



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 22.12.2023
Kabul Tarihi : 15.03.2024

Received Date : 22.12.2023
Accepted Date : 15.03.2024

KENEVİR TOHUMU YAĞI VE NAOH-KOH KULLANILARAK ÜRETİLEN METİL ESTERLERİN MOTORİNLE HARMANLANMASI İLE ELDE EDİLEN BİYOYAKITLARIN KİNEMATİK VİSKOZİTE DEĞERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF KINEMATIC VISCOSITY VALUES OF BIOFUELS PRODUCED BY BLENDING METHYL ESTERS PRODUCED USING HEMP SEED OIL AND NAOH-KOH WITH DIESEL FUEL

Fatmanur DEMİRBAŞ¹ (ORCID: 0009-0007-9649-8681)

Volkan ASLAN^{1}* (ORCID: 0000-0002-5354-2474)

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Volkan ASLAN, volkan.aslan@bozok.edu.tr

ÖZET

Fosil yakıtların tükenme tehlikesi, bu yakıtlardan enerji üretimi ile havaya salınan sera gazlarının küresel iklim değişikliğine olumsuz etkileri ve ekolojik dengenin sarsılması nedenlerinden dolayı alternatif yakıtların kullanımı hayati önem kazanmıştır. Alternatif yakıtlardan biri olan biyodizel; uygun emisyon ve yanma profili, karbon nötr özelliği, yüksek parlama noktası, çok yönlü kullanımı nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmektedir. Bu çalışmada, kenevir yağının, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit varlığında, metanol ile reaksiyonu sonucunda biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Her iki katalizörün en uygun biyodizel sentezi için katalizör ağırlığı (0,4–1,0 %ağ.), alkol:yağ molar oranı (3:1–9:1), reaksiyon sıcaklığı (30–60°C) ve reaksiyon süresi (30–75 dk.) parametreleri klasik metot kullanılarak optimize edilmiştir. Sodyum hidroksit ile yapılan denemelerde %94,89 biyodizel verimi elde edilirken, potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada %95,91 biyodizel verimi sağlanmıştır. Optimum sonuçlarda üretilen yakıtlar dizel yakıtı ile hacimsel olarak %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80 ve %90 oranlarında harmanlanmış ve karışım yakıtların 40°C’de kinematik viskozite değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, karışım yakıtların ASTM D6751 ve EN 14214 standartlarına uygun olduğu ve sodyum hidroksit ile üretilen yakıtların potasyum hidroksitle elde edilen yakıtlara göre daha düşük kinematik viskoziteye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyodizel, kinematik viskozite, kenevir tohumu, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit

ABSTRACT

The use of alternative fuels has become vitally important due to the danger of depletion of fossil fuels, the negative effects of greenhouse gases released into the air through energy production from these fuels on global climate change, and the disruption of ecological balance. Biodiesel, one of the alternative fuels; has recently attracted great attention due to its suitable emission and combustion profile, carbon neutral feature, high flash point, and versatile use. In this study, biodiesel was produced as a result of the reaction of hemp oil with methanol in the presence of sodium hydroxide and potassium hydroxide. For the most suitable biodiesel synthesis of both catalysts, catalyst weight (0.4–1.0 wt%), alcohol: oil molar ratio (3:1–9:1), reaction temperature (30–60 °C), and reaction time (30–75 min.) were determined. min.) parameters were optimized using the classical method. While 94,89% biodiesel yield was obtained in the trials conducted with sodium hydroxide, 95.91% biodiesel yield was achieved in the study using potassium hydroxide. The fuels produced with optimum results were blended with diesel fuel at 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% and 90% by volume, and the kinematic viscosity values of the blended fuels at 40°C were determined. As a result, it was determined that the blended fuels comply with ASTM D6751 and EN 14214 standards

ToCite: DEMİRBAŞ, F., & ASLAN, V., (2024). KENEVİR TOHUMU YAĞI VE NAOH-KOH KULLANILARAK ÜRETİLEN METİL ESTERLERİN MOTORİNLE HARMANLANMASI İLE EDİLEN BİYOYAKITLARIN KİNEMATİK VİSKOZİTE DEĞERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 539-553.

and that fuels produced with sodium hydroxide have lower kinematic viscosity than fuels obtained with potassium hydroxide.

Keywords: Biodiesel, kinematic viscosity, hemp seed, sodium hydroxide, potassium hydroxide

GİRİŞ

Enerji, birçok üretim ve tüketim faaliyetinin temel girdisi, ekonomik büyümenin ana kaynağı ve sosyal kalkınmanın en önemli parametrelerinden biridir. Fiziksel bir bakış açısından enerji kullanımı, ekonomik üretkenliği ve endüstriyel büyümeyi yönlendirir (Önder & Ağır, 2023; Pablo-Romero & Sánchez-Braza, 2015). Bilim ve teknolojinin gelişmesi ve nüfusun sürekli büyümesiyle birlikte, kaynaklara olan toplam talep de önemli ölçüde artmaktadır. Hem yenilenme hızı günümüzdeki tüketim hızını karşılayacak düzeyde olmaması hem de çevreye verdiği zararların çok olmasına rağmen insanoğlunun bağımlı olduğu birçok kaynak yenilenemeyen kaynaklardan oluşmaktadır (Liu & Ren, 2021). Fosil kaynaklar bakımından zengin olmayan ülkelerde enerjide dışa bağımlılık ve enerji arz problemleri ortaya çıkmaktadır (Yıldırım, 2019). Yenilenebilir yakıtlar, bu dezavantajların en aza indirgenmesinde ve yerli kaynakların kullanılmasıyla dışa bağımlılığın azaltılmasında son derece önemlidir (Anani, 2020). Biyodizel, yeşil bir enerji olarak fosil yakıtlara uygun bir alternatif olabilir. Bu enerji kaynağı, dünyanın enerji talebini kısa sürede karşılayabilecek en potansiyel sürdürülebilir güç kaynaklarından biridir. Biyodizel, uygun emisyon ve yanma profili, karbon nötr özelliği, yüksek parlama noktası, çok yönlü kullanımı nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmektedir (Shrivastava vd., 2021; Wang, 2019).

Ham yağda viskoziteyi azaltmak için birçok yöntem olmasına rağmen, dizel yakıtı yakın ürün oluşumu, ticarileştirme potansiyeli, hafif reaksiyon koşulları, yenilenebilirlik, ucuz ve yüksek dönüşüm vb. avantajları ile transesterifikasyon metodu en çok tercih edilen yöntemdir (Zahan & Kano, 2018; Ahmad vd., 2012). Transesterifikasyon, trigliserit içeren yağların, bir katalizör eşliğinde, kısa zincirli alkollerle bir dizi ardışık, geri dönüşümlü reaksiyondan oluşur. Bu reaksiyonda, trigliseritler adım adım digliseritlere, monogliseritlere ve en sonunda dibe çöken gliserole ve üstte estere dönüştürülür (Long vd., 2021). Biyodizel prosesinde transesterifikasyon metodu, üretim maliyeti ve verimliliği açısından önemli bir rol oynamaktadır. Transesterifikasyon reaksiyonunun etkinliği ve bütünlüğü üzerinde alkol:yağ molar oranı, katalizör tipi ve konsantrasyonu, reaksiyon süresi, reaksiyon sıcaklığı gibi parametreler farklı etki derecelerine sahiptir. Bu parametrelerin birbirleriyle olan bağıntılarını analiz etmek ve ideal optimizasyon metodolojisini belirlemek maliyet ve ürün verimliliği açısından önem arz etmektedir (Elango vd., 2019; Abbah vd., 2016).

Viskozite, yoğunluk, setan sayısı ve ısıl değer yakıt özellikleri, motor performansı ve egzoz emisyon değerlerini direkt etkileyen önemli parametrelerdir (Ramírez-Verduzco, 2012). Kinematik viskozite özelliği; yakıt atomizasyonu, yağlama, püskürtme özellikleri, çarpma mesafesi ve yanma kalitesini önemli ölçüde etkiler (Sáez-Bastante vd., 2016; Lin & Lin, 2012). Yüksek viskozite değeri, enjeksiyonda daha büyük damlacıklar oluşturma eğilimindedir ve bu da zayıf atomizasyona neden olur. Bu durum motor tortu oluşumu, enjektörlerin ve yakıt pompalarının aşınması, fazla yakıt tüketimi, egzoz dumanı ve emisyon artışına neden olmaktadır (Folayan vd., 2019; Martínez vd., 2014). Diğer yandan düşük yakıt viskozite, sızıntıya ve yetersiz yağlamaya neden olabilir (Ghazali vd., 2015). Buradan anlaşılabilceği gibi kinematik viskozite değeri belirli bir aralık içinde olmalıdır. Bu aralık, 40 °C'de sırasıyla Avrupa ve Amerikan standartlarına göre 3,5–5,0 mm²/s ve 1,9–6,0 mm²/s arasında belirlenmiştir (Bhuiya vd., 2016).

Biyodizel üretmek için bitkisel yağlar, hayvansal yağlar ve atık yemeklik yağlar gibi çeşitli hammaddeler kullanılmaktadır. Biyodizel üretimi için yenilenebilir hammadde kaynaklarının seçimi ülkeler veya bölgeler için ortak bir standart değildir. Hammadde seçiminde maliyet ve yerel bulunabilirlik gibi temel faktörler önemli bir rol oynayabilmektedir (Anwar, 2021). Kenevir (*Cannabis sativa* L.) insanlarla ilgili uzun ve karmaşık bir tarihe sahiptir. Endüstriyel kenevir, yiyecek ve içecek, kozmetik ve kişisel bakım ürünleri, besin takviyeleri, kumaş ve tekstil, iplik ve eğrilmiş elyaflar, kağıt, inşaat ve yalıtım malzemeleri, reçine, kağıt hamuru, yakıt gibi çok çeşitli ürünlerin üretiminde tercih edilen bir tarım ürünüdür (Johnson, 2018; Wirtshafter, 2004). Bu bitki en hızlı büyüyen biyokütlelerden biridir ve hükümetlerin 21. yüzyılda ulaşmayı hedeflediği yeşil gelecek hedefleriyle uyumludur. Ayrıca geniş bir adaptasyon kabiliyetine sahiptir ve çok az pestisit veya herbisit gerektirir (Alcheikh, 2015). Kenevir çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan sürdürülebilir tarımsal üretim sistemleri için fırsatlar sağlamaktadır. Her kenevir çeşidi hava, toprak ve su sağlığına belirgin bir şekilde katkıda bulunmaktadır (Phipps & Schluttenhofer, 2022). Yıllık bir bitki olan kenevirin iç kısmı odunsudur ve yaprakları alt gövdede kavisli olma eğilimindedir. Tohumları yumurta

şeklinde ve 3 ile 4 mm arası büyüklüktedir. Tohum kabuğunun rengi mozaiktir ve kahverengiden koyu griye kadar değişir (Strzelczyk vd., 2022; Small, 2015). Kenevir, anavatanı Orta Asya olan ve buradan tüm dünyaya yayılan otsu bir bitkidir. Asya ve Avrupa’da doğal olarak yetiştiği gibi Amerika, Afrika ve Avustralya’da da bulmak mümkündür (Iriondo-DeHond, 2023). Dünyanın kenevir üreticilerinden biri olan Türkiye, son dönemde kenevir yatırımını ve desteğini artırmıştır. Türkiye'nin son dönemde uyguladığı kenevir politikasının amacı, birçok farklı alanın ihtiyacını karşılayacak şekilde kenevir üretmek ve üretimini yaygınlaştırmaktır. Bu kapsamda, Yozgat Bozok Üniversitesi 2020 yılında “Endüstriyel Kenevir” alanında uzmanlaşmış bir üniversite olarak hükümetten onay almış ve araştırma-geliştirme çalışmalarına başlamıştır.

Sınırlı deneylerle maksimum biyodizel verimine ulaşmak için optimizasyon teknikleri popülerdir. Klasik metot, yanıt yüzeyi metodolojisi (Sharma vd., 2022), Taguchi (Jain vd., 2023), yapay sinir ağı (Said vd., 2023) ve Box-Behnken (Nguyen vd., 2023) en çok tercih edilen yöntemler arasındadır. Stamenković vd. (2015), katalizör miktarı (yağdaki ağırlıkça %0,58–1,42), metanol: yağ molar oranı (3,5:1–8,5:1) ve reaksiyon sıcaklığı (23,2–56,8°C) ve reaksiyon süresi (180 dakikaya kadar) parametrelerini kullanarak kenevir yağı metil ester üretiminin optimizasyonunu incelemişlerdir. Biyodizel üretim süreci parametreleri, genetik algoritma (GA) ile birleştirilmiş yanıt yüzeyi metodolojisi (YYM) ve yapay sinir ağı (YSA) kullanılarak optimize edilmiştir. En yüksek verimlilik YYM yöntemiyle %98,5 (tahmin edilen içerik: %99,8) iken, YSA-GA yöntemiyle %97,5 (tahmin edilen içerik: %97,1) olarak belirlenmiştir. Gupta vd. (2018), Fresnel lens güneş yoğunlaştırıcı yaklaşımını ve geleneksel ısıtma yöntemi yaklaşımını kullanarak kenevir (*Cannabis sativa* L.) yağının transesterifikasyon değişkenlerinin optimizasyonunu değerlendirmişlerdir. Kullanılan reaksiyon değişkenleri, katalizör konsantrasyonu (%0,3–1,2), alkol:yağ molar oranı (3:1–6:1), reaksiyon süresi (geleneksel için 10–80 dakika) ve karıştırma hızıdır (0–400 rpm). Optimum kenevir yağı metil ester verimi, 4 dakikalık reaksiyon süresi, 4,5:1 metanol:yağ molar oranı, 200 rpm karıştırma hızı ve %0,90 katalizör konsantrasyonunda %97,37 olarak elde edilmiştir. Coniwanti vd. (2019) çalışmalarında, sodyum hidroksit (NaOH) ve magnezyum oksit (MgO) katalizörlerinin, alkol: yağ molar oranının ve transesterifikasyon reaksiyon süresinin 65 C’de ve %1,5 ağırlığında sığır donyağından üretilen biyodizelin verimine ve özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar değerlendirildiğinde en büyük ortalama viskozite değerinin NaOH kullanıldığında elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak, NaOH ile metanol arasındaki reaksiyonun bir sodyum metoksit bileşiği oluşturması ve böylece MgO katalizöründen daha güçlü bir metil ester oluşturmak üzere karbonil grubu trigliseritlerine tutunması nedeniyle meydana geldiği ifade edilmiştir.

Biyodizel ile ilgili literatür taraması gerçekleştirildiğinde, kenevir yağı kullanılarak iki farklı katalizörün aynı çalışma içerisinde optimizasyon işleminin yapılmadığı görülmektedir. Bu çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) katalizörleri varlığında, metil alkol (metanol) ile kenevir tohumu yağının transesterifikasyonundan klasik optimizasyon metodu kullanılarak kenevir tohumu yağı biyodizeli elde edilmiştir. Ayrıca, NaOH ve KOH katalizörlerin kinematik viskoziteye etkisi belirlenerek motor performansı için en uygun transesterifikasyon işlem parametrelerini belirlemek ve böylece daha yüksek performanslı ve daha verimli bir yakıt üretilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, üretilen biyodizellerin farklı oranlarda dizel yakıt (motorin) ile harmanlaması yapılarak elde edilen yakıtların kinematik viskozite değerleri ölçülüp her iki katalizörün kinematik viskoziteye etkisi tartışılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Bu çalışmada, kenevir tohumu Narlıdere türü olarak Kayseri’nin Yahyalı ilçesinden temin edilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında kullanılan alkoller (saflığı %99,8 olan metanol) ve katalizörler (NaOH ve KOH) (saf peletler) Merck firmasından satın alınmıştır. Soğuk presleme sonrasında ham petrolün filtrasyonunda kullanılan kantitatif filtre kağıdı Machery-Nagel’den temin edilmiştir. SYA (%) ve asit sayısı (AN- mg KOH/g) tayini için; fenolftalein indikatörü (%1) ve KOH çözeltisi (0,1 N) Norateks Chemical Company’den, dietil eter ise Tekkim’den alınmıştır. Deneylerde kullanılan diğer deney ekipmanları (cam malzemeler, manyetik balık, metal kaşık vb.) EN ISO 17025 akreditasyon ve ISO 9001 Kalite Yönetimi belgelerine sahip yerel bir firmadan temin edilmiştir.

Çalışmanın ana cihazlarından biri olan ısıtıcılı manyetik karıştırıcı, çalışma hızı 100–1500 rpm arasında değişebilen, çalışma sıcaklığı 20–500°C değişme aralığında ve 0,1°C sıcaklık adımlı IKA marka C-MAG HS 7 model kullanılmıştır. Numunelerin ağırlık ölçümleri, 0,001 gr hassasiyetli Weightlab marka LB.WL-603 model hassas terazi ile yapılmıştır. Kenevir yağının ortalama molekül ağırlığı ve elde edilen kenevir biyodizellerinin yakıt özelliklerinin belirlenmesinde gerekli olan yağ asidi kompozisyonları tespiti QP2010 model Shimadzu marka gaz kromatografisi-kütle spektrometresinde (GC-MS) cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Yöntem

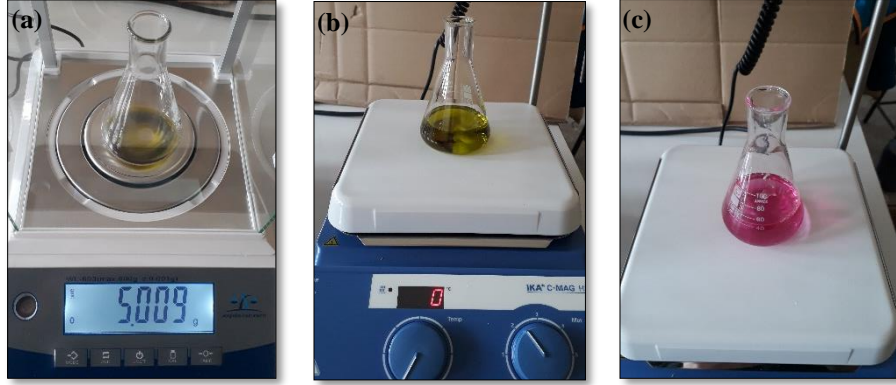
Serbest yağ asidi ve asit sayısı tayini

Yaklaşık 5 g kenevir yağı 250 mL'lik Erlenmeyer şişesi içinde tartılmıştır ve 50 mL çözücü karışım (etanol-dietil eter (50:50, v/v)) içinde çözülmesi sağlanmıştır. Sonraki aşamada, yağ ve yağ asitlerini çözmek için karışım 1 dakika titre edilmiştir. Çözünme işleminden sonra üç damla fenolftalein indikatörü damlatılmıştır. Son aşamada, çözeltinin rengi pembeye dönüşene kadar içerisine 0,1 N KOH solüsyonu karışıma damlatılmıştır. Dönüşüm sonrası elde edilen değerler kaydedilmiştir. Serbest yağ asidi ölçümüne ait görseller Şekil 1'de verilmiştir. Serbest yağ asidi (SYA) ve asit sayısı (AS) değeri denklem (1) ve (2) kullanılarak hesaplanmıştır (Aslan & Eryilmaz, 2020):

$$SYA (\%) = \frac{(v-b) \times N \times 28,2}{w} \quad (1)$$

$$AS (\text{mg KOH/g oil}) = \frac{(v-b) \times N \times 56,1}{w} \quad (2)$$

Burada b titrasyon öncesi değer, v numune için titrasyon sonrası değer, N KOH çözeltisinin normalliği ve w numunelik yağın kütlesidir.



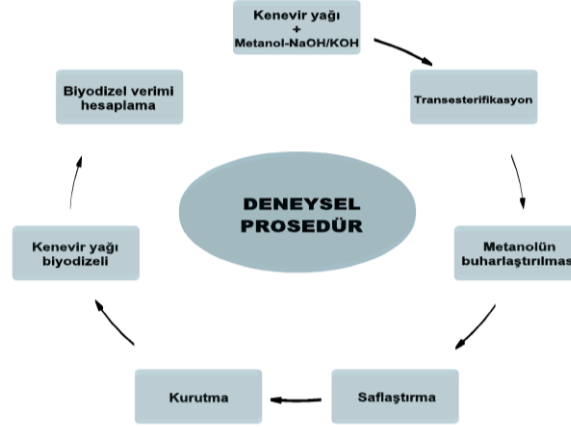
Şekil 1. a. Numunenin Tartılması b. Titrasyon İşlemi c. Solüsyonun Renk Değişirmesi

Hesaplamalar sonucunda kenevir yağının ortalama SYA değeri % 0,374, AS değeri ise 0,748 mg KOH/g yağ olarak belirlenmiştir. FFA değeri %1'den düşük olması nedeniyle optimizasyon çalışmalarında tek aşamalı homojen katalizörlü transesterifikasyon işlemi uygulanmıştır.

Transesterifikasyon

Transesterifikasyon prosesinde kenevir yağı (100 g ±0,01) 250 mL behere dökülerek istenilen reaksiyon sıcaklığına kadar ısıtılmıştır. Aynı zamanda metanol ve katalizör (NaOH veya KOH) başka bir cam şişe içerisine belirtilen miktarlarda eklenmiş ve sonrasında bu solüsyon diğer manyetik karıştırıcıda ortam sıcaklığında karıştırılmıştır. Kenevir yağı istenilen sıcaklığa ulaştığında kronometre çalıştırılmış ve çözelti yavaş yavaş işlem kabına ilave edilmiştir. Proses belirlenen reaksiyon süresine ulaştığında, cihazın ısıtılması ve karıştırılması durdurulmuştur. Daha sonra reaksiyona giren karışım bir ayırma hunisine alınmış, ester ve gliserolün farklı yoğunluklara sahip olması nedeniyle ayrılma gözlemlenmeye başlanmıştır. Ayrılmanın ilk ve belirgin aşaması 5 dakikadan daha az sürede meydana gelmiştir (Leung vd., 2010). Yaklaşık bir gün sonra, çöken gliserol alınmış ve reaksiyona girmemiş alkolü uzaklaştırmak için esterın sıcaklığı 70°C'de (metanolün kaynama noktasından dolayı) bir saat sabit sıcaklıkta karıştırılmadan bekletilmiştir. Ester içerisinde bulunan artık katalizör, serbest gliserol vb. istenilmeyen maddelerden arındırmak için damıtılmış su (ester ürününün miktarının ağırlıkça %25'i) kullanılarak duşlama yöntemiyle saflaştırma işlemi yapılmıştır. Tam bir arınma için en az 8 saat dinlendirilmiştir. Son işlem olarak, ester içerisindeki suyu tamamen buharlaştırmak için yaklaşık 120°C'de 2 saat kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel prosedür Şekil 2'de gösterilmiştir. Elde edilen biyodizelin kütlesi belirlenerek denklem (3) yardımıyla biyodizel verimi hesaplanmıştır (Yesilyurt & Cesur, 2020).

$$\text{Biyodizel verimi (\%)} = \frac{\text{Elde edilen biyodizel kütlesi (g)}}{\text{Harcanan yağ kütlesi (g)}} * 100 \quad (3)$$



Şekil 2. Kenevir Yağı Biyodizeli Elde Etme ve Verim Hesaplama Prosedürü

Üretim parametrelerinin optimizasyonu

Bu çalışmada, kenevir tohumundan elde edilen kenevir tohumu yağının iki farklı alkali katalizör (NaOH ve KOH) ve metanol ile reaksiyonundan klasik optimizasyon metodu kullanılarak kenevir tohumu yağı biyodizeli elde edilmiştir. Transesterifikasyon metodu kullanılarak incelenen parametreler; katalizör miktarı, alkol:yağ molar oranı, reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresidir. Klasik optimizasyon işlemine ait örnekleme Şekil 3’de gösterilmiştir.

| Katalizör çeşidi: NaOH | | Alkol çeşidi: Metanol | | |
|---|------------------------------|----------------------------|----------------------|-------|
| Sabit optimizasyon parametrelerinin sayısal değerleri | | | | |
| Metanol:Yağ molar oranı: 5:1 | Reaksiyon sıcaklığı (°C): 60 | Reaksiyon süresi (dk.): 60 | | |
| İlgili değişken optimizasyon parametresi: Katalizör miktarı (g) | | | | |
| Sayısal değişkenler: | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
| | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| Belirlenen biyodizel verimi: | 93,28 | 94,89 | 91,05 | 87,05 |
| Katalizör miktarı- En yüksek biyodizel verimi: | Katalizör miktarı (g) | | Biyodizel verimi (%) | |
| | ↓ | | ↓ | |
| | 0,6 | | 94,89 | |
| Bir sonraki optimizasyon parametresi | | | | |
| ↓ | | | | |
| Sabit optimizasyon parametrelerinin sayısal değerleri | | | | |
| Katalizör miktarı (g): 0,6 | Reaksiyon sıcaklığı (°C): 60 | Reaksiyon süresi (dk.): 60 | | |
| İlgili değişken optimizasyon parametresi: Metanol:Yağ molar oranı | | | | |
| Sayısal değişkenler: | 3:1 | 5:1 | 7:1 | 9:1 |
| | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| Belirlenen biyodizel verimi: | 90,85 | 94,89 | 93,85 | 91,95 |
| Metanol:Yağ molar oranı- En yüksek biyodizel verimi: | Metanol:Yağ molar oranı | | Biyodizel verimi (%) | |
| | ↓ | | ↓ | |
| | 5:1 | | 94,89 | |
| Bir sonraki optimizasyon parametresi | | | | |
| ⋮ | | | | |

Şekil 3. Klasik Optimizasyon İşlemine Ait Bir Örnekleme

Optimizasyon işlemine ilk katalizör miktarının değişimi ile başlanmıştır. Diğer parametreler için başlangıç değerleri metanol:yağ molar oranı 5:1 (18,42 g), reaksiyon sıcaklığı 60 °C ve reaksiyon süresi 60 dk. olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmalarında kullanılan parametre verileri Şekil 4’de sunulmuştur.

| | | KATALİZÖR ÇEŞİDİ | KATALİZÖR AĞIRLIĞI (% ağı.) | | ALKOL:YAĞ MOLAR ORANI | | REAKSİYON SICAKLIĞI (°C) | | REAKSİYON SÜRESİ (dk.) | |
|--------------|---------|--|-----------------------------|-----|-----------------------|-----|--------------------------|----|------------------------|----|
| ALKOL ÇEŞİDİ | METANOL | SODYUM HİDROKSİT ve POTASYUM HİDROKSİT | 0,4 | 0,6 | 3:1 | 5:1 | 30 | 40 | 30 | 45 |
| | | | 0,8 | 1,0 | 7:1 | 9:1 | 50 | 60 | 60 | 75 |

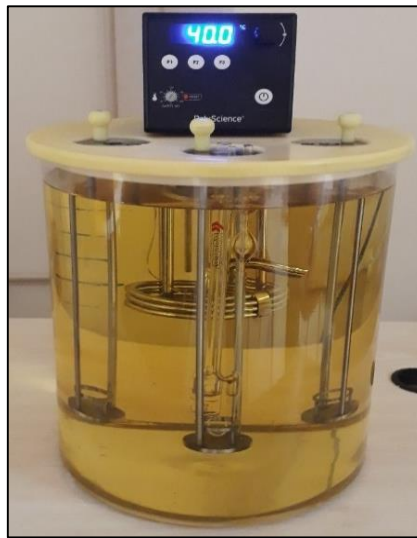
Şekil 4. Optimizasyon İşlemlerinde Kullanılan Parametreler ve Sayısal Değerler

Yakıtların hazırlanması

Kenevir yağının metil alkol ile sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit varlığında klasik optimizasyon metodu kullanılarak optimal veriler doğrultusunda iki farklı çeşit (NaOH/KOH) kenevir biyodizeli elde edilmiştir. Üretilen biyodizeller BP ultimate motorin ile %10-%20-%30-%40-%50-%60-%70-%80-%90 oranlarında harmanlanmıştır. Sonrasında %100 biyodizeller, harmanlanmış yakıtlar ve saf motorinin 40°C’de kinematik viskoziteleri ölçülmüştür. Kinematik viskozite tayini Yozgat Bozok Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (YOBÜ BİLTEM) laboratuvarında bulunan hassasiyeti $\pm 0,05^\circ\text{C}$ ve 15 L/dk hacimsel debiye sahip iki pompanın bulunduğu 7306A12E model Polyscience marka cihaz ile belirlenmiştir. Cihaz, ASTM D 445 standardına uygun olarak kinematik viskozite ölçümü yapabilmektedir. Numune ölçümünden önce cihaz ölçülecek sıcaklığa ayarlanmış ve ardından ısıtılmıştır. Cihaz içine batırılan cam ölçüm tüpünün içindeki kalıntıları temizlemek amacıyla etanol-aseton-toluen karışımları hazırlanmıştır. Çözücünün kalıntılarını ortadan kaldırmak için temiz, kuru bir hava akışı uygulanmıştır. Viskozitesi ölçülecek yakıt, cam ölçüm tüpüne konulmuş ve yakıtın sıcaklığının ölçülecek sıcaklığa ulaşması için 10 dakika ısıtılmıştır. Cam ölçüm tüpü ters akış prensibiyle çalışmaktadır. Cam ölçüm tüpünün üzerinde geniş bir balon bulunmaktadır. Kinematik viskoziteleri belirlemek için balon askılı anahtar yardımı ile doldurularak ters akışa bırakılmış ve ölçüm çizgisi aralıklarından kronometre ile akış süresi ölçülerek cam ölçüm tüpünün belirli sıcaklıklarının katsayıları ile çarpılmıştır. Ölçüm sonrası elde edilen veriler raporlanmıştır. Kinematik viskozite ölçümünün yapıldığı yakıtların adlandırılması Tablo 1’de ve ölçüm işleminin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 5’de verilmiştir.

Tablo 1. Kinematik Viskozite Tayini Yapılan Yakıtların Adlandırılması

| | Motorin (%) | | | | | | | | | | | |
|----------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|--|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | |
| NaOH (%) | N100 | N90D10 | N80D20 | N70D30 | N60D40 | N50D50 | N40D60 | N30D70 | N20D80 | N90D10 | D100 | |
| KOH (%) | K100 | K90D10 | K80D20 | K70D30 | K60D40 | K50D50 | K40D60 | K30D70 | K20D80 | K90D10 | D100 | |

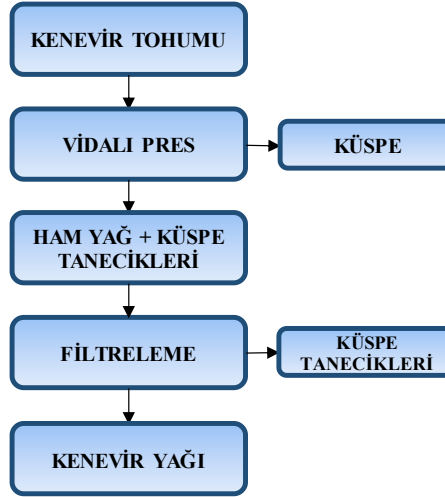


Şekil 5. Kinematik Viskozite Ölçüm Cihazı

BULGULAR VE TARTIŞMA

Kenevir tohumundan ham yağ elde edilmesi

Kayseri’de ticari bir firmadan satın alınan kenevir tohumları YOBÜ BİLTEM laboratuvarında bulunan vidalı yağ çıkarma presinde hizmet alımı ile sıkılarak kenevir yağı elde edilmiştir. Tohumdan en iyi verimde yağı çıkarmak için tohum sıcaklığı, tohum nem içeriği ve küspe çıkış ağız çap ölçüsü önem arz etmektedir. Yağ çıkarma işleminde Ø 10 mm ölçüsünde küspe çıkış ağız kullanılmıştır. Optimizasyon çalışmalarında kullanılmak üzere 100 kg kenevir tohumu sıkılmıştır. Sıkma işlemi sonrası elde edilen filtreleme öncesi ham yağ oranı %28,19 olarak tespit edilmiştir. Vidalı pres kullanılarak tohumdan yağ çıkarma akış şeması Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Kenevir Tohumundan Yağ Çıkarma Akış Şeması

Yağ Asidi Kompozisyonu

Hammadde olarak kullanılan kenevir yağına ait yağ asidi kompozisyonu YOBÜ BİLTEM laboratuvarında bulunan gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC-MS) cihazında hizmet alımı ile analiz edilmiştir. Kenevir yağına ait yağ asidi bileşimi Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Kenevir Yağının Yağ Asidi Kompozisyonu

| No | Yağ asidi | Molekül ağırlığı | Yapı | Formül | Kenevir yağı |
|----|---------------|------------------|------|--|--------------|
| 1 | Palmitik | 256 | 16:0 | C ₁₆ H ₃₂ O ₂ | 7,18 |
| 2 | Palmitoleik | 254 | 16:1 | C ₁₆ H ₃₀ O ₂ | 0,06 |
| 3 | Heptadekanoik | 270 | 17:0 | C ₁₇ H ₃₄ O ₂ | 0,04 |
| 4 | Stearik | 284 | 18:0 | C ₁₈ H ₃₆ O ₂ | 3,21 |
| 5 | Oleik | 282 | 18:1 | C ₁₈ H ₃₄ O ₂ | 18,23 |
| 6 | Linoleik | 280 | 18:2 | C ₁₈ H ₃₂ O ₂ | 53,74 |
| 7 | Linolenik | 278 | 18:3 | C ₁₈ H ₃₀ O ₂ | 16,55 |
| 8 | Araşidik | 312 | 20:0 | C ₂₀ H ₄₀ O ₂ | 0,41 |
| 9 | Gondoik | 312 | 20:1 | C ₂₀ H ₃₈ O ₂ | 0,25 |
| 10 | Behenik | 340 | 22:0 | C ₂₂ H ₄₄ O ₂ | 0,33 |
| | ΣDoymuş | | | | 11,17 |
| | ΣTDYA | | | | 18,54 |
| | ΣÇDYA | | | | 70,29 |

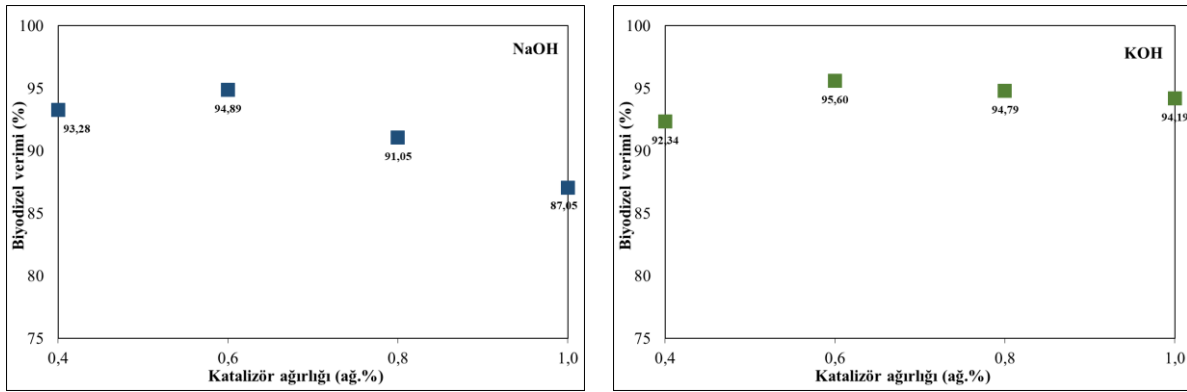
Tablo 2 incelendiğinde, kenevir yağındaki en baskın yağ asitleri sırasıyla linoleik asit (C18:2; ağırlıkça %53,74), oleik asit (C18:1; ağırlıkça %18,23), linolenik asit (C18:3; ağırlıkça %16,55) ve palmitik asit (C16:0; ağırlıkça %7,18) olduğu tespit edilmiştir. Minör yağ asitlerin ise stearik asit (C18:0; ağırlıkça %3,21), araşidik (C20:0; ağırlıkça %0,41) ve diğer asitler (ağırlıkça %1’in altında) olacak şekilde bulunmuştur. Tekli doymamış yağ asitleri (TDYA) ve çoklu doymamış yağ asitleri (ÇDYA) toplamının, doymuş yağ asitlerinden oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu çalışmadaki kenevir tohumu yağının %88,83 oranında doymamış yağ asitlerinden oluşması bu yağın doymamış yağlar grubunda olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, doymamışlık düzeyindeki artışın ester dönüşüm verimliliğini arttırdığı bilinmektedir (Oguz & Tolu, 2023). Kenevir biyodizeli; linoleik, linolenik ve oleik asitler gibi yüksek karbon zincir uzunluğuna sahip yağ asitlerine sahiptir. Karbon zinciri uzunluğu kinematik

viskozite artışını önemli ölçüde etkilemektedir (Folayan vd., 2019). Yağ asidi kompozisyonuna göre kenevir yağının ortalama moleküler ağırlığı 869,79 g/mol olarak belirlenmiştir.

Kenevir yağı biyodizeli üretiminin optimizasyonu

a. Katalizör çeşidi ve ağırlığının etkisi

Trigliserit içeren yağların biyodizele dönüşümü sırasında kullanılan katalizörün varlığı önemli bir rol oynamaktadır. Benzer olarak katalizör biyodizel üretim sürecinde biyodizelin oranını ve verimini belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır (Atadashi vd., 2013). Biyodizel verimi reaksiyonlarda kullanılan katalizör türlerinden etkilenebilir. Bu çalışmada NaOH ve KOH olmak üzere iki çeşit alkali katalizör kullanılmıştır. Katalizör miktarı, %0,2'lik aralıklarla ağırlıkça 0,4 ile 1,0 g arasında seçilmiştir. Başlangıç parametreleri, 5:1 metanol-yağ molar oranı, 600 rpm karıştırma hızı, 60°C reaksiyon sıcaklığı ve 60 dakikalık reaksiyon süresinde sabit tutulmuştur. Bu çalışmada kullanılan farklı katalizör türlerinin ve miktarlarının biyodizel verimi üzerindeki etkileri Şekil 7'de verilmiştir.



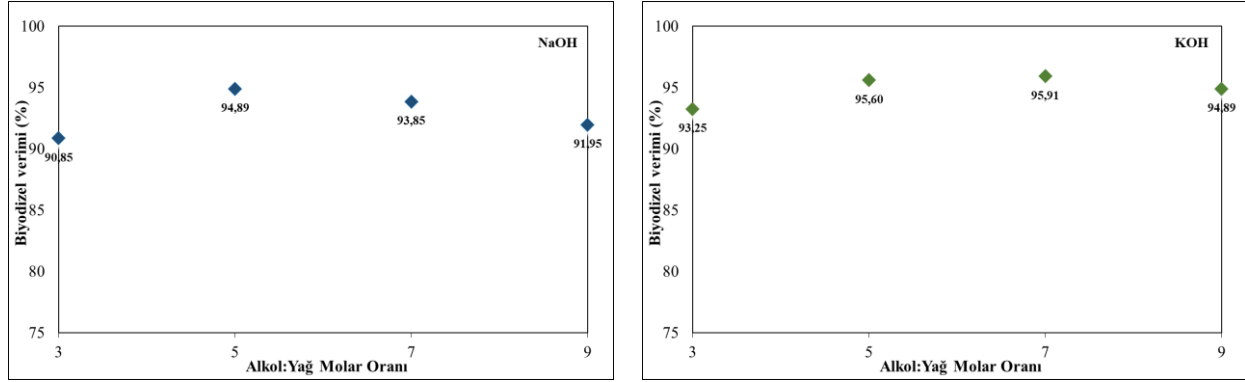
Şekil 7. Katalizör Çeşidinin ve Miktarının Biyodizel Verimi Üzerine Etkisi

Hem yüksek hem de düşük oranlarda kullanılan katalizörlerin verimi düşürdüğü ancak ikisi arasında optimal bir nokta olduğu tespit edilmiştir. Yüksek miktarda katalizör kullanıldığında yağdaki serbest yağ asitleri katalizörler ile tepkimeye girerek sabunlaşma meydana getirmektedir. Düşük miktarda katalizör kullanıldığında ise reaksiyon tamamlanamamakta ve ester elde edilememektedir (Sultana vd., 2014). Şekil 7 incelendiğinde, NaOH ve KOH kullanılarak yapılan çalışmalarda katalizör miktarı değişimi sonucu elde edilen en yüksek verim sırasıyla %94,89 (0,6g) ve %95,60 (0,6g) olarak tespit edilmiştir. Singh vd. (2006) ve Al-Sakkari vd. (2018) iki farklı çalışmada, NaOH ve KOH içeren farklı alkali katalizörleri kullanarak biyodizel üretimini araştırmışlardır. KOH'un NaOH'dan daha verimli bir katalizör olduğunu belirtmişlerdir. Denemelerde metanol içerisinde KOH'un çözünmesinin NaOH'dan daha iyi olduğu gözlenmiştir. Çözünmenin tam olarak gerçekleşmemesi durumunda trigliseritin fazla miktardaki NaOH katalizörü ile reaksiyona girmesi nedeniyle sabunlaşma meydana gelebilir (Efavi vd., 2018). Bu durum dikkate alındığında NaOH'un biyodizel verimi azalmış olabilir.

b. Alkol:Yağ molar oranının etkisi

Alkol:Yağ molar oranının biyodizel üretiminin dinamikleri açısından en kritik oran olduğu söylenebilir (Musa, 2016). Transesterifikasyonun stokiyometrik denklemine göre, 3 mol alkol 1 mol trigliserit ile reaksiyona girerek 3 mol yağ asidi esteri ve 1 mol gliserin vermektedir. Başka bir ifadeyle reaksiyonun tamamlanması için alkol:yağ molar oranının en az 3:1 olması gerekmektedir, ancak karışılabilirliği arttırmak ve alkol molekülü ile trigliserit arasındaki teması güçlendirmek için daha yüksek molar oranlar gerekmektedir (Hossain vd., 2010). Bu çalışma için alkol:yağ molar oranı; 3:1, 5:1, 7:1 ve 9:1 oranlarında seçilmiştir. Alkol:yağ molar oranının biyodizel verimi üzerindeki etkileri Şekil 8'de gösterilmiştir. Diğer işlem parametreleri 0,6 g katalizör ağırlığı (her iki katalizör için), 600 rpm karıştırma hızı, 60°C reaksiyon sıcaklığı ve 60 dakikalık reaksiyon süresinde sabit tutulmuştur. Şekil 8 incelendiğinde, NaOH ve KOH kullanılarak yapılan çalışmalarda alkol:yağ molar oranı değişimi sonucu elde edilen en yüksek verim sırasıyla %94,89 (5:1) ve %95,91 (7:1) olarak tespit edilmiştir. Trigliseritlerin transesterifikasyonu sırasında gliserin-yağ asidi bağlarını kırmak için fazla metanol gerekmektedir. Bu nedenle, daha yüksek alkol-yağ molar oranları, daha kısa sürede daha fazla ester dönüşümüne yol açmaktadır. Ayrıca yağdaki alkol miktarının artması biyodizel verimini ve biyodizel saflığını arttırmaktadır (Kavalli vd., 2022). Çok yüksek bir molar oran ise alkolün, gliserolün bir kısmının bozulmasına neden olan bir emülsifiye edici madde olarak görev yapması nedeniyle biyodizel veriminde bir

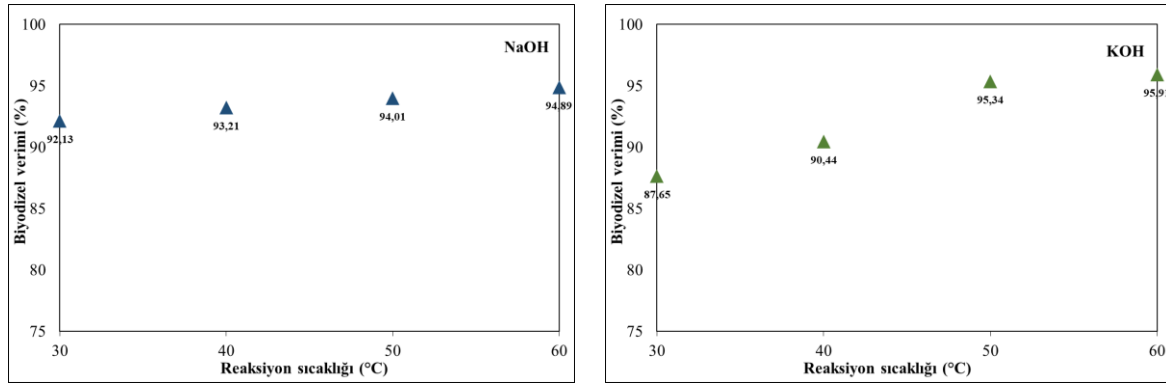
azalmaya yol açabilir. Bunun yanı sıra yüksek miktarda alkol kullanımı yüksek maliyetlere yol açmaktadır (Carlucci, 2022).



Şekil 8. Alkol:Yağ Molar Oranının Biyodizel Verimi Üzerine Etkisi

c. Reaksiyon sıcaklığının etkisi

Transesterifikasyon farklı sıcaklıklarda gerçekleşebilir. Reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon hızını ve biyodizel verimini etkilemektedir (Demirbaş, 2016). Bu çalışma için reaksiyon sıcaklığı 30, 40, 50 ve 60°C olarak seçilmiştir. Reaksiyon sıcaklığının biyodizel verimi üzerindeki etkileri Şekil 9'da gösterilmiştir. Diğer işlem parametreleri 0,6 g katalizör ağırlığı (her iki katalizör için), molar oran 5:1 (NaOH) ve 7:1 (KOH) ve 60 dk. reaksiyon süresinde sabit tutulmuştur.



Şekil 9. Reaksiyon Sıcaklığının Biyodizel Verimi Üzerine Etkisi

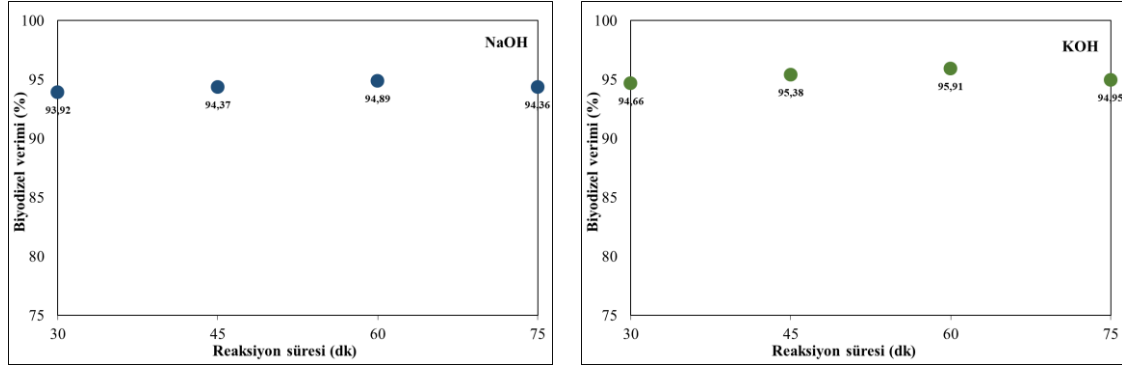
Şekil 9 incelendiğinde, NaOH ve KOH kullanılarak yapılan çalışmalarda reaksiyon sıcaklığının değişimi sonucu elde edilen en yüksek verim sırasıyla %94,89 (60°C) ve %95,91 (60°C) olarak tespit edilmiştir. Her iki katalizör ile yapılan denemelerde metanolün kaynama noktası sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta en yüksek verim elde edilmiştir. Sıcaklıktaki artış reaksiyon hızının artmasına neden olabilir. Sıcaklık arttıkça yağın viskozitesinin azalması nedeniyle daha fazla verim elde edilebilir. Bu durum yağın alkolle daha iyi karışması ve gliserolün biyodizelden daha hızlı ayrılmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, sıcaklığın aşırı artması biyodizel veriminin düşmesine neden olur. Yüksek sıcaklıklarda birincil reaksiyonun ardından meydana gelen termal bir reaksiyon olan ikincil reaksiyonlar transesterifikasyona göre daha hızlı meydana gelir ve bunun sonucunda biyodizel veriminde azalma sağlanır (Chozhavendhan vd., 2020; Verma & Sharma, 2016).

d. Reaksiyon süresinin etkisi

Reaksiyon süresi, trigliserit içeren yağların biyodizele dönüştürülmesinde transesterifikasyon işleminin dönüşüm verimliliğini etkiler. Reaksiyon süresi, üretilen biyodizelin verimi ile doğru orantılıdır ve reaksiyon süresi arttıkça dönüşüm oranı da artar (Abba vd., 2017). Bu çalışma için reaksiyon süresi 30, 45, 60 ve 75 dk. olarak belirlenmiştir. Reaksiyon süresinin biyodizel verimi üzerindeki etkileri Şekil 10'da verilmiştir. Diğer işlem parametreleri 0,6 g katalizör ağırlığı (her iki katalizör için), molar oran 5:1 (NaOH) ve 7:1 (KOH) ve 60°C reaksiyon sıcaklığı (her iki katalizör için) sabit tutulmuştur.

Şekil 10 incelendiğinde, NaOH ve KOH kullanılarak yapılan çalışmalarda reaksiyon süresinin değişimi sonucu elde edilen en yüksek verim sırasıyla %94,89 (60 dk.) ve %95,91 (60 dk.) olarak tespit edilmiştir. Yağ asidi esterlerinin

dönüşüm oranının reaksiyon süresiyle arttığı ifade edilebilir. Başlangıçta alkolün yağa karışıp dağılmasından dolayı reaksiyon yavaştır. Bir süre sonra reaksiyon giderek hızlı bir şekilde ilerlemeye başlar ve optimum sürede en yüksek verime ulaşır. Aşırı reaksiyon süresi, transesterifikasyon işleminin geriye doğru reaksiyonu sebebiyle ürün veriminde bir düşüşe yol açar, bu durum ester kaybına yol açarak daha fazla yağ asidinin sabun oluşturmaya neden olmaktadır (Efavi vd., 2018; Mashkour vd., 2017). Aslan & Eryılmaz (2020) ester dönüşümü için optimal reaksiyon süresinin bir saat uygun olabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 10. Reaksiyon Süresinin Biyodizel Verimi Üzerine Etkisi

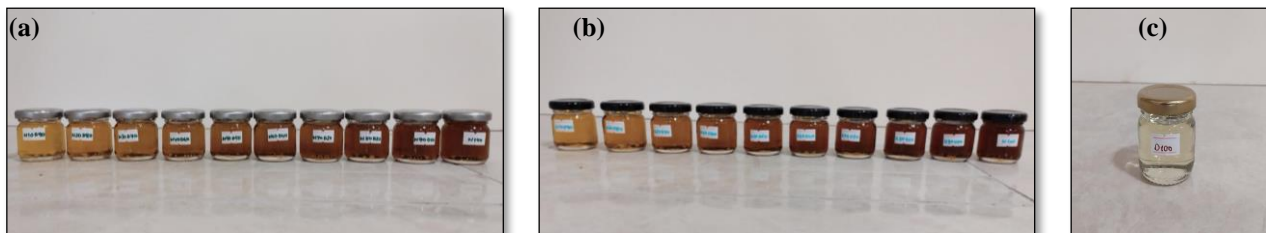
Optimum koşullar ve karışım yakıtların hazırlanması

Kenevir yağının metil alkol kullanılarak NaOH ve KOH olmak üzere iki farklı katalizör eşliğinde katalizör miktarı, alkol:yağ molar oranı, reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresi reaksiyon koşullarında klasik optimizasyon işlemi uygulanmıştır. Çalışmalar sonucunda her iki katalizör için optimum reaksiyon koşulları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. N100 ve K100 Biyodizel Yakıtların Optimum Reaksiyon Koşulları

| Biyodizeller | Optimum reaksiyon koşulları | | | | Verim (%) |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|-----------|
| | Katalizör miktarı (% ağı.) | Alkol:Yağ molar oranı | Reaksiyon Sıcaklığı (°C) | Reaksiyon Süresi (dk.) | |
| NaOH-Metanol Biyodizel (N100) | 0,6 | 5:1 | 60 | 60 | 94,89 |
| KOH-Metanol Biyodizel (K100) | 0,6 | 7:1 | 60 | 60 | 95,91 |

Tablo 3 incelendiğinde, her iki katalizör için alkol yağ molar oranı dışındaki parametrelerde aynı sonuçlar çıkmıştır. KOH kullanılarak elde edilen biyodizelin verimi NaOH ile üretilen biyodizelin veriminden daha yüksek olduğu görülmektedir. Literatür taraması yapıldığında çıkan sonuçların ilgili çalışmalarla uyumlu olduğu söylenebilir. Rashid ve Anwar (2008) yaptıkları çalışmada; NaOH, KOH, CH₃OK ve CH₃ONa eşliğinde, metil alkol kullanarak transesterifikasyon işlemi ile kolza biyodizeli elde etmek için optimizasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında en iyi katalizörün yüksek verimde KOH olduğu sonucuna varmışlardır. Al-Sakkari vd. (2018) ve Singh vd. (2006) çalışmalarında, metanol eşliğinde KOH ve NaOH bazik katalizörleri kullanımının biyodizel verimine etkilerini araştırmışlardır. KOH katalizörünün biyodizel veriminde daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır. KOH’un metanol içerisinde çözünmesi NaOH katalizörüne göre daha iyidir. Katalizörün alkol içerisinde tam veya yeterli çözünmesinin gerçekleşmemesi trigliseridin fazla miktarda katalizör ile reaksiyona girerek sabunlaşma meydana gelmesine neden olabilmektedir (Hassan vd., 2023; Chanakaewsonboon vd., 2020). Optimizasyon işlemleri sonucu elde edilen optimal veriler ile N100 ve K100 için 250 mL olacak şekilde biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında K100 ve N100 saf biyodizeller, motorin ile %10’dan %90’a kadar harmanlanmıştır. Karışım yakıtlar 40 mL cam kavanoz içerisinde kinematik viskozite tayininin yapılması için muhafaza edilmiştir. Karışım yakıtlar ve saf motorin (D100) Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. a. N100 ve Karışım Yakıtlar b. K100 ve Karışım Yakıtlar c. Saf Dizel Yakıt (D100)

SONUÇLAR

Bu çalışmada öncelikli olarak, endüstriyel kenevir (*Cannabis sativa* L.) tohumlarından vidalı yağ çıkarma presindeki ekstraksiyonu sonucu elde edilen kenevir ham yağı metanol ve NaOH-KOH katalizörlerini kullanarak transesterifikasyon prosesi ile farklı optimizasyon parametreleri (katalizör ağırlığı, alkol:yağ molar oranı, reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresi) ışığında klasik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları neticesinde, maksimum biyodizel üretim verimi, 7:1 metanol:yağ molar oranı, 0,6 g KOH ağırlığında, 60°C reaksiyon sıcaklığı ve 60 dk. reaksiyon süresinde % 95,91 olarak elde edilirken, minimum biyodizel üretim verimi; 5:1 metanol:yağ molar oranı, 0,6 g NaOH ağırlığında, 60°C reaksiyon sıcaklığı ve 60 dk. reaksiyon süresinde % 94,89 olarak belirlenmiştir. Sonraki aşamada elde edilen biyodizeller motorin ile belirli oranlarda harmanlanarak kinematik viskozite değerleri incelenmiştir. Çıkan sonuçlarda K100 yakıtının 5,33 mm²/s ile en yüksek kinematik viskozite değerine, D100 yakıtının 2,81 ile en düşük kinematik viskozite değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Biyodizel verimi tespitinde katalizör ağırlığı, alkol:yağ molar oranı ve reaksiyon sıcaklığı işlem parametrelerinin etkili olduğu görülmektedir. Belirlenen değerlere karşılık gelen en yüksek ve en düşük biyodizel verimlerinde kayda değer artışlar gözlemlenmiştir. Reaksiyon sürelerinde ise biyodizel verimleri arasında yatay bir seyir izlenmiş ve önemli bir değişim görülmemiştir. Ayrıca üretilen yakıtların kinematik viskozite değerlerinin ASTM D6751 standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir. Kenevir yağından üretilen biyodizelin fosil yakıtlara uygun bir alternatif olduğu sonucunu çıkarmak mümkündür. Ancak bu yakıtların motor performansını ve ürettiği emisyonları analiz etmek için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında verilen proje desteğine teşekkür ederiz (Proje No: 1919B012205988).

KAYNAKÇA

- Abba, E.C., Nwakuba, N.R., Obasi, S.N., & Enem, J.I. (2017). Effect of reaction time on the yield of biodiesel from Neem seed oil. *American Journal of Energy Science*, 4(2), 5-9.
- Abbah, E.C., Nwandikom, G.I., Egwuonwu, C.C., & Nwakuba, N.R. (2016). Effect of reaction temperature on the yield of biodiesel from neem seed oil. *American Journal of Energy Science*, 3(3), 16-20.
- Afif, M.K., & Biradar, C.H. (2019). Production of biodiesel from Cannabis sativa (Hemp) seed oil and its performance and emission characteristics on DI engine fueled with biodiesel blends. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6(8), 246-253.
- Ahmad, M., Khan, M.A., Zafar, M., & Sultana, S. (2012). Practical handbook on biodiesel production and properties. CRC Press.
- Al-Sakkari, E.G., El-Sheltawy, S.T., Soliman, A., & Ismail, I. (2018). Transesterification of low FFA waste vegetable oil using homogeneous base catalyst for biodiesel production: optimization, kinetics and product stability. *Journal of Advanced Chemical Sciences*, 586-592. <https://doi.org/10.30799/jacs.195.18040305>.
- Alcheikh, A. (2015). Advantages and challenges of hemp biodiesel production. Faculty of Engineering and Sustainable Development, Master's thesis. Gavle University: Gävle, Sweden.
- Anani, N. (2020). Renewable energy technologies and resources. Artech House, Norwood.
- Anwar, M. (2021). Biodiesel feedstocks selection strategies based on economic, technical, and sustainable aspects. *Fuel*, 283, 119204. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119204>.
- Aslan, V., & Eryilmaz, T. (2020). Polynomial regression method for optimization of biodiesel production from black mustard (*Brassica nigra* L.) seed oil using methanol, ethanol, NaOH, and KOH. *Energy*, 209, 118386. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118386>.
- Atadashi, I.M., Aroua, M.K., Aziz, A.A., & Sulaiman, N.M.N. (2013). The effects of catalysts in biodiesel production: A review. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 19(1), 14-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2012.07.009>.

- Bhuiya, M.M.K., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., Ashwath, N., Azad, A.K., & Hazrat, M.A. (2016). Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel—Part 2: Properties, performance and emission characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1129–1146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.086>.
- Carlucci, C. (2022). An overview on the production of biodiesel enabled by continuous flow methodologies. *Catalysts*, 12(7), 717. <https://doi.org/10.3390/catal12070717>.
- Chanakaewsomboon, I., Tongurai, C., Photaworn, S., Kungsanant, S., & Nikhom, R. (2020). Investigation of saponification mechanisms in biodiesel production: Microscopic visualization of the effects of FFA, water and the amount of alkaline catalyst. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103538. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103538>.
- Chozhavendhan, S., Singh, M.V.P., Fransila, B., Kumar, R.P., & Devi, G.K. (2020). A review on influencing parameters of biodiesel production and purification processes. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 1, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.04.002>.
- Coniwanti, P., Surliadji, L., & Triandini, D. (2019, September). The effects of catalysts type, molar ratio, and transesterification time in producing biodiesel from beef tallow. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 620, No. 1, p. 012019). IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/620/1/012019>.
- Demirbas, A. (2016). Biodiesel from corn germ oil catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(13), 1890-1897. <https://doi.org/10.1080/15567036.2015.1004388>.
- Efavi, J. K., Dodoo-Arhin, D., Kanbogah, D., Apalangya, V., Nyankson, E., Tiburu, E. K., Dodoo-Arhin, D., Onwona-Agyeman, B., & Yaya, A. (2018). The effect of NaOH catalyst concentration and extraction time on the yield and properties of Citrullus vulgaris seed oil as a potential biodiesel feed stock. *South African Journal of Chemical Engineering*, 25(1), 98-102. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.03.002>.
- Elango, R.K., Sathiasivan, K., Muthukumaran, C., Thangavelu, V., Rajesh, M., & Tamilarasan, K. (2019). Transesterification of castor oil for biodiesel production: Process optimization and characterization. *Microchemical Journal*, 145, 1162–1168. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.12.039>.
- Folayan, A.J., Anawe, P.A.L., Aladejare, A.E., & Ayeni, A.O. (2019). Experimental investigation of the effect of fatty acids configuration, chain length, branching and degree of unsaturation on biodiesel fuel properties obtained from lauric oils, high-oleic and high-linoleic vegetable oil biomass. *Energy Reports*, 5, 793–806. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.06.013>.
- Ghazali, W.N.M.W., Mamat, R., Masjuki, H.H., & Najafi, G. (2015). Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 585–602. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.031>.
- Gupta, A.R., Jalan, A.P., Rathod, V.K. (2018). Solar energy as a process intensification tool for the biodiesel production from hempseed oil. *Energy Conversion and Management*, 171, 126-132. <https://doi.org/10.1201/b18947-7>.
- Hassan, A.A., Erwa, I.Y., Salim, R.A., Ishag, O.A.O., & Ahmed, M.A. (2023) Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil Using KOH/Al₂O₃ as a Heterogeneous Catalyst. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.1163670>.
- Hossain, A.B.M.S., Boyce, A.N., Salleh, A., & Chandran, S. (2010). Impacts of alcohol type, ratio and stirring time on the biodiesel production from waste canola oil. *African Journal of Agricultural Research*, 5(14), 1851-1859. <https://doi.org/10.5897/AJAR09.135>.
- Iriondo-DeHond, A., Alonso-Esteban, J.I., Gallego-Barceló, P., García, P., Abalo, R., & Castillo, M. (2023). Nutrition security of hemp for human consumption. In P. Ferranti (Ed.), *Sustainable food science - A comprehensive approach* (pp. 60–88). Netherlands: Elsevier.
- Jain, A., Bora, B. J., Kumar, R., Sharma, P., Deepanraj, B., Irshad, K., & Ravikiran, C. (2023). Application of hybrid Taguchi L16 and desirability for model prediction and optimization in assessment of the performance of a novel Water Hyacinth biodiesel run diesel engine. *Fuel*, 339, 127377. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127377>.
- Johnson, R. (2018). *Hemp as an agricultural commodity* (pp. 1–29). Washington, DC, USA: Congressional Research Service.

- Kavalli, K., Hebbar, G.S., Shubha, J.P., Adil, S.F., Khan, M., Hatshan, M.R., Almutairi, A.M., & Shaik, B. (2022). Green Synthesized ZnO Nanoparticles as Biodiesel Blends and Their Effect on the Performance and Emission of Greenhouse Gases. *Molecules*, 27(9), 2845. <https://doi.org/10.3390/molecules27092845>.
- Khan, I. A., Prasad, N., Pal, A., & Yadav, A.K. (2020). Efficient production of biodiesel from Cannabis sativa oil using intensified transesterification (hydrodynamic cavitation) method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(20), 2461-2470. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1607946>.
- Kuppili, S.K., Kumar, A., & Kim, D. S. (2020). Biodiesel Properties Depending on Blends and Feedstocks: 155Cloud Point, Kinematic Viscosity, and Flash Point. In H. Joo, A. Kumar (Eds.), *World Biodiesel Policies and Production* (pp. 155-174). CRC Press.
- Leung, D.Y., Wu,X., & Leung, M.K.H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied energy*, 87(4), 1083-1095. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>.
- Lin, C.Y., & Lin, Y.W. (2012). Fuel characteristics of biodiesel produced from a high-acid oil from soybean soapstock by supercritical-methanol transesterification. *Energies*, 5(7), 2370–2380. <https://doi.org/10.3390/en5072370>.
- Liu, Y., & Ren, J. (2021). Overview of sustainability, sustainable development and sustainability assessment: Concepts and methods. In *Energy Systems Evaluation (Volume 1)* (pp. 1–29). Springer, Cham.
- Long, F., Liu, W., Jiang, X., Zhai, Q., Cao, X., Jiang, J., & Xu, J. (2021). State-of-the-art technologies for biofuel production from triglycerides: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111269>.
- Martínez, G., Sánchez, N., Encinar, J.M., & González, J.F. (2014). Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and oil mixtures. Influence of methyl esters distribution. *Biomass and Bioenergy*, 63, 22–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.034>.
- Mashkour, A.P.D.M.A., & Mohammed, L.A.A. (2017). Impact of mixing speed & reaction time on the biodiesel production from sunflower oil. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 24(3), 101-134.
- Musa, I.A. (2016). The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 21-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.007>.
- Nguyen, V.N., Sharma, P., Kumar, A., Pham, M.T., Le, H.C., Truong, T.H., & Cao, D.N. (2023). Optimization of biodiesel production from Nahar oil using Box-Behnken design, ANOVA and grey wolf optimizer. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(4). <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.54941>.
- Oguz, H., & Tolu, M.C. (2023). Investigation of fuel properties of biodiesel produced from hemp seed oil. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 12(1), 1-8.
- Önder, F., Ağır, H. (2023). Panel Econometric Analysis of the Relationship between Energy Consumption and Economic Growth: The Case of the Bric Countries. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 10(4), 922–932. <https://doi.org/10.30910/turkjans.1355868>.
- Pablo-Romero, M.D.P., & Sánchez-Braza, A. (2015). Productive energy use and economic growth: Energy, physical and human capital relationships. *Energy Economics*, 49, 420–429. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2015.03.010>.
- Phankosol, S., & Krisnangkura, K. (2015). Estimation kinematic viscosity of biodiesel produced by ethanolysis. *Engineering Transactions: A Research Publication of Mahanakorn University of Technology*, 18(2), 96-99.
- Phipps, B., & Schluttenhofer, C. (2022). Perspectives of industrial hemp cultivation. In M. Pojić, B.K. Tiwari (Eds.), *Industrial hemp: Food and nutraceutical applications* (pp. 1–36). Academic Press.
- Ramírez-Verduzco, L.F., Rodríguez-Rodríguez, J.E., & del Rayo Jaramillo-Jacob, A. (2012). Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition. *Fuel*, 91(1), 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.06.070>.

- Rashid, U., Bhatti, S.G., Ansari, T.M., Yunus, R., & Ibrahim, M. (2016). Biodiesel production from Cannabis sativa oil from Pakistan. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(6), 865-875. <https://doi.org/10.1080/15567036.2013.803179>.
- Rashid, U., & Anwar, F. (2008). Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil. *Fuel*, 87(3), 265-273. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.00>.
- Sáez-Bastante, J., Fernández-García, P., Saavedra, M., López-Bellido, L., Dorado, M.P., & Pinzi, S. (2016). Evaluation of Sinapis alba as feedstock for biodiesel production in Mediterranean climate. *Fuel*, 184, 656-664. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.022>.
- Said, Z., Sharma, P., Nhung, Q.T.B., Bora, B.J., Lichtfouse, E., Khalid, H.M., Luque, R., Nguyen, X.P., & Hoang, A. T. (2023). Intelligent approaches for sustainable management and valorisation of food waste. *Bioresourcetechnology*, 128952. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128952>.
- Saydut, A., Kafadar, A.B., Aydin, F., Erdogan, S., Kaya, C., & Hamamci, C. (2016). Effect of homogeneous alkaline catalyst type on biodiesel production from soybean [Glycine max (L.) Merrill] oil. *Indian Journal of Biotechnology*, 15(4), 596-600.
- Sharma, P., Sivaramakrishnaiah, M., Deepanraj, B., Saravanan, R., & Reddy, M. V. (2022). A novel optimization approach for biohydrogen production using algal biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*. Article in press. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.274>.
- Shrivastava, P., Rajak, U., Nashine, P., & Verma, T.N. (2021). Performance and emission characteristics of a compression ignition engine fueled with roselle and karanja biodiesel. In S.M. Sapuan, R. Nadlene, A.M. Radzi, & R.A. Ilyas (Eds.), *Roselle: Production, processing, products and biocomposites* (pp. 165-176). Academic Press.
- Singh, A., He, B., Thompson, J., & Van Gerpen, J. (2006). Process optimization of biodiesel production using alkaline catalysts. *Applied Engineering in Agriculture*, 22(4), 597-600.
- Small, E. (2015). Evolution and classification of Cannabis sativa (marijuana, hemp) in relation to human utilization. *The botanical review*, 81, 189-294. <https://doi.org/10.1007/s12229-015-9157-3>.
- Stamenković, O.S., Veličković, A.V., Kostić, M.D., Joković, N.M., Rajković, K.M., Milić, P.S., & Veljković, V.B. (2015). Optimization of KOH-catalyzed methanolysis of hempseed oil. *Energy Conversion and Management*, 103, 235-243. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.054>.
- Strzelczyk, M., Lochyńska, M., & Chudy, M. (2022). Systematics and botanical characteristics of industrial hemp Cannabis sativa L. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5804-5826. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1889443>.
- Sultana, S., Khalid, A., Ahmad, M., Zuhairi, A.A., Teong, L.K., Zafar, M., & Hassan, F.U. (2014). The production, optimization, and characterization of biodiesel from a novel source: Sinapis alba L. *International Journal of Green Energy*, 11(3), 280-291. <https://doi.org/10.1080/15435075.2013.772520>.
- Verma, P., & Sharma, M.P. (2016). Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*, 62, 1063-1071. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.054>.
- Wang, Y. (2019). Applications of rice bran oil. In L.Z. Cheong, X. Xu (Eds.), *Rice bran and rice bran oil* (pp. 159-168). AOCS Press.
- Wirtshafter, D.E. (2004). Ten years of a modern hemp industry. *Journal of Industrial Hemp*, 9(1), 9-14. https://doi.org/10.1300/J237v09n01_03.
- Yesilyurt, M.K., & Cesur, C. (2020). Biodiesel synthesis from Styra officinalis L. seed oil as a novel and potential non-edible feedstock: A parametric optimization study through the Taguchi technique. *Fuel*, 265, 117025. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117025>.
- Yıldırım, H.H. (2019). Yenilenebilir enerji yatırımlarındaki teşviklerin yatırım performansları üzerine etkisi. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(3), 330-345. <https://doi.org/10.29106/fesa.605785>.
- Zahan, K.A., & Kano, M. (2018). Biodiesel production from palm oil, its by-products, and mill effluent: A review. *Energies*, 11(8), 2132. <https://doi.org/10.3390/en11082132>.