

Elektroliz Yöntemi ile Atık Yemek Yağından Biyodizel Üretimi: Sıcaklık Etkileri

M. Raşit ATELGE^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Siirt University, Türkiye

*(rasitatelge@siirt.edu.tr)

(Received: 26 September 2024, Accepted: 02 October 2024)

(6th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2024, 25-26 September 2024)

ATIF/REFERENCE: Atelge, M. R. (2024). Elektroliz Yöntemi ile Atık Yemek Yağından Biyodizel Üretimi: Sıcaklık Etkileri, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8(9), 126-132.

Özet – Bu çalışma, elektroliz yöntemiyle atık yemek yağından biyodizel üretiminde sıcaklığın etkisini araştırmıştır. Geleneksel transesterifikasyon yöntemlerine kıyasla, elektroliz yöntemi hammadde içerisindeki yüksek serbest yağ asidi ve su içeriği sınırlamalarını ortadan kaldırarak avantajlar sunmaktadır. Farklı sıcaklıklarda (25°C, 45°C ve 65°C) gerçekleştirilen deneyler sonucunda, 65°C'de en yüksek biyodizel verimi (%96.3) elde edilmiştir. Literatürdeki benzer çalışmalarla da uyumlu olarak, sıcaklığın artmasının biyodizel verimini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Öte yandan, reaksiyon süresinin de optimize edilmesi gerektiği, aksi halde uzun süreli reaksiyonların istenmeyen sabunlaşma reaksiyonlarına yol açabileceği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, elektroliz yöntemiyle biyodizel üretiminin ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif olduğu, enerji verimliliği ve çevresel etkiler bakımından önemli katkılar sağlayabileceği ortaya konmuştur. Bu bulgular, elektroliz yöntemiyle biyodizel üretiminin daha geniş ölçekte uygulanabilirliğini ve verimliliğini geliştirme potansiyeline işaret etmektedir.

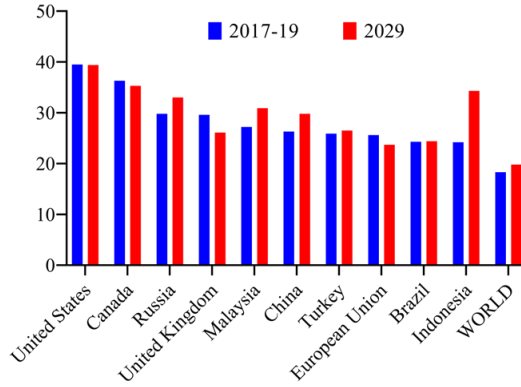
Anahtar Kelimeler – Biyodizel Üretimi, Elektroliz Yöntemi, Sıcaklık Etkisi, Atık Yemek Yağı, Biyoenerji

I. GİRİŞ

Enerji talebi ve tüketimi, nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme nedeniyle her geçen gün dramatik bir şekilde artmaktadır. Bu enerji talebinin büyük bir kısmı sınırlı rezervlere sahip fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Petrol kaynakları, toplam birincil enerji kullanımının %80'ini oluşturmakta olup, yalnızca ulaşım sektörü enerji tüketiminin %54'ünden sorumludur [1, 2]. Rezervlerin sınırlı olması ve çevresel sorunlar nedeniyle, alternatif yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının bulunması ve enerji güvenliği, onlarca yıldır araştırmacıların başlıca motivasyonu olmuştur. Biyodizel sıvı bir yakıt olarak, hidrojen ise gaz yakıt olarak bu sorunlara yönelik umut verici alternatif çözümlerdir. Biyodizel yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostu iken, hidrojen en temiz enerji taşıyıcısıdır [3, 4].

Biyodizel üretiminde enerji bitkileri [5], sucul biyokütle [6], atık yemeklik yağ [7] ve hayvansal yağlar [8] gibi çeşitli hammaddeler kullanılabilir. Biyodizel üretimi için en yaygın kabul gören yol ise transesterifikasyon reaksiyonudur (TER) [9]. Metanol veya etanol gibi kısa zincirli alkoller, katalizör varlığında hammaddeyi oluşturan trigliseritler ve/veya serbest yağ asitleri ile reaksiyona girdiğinde, transesterifikasyon süreci sırasında yağ asidi esterleri ürün olarak oluşur [10]. Ekonomik fizibilite açısından, biyodizel üretiminin hammaddeleri en önemli parametredir ve yenilenebilir yağlardan elde edilen biyodizelin, hammadde maliyeti nedeniyle fosil yakıtlardan daha yüksek bir üretim maliyetine sahip olduğu belirtilmiştir [11]. Bu nedenle, son yıllarda hayvansal yağlar ve atık yemeklik yağlar ilgi görmektedir [12,

13]. Biyodizel üretim maliyeti, hammadde ve işletme maliyetleri azaltılarak düşürülebilir [13]. Şekil 1, 2017 ile 2019 yılları arasında ve 2029 projeksiyonuna göre dünya genelinde ve önde gelen ülkelerde kişi başına bitkisel yağ tüketimini göstermektedir [14]. 2029'da tüketimin dünya genelinde %8 artması öngörülmektedir. Bu nedenle, bu kaynaktan elde edilen atıklar yakın gelecekte hala bir sorun olmaya devam edecek ve atık yemeklik yağın uygun değer kazanma yollarından biri, biyodizel hammaddesi olarak kullanılmalıdır. Ek olarak, katalizörler bu reaksiyonların etkinliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve iki gruba ayrılabilir: homojen olarak ticari olarak mevcut olanlar (örneğin NaOH, KOH ve HCl) ve katı bazlı yenilenebilir heterojen katalizörler [2, 3]. Homojen katalizörler, yüksek reaksiyon hızı ve düşük maliyet nedeniyle biyodizel endüstrisinde yaygın olarak kullanılır; ancak, sabun oluşumunun artması, yüksek işletme maliyeti (yeniden kullanım yok) ve saflaştırma problemleri (artık katalizörler) gibi kendi dezavantajları vardır [3, 15]. Homojen katalizörlerin yerine heterojen katalizörlerin kullanılması, ayırma, geri kazanım ve yeniden kullanılabilirlik sorunlarının üstesinden gelebilir.

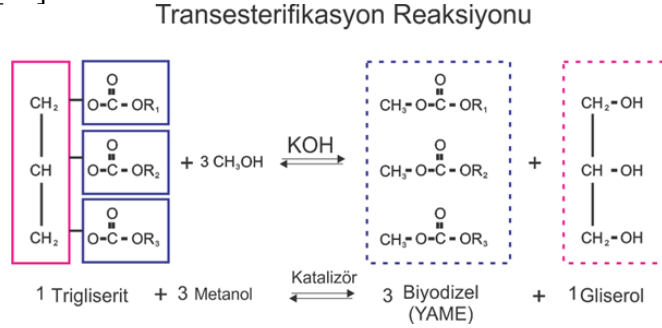


Şekil 1. Dünya genelinde ve önde gelen ülkelerde 2017 ile 2019 yılları arasında bitkisel yağ tüketimi (mavi) ve 2029 projeksiyonu (kırmızı) [14]

Son yıllarda heterojen katalizörler, yeniden kullanılabilirlik, geri kazanım kolaylığı, yüksek stabilite ve çevre dostu olma gibi çeşitli avantajlar nedeniyle yoğun bir şekilde araştırılmıştır [16, 17]. Heterojen katalizörler, metal oksitler [18], zeolitler [19] veya karbon gibi çeşitli malzemelerden üretilebilir. Bunlar arasında karbon bazlı katalizörler, ticari katalizörlerin yerini alacak güçlü bir adaydır. Ayrıca, aktif karbon, üretim sürecinde karbon bazlı katalizörler için destek malzemesi olarak kullanılır [9, 20]. Aktif karbon (Ad-C), yüksek gözenekliliği, yüksek termokimyasal stabilitesi ve geniş yüzey alanı nedeniyle son literatürde destek malzemesi olarak tercih edilmiştir [2, 3]. Ad-C, biyodizel üretimi için CaO [21], ZnCl₂ [22], NaOH [23] ve KOH [24] gibi farklı aktivasyon ajanlarıyla başarıyla destek malzeme olarak kullanılmıştır. Bir çalışmada, NaOH ve KOH gibi metal hidroksitlerin diğer aktivasyon ajanlarına göre daha iyi adsorpsiyon kapasitesi gösterdiği bildirilmiştir [25]. Konwar ve ark. [18], T struatulla'nın atık kabuklarından elde edilen Ad-C'nin CaO katalizörleri desteklediğini ve atık yemeklik yağdan (WCO) biyodizel üretiminde kullanıldığını bildirmiştir. Sonuçları, biyodizelin %96'lık bir dönüşüm oranıyla başarıyla elde edildiğini ve transesterifikasyon sürecinin (TER) optimum parametrelerinin 40:1 metanol oranı, %11 (w/w) katalizör ve 120°C reaksiyon sıcaklığında 7 saatlik reaksiyon süresi olduğunu ortaya koymuştur. Yakın zamanda yayınlanan başka bir çalışmada, heterojen bir katalizör olarak biyodizel üretimi için grafit karbon nitrür katalizör araştırılmıştır [26]. %1 (w/w) katalizör, 24:1 metanol yağı oranı ve 150°C'de 3 saatlik reaksiyon süresi parametreleri ile %96 metil ester dönüşüm oranı elde edilmiştir.

Esterifikasyon reaksiyonunun yan ürünü olarak su oluşumu, olası sabunlaşma reaksiyonu nedeniyle biyodizel üretim verimi üzerinde bir olumsuz etkiye sahiptir. Sabunlaşma, metal tuzu oluşumunu içeren kimyasal bir yan reaksiyondur [20]. Bu reaksiyon, ortamda yüksek miktarda SYA, YAME, su ve alkali katalizör varlığında gerçekleşir. Esterleşme reaksiyonunda her zaman bir miktar su bulunur ve biyodizel üretildiğinde her zaman bir miktar sabun oluşur. Transesterifikasyon reaksiyonu ise yağ kaynağının SYA miktarı 2 g KOH/g yağ'dan düşük olduğunda direk uygulanabilir [9]. Transesterifikasyon reaksiyonu ise 1 mol yağ kaynağının (trigliserit) 3 mol alkol ile reaksiyona girmesiyle 3 mol biyodizel (YAME) ve 1 mol gliserol oluşurmasıdır ve katalizör olarak genelde potasyum hidroksit (KOH) veya sodyum hidroksit

(NaOH) tercih edilmektedir [21]. Atık yemek yağı yüksek sıcaklığa maruz kaldığından yapısındaki SYA miktarı genelde 2 g KOH/g yağ'dan yüksektir ve biyodizel üretiminde kullanılmak için esterifikasyon reaksiyonu gerektirir. Geleneksel biyodizel üretiminde, yüksek SYA sahip atık yemek yağına esterifikasyon ve transesterifikasyon reaksiyonlarının art arda uygulanması gerekmektedir. Buda, fazladan bir adım olarak üretim maliyetini artırır ve sabunlaşma reaksiyonu oluşması ihtimalinden dolayı da biyodizel verimini düşürür [22].



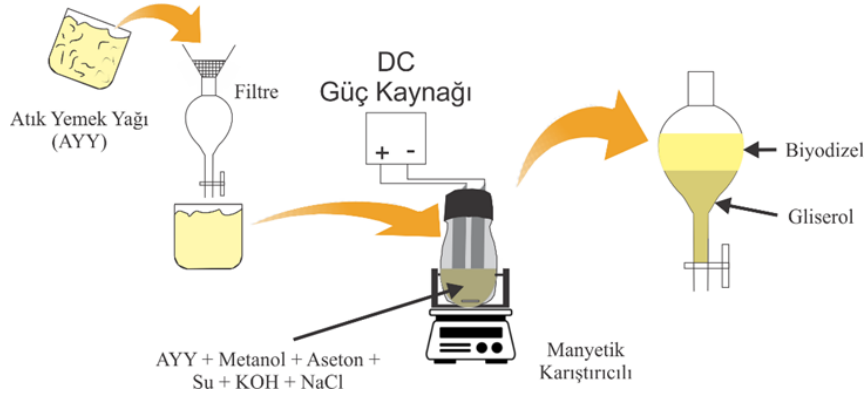
Şekil 2. Transesterifikasyon reaksiyonun şematik gösterimi [21]

Bahsedilen bu zorlukların üstesinden gelmek için yeni bir teknoloji olarak, elektroliz reaktör kullanımı, alkali katalizör varlığında SYA'nın olası sabunlaşma reaksiyonunu azaltmak için kullanılabilir. Japon araştırmacılar Guan ve Kusakabe [23], ilk olarak biyodizel üretiminde atık yemek yağı ve mısır yağı karışımının transesterifikasyonu için elektroliz reaktör kullanmışlardır (Şekil 3). Putra ve ark. [24] elektroliz yöntemi ile atık yemek yağından YAME sentezini için heterojen bir katalizör varlığında ve destekleyici elektrolit olarak NaCl'nin çeşitli kütle oranlarındaki etkisini araştırmışlardır. Ayrıca, reaktördeki atık yemek yağının ağırlıkça %2'si kadar saf su ilavesi yapmışlardır. NaCl elektroliz ortamındaki toplam iyon konsantrasyonunu arttırarak direncin azalmasını sağlamıştır. Bu koşullar altında, kolaylaştırılmış elektron taşınmasının bir sonucu olarak elektrokimyasal reaksiyonlar artmıştır [24]. Elektrokimyasal hidroksit iyonların (OH⁻), metanolden elde edilen metoksitler, trigliseritler ile reaksiyona girerek YAME üretir [25]. Daha kısa reaksiyon süresi, yüksek kaliteli YAME üretimi, düşük maliyeti, basit reaksiyon koşulları ve ekipmanı, yüksek yağ asitleri ve su içeren atık maddelerin kullanılması nedeniyle elektroliz, mevcut yöntemlere alternatif bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır [7]. Uygulanan bu yöntemin diğer bir avantajı ise elektroliz reaktör ile biyodizel üretimi sadece 25°C'de ve atmosferik basınçta gerçekleştirilebilmesidir. Eğer 25°C sıcaklıkta geleneksel yöntemle biyodizel üretimi gerçekleştirilirse, yağ asidi esterlerinin azaldığı ve biyodizel üretim veriminin olumsuz etkilendiği bildirilmiştir [26].

Elektroliz yöntemiyle biyodizel üretimi, hammadde içindeki yüksek Serbest Yağ Asidi (SYA) ve su içeriği sınırlamalarını çözen yenilikçi bir yaklaşımdır. Daha düşük enerji tüketimi, susuzlaştırma ve SYA içeriğinin azaltılması gibi adımların atlanması ve zamandan tasarruf sağlanması, elektroliz yönteminin başlıca avantajları arasında yer almaktadır [7]. Bu çalışmada, Atık Yağdan Yağ (AYY) elde edilen biyodizelin elektroliz reaktörde üretimi üzerindeki etkisi, transesterifikasyon reaksiyonu 25, 45 ve 65 °C sıcaklıklarda uygulanarak araştırılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Elektroliz yöntemi, biyodizel üretiminde hammadde içindeki yüksek Serbest Yağ Asidi (SYA) ve su içeriği sınırlamalarını ortadan kaldıran yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajları arasında, enerji tüketiminin azaltılması, susuzlaştırma ve SYA içeriğini düşürme gibi süreçlerin ortadan kaldırılması ve böylece zamandan tasarruf sağlanması yer almaktadır.



Şekil 3. Elektroliz reaktör sistemi ve elektrot yüzeyinde meydana gelen reaksiyonlar

Atık yemek yağı, Siirt Üniversitesi yemekhanesinden temin edilecektir. Temin edilen yağın içerisindeki gıda kalıntılarını gidermek için filtre işlemi uygulanacaktır. Ardından, yağ içerisinde su oranını gidermek için iki saat boyunca 103 ile 105 °C arasında kurutma fırında tutulacaktır.

Atık yemek yağının yağ asidi profili, zeytin, ayçiçeği ve mısır yağı gibi atık yemek yağının ana kaynağından dolayı farklılık gösterebilir. Bu profil bilgisi, hem yağ zincirinin uzunluğu hem de doyma dereceleri ile ilgili bilgi verdiği için biyodizel üretimi için kritiktir. Sonuç olarak, hammaddelerin doğası, biyodizelin fizikokimyasal özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir [29]. Biyodizel üretmek için, en yaygın hammadde yağ asidi zincir uzunlukları 12 ile 22 arasındadır. Ayrıca, yaygın olarak biyodizel üretimi için kullanılan hammaddelerdeki 16 ile 18 zincir uzunluğundaki karbon bileşenlerinin dağılımları %90'lar civarında olduğu literatürde bildirilmiştir [21]. Üretilen biyodizelin oksidasyon kararlılığı ve soğuk akış özelliği arasındaki en iyi uyumun bu zincir uzunlukları aralığında elde edilebileceği yapılan araştırmalarda ortaya konmuştur [23; 30]. Bu nedenle, biyodizel üretmek için karbon zincir uzunlukları 16 ila 18 arasında olan hammaddelerin tercih edildiği sonucuna varılabilir. Bu kapsamda, atık yemek yağının yağ asidi kombinasyonlarını belirlemek için, GC-MS analizi kullanılmıştır.

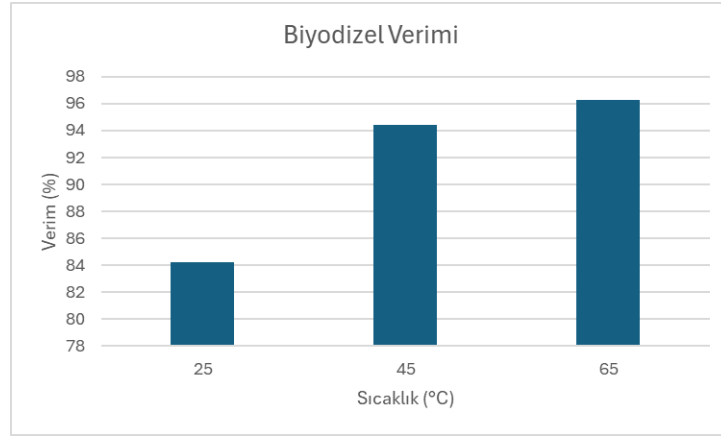
Biyodizel üretim verimi ise D (1)'e göre belirlenecektir [35]. D (1)'de BV, biyodizel üretim verimini (%), BA biyodizel ağırlığını (g) ve AYYA ise atık yemek yağının ağırlığını (g) belirtmek üzere;

$$BV (\%) = \frac{BA}{AYYA} \times 100 \quad D (1)$$

Biyodizel üretiminde elektroliz bir reaktör kullanılarak ve elektroliz ortamını bir güç kaynağı ve paslanmaz çelik elektrotlar kullanılmasıyla sağlandı. Reaktör içerisine 100 ml atık yemek yağı, 6:1 molar metanol ve yağ karışımına denk gelecek miktarda alkol, 10 ml aseton (yüze ayrışmasını önlemek için çözücü olarak kullanılacak), elektrolizin oluşması için toplam çözeltinin ağırlıkça %2'si kadar saf su ve elektrolizi iyileştirmek için 3 gram NaCl ilave edildi. Atık yemek yağ ağırlığının %1 kadar KOH katalizörü kullanıldı. Transesterifikasyon reaksiyonuna etkisini araştırmak üzere voltaj 30 V olarak uygulanırken, reaksiyon karıştırma hızı 600 rpm olmak belirlenmiştir. Reaksiyon süresi 120 dakika olarak sabit tutuldu. Ayrıca, elektroliz reaktör ile biyodizel üretimindeki sıcaklık etkisini belirlemek için 25, 45 ve 65 °C sıcaklıklarda yapılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Elektroliz yöntemiyle üretilen biyodizelin, farklı sıcaklıkların üretim verimi üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, sıcaklıklar 25°C, 45°C ve 65°C olarak belirlenmiş ve bu sıcaklıklarda elde edilen verimler sırasıyla %84.2, %94.4 ve %96.3 olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, sıcaklığın artmasıyla birlikte biyodizel üretim veriminde belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Özellikle 65°C'de en yüksek verimin elde edilmesi, biyodizel üretimi sürecinde daha yüksek sıcaklıkların reaksiyon verimliliğini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Biyodizel üretiminin sıcaklıklara göre üretim verimi

Literatürde de benzer bulgulara rastlanmaktadır. Örneğin, yapılan bir çalışmada ayçiçeği yağının transesterifikasyonunda sıcaklığın etkisi incelenmiş ve 25°C'de %71.25 olan verimin 65°C'de %80.72'ye yükseldiği saptanmıştır [27]. Bu çalışma, sıcaklığın artmasının biyodizel verimini artırdığına dair bulgular sunmaktadır. Ayrıca, Barnwal ve Sharma'nın araştırmaları, transesterifikasyon reaksiyonunda optimum sıcaklık aralığını 60-80°C olarak belirlemiştir [28]. Bu bulgular, mevcut çalışmanın sonuçlarıyla uyumlu olup, yüksek sıcaklıkların biyodizel üretiminde önemli bir rol oynadığını desteklemektedir.

Sıcaklığın yanı sıra, reaksiyon süresi de biyodizel verimi üzerinde etkilidir. Diğer bir çalışma, 65°C'de sabit tutulan bir ortamda reaksiyon süresinin artırılmasının verimi düşürdüğünü göstermiştir; bu durumda 1 saatlik bir süreçte %80.72 olan verim, 2 saatlik süreçte %78.51'e ve 4 saatlik süreçte ise %75.43'e gerilemiştir [27]. Bu durum, uzun süreli reaksiyonların sabunlaşma oranını artırarak biyodizel verimini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, elektroliz yöntemiyle üretilen biyodizelin verimliliği üzerinde sıcaklığın kritik bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek sıcaklıklar (özellikle 65°C) ile daha yüksek verim elde edilmesi, literatürdeki diğer çalışmalarla da desteklenmektedir. Bununla birlikte, reaksiyon süresinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerektiği vurgulanmalıdır; zira aşırı uzun süreler sabunlaşma gibi istenmeyen yan etkilere yol açabilir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışma, elektroliz yöntemiyle biyodizel üretiminde sıcaklığın ve reaksiyon süresinin üretim verimi üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Elektroliz reaktörünün kullanımıyla, geleneksel yöntemlere kıyasla hammadde içindeki yüksek Serbest Yağ Asidi (SYA) ve su içeriği sınırlamalarının üstesinden gelinerek biyodizel üretim sürecinde önemli avantajlar elde edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen üretim sürecinde, 25°C, 45°C ve 65°C'de elde edilen verimler sırasıyla %84.2, %94.4 ve %96.3 olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, biyodizel üretiminde reaksiyon sıcaklığının artmasıyla verimin de arttığını göstermektedir. Literatürdeki diğer çalışmalarla da uyumlu olarak, 65°C'nin biyodizel üretimi için ideal bir sıcaklık olduğu doğrulanmıştır.

Bu sonuçlar, biyodizel üretiminde elektroliz yöntemiyle optimum verim elde edilebileceğini ve elektroliz reaktör sisteminin, geleneksel transesterifikasyon yöntemlerine göre önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir. Çalışmanın sonuçları, elektroliz yöntemiyle biyodizel üretiminin hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif olduğunu ve biyodizel üretiminde enerji verimliliği ve çevresel etkiler açısından önemli bir katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, biyodizel üretimi için gelecekteki araştırmalara ışık tutacak nitelikte olup, elektroliz yöntemiyle biyodizel üretiminin daha geniş bir ölçekte uygulanabilirliğini ve verimliliğini geliştirme potansiyeline işaret etmektedir.

KAYNAKLAR

[1] A. International Energy. Statistics Report. Key World Energy Statistics 2020. Springer Berlin/Heidelberg, Germany 2020.

- [2] B. Changmai, C. Vanlalveni, A.P. Ingle, R. Bhagat, L. Rokhum. Widely used catalysts in biodiesel production: A review. *RSC Advances*. 10 (2020) 41625-79. 10.1039/d0ra07931f.
- [3] S.Z. Naji, C.T. Tye. A review of the synthesis of activated carbon for biodiesel production: Precursor, preparation, and modification. *Energy Conversion and Management*: X. 13 (2022) 100152-. 10.1016/j.ecmx.2021.100152.
- [4] M. Kayfeci, A. Keçebaş, M. Bayat. Hydrogen production. *Solar Hydrogen Production Processes, Systems and Technologies*. Elsevier2019. pp. 45-83.
- [5] V. Rahimi, M. Shafiei. Techno-economic assessment of a biorefinery based on low-impact energy crops: A step towards commercial production of biodiesel, biogas, and heat. *Energy Conversion and Management*. 183 (2019) 698-707. 10.1016/j.enconman.2019.01.020.
- [6] M. Subramaniam, J.M. Solomon, V. Nadanakumar, S. Anaimuthu, R. Sathyamurthy. Experimental investigation on performance, combustion and emission characteristics of DI diesel engine using algae as a biodiesel. *Energy Reports*. 6 (2020) 1382-92. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.05.022>.
- [7] A. Pugazhendhi, A. Alagumalai, T. Mathimani, A.E. Atabani. Optimization, kinetic and thermodynamic studies on sustainable biodiesel production from waste cooking oil: An Indian perspective. *Fuel*. 273 (2020) 117725-. 10.1016/j.fuel.2020.117725.
- [8] A. Sander, M. Antonije Koščak, D. Kosir, N. Milosavljević, J. Parlov Vuković, L. Magić. The influence of animal fat type and purification conditions on biodiesel quality. *Renewable Energy*. 118 (2018) 752-60. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.068>.
- [9] V. Mandari, S.K. Devarai. Biodiesel Production Using Homogeneous, Heterogeneous, and Enzyme Catalysts via Transesterification and Esterification Reactions: a Critical Review. *BioEnergy Research*. (2021). 10.1007/s12155-021-10333-w.
- [10] D.C. Rakopoulos, C.D. Rakopoulos, R.G. Papagiannakis, D.C. Kyritsis. Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty di diesel engine. *Fuel*. 90 (2011) 1855-67. 10.1016/j.fuel.2010.12.003.
- [11] A.E. Atabani, I.A. Badruddin, T.M.I. Mahlia, H.H. Masjuki, M. Mofijur, K.T. Lee, et al. Fuel Properties of Croton megalocarpus, Calophyllum inophyllum, and Cocos nucifera (coconut) Methyl Esters and their Performance in a Multicylinder Diesel Engine. *Energy Technology*. 1 (2013) 685-94. <https://doi.org/10.1002/ente.201300110>.
- [12] D.-S. Kim, M. Hanifzadeh, A. Kumar. Trend of biodiesel feedstock and its impact on biodiesel emission characteristics. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 37 (2018) 7-19. <https://doi.org/10.1002/ep.12800>.
- [13] Y. Zhao, C. Wang, L. Zhang, Y. Chang, Y. Hao. Converting waste cooking oil to biodiesel in China: Environmental impacts and economic feasibility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 140 (2021) 110661-. 10.1016/j.rser.2020.110661.
- [14] OECD/FAO. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030*. Paris, 2021.
- [15] O. Awogbemi, D.V.V. Kallon, V.S. Aigbodion. Trends in the development and utilization of agricultural wastes as heterogeneous catalyst for biodiesel production. *Journal of the Energy Institute*. 98 (2021) 244-58. 10.1016/j.joei.2021.06.017.
- [16] Z.-E. Tang, S. Lim, Y.-L. Pang, H.-C. Ong, K.-T. Lee. Synthesis of biomass as heterogeneous catalyst for application in biodiesel production: State of the art and fundamental review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 92 (2018) 235-53. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.056>.
- [17] M. Narasimhan, M. Chandrasekaran, S. Govindasamy, A. Aravamudhan. Heterogeneous nanocatalysts for sustainable biodiesel production: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9 (2021) 104876. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104876>.
- [18] L.J. Konwar, J. Boro, D. Deka. Activated Carbon Supported CaO from Waste Shells as a Catalyst for Biodiesel Production. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 40 (2018) 601-7. 10.1080/15567036.2012.733483.
- [19] J. Cheng, H. Guo, X. Yang, Y. Mao, L. Qian, Y. Zhu, et al. Phosphotungstic acid-modified zeolite imidazolate framework (ZIF-67) as an acid-base bifunctional heterogeneous catalyst for biodiesel production from microalgal lipids. *Energy Conversion and Management*. 232 (2021) 113872. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113872>.
- [20] M. Jayakumar, N. Karmegam, M.P. Gundupalli, K. Bizuneh Gebeyehu, B. Tessema Asfaw, S.W. Chang, et al. Heterogeneous base catalysts: Synthesis and application for biodiesel production – A review. *Bioresource Technology*. 331 (2021) 125054. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125054>.
- [21] H.K. Ooi, X.N. Koh, H.C. Ong, H.V. Lee, M.S. Mastuli, Y.H. Taufiq-Yap, et al. Progress on modified calcium oxide derived waste-shell catalysts for biodiesel production. *Catalysts*. 11 (2021) 1-26. 10.3390/catal11020194.
- [22] C. Sun, Y. Hu, F. Sun, Y. Sun, G. Song, H. Chang, et al. Comparison of biodiesel production using a novel porous Zn/Al/Co complex oxide prepared from different methods: Physicochemical properties, reaction kinetic and thermodynamic studies. *Renewable Energy*. 181 (2022) 1419-30. 10.1016/j.renene.2021.09.122.
- [23] M. Helmi, K. Tahvildari, A. Hemmati. Parametric optimization of biodiesel synthesis from Capparis spinosa oil using NaOH/NaX as nanoheterogeneous catalyst by response surface methodology. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 38 (2021) 61-75. 10.1007/s43153-020-00074-2.
- [24] B. Narowska, M. Kułażyński, M. Łukaszewicz, E. Burchacka. Use of activated carbons as catalyst supports for biodiesel production. *Renewable Energy*. 135 (2019) 176-85. 10.1016/j.renene.2018.11.006.

- [25] M.A. Yahya, Z. Al-Qodah, C.W.Z. Ngah. Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 46 (2015) 218-35. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.051>.
- [26] T.V. de Medeiros, A. Macina, R. Naccache. Graphitic carbon nitrides: Efficient heterogeneous catalysts for biodiesel production. *Nano Energy*. 78 (2020) 105306-. [10.1016/j.nanoen.2020.105306](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105306).
- [27] Başak Burcu, U. Z. U. N., Kılıç, M., & Pütün, A. E. Ayçiçeği Yağından Transesterifikasyon Yöntemiyle Biyodizel Üretimi.
- [28] Barnval. B.K., Sharma, M.P., Prospects of Biodiesel Production from Vegetable Oils in India, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-16,(2004)