

VII. INTERNATIONAL ANKARA MULTIDISCIPLINARY STUDIES CONGRESS

DERİN ÖTEKTİK ÇÖZÜCÜ KATALİZÖRLÜĞÜNDE BİTKİSEL ATIK YAĞLARIN BİYODİZELE KATALİTİK DÖNÜŞÜMÜ

CATALYTIC CONVERSION OF WASTE COOKING OILS TO BIODIESEL BY A DEEP EUTECTIC SOLVENT CATALYST

Yl. Öğr. Elif DEMİR

Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, Türkiye.

ORCID NO: 0000-0003-0080-1193

Doç. Dr. Selda DOĞAN ÇALHAN

Mersin Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Mersin, Türkiye.

ORCID NO: 0000-0003-2589-8585

Prof. Dr. Özgür SÖNMEZ

Mersin Üniversitesi, Fen Fakültesi, Mersin, Türkiye.

ORCID NO: 0000-0003-0322-4854

ÖZET

Kullanılmış atık bitkisel yağlardan biyodizel üretimi sürdürülebilir ve uygun maliyetli bir enerji alternatifi olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Kullanılmış atık bitkisel yağların biyodizel üretiminde kullanımı hem üretim maliyetini düşürecek hem de atık yağların çevreye vermiş olduğu zararlar azaltılmış olacaktır. Bu çalışmanın amacı atık bitkisel pişirme yağından derin ötektik çözücü katalizörü kullanılarak mikrodalga destekli transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel sentezinin gerçekleştirilmesidir. Katalizör olarak kullanılan derin ötektik çözücü, tetraetil amonyum bromür ve p-toluen sülfonik asitten sentezlenmiş ve yapısı ¹H-NMR spektroskopisi kullanılarak karakterize edilmiştir. Mikrodalga destekli transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel sentezinde test edilen parametreler sıcaklık, zaman, metanol/yağ molar oranı ve katalizör miktarı olmuştur. Test edilen parametreler doğrultusunda en iyi biyodizel dönüşümü %96,6 ile 150° C'de, 2 saat reaksiyon süresinde, 28:1 metanol/yağ molar oranı ve %10 (a:a) katalizör kullanıldığında elde edilmiştir. Elde edilen biyodizel ¹H-NMR spektroskopisi ile karaktere edilmiştir. Diğer taraftan, geleneksel ısıtma yöntemi ile de biyodizel sentezi gerçekleştirilmiş ve mikrodalga yöntem ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar mikrodalga yöntemin, geleneksel ısıtma yöntemine göre biyodizel sentezinin daha kısa sürede gerçekleştirilebileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Biyodizel, kullanılmış bitkisel atık yağ, derin ötektik çözücü, mikrodalga yöntem.

ABSTRACT

Biodiesel production from waste cooking oils has significant potential as a sustainable and cost-effective energy alternative. The use of waste cooking oils in biodiesel production will both reduce the production cost and reduce the environmental damage of waste oils. The aim of this study is to synthesize biodiesel from waste cooking oil by microwave-assisted transesterification reaction using a deep eutectic solvent catalyst. A combination of deep eutectic solvent and microwave method has been considered as a promising alternative method to accelerate the transesterification reaction to be used in biodiesel production. The deep eutectic solvent used as the catalyst was synthesized from tetraethyl ammonium bromide and p-toluene sulfonic acid and its structure was characterized using ¹H-NMR spectroscopy. The parameters tested in the synthesis of biodiesel by microwave-assisted transesterification method were temperature, time, methanol/oil molar ratio, and amount of catalyst. According to the tested parameters, the best biodiesel conversion was obtained at 96.6% to 150°C, 2 hours reaction time, 28:1 methanol/oil molar ratio, and 10 wt. % catalyst. The obtained biodiesel was characterized by ¹H-NMR spectroscopy. On the other hand, biodiesel synthesis was performed with the conventional heating method and compared with the microwave method. The results showed that the microwave method can perform biodiesel synthesis in a shorter time than the conventional heating method.

Keywords: Biodiesel, waste cooking oil, deep eutectic solvent, microwave method

GİRİŞ

Günümüzde nüfusun hızla artması, artan sanayileşme ve enerji yoğun ekonomik faaliyetler nedeniyle enerji tüketimi sürekli artmaktadır. Günümüzde toplumlar artan bu enerji taleplerini karşılamak için büyük ölçüde fosil yakıtlardan karşılamaktadır. Günlük kullandığımız enerjinin en az %80'i bu yakıtlardan gelmektedir [1]. Fakat

VII. INTERNATIONAL ANKARA MULTIDISCIPLINARY STUDIES CONGRESS

fosil yakıtların ulaşım, endüstri, tarım ve elektrik santrallerinde kullanılması sonucunda önemli miktarda zararlı emisyonlar atmosfere salınır ve bu da fosil yakıtları küresel ısınma, buzulların erimesi, çölleşme ve asit yağmurları gibi çeşitli çevre sorunlarının birincil nedeni haline getirir [2-4]. Bu nedenle, gelecekte toplumların enerji ihtiyacını karşılayacak fosil yakıtlara alternatif yenilenebilir, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Biyoyakıtlar fosil kaynaklara bağımlılığı azaltacak ve gelecekte potansiyel bir enerji kaynağı olarak giderek önem kazanacaktır. Bir biyoyakıt olarak, biyodizel fosil yakıtlara alternatif olabilecek, yenilenebilir, çevre dostu, temiz ve gelecek vadeden yeşil bir yakıttır [5]. Biyodizel, çevre dostu, biyolojik olarak bozulabilir, yanıcı olmayan, düşük karbon monoksit emisyonuna sahip, kükürt içermeyen ve toksik olmayan bir yapıya sahiptir [6].

Kullanılan hammaddeye bağlı olarak, biyodizelin maliyetli olduğu ve fiyatının petrol motorine göre yarı kat daha yüksek olduğu bildirilmektedir. Literatüre göre, biyodizel fiyatının %70-95'i, bitkisel veya hayvansal yağlar olan hammadde maliyetinden kaynaklanmaktadır [7]. Bu nedenle, biyodizelin ekonomik uygulanabilirliğini artırmak için atık yemeklik yağ gibi yenilebilir olmayan yağın biyodizel üretiminde kullanılması üretim maliyetini düşürmede etkili olacaktır. Ancak bitkisel yağın pişirme veya kızartma amacıyla kullanımı sırasında yağ, ışık, ısı ve oksijene verdikleri tepkimeler nedeniyle polimerizasyon, hidroliz ve oksidasyonu gibi çeşitli kimyasal reaksiyonlara girebilir. Bunun sonucunda da dimer, polimer, oksitlenmiş trigliseritler (aldehitler, ketonlar, vb. elde etmek için hidroperoksitler ile) digliserit ve yağ asitleri gibi farklı kimyasal bileşikler oluşur [8-10]. Atık pişirme yağlarının biyodizel üretiminde kullanılması sadece üretim maliyetini düşürmekle kalmaz, ayrıca atık yağların çevreye vereceği zararlar da minimize edilmiş olur.

Genel olarak biyodizel, uygun bir katalizör varlığında kısa zincirli bir alkol (etanol veya metanol gibi) ile trigliseritlerin (yenilebilir olmayan yağlar, yenilebilir yağlar ve hayvansal yağlarda bulunan) transesterifikasyonundan üretilir [11]. Homojen, heterojen ve enzimler gibi çeşitli katalizörler biyodizel üretiminde kullanılmaktadır. Biyodizel üretiminde katalizör seçimi reaksiyon zamanını, verimini ve üretim maliyetini etkilediği için son derece önemlidir. Biyodizel üretiminde NaOH, KOH gibi alkali ve H₂SO₄ gibi asidik homojen katalizörler yaygın olarak kullanılmalarına rağmen, bu katalizörlerin çeşitli dezavantajları vardır. Örneğin atık yağlar gibi serbest yağ asidi içeriği fazla olan bitkisel yağlarda alkali katalizörler kullanıldığında hem verimin düşmesine hem de ayırma problemlerine neden olan sabunlaşma meydana gelir. Diğer taraftan geleneksel asidik katalizörler kullanıldığında ise hem ekipmanlarda korozyona hem de asidik atıkların oluşumuna neden olurlar. Ayrıca bu katalizörlerin geri kazanımları zordur ve tekrar kullanılmazlar. Bu da işletme maliyetini artırır ve büyük miktarlarda atık su üretir [12,13]. Son yıllarda, araştırmacılar bu sorunların üstesinden gelmek için bazı yeni katalizörler üzerine çalışmalar yapmaktadırlar. Derin ötektik çözücüler (DÖÇ) biyodizel üretiminde kullanılabilecek alternatif katalizörler arasında yer alma potansiyeline sahiptirler. Derin ötektik çözücü, bir hidrojen bağı alıcısı (HBA) ile bir hidrojen bağı vericisi (HBV) arasındaki güçlü bir hidrojen bağı etkileşimi ile oluşturulan bir tür çevre dostu çözücüdür [14]. Derin ötektik çözücüler, yüksek termal ve kimyasal kararlılık, düşük buhar basıncı, düşük yanıcılık ve yüksek çözme kapasitesi gibi iyonik sıvılara benzer özelliklere sahiptir. Ayrıca düşük fiyat, yüksek biyolojik parçalanabilirlik ve düşük toksisite gibi iyonik sıvılara göre birçok avantajı vardır [15].

Bu çalışma, alternatif yeşil yöntemler kullanarak atık bitkisel yağdan biyodizel üretmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, biyodizel üretimi, mikrodalga yöntemi ve bir DÖÇ katalizörü kullanılarak bir transesterifikasyon reaksiyonu yoluyla gerçekleştirilmiştir. Katalizör miktarı, reaksiyon süresi, sıcaklık ve metanol: yağ mol oranı gibi biyodizel dönüşümünü etkileyen parametreler araştırılmış ve tartışılmıştır. Ayrıca geleneksel ve mikrodalga yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

YÖNTEM

Materyal

Bu çalışmada kullanılan atık pişirme yağı, Mersin Üniversitesi Kampüs alanında bulunan bir kafeteryadan temin edilmiştir. Temin edilen atık yağ filtre kâğıdı kullanılarak süzme işlemine tabi tutulmuş, böylece asılı katı parçacıkları ve yiyecek kalıntıları uzaklaştırılmıştır.

Derin Ötektik Çözücünün Sentezi ve Karakterizasyonu

p-toluensülfonik asit (PTSA) monohidrat ve tetraetilamonyum bromür (TEAB)'ün belirli bir molar oranda (1:1) karıştırılmasıyla TEAB:PTSA DÖÇ'ü hazırlanmıştır. TEAB ve PTSA berrak bir sıvı oluşuncaya kadar 80 °C'de 50 ml'lik bir balon içerisinde manyetik karıştırıcı üzerinde tüm katı çözülene ve karışım tutarlı homojen bir karışım oluşuncaya kadar karıştırılmıştır. Daha sonra karışım vakum etüvünde 60 °C de kurutulmuş ve sonraki kullanımlar için bir desikatörde saklanmıştır [16].

VII. INTERNATIONAL ANKARA MULTIDISCIPLINARY STUDIES CONGRESS

Mikrodalga Isıtma ile Biyodizel Sentezi

Atık yağın biyodizele mikrodalga destekli katalitik dönüşümü Milestone marka mikrodalga reaksiyon sisteminde 100 mL hacmindeki teflon reaktörler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Görsel 1a). Reaktör içine 5 g yağ alınmış ve belirlenen miktarlarda metanol ve katalizör ilave edilerek belirlenen sıcaklık ve reaksiyon sürelerinde transesterifikasyon tepkimesi gerçekleştirilmiştir. Test edilen parametreler sıcaklık (100-160 °C), zaman (0,5-4,0 s), metanol/yağ molar oranı (5:1-37:1) ve katalizör miktarı (%1-20, a/a) olmuştur. Reaksiyon tamamlandıktan sonra, reaktör sıcaklığının oda sıcaklığına kadar düşmesi beklenmiş ve ardından karışım bir ayırma hunisine alınmıştır. Karışım ayırma hunisinde bir gece boyunca bekletilerek iki fazın oluşması sağlanmıştır. Üst faz biyodizel içerirken, alt faz gliserin ve DÖÇ katalizör içerir. Alt faz ayrıldıktan sonra, üst biyodizel fazı ılık ultra saf su ile üç kez yıkanarak kalıntı gliserin ve katalizör giderilmiştir. Daha sonra biyodizel silika ile muamele edilmiş ve ardından 80 °C'de bir gece boyunca kurutulmuştur.

Geleneksel Isıtma ile Biyodizel Sentezi

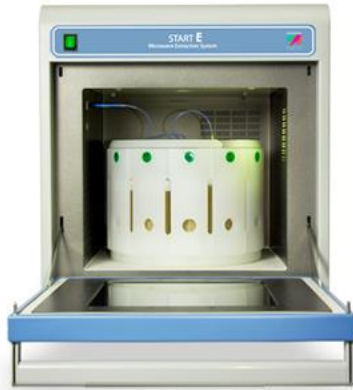
Mikrodalga ısıtma ile geleneksel ısıtmanın bir karşılaştırılmasının yapılması için mikrodalga yöntemde belirlenen optimum koşullarda geleneksel ısıtma ile atık yağın katalitik transesterifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sıcaklık ve basınca dayanıklı cam bir reaktör içinde bir yağ banyosu yapılarak gerçekleştirilmiştir (Görsel 1b). Ürünün saflaştırılması ve elde edilmesi mikrodalga yöntemde anlatıldığı gibi yapılmıştır.

Ürün Analizi

Metil ester dönüşümü olarak tanımlanan biyodizel dönüşümü ¹H NMR tekniği kullanarak gerçekleştirilmiştir. Çözücü olarak CDCl₃ kullanılmış ve dönüşüm aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmiştir [5].

$$\text{Dönüşüm} = 100 \times (2A_{\text{ME}}) / (3A_{\text{CH}_2})$$

A_{ME}= NMR spektrumunda 3,6 ppm'deki metil ester pikinin metoksi protonlarının integrali. A_{CH₂}= 2,3 ppm deki α-metilen pikinin integrali



a) Mikrodalga Yöntem



b) Geleneksel Yöntem

Görsel 1. Çalışmada Kullanılan Biyodizel Üretim Yöntemleri

BULGULAR

Reaksiyon Parametrelerinin Biyodizel Dönüşümü Üzerine Olan Etkisi

Biyodizel sentezini ekonomik kılmak için, ester değişimi reaksiyonunu optimize etmek önemlidir. Bu çalışmada, biyodizel sentezini önemli ölçüde etkileyen metanolün yağa oranı, katalizör miktarı, reaksiyon süresi ve sıcaklık gibi reaksiyon değişkenlerini araştırmak için deneyler yapılmıştır. Sonuçlar Görsel 2'de gösterilmiştir.

Görsel 2a da metanol/yağ molar oranının biyodizel dönüşümü üzerine olan etkisi gösterilmiştir. Teorik olarak 1 mol biyodizel üretmek için, 3 mol alkol ve 1 mol trigliserit tepkimeye girer. Bu oran, 1 mol biyodizel üretmek için pratik olarak yeterli değildir, çünkü ester değişimi tersine çevrilebilir bir reaksiyondur. Düşük miktarda alkol kullanılması durumunda, dönüşüm uzun süreli bir reaksiyon gerektirir [17]. Görselde görüldüğü gibi, metanol miktarı düşüken dönüşüm düşük olarak gerçekleştirilmiştir. Metanol miktarının artması ile dönüşüm artmış ve

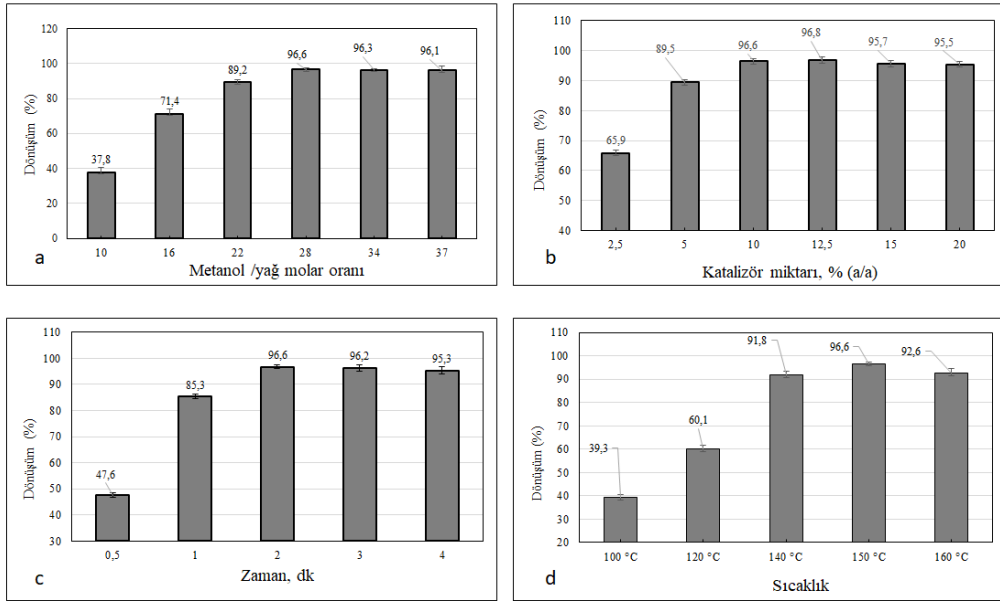
VII. INTERNATIONAL ANKARA MULTIDISCIPLINARY STUDIES CONGRESS

daha sonra da sabit kalmıştır. En iyi dönüşüm metanol/yağ molar oranı 28:1 olduğunda elde edilmiştir, bu yüzden diğer parametrelerin etkisini incelemek için metanol/yağ molar oranı 28:1 olarak alınmıştır.

Genelde trigliserit ve metanol birbiri içinde karışmazlar ve bundan dolayı bu iki bileşenden tek bir faz oluşmaz. Bu da iki bileşen arasındaki temasın az olmasına ve bunun sonucunda reaksiyon hızının yavaş olmasına neden olur. Katalizör reaktantlar arasındaki temas alanını artıracığından reaksiyon hızını artıracaktır [18]. Görsel 2b’de görüldüğü gibi, katalizör miktarı %2,5’den %10,0’a artırıldığında dönüşüm %37,8’den %96,6’ya yükselmiştir. Katalizör miktarının daha da artırılması dönüşüm üzerinde etkili olmadığı görülmüştür. Katalizör miktarının artırılması reaksiyon ortamının asitliğini artıracığından, metanol ve trigliserit arasındaki teması artıracığından reaksiyon hızı da artacaktır. Fakat katalizör miktarının daha fazla artırılması, DÖÇ’ün viskozitesinin yüksek olmasından dolayı reaksiyon ortamının viskozitesi artacaktır. Bunun sonucu olarak kütle transferine olan direnç artacaktır ve iki faz arasındaki temas azalacaktır [19]. Sonuç olarak fazla miktarda katalizör kullanılması dönüşüm üzerinde etkili olmayacaktır. Bundan dolayı, diğer parametrelerin etkisini incelemeye katalizör miktarı olarak %10 alınmıştır.

Reaksiyon süresi biyodizel sentezinde dönüşümü etkileyen önemli parametrelerden biridir ve bu çalışmada reaksiyon süresi 0,5 ile 4 saat arasında incelenmiştir. Reaksiyon süresi 0,5 saatten 2 saate çıkarıldığında dönüşüm %47,6’dan %96,6 ya çıkmıştır. 2 ile 4 saat arasında ise süredeki artış dönüşümde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Bundan dolayı en iyi reaksiyon süresi olarak 2 saat belirlenmiştir.

Biyodizel sentezini etkileyen diğer bir önemli faktörde sıcaklıktır ve bu çalışmada deneyler 100-160°C aralığında yapılarak, reaksiyon sıcaklığının dönüşüm üzerine olan etkisi incelenmiştir. Sonuçlar Görsel 2d’de gösterilmiştir. 100 ve 120 °C reaksiyon sıcaklıklarında dönüşüm düşük iken, 140 °C den sonra dönüşüm önemli oranda artmış 150 °C de en yüksek değere ulaşmıştır. Reaksiyon sıcaklığının artması reaktantların birbiri içinde daha iyi karışmasına ve birim hacimdeki moleküller çarpışmaları artıracaktır. Aynı zamanda sıcaklığın artışı reaksiyon ortamının viskozitesini düşürecek [5]. Bu nedenlerle, DÖÇ kullanılan tüm reaktantlarla iyi bir şekilde karışır ve bu da daha yüksek biyodizel dönüşümü sağlar. Bu çalışmada en iyi reaksiyon sıcaklığı 150 °C olarak belirlenmiştir. Ayrıca, ester değişimi reaksiyonu kapalı kaplardan yapıldığından dolayı, metanol buharlaşmaz ve kütle kaybı meydana gelmez. Kapalı ortam olduğundan, sıvı fazdaki yağ gaz fazındaki metanol ile reaksiyona girebilir. Yüksek sıcaklıklarda, bu iki reaktif arasındaki artan çarpışma sıklığı ester değişimi tepkimesinin kinetiğini önemli ölçüde artırır [20].

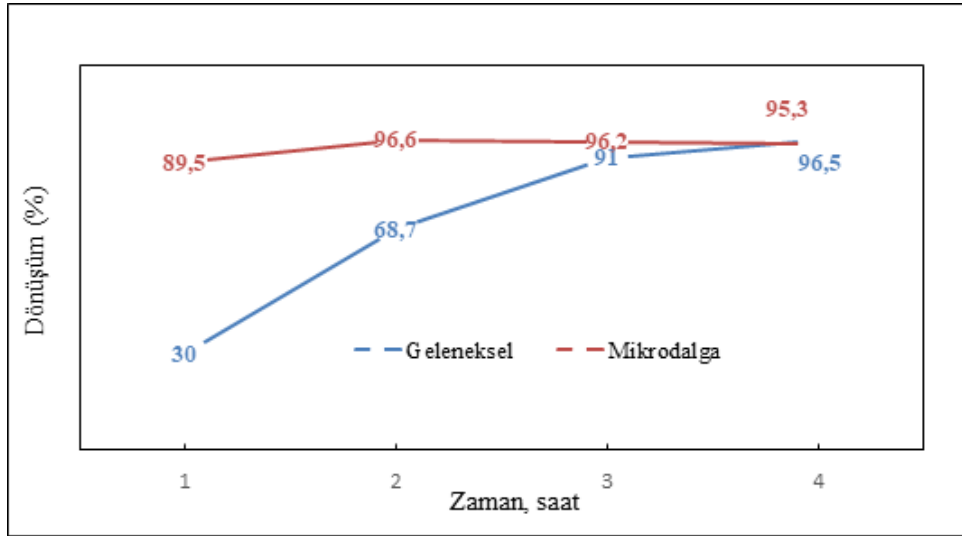


Görsel 2. Reaksiyon Parametrelerinin Biyodizel Dönüşümü Üzerine Etkileri

3.2. Geleneksel ve Mikrodalga Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Mikrodalga yöntemi ile geleneksel yöntem karşılaştırılması yapılarak farklı ısıtma yöntemlerinin biyodizel üretimine etkisi araştırılmıştır. Geleneksel yöntemde 4 farklı zaman diliminde (1,2,3 ve 4 saat) deneyler gerçekleştirilmiştir. Diğer koşullar ise şöyledir; 150 °C, %10 katalizör miktarı ve 28:1 metanol/yağ molar oranıdır. Görsel 3’de gösterildiği gibi mikrodalga yöntem ile 2 saat sonunda reaksiyon dengeye ulaşırken, geleneksel yöntemde 4 saat sonunda en iyi dönüşüm elde edilmiştir.

VII. INTERNATIONAL ANKARA MULTIDISCIPLINARY STUDIES CONGRESS



Görsel 3. Geleneksel ve Mikrodalga Yöntemlerin Bir Karşılaştırılması

Mikrodalgalar kimyasal bağları kırmak için gerekli enerjiye sahip değildirler ve bu nedenle kimyasal bağlarda bir değişime neden olmazlar. Bu nedenle mikrodalga yöntem ile geleneksel yöntem ile transesterifikasyon reaksiyonu aynı mekanizma üzerinden yürür [5]. Mikrodalga ışıması polar moleküller ve iyonlar üzerinde etki ederek hızlı ısınmaya neden olur. Reaksiyon ortamında hem metanol hem de DÖÇ katalizör mikrodalga ışımayı absorbe ederek hızlıca ısınır. Metanol yüksek 32,7 gibi yüksek bir dipol momentine sahip olduğundan, mikrodalga ışıması altında seçici olarak ısınır, bu da reaksiyon karışımınınkinden çok daha yüksek sıcaklıklarda mikrozonların hızlı oluşumuna yol açabilir. Böylece metanol hızlı ısınır, kaynama noktasına çabuk ulaşır ve transesterifikasyon reaksiyonu için enerji sağlar [13,21]. Diğer taraftan DÖÇ katalizör de hem polar hem de iyonik yapısından dolayı mikrodalga ışımayı absorbe eder. Buda reaksiyon ortamının hızlıca ısınmasına neden olarak reaksiyonu hızlandıracaktır.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada katalizör olarak TEAB: PTSA DÖÇ'ü kullanılarak atık bitkisel yağdan mikrodalga yardımlı biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada biyodizel sentezini etkileyen metanolün yağa mol oranı, katalizör miktarı, reaksiyon süresi ve sıcaklık gibi reaksiyon değişkenlerinin etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en iyi biyodizel dönüşümü %96,6 ile 150° C'de, 2 saat reaksiyon süresinde, 28:1 metanol/yağ molar oranı ve %10 (a:a) katalizör kullanıldığında elde edilmiştir. Ayrıca, belirlenen bu koşullarda geleneksel ısıtma yöntemi biyodizel sentezi gerçekleştirilmiş ve mikrodalga yöntem ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar mikrodalga yöntemin, geleneksel ısıtma yöntemine göre biyodizel sentezinin daha kısa sürede gerçekleştirilebileceğini göstermiştir.

Teşekkür: Bu çalışma, Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2021-2-TP2-4454 numaralı proje ile desteklenmiştir. Ayrıca değerli yardımlarından dolayı Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne (MEİTAM) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Dale, B.E. Feeding a sustainable chemical industry: do we have the bioproducts cart before the feedstocks horse? Faraday Discussions, 202, 11-30. 2017.
- [2] Marzouk, N. M., El Naga, A. O. A., Younis, S. A., Shaban, S. A., El Torgoman, A. M., & El Kady, F. Y. Process optimization of biodiesel production via esterification of oleic acid using sulfonated hierarchical mesoporous ZSM-5 as an efficient heterogeneous catalyst. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(2), 105035, 2021.

VII. INTERNATIONAL ANKARA MULTIDISCIPLINARY STUDIES CONGRESS

- [3] Wei, X., Massarotto, P., Wang, G., Rudolph, V., & Golding, S. D. CO₂ sequestration in coals and enhanced coalbed methane recovery: New numerical approach. *Fuel*, 89(5), 1110-1118, 2010.
- [4] El Saey, H. S., Naga, A. O. A. E., El Saied, M., Shaban, S. A., Abdel-Gawad, S. A., & Salih, S. A. Kinetic and thermodynamic studies on the esterification of oleic acid with methanol over sulfonated biochar catalyst derived from waste tea dregs. *Biomass and Bioenergy*, 176, 106892, 2023.
- [5] Kavlak, A., & Sönmez, Ö. Ionic liquid and microwave irradiation synergism for efficient biodiesel synthesis from waste cooking oil. *Biofuels*, 14(2), 137-146, 2023.
- [6] Gorji, A., & Ghanei, R. A review on catalytic biodiesel production. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 5(4), 48-59, 2014.
- [7] Zhang, Y., Dubé, M. A., McLean, D. D., & Kates, M. Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis. *Bioresource technology*, 90(3), 229-240, 2003.
- [8] Guillaume, C., De Alzaa, F., & Ravetti, L. Evaluation of chemical and physical changes in different commercial oils during heating. *Acta Scientific Nutritional Health*, 2(6), 2-11, 2018.
- [9] Guillaume, C., De Alzaa, F., & Ravetti, L. (2018). Evaluation of chemical and physical changes in different commercial oils during heating. *Acta Scientific Nutritional Health*, 2(6), 2-11.
- [10] Ullah, Z., Bustam, M. A., & Man, Z. Biodiesel production from waste cooking oil by acidic ionic liquid as a catalyst. *Renewable Energy*, 77, 521-526, 2015.
- [11] Oyekunle, D. T., & Oyekunle, D. O. Biodiesel production from yellow oleander seed oil via heterogeneous catalyst: performance evaluation of minitab response surface methodology and artificial neural network. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9(8), 2468-2477, 2018.
- [12] Guo, M., Jiang, W., Ding, J., & Lu, J. Highly active and recyclable CuO/ZnO as photocatalyst for transesterification of waste cooking oil to biodiesel and the kinetics. *Fuel*, 315, 123254, 2022.
- [13] Bölük, S., & Sönmez, Ö. (2020). Microwave-Assisted Esterification of Oleic Acid Using an Ionic Liquid Catalyst. *Chemical Engineering & Technology*, 43(9), 1792-1801, 2020.
- [14] Shen, C., Wang, X., Zhu, Y., Jiao, J., Bao, S., Kou, P., Fu, Y. A green one-pot method for simultaneous extraction and transesterification of seed oil catalyzed by a p-toluenesulfonic acid based deep eutectic solvent. *Industrial crops and products*, 152, 112517, 2020.
- [15] Zhang, Y., Xia, X., Duan, M., Han, Y., Liu, J., Luo, M., ... & Fu, Y. Green deep eutectic solvent assisted enzymatic preparation of biodiesel from yellow horn seed oil with microwave irradiation. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 123, 35-40, 2016.
- [16] Jiang, S., Zeng, Z., Xue, W., Mao, Z., & Wang, Y. Physical properties of deep eutectic solvents based on p-toluene sulfonic acid and employment as catalyst. *Chemical Engineering Communications*, 210(1), 34-46, 2023.
- [17] Soltani, S., Rashid, U., Al-Resayes, S. I., & Nehdi, I. A. Recent progress in synthesis and surface functionalization of mesoporous acidic heterogeneous catalysts for esterification of free fatty acid feedstocks: A review. *Energy Conversion and Management*, 141, 183-205, 2017.
- [18] Mandari, V., & Devarai, S.K. Biodiesel production using homogeneous, heterogeneous, and enzyme catalysts via transesterification and esterification reactions: A critical review. *BioEnergy Research*, 1-27, 2021.
- [19] Liu, Y., Yan, H., Liu, J., Dong, W., Cao, Z., Hu, X., & Zhou, Z. Acidic deep eutectic solvents with long carbon chains as catalysts and reaction media for biodiesel production. *Renewable Energy*, 162, 1842-1853, 2020.
- [20] Jung, J.M., Kim, M., Jung, S., Jeon, Y.J., Tsang, Y.F., Park, Y.K., & Kwon, E.E. Direct conversion of *Camellia japonica* seed into biodiesel through non-catalytic transesterification. *Industrial Crops and Products*, 174, 114194, 2021.
- [21] Dehghan, L., Golmakani, M. T., & Hosseini, S. M. H. Optimization of microwave-assisted accelerated transesterification of inedible olive oil for biodiesel production. *Renewable Energy*, 138, 915-922, 2019.