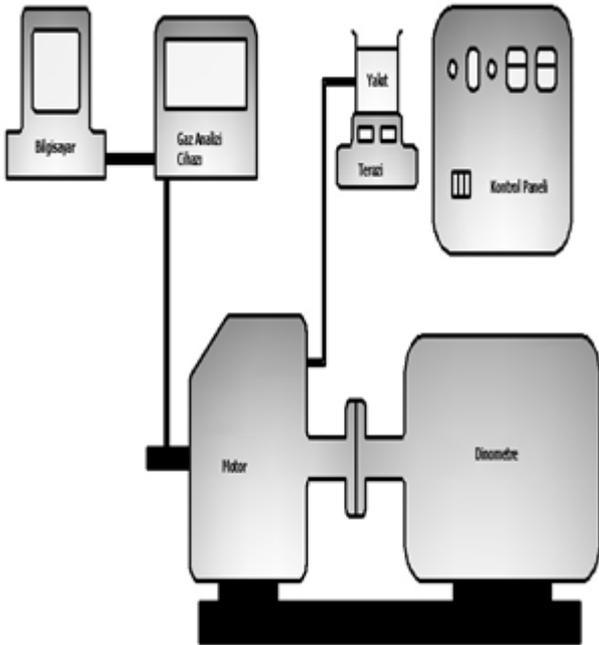
Deney öncesi motor yağı ve filtresi değiştirilmiştir. Deney başlangıcında, motor yaklaşık olarak 10 dakika çalıştırılarak ısıtılmış ve ölçümlere motor çalışma sıcaklığına geldikten sonra başlanmıştır. İlk

test dizel yakıtı ile yapılmıştır.

**Tablo 1.** Deney motorunun teknik özellikleri.

Özellikler	
Marka	Antor 3 LD 510
Silindir Sayısı	1
Hacim (cm <sup>3</sup> )	510
Çap/Strok (mm)	85-90
Sıkıştırma Oranı	17.5/1
Maksimum Motor Torku (Dev/dk)	32.8/1800
Soğutma Sistemi	Hava Soğutmalı
Maksimum Motor Gücü (Dev/dk)	9/3000

Dizel yakıtı ile biyodizel yakıtları için tam gaz-değişik hız testi ile motor momenti, motor gücü, özgül yakıt sarfiyatı, CO ve NO<sub>x</sub> emisyon değerleri ölçülmüştür.



**Şekil 1.** Test sisteminin şematik resmi.

Motor momenti ölçümlerinde 0.01 hassasiyetinde yük hücrelerine sahip bir elektrikli dinamometre

kullanılmıştır. Deneyler tam yük şartlarında 1100–3000 rpm motor devirleri arasında gerçekleştirilmiştir. NO<sub>x</sub> ve CO egzoz emisyonu ölçümü Testo 350 XL marka taşınabilir gaz analiz cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motor test düzeneğinin şematik resmi Şekil 1’de görülmektedir.

**Tablo 2.** Hassasiyet ve Belirsizlikler.

Hassasiyet ve Belirsizlikler	
Yakıt (g)	±1 g
Zaman (s)	±%0.5
Tork (Nm)	±%1
Güç (kW)	±%1.41
ÖYT (g/kWh)	±%1.5
CO (ppm)	±1 ppm
NO <sub>x</sub> (ppm)	±1 ppm

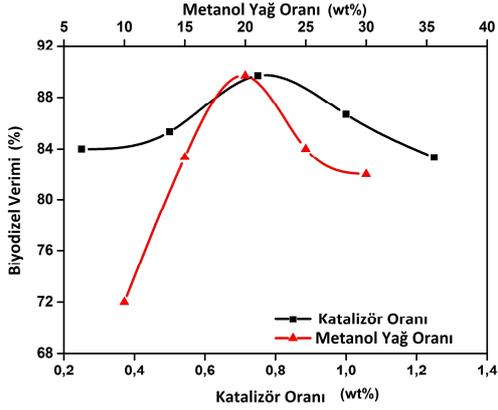
Üretilen biyodizelin motor performans ve emisyon değerlerinin ölçüldüğü deney düzeneğinin hassasiyeti ve belirsizlik oranları ise Tablo 2’de verilmiştir.

### 3. Bulgular

#### 3.1 Katalizör Konsantrasyonunun Etkisi

Transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretiminde çeşitli katalizörler kullanılmıştır. Transesterifikasyon işlemi sırasında kullanılan başlıca katalizör olarak NaOH ve KOH kullanılmıştır. Alkali hidroksitler transesterifikasyon sürecini hızlandırıp uygun reaksiyon koşullarında çalışmaktadır. Üretilen biyodizeller için en yüksek biyodizel verimi NaOH kullanımında görülmüştür (Thomas, Birney ve Aulda 2013). Transesterifikasyon sürecinde 150 g hardal yağı, %20wt alkol, reaksiyon sıcaklığı 60 °C ve reaksiyon süresi 90 dakika alınmıştır. Reaksiyonda kullanılan NaOH konsantrasyonu %0.25wt-%1.25wt arasında değiştirilmiştir. Şekil 2’de katalizör değişiminin biyodizel verimine etkisi görülmektedir. Katalizör için optimum oran %0.75wt olarak edilmiştir. Daha

yüksek oranlarda katalizör uygulamasında verimin düştüğü gözlemlenmiştir. Reaksiyonun yüksek verimde tamamlanması için %0.25wt katalizör oranı yetersiz kalmıştır. Optimum sonucun elde edildiği %0.75wt NaOH den sonra katalizör içindeki sodyum, hardal yağı içindeki serbest yağ asidiyle reaksiyona girmiştir. Bu durumda gerçekleşen sabunlaşma biyodizel verimini düşürmüştür (Sinha., Agarwal ve Garg. 2008) (Phan ve Phan 2008).



Şekil 2. Katalizör ve Metanol – Yağ Oranı değişiminin biyodizel verimine etkisi.

### 3.2 Metanol Yağ Oranı Etkisi

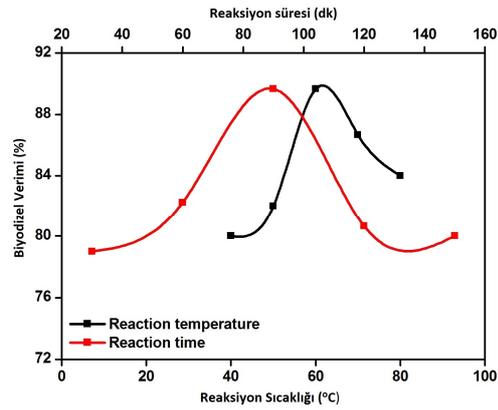
Biyodizel üretiminde transesterifikasyon işlemi yapılırken yağları esterleştirmek için metanol gibi kısa zincirli alkol kullanılır (Sinha., Agarwal ve Garg. 2008). Üretimde kullanılan alkol ile yağ arasındaki oran biyodizel verimini etkileyen en önemli faktörlerdendir. Alkol yağ arası stokiyometrinin 3:1 olması gerekmektedir. Bununla birlikte birçok çalışmada, kullanılan katalizör ve yağın kalitesine göre, fazladan alkol eklenerek karışımın stokiyometrisi artırılmıştır (Phan ve Phan 2008).

Transesterifikasyon işleminde diğer parametreler sabit tutularak reaksiyona %wt 10 – 15 -20 – 25 - 30 değerlerinde metanol sokulmuştur. Katalizör oranı %0.75 wt, reaksiyon süresi 90 dakika, reaksiyon sıcaklığı 60 °C seçilmiştir. Şekil 2’de görüldüğü gibi %20wt metanol:yağ oranında en yüksek verimin elde edildiği görülmüştür. %20wt metanol:yağ oranından sonra biyodizel veriminin düştüğü gözlemlenmiştir. Bitkisel ve hayvansal yağ

asitlerinin metil alkol ile tepkimeye girmesi sonucunda gliserin ve biyodizel oluşmaktadır. Reaksiyona daha fazla metil alkol girmesi biyodizel ve gliserin oluşumunu arttırmaktadır. Bu durumda gliserin artışı verimi düşürmüş olabilir (Phan ve Phan 2008).

### 3.3 Reaksiyon Sıcaklığının Etkisi

Esterleşme işlemi kullanılan yağın özelliklerine bağlı olarak farklı sıcaklıklarda yapılmaktadır. Üretim ortam sıcaklığında yapılabileceği gibi kaynama sıcaklığına yakın sıcaklıklarda da yapılabilmektedir (Phan ve Phan 2008). Reaksiyon sıcaklığını optimize etmek için diğer parametreler sabit tutularak üretim yapılmıştır. Reaksiyon için %20wt metanol:yağ oranı, %0.75wt katalizör konsantrasyonu, 90 dakika reaksiyon süresi ve 150 g hardal yağı kullanılmıştır. Deneyler 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3 göstermektedir ki en yüksek biyodizel üretim verimi 60 °C’de elde edilmiştir. 60 °C sıcaklıktan sonra, sıcaklığın artması ile metil alkole buharlaşma eğilimi artmıştır. Bu durumda oluşan kabarcıklar reaksiyona giren metil alkol miktarını azaltmıştır. Bu sebeple optimum sıcaklıktan sonra sıcaklık artışı biyodizel verimini azaltmıştır (Phan ve Phan 2008).



Şekil 3. Reaksiyon süresinin ve sıcaklığının verime etkisi

### 3.4 Reaksiyon Süresinin Etkisi

Katalizör oranı, alkol oranı ve sıcaklığın yanısıra biyodizel verimine reaksiyon süresi de etki

etmektedir. Buna göre reaksiyonun ilk dakikalarda çok yavaş olduğu ve biyodizel veriminin genel olarak sürenin artışıyla paralel olarak arttığı gözlenmiştir (Bhatti, et al. 2008). Transesterifikasyon işleminde reaksiyon süresinin verime etkisini incelemek amacıyla diğer parametreler sabit tutulurken reaksiyon süresi 30 – 150 (30, 60, 90, 120, 150) dakika arasında değiştirilmiştir. Reaksiyonda metil alkol yağ oranı %20wt, katalizör oranı %0.75wt ve 150 g hardal yağı kullanılmıştır. Reaksiyon sıcaklığı 60 °C seçilmiştir. Artan reaksiyon süreleri için verim de artarken 90 dakika da en yüksek verim elde edilmiştir. Sonrasında reaksiyon süresinin artması verimi azaltıcı yönde etki göstermiştir (Şekil 3).

**Tablo 3.** Optimize edilmiş biyodizelin özellikleri

Biyodizel Özellikleri	
Kükürt (ppm)	1,9
Viskozite (mm <sup>2</sup> /s)	5,886
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	0,886
Parlama Noktası (°C)	162

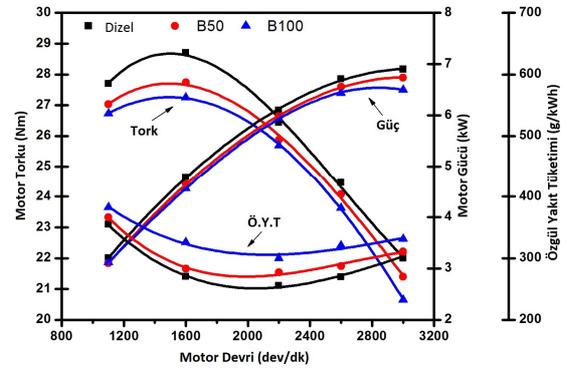
Optimum koşullarda üretilen biyodizelin özellikleri tablo 3'te verilmiştir.

### 3.5 Motor Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi

Şekil 4'te motor devrine bağlı olarak tork, efektif güç ve özgül yakıt değişimi dizel, B50 ve B100 yakıtları için verilmiştir. Dizel yakıt kullanımında ortalama motor torku B50 ye göre %2.5 ve B100'e göre %4.2 daha yüksektir. İçten yanmalı motordan elde edilen efektif güç hemen hemen her üç yakıtta da benzer değerleri vermiştir. Buna rağmen dizel yakıt kullanımında ortalama olarak B50 ye göre %2.4, B100 e göre %4.3 daha yüksek güç elde edilmiştir. Biyodizel yakıtın alt ısı değeri dizele göre düşüktür. Bu nedenle dizel yakıtı göre tork performansını ve içten yanmalı motordan elde edilen efektif gücü düşürmektedir (Gürü, Koca, et al. 2010).

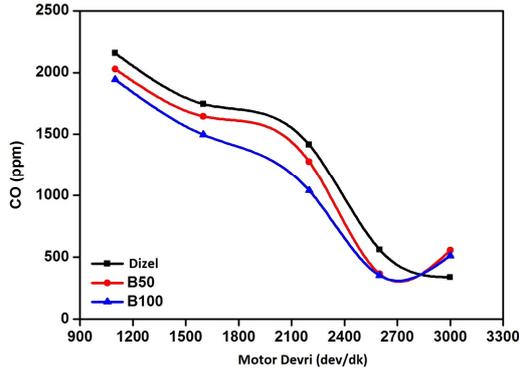
Hardal yağından elde edilen B50 ve B100 biyodizel

yakıt kullanımı özgül yakıt tüketimini (SFC) arttırmıştır. 2200 rpm motor devri için B50 kullanımı dizele göre SFC'yi %8 oranında arttırmıştır. 2200 rpm motor devrinde ise B100 kullanımı SFC'yi %17 oranında arttırmıştır. Biyodizel yakıtların viskozite ve yoğunluk değerleri dizel yakıtı göre daha yüksektir. Bu nedenle yakıtın yanma odasına enjeksiyonu sırasında atomizasyon kalitesi kötüleşmektedir. Bunun bir sonucu olarak yanmanın gerçekleştiği yüzey alanı azalmaktadır. Bu sebeple sıkıştırma ile ateşlemeli içten yanmalı motorlarda biyodizel kullanımı SFC'yi arttırmaktadır (Özsezen ve Çanakçı 2009).



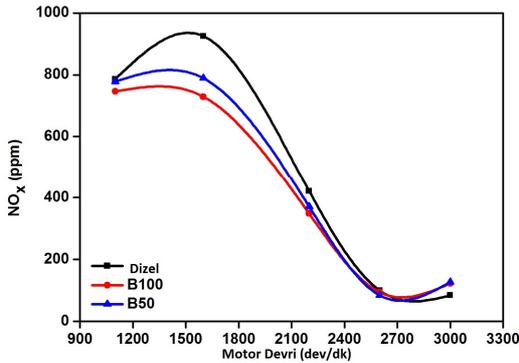
**Şekil 4.** Motor devrine bağlı olarak tork, efektif güç ve özgül yakıt değişimi

Şekil 5'te motor hızına bağlı olarak Dizel, B50 ve B100 yakıtlarının CO emisyon değerleri görülmektedir. B100 ve B50 yakıtlarında dizel yakıtı göre CO emisyonu daha düşüktür. CO emisyonu dizel yakıtı göre B50 de %8, B100 de %16 daha düşüktür. Biyodizel yakıt içerisindeki oksijen oranının dizel yakıtı göre yüksek olması yanma olayının daha iyi olmasını sağlamaktadır. Biyodizel yakıt motor performansını olumsuz etkilerken CO emisyonuna olumlu katkı sağlamıştır (Varuvel, et al. 2012).



Şekil 5. Motor hızına bağlı olarak CO emisyon değişimi

İçten yanmalı motorlardan kaynaklanan  $NO_x$  emisyonlarının birçoğu termal  $NO_x$  mekanizması yoluyla oluşur. Termal  $NO_x$  yanma odasındaki nitrojenin yüksek sıcaklıklarda oksidasyonu yoluyla oluşan  $NO_x$  olarak adlandırılır.  $NO_x$  oluşum oranı yanma sıcaklığı, sıcaklığa nitrojenin maruz kalma süresi ve yanma odasındaki reaksiyon bölgelerindeki oksijen içeriğinin bir fonksiyonudur (Yao, et al. 2008). Motor hızına bağlı olarak  $NO_x$  emisyonu değişimi Şekil 6'da verilmiştir.  $NO_x$  emisyonu dizel yakıtı göre B100 de ortalama %13, B50 de ortalama %7 daha düşüktür.



Şekil 6. Motor hızına bağlı olarak  $NO_x$  emisyonu değişimi

Literatürde yapılan birçok çalışmada görülmektedir ki biyodizel kullanımı  $NO_x$  emisyonunu arttırmaktadır. Buna karşın  $NO_x$  değerlerinin biyodizel kullanımıyla azalma gösterdiği veya dizel yakıtı göre önemli bir değişimin olmadığı çalışmalarda literatüre geçmiştir (Xue, Grifta ve Hansena 2011). Bu çalışmada da deneyler

sonucunda  $NO_x$  değerlerinin biyodizel kullanımıyla azaldığı görülmüştür. Biyodizelin alt ısıl değeri dizel yakıtı göre düşüktür. Bunun yanı sıra setan sayısı biyodizel yakıtlarda daha yüksek olmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında tutuşma gecikme süresi ve yanma basıncı düşmüş olabilir. Bundan dolayı yanma sıcaklığı azalmıştır. Yanmanın ikinci aşamasında düşük sıcaklık ve basınç  $NO_x$  emisyonunu düşürmüş olabilir (Puhan, et al. 2005).

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma kapsamında hardal yağından biyodizel üretim sürecinin optimizasyonu yapılmıştır. Üretilen biyodizelin motor performans testleri yapılmıştır. Ayrıca emisyon ölçümleri yapıp  $NO_x$  ve CO değerleri incelenmiştir. Aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Hardal yağından biyodizel üretim sürecinde maksimum verim; %0.75wt katalizör %20wt metanol/yağ oranı 60 °C reaksiyon sıcaklığı ve 90 dakika reaksiyon süresinde %89.67 bulunmuştur.
- Motor performans testleri sonucunda motor gücünde dizel yakıtı ortalama B50 ye göre %2.4 B100 e göre %4.3 daha yüksek güç elde edilmiştir.
- Biyodizel yakıtların düşük ısıl değerine bağlı olarak SFC artmıştır. B50 yakıtı için %8 B100 yakıtı için %17 lik artış elde edilmiştir.
- CO emisyonlarında B50 de %16 ve B100 de %8 dizel yakıtı göre azalma gerçekleşmiştir
- $NO_x$  emisyonlarında B50 %13 ve B100 %7 dizel yakıtı göre azalma görülmüştür.

#### 5. Teşekkür

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi BAP biriminin 12.FEN.BİL.16' nolu BAP projesi tarafından desteklenmiştir.

#### Kaynaklar

Aktaş, A., ve Y. Segmen. «The effects of advance fuel injection on engine performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with biodiesel.» *J. Fac. Eng. Arch.*

- Gazi Univ., 2008: 23: 199-206.
- Altıparmak, D., A.Keskin, A. Koca, ve M. Gürü. «Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester-diesel fuel blends.» *Bioresource Technology*, 2007: Volume 98, 241-246.
- Antolin, G., F.V. Tinaut, Y. Briceno, V. Castano, C. Perez, ve A.I. Ramirez. «Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification.» *Bioresource Technology*, 2002: 83 :111-114.
- Berrios, M., ve R.L. Skelton. «Comparison of purification methods for biodiesel.» *Chem Eng J*, 2008: 144:459-65.
- Bhatti, H. N., A. Hanif M., M. Qasim, ve Ata-ur-Rehman. «Biodiesel production from waste tallow.» *Fuel*, 2008: 87 : 2961–2966.
- Biswas, D., ve Parivesh. «Biodiesel as Automobile Fuel. Central Pollution Control Board, Ministry of Environment and Forests.» 2002.  
<http://www.cpcb.delhi.nic.in/diesel/ch70902.htm>.
- Crabbe, E., C. Nolasco-Hipolito, Kobayashi G., Sonomoto K., ve Ishizaki A. «Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanol extraction and fuel properties.» *Process Biochem*, 2001: 37:65-71.
- Demirbas, A. «"biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods.» *Progres in Energy and Combustion Science*, 2009: 31: 466-87.
- Ghadge, S.V., ve H. Raheman. «Process optimization for biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil using response surface methodology.» *Bioresource Technology*, 2006: 97 : 379–384.
- Gürü, M., A. Koca, Ö. Can, C. Çınar, ve F. Şahin. «, "Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine.» *Renewable Energy*, 2010: 35 : 637–643.
- Gürü, M., U. Karakaya, D. Altıparmak, ve A. Alicılar. «Improvement of diesel fuel properties by using additives.» *Energy Conversion and Management*, 2002: Vol:43: 1021-1025.
- Kalam, M.A., ve H.H. Masjuki. «Biodiesel from palmoil—an analysis of its properties and potential.» *Biomass and Bioenergy*, 2002: Volume 23, Issue 6, December, 471-479, 21-29.
- Knothe, G., ve M.A. Hanna. «The effect of mixing on transesterification of beef tallow.» *Bioresource Technol*, 1999: 69, 289-293.
- Lopez, D.E., J.G. Goodwin, D.A. Bruce, ve E. Lotero. «Transesterification of triacetin with methanol on solid acid and base catalysts.» *Applied Catalysis A: General*, 2005: 97-105.
- Meher, L.C., D.V. Sagar, ve S.N. Naik. «Technical aspects of biodiesel production by transesterification- a review.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006: 10 : 248–268.
- Nabi, M.N., M.S. Akhter, ve M.M. Zaglul, Shahadat. «Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel–biodiesel blends.» *Bioresour Technol*, 2006: 97:372-8.
- Özsezen, A.N., ve M. Çanakçı. «Atık Palmiye ve Kanola Yağı Metil Esterlerinin Kullanıldığı Direkt Püskürtmeli Bir Dizel Motorda Performans ve Yanma.» *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 2009: 24: 275-84.
- Phan, A. N., ve T. M. Phan. «Biodiesel production from waste cooking oils.» *Fuel*, 2008: 87 : 3490–3496.
- Puhan, S., N. Vedaraman, B.V.B. Ram, G. Sankarnarayanan, ve K. Jeychandran.



- «Mahua oil (Madhuca Indica seed oil) methyl ester as biodiesel-preparation and emission characteristics.» *Biomass and Bioenergy*, 2005: 28 : 87–93.
- Riberto, A., F. Castro, ve J. Carvalho. «INFLUENCE OF FREE FATTY ACID CONTENT IN BIODIESEL PRODUCTION.» *WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities 1st International Conference*, 2011.
- Sinha., S., A K. Agarwal, ve S. Garg. «Biodiesel development from rice bran oil: Transesterification process optimization and fuel characterization.» *Energy Conversion and Management*, 2008: 49 :1248–1257.
- Tashtoush, G.M., M.I. Al-Widyan, ve M.M. Al-Jarrah. «Experimental Study on Evaluation and Optimisation of Conversion of Waste Animal Fats into Biodiesel.» *Energy Conversion and Management*, 2004: 45: 2697-2711.
- Thomas, T.P., D.M. Birney, ve D.L. Aulda. «Optimizing esterification of safflower, cottonseed, castor and used cottonseed oils.» *Industrial Crops and Products*, 2013: 41 :102-106.
- Usta, N., et al. «Combustion of biodiesel fuel produced from hazelnut soapstock/waste sunflower oil mixture in a diesel engine.» *Energy Conversion & Management*, 2004: 46:741-755.
- Varuvel, E.G., N. Mrad, M.Tazerout, ve F. Aloui. «, “Assessment of liquid fuel (bio-oil) production from waste fish fat and utilizationin diesel engine.» *Applied Energy*, 2012: 100 : 249–257.
- Wang, Y., S. Ou, P. Liu, F. Xue, ve S. Tang. «Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil.» *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2006: 252: 107-112 .
- Xue, J., T.E. Grifta, ve A. C. Hansena. «Effect of biodiesel on engine performances and emissions.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011: 15 : 1098–1116.
- Yao, C., C.S. Cheung, C. Cheng, Y. Wang, T.L. Chan, ve S.C. Lee. «Effect of Diesel/methanol compound combustion on Diesel engine combustion and emissions.» *Energy Conversion and Management*, 2008: 49: 1696-1704.
- Yucesu, H.S., R. Altın, ve S. Çetinkaya. «Experimental investigation of vegetable oil usage as alternative fuel in idesel engines.» *Turk J Eng Environ Sci*, 2001: 25: 39-49.