

Düşük viskoziteli atık kızartma yağı etil esteri üretimi Production of the low viscosity waste cooking oil ethyl ester

Mert GÜLÜM^{1*}, Atilla BİLGİN², Abdülvahap ÇAKMAK³

^{1,2}Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Trabzon, Türkiye.
mertgulumm@gmail.com, bilgin@ktu.edu.tr

³Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Kavak Meslek Yüksekokulu, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye.
abdulvahap.cakmak@samsun.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 26.04.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 10.12.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 05.12.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.48085
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Yenilenebilir ve çevre dostu bir yakıt olan biyodizelin dizel yakıtı ile kıyaslandığında en önemli avantajlarından bazıları, parlama noktası sıcaklığının ve setan sayısının yüksek olmasıdır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu tarafından yayınlanan "Motorin türlerine biodizel harmanlanması" hakkındaki tebliğe göre, 1.1.2018 tarihinden itibaren biyodizelin hacimsel olarak %0.5 oranında motorine ilave edilmesi zorunlu hale getirilmiştir. Ayrıca, Avrupa Parlamentosu'nun 2003/30/EC sayılı biyoyakıtlar konulu direktifi, üye ülkelerin 2020 yılında en az %10 oranında yenilenebilir yakıtların kullanımını mecburi hale getirmiştir. Dünyada ve ülkemizde bu denli önemli bir noktaya gelen biyodizelin birçok üstün özelliklerine rağmen, üretim maliyeti ve viskozitesi yüksektir. Üretim maliyetinin yüksek olması biyodizelin daha yaygın olarak kullanılmasını engellerken, viskozitesinin yüksek olması ise motor performansı ve eksoz emisyonlarını olumsuz yönden etkilemektedir. Bu yüzden, sunulan çalışmada, viskozitenin ve üretim maliyetinin azaltılması için, transesterifikasyona etki eden parametrelerin üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin viskozitesine etkileri tam bir matris şeklinde incelenerek en düşük viskoziteyi veren reaksiyon parametreleri belirlenmiştir. Optimum parametrelere göre üretilen biyodizelin viskozite değeri, farklı çalışmalarda üretilen biyodizellerin viskozite değerleri ile kıyaslanmıştır. Deney sonuçlarına göre, %1.25 oranında potasyum metoksit ve 10.5:1 alkol/yağ mol oranında etil alkol kullanılarak 70 °C reaksiyon sıcaklığında ve 121 dk. reaksiyon süresi sonunda üretilen biyodizelin 3.595 mm²/s (cSt) ile en düşük viskoziteye sahip olduğu belirlenmiştir. Üretilen biyodizelin yakıt özelliklerinin EN 14214 standardına uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen viskozite değerinin (3.595 mm²/s) literatürdeki diğer çalışmalarda elde edilen viskozite değerlerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Biyodizel, Etil ester, Viskozite, Potasyum metoksit, Etanol.

Abstract

Some of the most important advantages of biodiesel, which is a renewable and environmentally friendly fuel, are that it has higher flash point and cetane number, compared to diesel fuel. According to the notification on "blending of biodiesel with diesel fuel" published by the Energy Market Regulatory Authority, it has become mandatory to add 0.5% volume ratio of biodiesel to diesel fuel as of 1.1.2018. In addition, The European Parliament's Directive on biofuels (2003/30/EC) makes compulsory the use of renewable fuels at least 10% in 2020 for member countries. Despite the superior properties of biodiesel, its production cost and viscosity are high. The high production cost prevents the more widespread use of biodiesel, and the high viscosity decreases engine performance and increases exhaust emissions. Therefore, in this study, for reducing production cost and viscosity, the effects of transesterification reaction parameters on the viscosity of produced waste cooking oil biodiesel were investigated as a full matrix to determine the optimal values giving the lowest viscosity. The viscosity value of biodiesel produced under the optimal parameters in this study was also compared to that of biodiesels produced in different studies. According to experimental results, it has been specified that the biodiesel, produced the optimal reaction parameters such as potassium methoxide concentration of 1.25%, ethyl alcohol to oil molar ratio of 10.5:1, the reaction temperature of 70 °C and reaction duration of 121 minutes, has the lowest viscosity of 3.595 mm²/s (cSt). The fuel properties of produced biodiesel are in accordance with EN 14214. Moreover, it has been determined that the viscosity value (3.595 mm²/s) obtained in this study is lower than the viscosity values reported in the literature.

Keywords: Biodiesel, Ethyl ester, Viscosity, Potassium methoxide, Ethanol.

1 Giriş

Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan fosil kökenli yakıtların sınırlı olan rezervlerinin gün geçtikçe azalması ve fiyatlarındaki dalgalanmalar nedeniyle bilim insanları, yeni, yenilenebilir ve çevre dostu yakıtların araştırılmasına ve geliştirilmesine yönelik birçok çalışma yapmaktadırlar. Ülkemizin tarım potansiyeli dikkate alındığında biyodizel, sıkıştırma-ateşlemeli motorlar için son yıllarda önemli bir alternatif yakıt olarak görülmektedir.

Orta uzunluktaki yağ asidi zincirlerini (C16-C18 karbonlu) içeren mono-alkil esterlerin karışımı olarak tanımlanan biyodizel, genellikle transesterifikasyon (alkoliz) reaksiyonu ile üretilir [1]. Diğer bir anlatımla, biyodizel, uygun bir katalizör

eşliğinde, bitkisel veya hayvansal yağların kısa zincirli bir alkol (genellikle metanol (CH₃OH) veya ethanol (C₂H₅OH)) ile reaksiyonu sonucunda üretilir [2]. Transesterifikasyon reaksiyonunda biyodizel, ethanol kullanılarak üretilmişse yağ asidi etil esteri, methanol kullanılarak üretilmişse yağ asidi metil esteri olarak da adlandırılabilir. Etil esterlerin metil esterlere göre daha yüksek ısıl değere, setan sayına ve oksidasyon stabilizesine sahip oldukları, fakat düşük sıcaklıktaki akış özelliklerinin daha kötü olduğu bilinmektedir [3]. Ayrıca, yenilenebilir bir alkol olan etil alkol metil alkole daha az toksiktir.

Yenilenebilir bir yakıt olan biyodizelin, dizel yakıtı ile kıyaslandığında bazı üstün özellikleri şu şekilde sıralanabilir: (1) Yapısında aromatik ve sülfür bileşiği bulunmaz. (2) Parlama

*Yazışılan yazar/Corresponding author

noktası sıcaklığı (>130 °C), setan sayısı (48-67) ve yağlayıcılık özelliği daha yüksektir. (3) Yapısında kütlece yaklaşık %10-12 oranlarında oksijen bulunduğundan karbonmonoksit, hidrokarbon ve is emisyonları daha azdır [4]. Birçok üstün yanlarına rağmen, soğukta akış özelliklerinin (akma noktası ve soğukta filtre tıkanma noktası) kötü, viskozitesinin ve üretim maliyetinin yüksek, ısıl kapasitesinin (35-40 MJ/kg) ise düşük olması biyodizelin en önemli yetersizlikleri olarak söylenebilir [5].

Yüksek viskozite yakıtın iyi atomize olamamasına, damlacık boyutunun artmasına, sprey özelliklerinin kötüleşmesine, dolayısıyla motor performansının azalmasına ve egzoz emisyonlarının artmasına neden olmaktadır [6]. Özellikle viskozitesinin ve üretim maliyetinin yüksek olması biyodizelin ticarileşmesindeki ve yaygınlaşmasındaki en önemli iki engeldir. Biyodizelin üstün ve yetersiz özellikleri ile ülke olarak petrole olan bağımlılığımız dikkate alındığında, sunulan çalışmanın amacı "bu en önemli iki soruna (viskozite ve maliyet) çözüm getirerek biyodizelin taşıtlarda kullanımının yaygınlaştırılmasını sağlamak ve bu sayede petrole olan bağımlılığımızı bir ölçüde azaltmak" olarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, biyodizel üretimi ile ilgili literatürdeki önemli çalışmaların kısa bir özeti verilmiştir. Örneğin, Samuel ve arkadaşları [7] tarafından yapılan çalışmada, hindistan cevizi yağı, C₂H₅OH ve potasyum hidroksit (KOH) kullanılarak en yüksek ester verimine sahip biyodizelin üretilmesi amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle, 60 °C reaksiyon sıcaklığı, 6:1 alkol/yağ mol oranı ve 60 dk. reaksiyon süresi sabit tutularak farklı katalizör oranlarında (%0.5-%2.25) biyodizeller üretilmiştir. %1.00 katalizör oranında en yüksek ester verimi (%97.2) elde edilmiştir. Bunun üzerine, %1.00 katalizör oranı, 60 dk. reaksiyon süresi ve 60 °C reaksiyon sıcaklığı sabit tutulmuş ve farklı alkol/yağ mol oranlarında (3:1-12:1) etil esterler üretilmiştir. Deney sonuçlarına göre, en yüksek etil ester veriminin 6:1 mol oranında elde edildiği belirlenmiştir. Çalışmanın diğer aşamasında, 6:1 mol oranı, %1.00 katalizör oranı ve 60 dk. reaksiyon süresi için farklı reaksiyon sıcaklıklarında (30 °C-80 °C) üretilen biyodizeller arasında 70 °C'de üretilenin en yüksek ester verimine (%97.20) sahip olduğu görülmüştür. Reaksiyon süresinin etkisi incelenirken, önceden belirlenen optimum değerler (70 °C, %1.00 ve 6:1) sabit tutularak, 30, 35, 40, 50, 55, 60 ve 70 dk. reaksiyon sürelerinde biyodizeller üretilmiştir. 60 ile 70 dk. reaksiyon sürelerinde %97.20 ile en yüksek ester verimine ulaşılmıştır. Sonuç olarak, en yüksek ester veriminin elde edildiği optimum reaksiyon parametreleri %1.00, 6:1, 70 °C ve 60 dk. olarak belirlenmiştir. Kumar ve arkadaşları [8] tarafından yapılan çalışmada, Jatropha curcas yağından biyodizel üretiminde, 2 sa. reaksiyon süresi ve 65 °C reaksiyon sıcaklığı sabit tutularak, KOH miktarının (kütlesele olarak %1.00, %1.50, %2.00, %2.50 ve %3.00) ve etil alkol/yağ mol oranının (hacimsel olarak %25, %30, %35 ve %40) ester verimine olan etkileri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, %3.00 katalizör miktarı ve %30 alkol/yağ mol oranı optimum değerler olarak belirlenmiştir. Ayrıca, %60.33 ile en yüksek etil ester dönüşüm verimine ulaşılmıştır. Sánchez ve diğ. [9] tarafından yapılan çalışmada, ayçiçeği yağından etil ester üretiminde, reaksiyon sıcaklığının (30 °C-70 °C), alkol/yağ mol oranının (3:1 ve 4.25:1) ve sodyum etoksit (C₂H₅NaO) miktarının (%0.7, %1.00, %1.30, ve %1.60) ester dönüşüm verimine olan etkileri incelenmiştir. Tüm deneyler 120 dk. sürede gerçekleştirilmiştir. Optimum reaksiyon parametreleri, 55 °C, %1.60 ve 4.25:1 olarak belirlenmiştir. Silva ve diğ. [10],

sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak soya yağından etil ester üretimini yüzey metodolojisi yöntemi yardımıyla optimize etmişlerdir. Bunun için, alkol/yağ mol oranını (3:1-15:1), katalizör miktarını (%0.1-%1.70), reaksiyon sıcaklığını (40 °C-80 °C) ve reaksiyon süresini (40-120 dk.) incelemişlerdir. En yüksek ester içeriğini veren optimum reaksiyon parametreleri 40 °C, 80 dk., 9:1 ve %1.30 olarak belirlenmiştir. Encinar ve arkadaşları [11], Cynara cardunculus L. yağından etil ester üretimini ve transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametrelerin ester verimine olan etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde reaksiyon süresi 120 dk. olarak sabit tutulmuştur. Bir parametrenin etkisi incelenirken diğer parametreler sabit tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, %1.00 oranında KOH ile 9:1 alkol/yağ mol oranında alkol kullanılarak 75 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen biyodizelin en yüksek etil ester verimine sahip olduğu belirlenmiştir.

Bir kısmı yukarıda özetlenmiş olan literatürdeki birçok çalışmada, transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametrelerin herhangi biri sabit tutulup diğeri değiştirilmiştir. Ayrıca, reaksiyon parametrelerinin üretilen biyodizelin metil veya etil ester verimine olan etkileri incelenmiştir. Son olarak, transesterifikasyon reaksiyonunu optimize etmek için yapay sinir ağları, Taguchi veya yüzey metodolojisi gibi yöntemler kullanılmıştır. Oysaki, sunulan bu çalışmada, özgün değer olarak, reaksiyon parametrelerinin hepsi tam bir matris şeklinde değiştirilerek (tüm olasılıklar deneyerek yani hepsi değiştirilerek) transesterifikasyon reaksiyonu eğrisel interpolasyon yöntemiyle optimize edilip, biyodizel (etil ester) üretilmiştir. Diğer bir anlatımla, transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametrelerin (katalizör miktarı, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi ve alkol/yağ mol oranı) üretilen biyodizelin ester verimine değil de viskozitesine olan etkileri incelenmiştir. Böylece, çalışmanın amacına uygun olarak en düşük viskozitenin elde edildiği parametre değerleri belirlenmiştir. Biyodizel üretiminde, maliyeti azaltmak ve çevre kirliliğinin önüne geçmek için atık kızartma yağını, yukarıda bahsedildiği gibi metil esterlere göre etil esterler daha avantajlı olduğundan %99.80 saflıkta etil alkolü (C₂H₅OH), ve hidroksitlere göre metoksitler daha verimli olduğundan [12] potasyum metoksiti (CH₃OK) kullanmak da çalışmanın diğer bir özgün tarafıdır.

2 Deneysel çalışma

2.1 Kimyasal malzemeler

Biyodizel üretiminde kullanılan atık kızartma yağının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Atık kızartma yağının bazı özellikleri.

Table 1. Some properties of waste cooking oil.

Özellikler	Atık yağ
Serbest yağ asidi içeriği ^a , (% m/m)	0.76
Su içeriği ^b , (mg/kg)	600
Yağ asidi kompozisyonu ^c , (Kütlesele %)	
Palmitik (C16:0)	18.791
Stearik (C18:0)	1.402
Oleik (C18:1)	41.513
Linoleik (C18:2)	33.794
Linolenik (C18:3)	4.500

^a: Titrasyon yöntemi yardımıyla potasyum hidroksit çözeltisiyle belirlenmiştir (EN 14104); ^b: Karl Fischer titrasyonuyla belirlenmiştir (ISO 8534:2008 ve EN ISO 12937); ^c: Gaz kromatografisi ile ölçülmüştür.

Söz konusu tablodan görüldüğü gibi, kullanılan yağın serbest yağ asit değeri %0.76 (m/m) ve su içeriği 600 mg/kg olarak belirlendiğinden, asidik esterifikasyon reaksiyonuna gerek duyulmadan, direkt bazik katalizör potasyum metoksit (CH_3OK) kullanılmıştır. Bilgin ve diğ. [3] tarafından yapılan çalışma ve literatürdeki diğer çalışmalar [13]-[15] incelendiğinde, bazik katalizörler ve etanol kullanımında genellikle, katalizör oranı %0.75, %1.00, %1.25, reaksiyon sıcaklığı 60 °C, 65 °C, 70 °C, reaksiyon süresi 90, 120, 150 dk. ve alkol/yağ mol oranı 9:1, 12:1, 15:1 değerlerinde üretilen biyodizellerin uluslararası standartları sağladığı belirlenmiştir. Bu yüzden, yukarıda belirtilen parametre değerlerinde üretilen biyodizellerin viskoziteleri tam bir matris şeklinde incelenmiş ve en düşük viskoziteli atık kızartma yağı biyodizelinin üretildiği reaksiyon parametreleri tespit edilmiştir. Diğer bir anlatımla, $3 \times 3 \times 3 = 81$ adet (3 farklı katalizör (CH_3OK) oranı, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi ve alkol/yağ mol oranı için) atık kızartma yağı biyodizeli üretilmiş ve aralarında en düşük viskoziteli olanı belirlenmiştir. Biyodizel üretimi ile viskozite (40 °C'de) ve yoğunluk (15 °C ve 40 °C'de) ölçümleri Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği, Otomotiv Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk ölçümü hassas terazi ve piknometre yardımıyla ISO 4787 standardına uygun olarak ölçülmüştür. Dinamik viskozite ölçümü ise HAAKE Düşen Küre Viskozimetresi ve kronometre yardımıyla DIN 53015 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kinematik viskozite değerleri ise aynı sıcaklık için dinamik viskozitenin yoğunluğa bölünmesiyle belirlenmiştir. Biyodizel üretimi ve ölçümler ile ilgili ayrıntılı bilgi yazarların diğer çalışmalarında da bulunabilir [16],[17]. Üretilen biyodizelin parlama noktası (EN ISO 3679), soğukta filtre tıkanma noktası (EN 116) ve üst ısı değerleri (DIN 51900-2) Prof. Dr. Saadetin GÜNER Yakıt Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde ölçtürülmüştür.

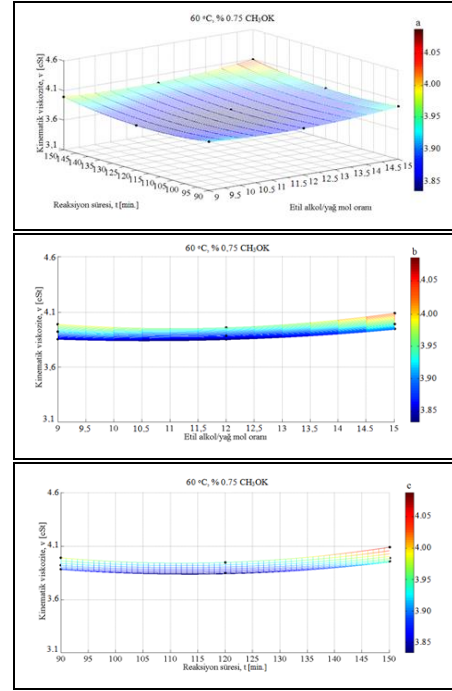
2.2 Belirsizlik analizi

Deneysel çalışmalarda, ölçüm cihazlarının hassasiyeti nedeniyle ölçülen fiziksel büyüklük bir miktar belirsizlik yani hata içerir. Bu belirsizlik, söz konusu büyüklük kullanılarak hesaplanan diğer fiziksel büyüklüklerde de hataya neden olur, yani belirsizlik yayılarak devam eder. Bu nedenle, sunulan deneysel çalışmada, ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerin anlamlılığını ve güvenilirliğinin incelemek amacıyla Kline ve McClintock [18] tarafından önerilen yöntem ile belirsizlik analizi yapılmıştır. Bu çalışma ile ilgili ayrıntılı belirsizlik analizi hesap örneği Ek A'da verilmiştir. Ayrıca, bir başka belirsizlik analizi örneği Referans [6]'da bulunabilir. Viskozite ve yoğunluk ölçümlerinde kullanılan kronometre ve hassas terazinin belirsizlikleri sırasıyla 0.001 sn. ve 0.01 g olmak üzere, hesaplanan belirsizlikler %0.02126 ile %0.03856 aralığındadır. Bu değerler ölçümlerin ve sonuçların oldukça yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu göstermektedir.

3 Sonuçlar ve tartışma

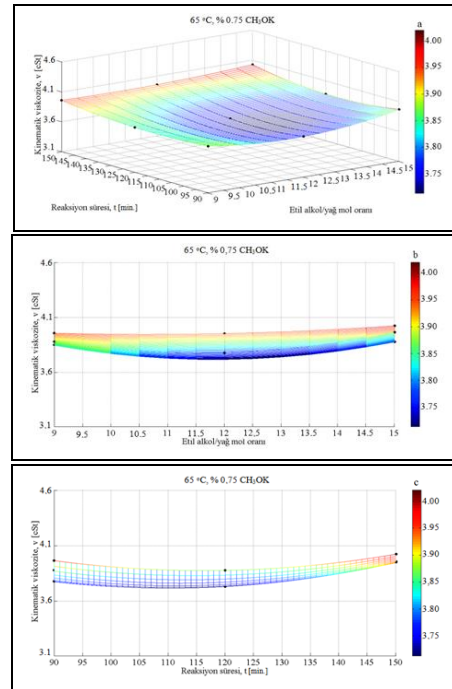
Şekil 1-9 a-c'de $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ve CH_3OK kullanılarak farklı katalizör oranlarında (%0.75, %1.00 ve %1.25) ve farklı reaksiyon sıcaklıklarında (60 °C, 65 °C ve 70 °C) üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozitelerinin $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ /yağ mol oranı (9:1, 12:1 ve 15:1) ve reaksiyon süresine (90, 120 ve 150 dk.) göre değişimleri 3- ve 2-boyutlu grafikler şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekillerde, noktalar üretilen biyodizellerin deneysel olarak ölçülen viskozite değerlerini temsil etmektedir. 2 boyutlu yüzeyler ise, bu deneysel viskozite değerleri dikkate alınarak eğrisel interpolasyon komutu

yardımıyla elde edilmiştir. Böylece, parametrik değerlerin değişimi daha ayrıntılı olarak incelenmiş, belirli şartlarda en düşük viskoziteli biyodizelin üretim parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.



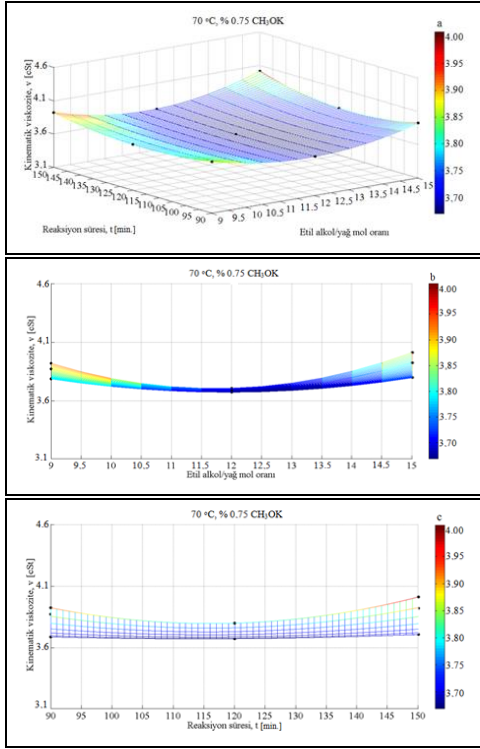
Şekil 1. 60 °C ve %0.75 reaksiyon parametreleri için üretilen biyodizelin viskozitesinin değişimleri.

Figure 1. Changes of viscosity of biodiesel produced at 60 °C and 0.75%.

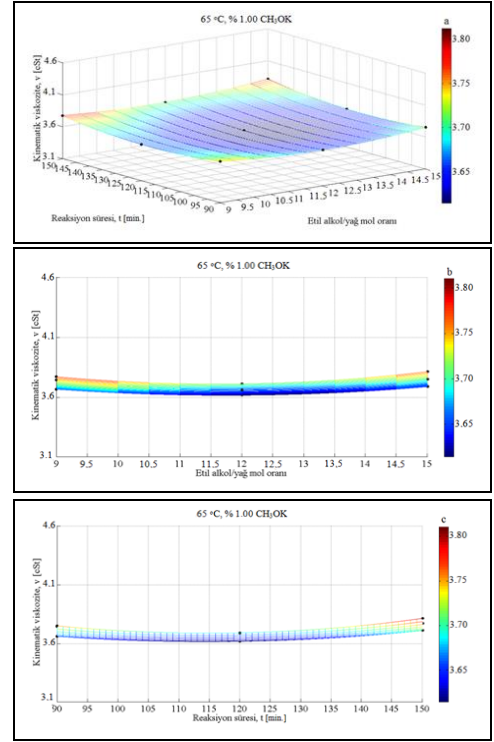


Şekil 2. 65 °C ve %0.75 reaksiyon parametreleri için üretilen biyodizelin viskozitesinin değişimleri.

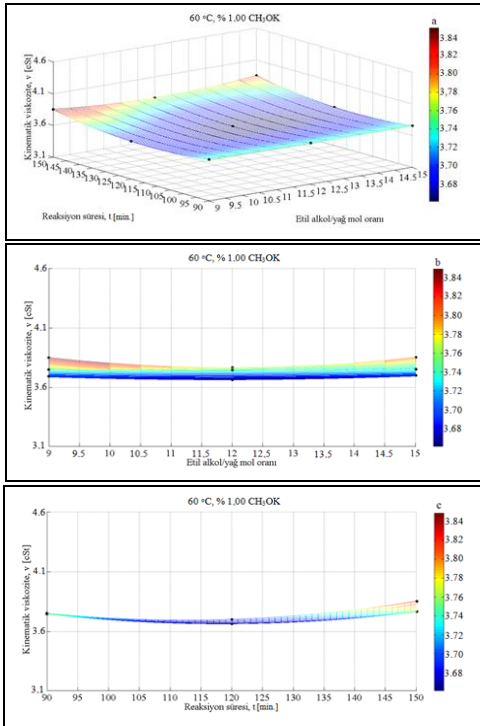
Figure 2. Changes of viscosity of biodiesel produced at 65 °C and 0.75%.



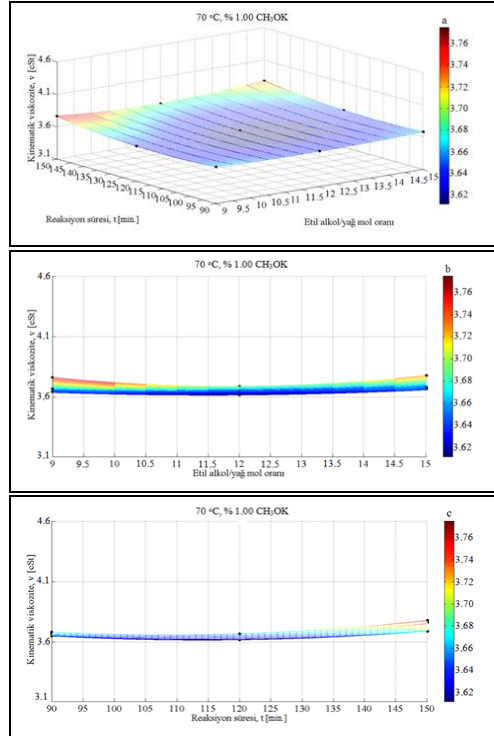
Şekil 3: 70 °C ve %0.75 reaksiyon parametreleri için üretilen biyodizelin viskozitesinin değişimleri.
Figure 3. Changes of viscosity of biodiesel produced at 70 °C and 0.75%.



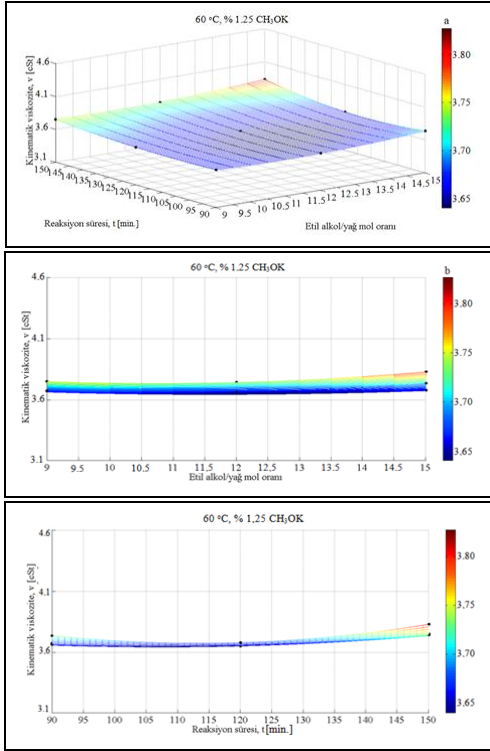
Şekil 5: 65 °C ve %1.00 reaksiyon parametreleri için üretilen biyodizelin viskozitesinin değişimleri.
Figure 5. Changes of viscosity of biodiesel produced at 65 °C and 1.00%.



Şekil 4. 60 °C ve %1.00 reaksiyon parametreleri için üretilen biyodizelin viskozitesinin değişimleri.
Figure 4. Changes of viscosity of biodiesel produced at 60 °C and 1.00%.

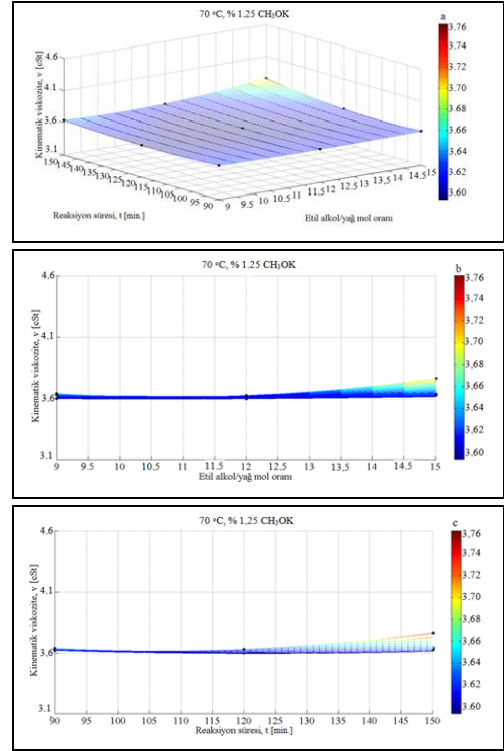


Şekil 6: 70 °C ve %1.00 reaksiyon parametreleri için üretilen biyodizelin viskozitesinin değişimleri.
Figure 6. Changes of viscosity of biodiesel produced at 70 °C and 1.00%.



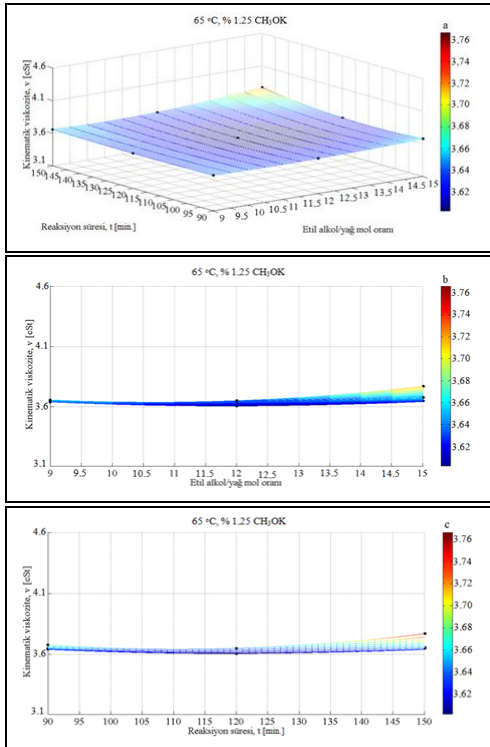
Şekil 7: 60 °C ve %1.25 reaksiyon parametreleri için üretilen biyodizelin viskozitesinin değişimleri.

Figure 7. Changes of viscosity of biodiesel produced at 60 °C and 1.25%.



Şekil 9: 70 °C ve %1.25 reaksiyon parametreleri için üretilen biyodizelin viskozitesinin değişimleri.

Figure 9. Changes of viscosity of biodiesel produced at 70 °C and 1.25%.



Şekil 8: 65 °C ve %1.25 reaksiyon parametreleri için üretilen biyodizelin viskozitesinin değişimleri.

Figure 8. Changes of viscosity of biodiesel produced at 65 °C and 1.25%.

Şekil 1-9'a göre, viskozitenin etil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine göre değişimi için farklı reaksiyon sıcaklıklarında benzer karakteristikler elde edilmiştir. Düşük etil alkol/yağ mol oranlarında (örneğin 9:1) ve kısa reaksiyon sürelerinde (örneğin 90 dk.), bir denge reaksiyonu olan transesterifikasyon girenler yönüne kaydığından ve ester dönüşümüne yeterli süre verilmediğinden üretilen biyodizellerin viskozite değerleri yüksek çıkmıştır [3]. Mol oranının ve reaksiyon süresinin belirli bir değere kadar artışıyla reaksiyon ürünler yönüne kaymıştır. Bu durum, reaksiyon veriminin artıp viskozitelerin azalmasına ve en düşük viskozite değerlerinin elde edilmesine neden olmuştur [4]. Fakat yüksek miktarda alkol (örneğin 15:1) kullanıldığında ve reaksiyon süresi (örneğin 150 dk.) aşırı uzatıldığında, gliserinin etil ester fazındaki çözünürlüğünün artması, ester ve gliserin fazlarının ayrışmasının zorlaşması ve reaksiyon sırasında gliserinin ortamda çözülmüş olarak bulunması reaksiyonu tekrar girenler yönüne kaymıştır. Böylece, viskoziteler tekrar artmaya başlamıştır [9] (Şekil 1-9 a, b). Ayrıca, Şekil 1-9 a incelendiğinde, 60 °C gibi düşük reaksiyon sıcaklıklarında (Şekil 1, 4 ve 7 a) transesterifikasyon reaksiyonunun yeterli şekilde tamamlanamaması nedeniyle viskozitelerin diğerlerine göre (Şekil 2, 3, 5, 6, 8 ve 9 a) yüksek değerler aldığı görülmüştür. Reaksiyon sıcaklığı arttıkça reaksiyon verimi artmış, viskoziteler azalmış ve 70 °C'de (Şekil 3, 6 ve 9 a) en düşük değerler elde edilmiştir. Etil alkolün kaynama noktası sıcaklığının 78.37 °C olması nedeniyle 70 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda biyodizel üretimi gerçekleştirilmemiştir [3]. Söz konusu kaynama noktası sıcaklığından daha yüksek reaksiyon sıcaklıkları seçilseydi, alkol buharlaşıp reaksiyon ortamından ayrılacağı için muhtemelen reaksiyon verimi azalıp üretilen biyodizellerin

viskoziteleri yüksek değerler alacaktı. Bu durum yazarların daha önceki çalışmalarında gözlemlenmiştir [3],[4].

Viskozitenin etil alkol/yağ mol oranına göre değişiminde genel olarak, düşük ve yüksek mol oranlarındaki (örneğin 9:1 ve 15:1) değişimin daha geniş, orta mol oranlarındaki (örneğin 12:1) değişimin ise daha dar bir aralıkta gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 1-9 b). Bu durum, seçilen etil alkol/yağ mol oranı aralığının (9:1, 12:1 ve 15:1) uygun olduğunu, daha düşük veya yüksek mol oranlarının seçilmesinin gereksiz olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, %1.00 ve %1.25 oranlarında katalizör kullanıldığında, her üç reaksiyon sıcaklığı için de, viskozitenin reaksiyon süresiyle değişimi nispeten dar bir aralıkta gerçekleşmiştir (Şekil 4-9 c). Diğer bir anlatımla, reaksiyon süresiyle viskozite değerleri çok fazla değişmemiştir. Öte yandan, %0.75 oranında katalizör kullanımında, viskozite değerleri reaksiyon süresiyle görece daha geniş bir aralıkta değişmiştir (Şekil 1-3c). Genel olarak, %0.75 ve %1.00 katalizör oranları için, hem düşük hem de yüksek etil alkol/yağ mol oranlarında, reaksiyon süresiyle viskozite değerlerinin değişimi parabolik bir karakter göstermiştir (Şekil 1-7c). Fakat, %1.25 katalizör oranında ve 65 °C ve 70 °C reaksiyon sıcaklıklarında bu parabolik karakter düşük mol oranlarında yaklaşık doğrusal karaktere dönüşmüştür (Şekil 8 ve 9 c).

%0.75, %1.00 ve %1.25 oranlarında CH₃OK kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarında (60 °C, 65 °C ve 70 °C), reaksiyon sürelerinde (90, 120 ve 150 dk.) ve alkol/yağ mol oranlarında (9:1, 12:1 ve 15:1) deneysel olarak elde edilen viskozite değerleri kullanılarak, 60 °C, 65 °C ve 70 °C'de üretilebilecek en düşük viskoziteli biyodizellerin viskozite değerleri ve ilgili reaksiyon parametreleri eğrisel interpolasyon yöntemiyle tahmin edilmiştir. Söz konusu değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Farklı katalizör oranı ve reaksiyon sıcaklıklarında üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili parametreleri.

Table 2. The predicted viscosity values of biodiesels which can be produced at different catalyst amounts and reaction temperatures, and the reaction parameters.

Katalizör oranı	Reaksiyon Sıcaklığı		
	60 °C	65 °C	70 °C
%0.75	10.5:1 mol oranı ve 113 dk. reaksiyon süresinde 3.8337 cSt	12:1 mol oranı ve 110 dk. reaksiyon süresinde 3.7130 cSt	12:1 mol oranı ve 112 dk. reaksiyon süresinde 3.6990 cSt
	12:1 mol oranı ve 118 dk. reaksiyon süresinde 3.6607 cSt	12:1 mol oranı ve 114 dk. reaksiyon süresinde 3.6136 cSt	11.5:1 mol oranı ve 114 dk. reaksiyon süresinde 3.6111 cSt
	11.5:1 mol oranı ve 107 dk. reaksiyon süresinde 3.6399 cSt	12:1 mol oranı ve 118 dk. reaksiyon süresinde 3.6018 cSt	10.5:1 mol oranı ve 121 dk. reaksiyon süresinde 3.5935 cSt

Tablo 2 incelendiğinde, %0.75 ile %1.00 katalizör oranları için genellikle 12:1 mol oranında; %1.25 katalizör oranında ise

reaksiyon sıcaklığıyla değişmekle birlikte 10.5:1, 11.5:1 ve 12:1 mol oranlarında üretilen biyodizellerin en düşük viskoziteye sahip olabilecekları görülmüştür. Ayrıca, %1.00 katalizör kullanımında reaksiyon sıcaklığı arttıkça en düşük viskozitenin elde edilebileceği reaksiyon süresinin az daha olsa azalabileceği belirlenmiştir. Her üç reaksiyon sıcaklığı için de, %1.25 katalizör oranı kullanımında en düşük viskoziteli biyodizellerin üretilebileceği görülmüştür. Deneysel olarak, %1.25 katalizör oranı ve 12:1 alkol/yağ mol oranı kullanılarak 70 °C reaksiyon sıcaklığında ve 120 dk. reaksiyon süresi sonunda en düşük viskoziteli biyodizel (3.597 cSt) üretilmiştir. Fakat, Tablo 2, yine aynı reaksiyon sıcaklığı ve katalizör oranında, mol oranı 10.5:1'e düşürüldüğünde ve reaksiyon süresi 121 dakikaya çıkarıldığında daha da düşük viskoziteli (3.5935 cSt) biyodizelin üretilebileceğini göstermektedir. Belirlenen bu reaksiyon parametreleri ile (%1.25, 70 °C, 10.5:1 ve 121 dk.) biyodizel üretimi gerçekleştirilmiş ve üretilen biyodizelin viskozitesi 40 °C'de 3.595 cSt olarak belirlenmiştir. Optimum reaksiyon koşullarında tahmin edilen viskozite değeri (3.5935 cSt) ile deneysel olarak üretilen biyodizelin viskozite değeri (3.595 cSt) arasındaki hata oranının %0.0417 gibi oldukça düşük bir değerde olması yapılan optimizasyonun geçerliliğini göstermektedir. Böylece, Giriş kısmında belirtilen çalışmanın amacına ulaşılmış ve en düşük viskoziteli biyodizel üretilmiştir. Üretilen bu biyodizelin bazı önemli yakıt özellikleri ölçtürülmüş ve saf dizel yakıtıyla karşılaştırmalı olarak Tablo 3'te verilmiştir. Biyodizelin yakıt özelliklerinin EN 14214 standartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 3: Dizel yakıtının ve üretilen biyodizelin bazı yakıt özellikleri.

Table 3. Some fuel properties of diesel fuel and produced biodiesel.

Özellikler	Birimler	Dizel yakıtı	Atık kızartma yağı etil esteri	EN14214
40 °C'de kinematik viskozite	cSt (mm ² /s)	2.700	3.595	3.50-5.00
15 °C'de yoğunluk	kg/m ³	833.33	878.17	860-900
Parlama noktası	°C	63.0	175	101≤
Soğukta filtre tıkanma noktası	°C	-6.0	-5.0	<+5 (yaz) -15< (kış)
Üst ısı değeri	kJ/kg	45950	39880	¹

¹: Belirtilmemiş.

Son olarak, Tablo 4'te, bu çalışmada üretilen etil esterinin 40 °C'deki viskozitesi (3.595 mm²/s) ile, bazik transesterifikasyon reaksiyonuyla literatürdeki bazı çalışmalarda üretilmiş olan etil esterlerin aynı sıcaklıktaki viskozite değerleri kıyaslanmıştır. Görüldüğü gibi, yukarıda belirlenen optimum şartlarda üretilen atık kızartma yağı etil esterinin viskozitesi diğerlerine göre daha düşüktür.

Tablo 4: Üretilen etil esterinin viskozitesinin literatürdeki diğer etil esterlerin viskoziteleri ile kıyaslanması.

Table 4. Comparison of viscosity of produced ethyl ester with the others in the literature.

Kullanılan yağ ve katalizör	40 °C'de kinematik viskozite, (mm ² /s)	Çalışma
Atık kızartma, NaOH	4.347	[3]
Hindistan cevizi, KOH	4.629	[7]
Jatropha curcas, KOH	7.330 (37 °C)	[8]
Ayçiçeği, C ₂ H ₅ NaO	4.700	[9]
Cynara cardunculus, KOH	4.590	[11]
Ayçiçeği, NaOH	4.630	[14]
Kolza, NaOH	4.840	[14]
Zeytin, NaOH	4.000	[14]
Atık kızartma, NaOH	5.810	[14]
Kolza, KOH	6.170	[15]
Ayçiçeği, KOH	5.000	[19]
Keten, KOH	4.900	[19]
Soya, KOH	5.300	[19]
Atık kızartma, KOH	5.200	[19]
Hardal, KOH	5.330	[20]
Atık kızartma, CH ₃ OK	5.760	[21]
Atık kızartma, CH ₃ ONa	7.590	[21]
Hurma çekirdeği, KOH	4.839	[22]
Atık kızartma, NaOH	5.030	[23]
Atık soya, KOH	7.800	[24]
Atık kızartma, KOH	4.380	[25]
Jatropha curcas, CH ₃ ONa	5.800	[26]
Hint, KOH	19.700	[27]
Soya, KOH	4.900	[27]
Kanola, KOH	4.900	[28]
Atık kızartma, KOH	8.800	[28]

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, atık kızartma yağından C₂H₅OH ve CH₃OK kullanılarak transesterifikasyon reaksiyonuyla en düşük viskoziteli biyodizel üretilmiştir. Bunun için, katalizör oranı %0.75, %1.00, %1.25, reaksiyon sıcaklığı 60 °C, 65 °C, 70 °C, reaksiyon süresi 90, 120, 150 dk. ve C₂H₅OH/yağ mol oranı 9:1, 12:1, 15:1 değerlerinde değiştirilerek 81 adet (3×3×3×3) biyodizel üretilmiştir. Ayrıca, reaksiyon parametrelerinin ara değerlerinde, örneğin 12.5:1, 96 dk. ve 64 °C, üretilebilecek biyodizellerin viskozite değerleri, gerçek ölçüm değerleri referans alınarak eğrisel interpolasyon yöntemiyle tahmin edilmiştir. Böylece, üretilebilecek en düşük viskoziteli biyodizelin optimum reaksiyon parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen bazı sonuçlar kısaca şu şekildedir:

- 1) Genel olarak, düşük alkol/yağ mol oranlarında (örneğin 9:1) yeterli reaksiyon verimi elde edilemediğinden üretilen biyodizellerin viskoziteleri yüksek çıkmıştır. Mol oranının artışıyla transesterifikasyon ürünler yönüne kayıp dönüşüm verimi arttığından viskoziteler azalmıştır. Aşırı alkol (örneğin 15:1) kullanımında ise gliserinin ester fazındaki çözünürlüğünün artması nedeniyle viskoziteler tekrar yüksek değerler almıştır.
- 2) Kısa reaksiyon sürelerinde (örneğin 90 dk.), biyodizel dönüşümüne yeterli süre verilmediğinden reaksiyonun verimi düşük, üretilen biyodizellerin viskoziteleri yüksek değerler almıştır. Sürenin uzamasıyla biyodizel dönüşüm verimi artarak viskoziteler azalmıştır. Fakat, reaksiyon süresinin aşırı uzatılması durumunda (örneğin 150 dk.) esterler tekrar hidrolizlenerek sabunlaşmış ve viskoziteler tekrar artmaya başlamıştır.

- 3) Reaksiyon sıcaklığının artışıyla moleküllerin hızlarının artmasından dolayı transesterifikasyon reaksiyonunu ürünler yönüne kayıp reaksiyon verimi iyileşmiş ve viskozite değerleri sürekli azalmıştır.
- 4) Deneysel olarak, %1.25 katalizör oranında CH₃OK ve 12:1 alkol/yağ mol oranında C₂H₅OH kullanılarak 70 °C reaksiyon sıcaklığında ve 120 dk. reaksiyon süresinde 3.597 cSt ile en düşük viskoziteli biyodizel üretilmiştir. Fakat, eğrisel interpolasyon yöntemiyle elde edilen optimum reaksiyon parametreleri (%1.25, 70 °C, 10.5:1 ve 121 dk.) kullanılarak üretilen biyodizelin az da olsa daha düşük viskoziteye (3.595 cSt) sahip olduğu belirlenmiştir.
- 5) En düşük viskoziteli atık kızartma yağı etil esterinin (3.595 cSt) diğer önemli yakıt özelliklerinin (yoğunluk, üst ısıl değer, parlama noktası sıcaklığı ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı) de uluslararası standardı sağladığı belirlenmiştir.
- 6) Son olarak, bu çalışmada üretilen biyodizelin viskozite değerinin (3.595 cSt), literatürdeki benzer çalışmalarda üretilen (transesterifikasyon reaksiyonuyla bazik katalizör kullanılarak) etil esterlerin viskozite değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür.

5 Conclusions

In this study, waste cooking oil biodiesel with the lowest viscosity was produced using ethanol (C₂H₅OH) and potassium methoxide (CH₃OK) by means of the transesterification reaction. For this, the effects of catalyst amount (0.75%, 1.00%, 1.25%), reaction temperature (60 °C, 65 °C, 70 °C), reaction time (90, 120, 150 minutes), and alcohol/oil molar ratio (9:1, 12:1, 15:1) on viscosities of produced biodiesels were investigated as a full matrix. In other words, 81 biodiesel samples were produced for each different reaction parameter (3×3×3×3). Moreover, the viscosity values of biodiesels which can be produced at the intermediate reaction parameters (i.e. alcohol/oil molar ratio of 12.5:1, reaction time of 96 minutes, and reaction temperature of 64°C) were predicted by means of the cubic spline interpolation. Therefore, the optimal reaction parameters giving the lowest viscosity were determined. The main findings can be listed as follows:

- 1) The viscosities of biodiesels produced at the lower molar ratio (i.e. 9:1) are generally higher because of lower ester yield. When the molar ratio is increased, the ester yield increases and the viscosities decrease. However, the use of excess molar ratio (i.e. 15:1) again results in the increase of viscosity because of increasing solubility of glycerol in the ester phase.
- 2) The viscosities of biodiesels produced at short reaction times (e.g. 90 min.) are higher because of lower reaction yield. With the increase in reaction time, the ester yield increases, and viscosities decrease. However, the further increase in reaction time (i.e. 150 min.) increases viscosities because of the saponification reaction.
- 3) As the reaction temperature increases, since the velocities of molecules increase, the reaction yield improves (transesterification reaction shifts towards the expected products), and viscosities continuously decrease.
- 4) The biodiesel with the viscosity value of 3.597 cSt was produced with the following reaction parameters: the catalyst concentration of 1.25%, molar ratio of 12:1,

reaction temperature of 70 °C, and reaction time of 120 minutes. However, the optimal reaction parameters providing the lowest viscosity of 3.597 cSt were determined by means of the cubic spline interpolation as follows: the catalyst concentration of 1.25%, molar ratio of 10.5:1, reaction temperature of 70 °C, and reaction time of 121 minutes.

- 5) Some fuel properties (density, higher heating value, flash point temperature, and cold filter plugging point) of final waste cooking oil ethyl ester (with the lowest viscosity value of 3.595 cSt) were found to be within the limits of international biodiesel standard.
- 6) Finally, the viscosity value of the final biodiesel produced in this study (3.595 cSt) was shown to be lower than that of other ethyl esters produced by different authors in the literature.

6 Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmayı 217M088 proje No.lu hızlı destek projesiyle destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür eder.

7 Kaynaklar

- [1] Yesilyurt MK, Cesur C, Aslan V, Yilbasi Z. "The production of biodiesel from safflower (*carthamus tinctorius* L.) oil as a potential feedstock and its usage in compression ignition engine: a comprehensive review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 1-30, 2019.
- [2] Yesilyurt MK, Arslan M. "Analysis of the fuel injection pressure effects on energy and exergy efficiencies of a diesel engine operating with biodiesel". *Biofuels*, 10(5), 643-655, 2019.
- [3] Bilgin A, Gülüm M, Koyuncuoglu I, Nac E, Çakmak A. "Determination of transesterification reaction parameters giving the lowest viscosity waste cooking oil biodiesel". *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2492-2500, 2015.
- [4] Gülüm M, Bilgin A, Çakmak A. "Comparison of optimum reaction parameters of corn oil biodiesels produced by using sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH)". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(3), 503-511, 2015.
- [5] Gülüm M, Yesilyurt MK, Bilgin A. "The performance assessment of cubic spline interpolation and response surface methodology in the mathematical modeling to optimize biodiesel production from waste cooking oil". *Fuel*, 255, 115778, 2019.
- [6] Gülüm M, Bilgin A. "Two-term power models for estimating kinematic viscosities of different biodiesel-diesel fuel blends". *Fuel Processing Technology*, 149, 121-130, 2016.
- [7] Samuel OD, Giwa SO, El-Suleiman A. "Optimization of coconut oil ethyl esters reaction variables and prediction model of its blends with diesel fuel for density and kinematic viscosity". *Biofuels*, 7(6), 723-733, 2016.
- [8] Kumar R, Dixit A, Singh SK, Singh G, Sachdeva M. "Production and characterization of ethyl ester from crude *jatropha curcas* oil having high free fatty acid content". *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 96(3), 229-235, 2015.
- [9] Sánchez BS, Benitez B, Querini CA, Mendow G. "Transesterification of sunflower oil with ethanol using sodium ethoxide as catalyst. Effect of the reaction conditions". *Fuel Processing Technology*, 131, 29-35, 2015.
- [10] Silva GF, Camargo FL, Ferreira ALO. "Application of response surface methodology for optimization of biodiesel production by transesterification of soybean oil with ethanol". *Fuel Processing Technology*, 92(3), 407-413, 2011.
- [11] Encinar JM, González JF, Rodríguez JJ, Tejedor A. "Biodiesel fuels from vegetable oils: transesterification of *cynara cardunculus* L. oils with ethanol". *Energy & Fuels*, 16(2), 443-450, 2002.
- [12] Verma P, Sharma MP, Dwivedi G. "Impact of alcohol on biodiesel production and properties". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 319-333, 2016.
- [13] Yesilyurt MK. "The evaluation of a direct injection diesel engine operating with waste cooking oil biodiesel in point of the environmental and enviroeconomic aspects". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(6), 654-661, 2018.
- [14] Anastopoulos G, Zannikou Y, Stournas S, Kalligeros S. "Transesterification of vegetable oils with ethanol and characterization of the key fuel properties of ethyl esters". *Energies*, 2(2), 362-376, 2009.
- [15] Peterson CL, Reece DL, Thompson JC, Beck SM, Chase C. "Ethyl ester of rapeseed used as a biodiesel fuel-a case study". *Biomass and Bioenergy*, 10(5-6), 331-336, 1996.
- [16] Gülüm M, Bilgin A. "Measurements and empirical correlations in predicting biodiesel-diesel blends' viscosity and density". *Fuel*, 199, 567-577, 2017.
- [17] Gülüm M, Bilgin A. "A comprehensive study on measurement and prediction of viscosity of biodiesel-diesel-alcohol ternary blends". *Energy*, 148, 341-361, 2018.
- [18] Holman JP. *Experimental Methods for Engineers*. 7th ed. New York, USA, McGraw-Hill, 2001.
- [19] Guzzato R, Defferrari D, Reiznaut QB, Cadore ÍR, Samios D. "Transesterification double step process modification for ethyl ester biodiesel production from vegetable and waste oils". *Fuel*, 92(1), 197-203, 2012.
- [20] Fadhil AB, Abdulahad WS. "Transesterification of mustard (*brassica nigra*) seed oil with ethanol: purification of the crude ethyl ester with activated carbon produced from de-oiled cake". *Energy Conversion and Management*, 77, 495-503, 2014.
- [21] Encinar JM, González JF, Rodríguez A. "Ethanolysis of used frying oil. biodiesel preparation and characterization". *Fuel Processing Technology*, 88, 513-522, 2007.
- [22] Alamu OJ, Waheed MA, Jekayinfa SO. "Biodiesel production from nigerian palm kernel oil: effect of KOH concentration on yield". *Energy for Sustainable Development*, 11(3), 77-82, 2007.
- [23] Chhetri AB, Watts KC, Islam MR. "Waste cooking oil as an alternate feedstock for biodiesel production". *Energies*, 1(1), 3-18, 2008.
- [24] Allawzi M, Kandah MI. "Parametric study of biodiesel production from used soybean oil". *European Journal of Lipid Science and Technology*, 110(8), 760-767, 2008.
- [25] Gülüm M, Bilgin A, Çakmak A. "Production of the lowest viscosity waste cooking oil biodiesel by using ethanol and potassium hydroxide". *Journal of Clean Energy Technologies*, 5(4), 289-293, 2017.
- [26] Ginting MSA, Azizan MT, Yusup S. "Alkaline in situ ethanolysis of *jatropha curcas*". *Fuel*, 93, 82-85, 2012.
- [27] Barbosa DDC, Serra TM, Meneghetti SMP, Meneghetti MR. "Biodiesel production by ethanolysis of mixed castor and soybean oils". *Fuel*, 89(12), 3791-3794, 2010.

[28] Issariyakul T, Kulkarni MG, Meher LC, Dalai AK, Bakhshi NN. "Biodiesel production from mixtures of canola oil and used cooking oil". *Chemical Engineering Journal*, 140(1-3), 77-85, 2008.

8 Ek A

Kline ve McClintock tarafından önerilen yöntemle göre, ölçülen veya hesaplanan hedef fiziksel büyüklük R ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ise,

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait belirsizlik $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün belirsizliği w_R ise,

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, hedef fiziksel büyüklükler yoğunluk ile dinamik ve kinematik viskozitelerdir. Örneğin, en düşük viskoziteli biyodizelin 40 °C'deki yoğunluğu,

$$\rho_{biyodizel} = \frac{m_{toplamlam} - m_{piknometre}}{m_{su}} \cdot \rho_{su} \quad (3)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Belirsizlik analizi için Denklem (3), Denklem (1) ve Denklem (2)'ye uyarlanırsa:

$$\rho_{BD} = \rho_{BD}(m_{toplamlam}, m_{piknometre}) \quad (4)$$

$$R \equiv \rho_{BD} \quad (5)$$

$$x_1 \equiv m_{toplamlam} \quad (6)$$

$$x_2 \equiv m_{piknometre} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_{BD}}{\partial m_{toplamlam}} = \frac{1}{m_{su}} \cdot \rho_{BD} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_{BD}}{\partial m_{piknometre}} = \frac{-1}{m_{su}} \cdot \rho_{su} \quad (9)$$

olarak belirlenir. İlgili değerler ($w_{m_{toplamlam}} = 0.01$ g, $\rho_{su,40^\circ C} = 992.30$ kg/m³ ve $w_{m_{piknometre}} = 0.01$ g) yerine yazıldığında,

$$w_{\rho_{biyodizel,40^\circ C}} = \pm 0.28049 \text{ kg/m}^3 \quad (10)$$

elde edilir. İlgili biyodizelin 40 °C'deki yoğunluğu 872.11 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. O halde, oransal olarak belirsizlik yüzde cinsinden,

$$\tilde{w}_{\rho_{biyodizel,40^\circ C}} = \frac{0.28049}{872.11} \cdot 100 = \pm \%0.03216 \quad (11)$$

şeklinde hesaplanır. Benzer şekilde dinamik viskozite için $w_{\mu_{biyodizel,40^\circ C}} = \pm 6.66505 \cdot 10^{-4}$ cP ve $\tilde{w}_{\mu_{biyodizel,40^\circ C}} = \pm \%0.02126$, kinematik viskozite için $w_{\nu_{biyodizel,40^\circ C}} = \pm 1.38591 \cdot 10^{-3}$ cSt ve $\tilde{w}_{\nu_{biyodizel,40^\circ C}} = \pm \%0.03856$ olarak hesaplanmıştır.