

# Atık Pişirme Yağlarından Biyodizel Üretimi: Kinetik ve Termodinamik Analiz

M. Raşit ATELGE<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Siirt University, Türkiye

\*(rasitatelge@siirt.edu.tr)

(Received: 02 October 2024, Accepted: 18 October 2024)

(5th International Conference on Innovative Academic Studies ICIAS 2024, 10-11 October 2024)

**ATIF/REFERENCE:** Atelge, M. R. (2024). Atık Pişirme Yağlarından Biyodizel Üretimi: Kinetik ve Termodinamik Analiz, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8(9), 197-203.

**Özet** – Bu çalışma, atık pişirme yağlarından biyodizel üretiminde reaksiyon sıcaklığının etkisini ve transesterifikasyon reaksiyonunun kinetik ve termodinamik özelliklerini incelemektedir. Çalışmada, atık pişirme yağlarının metanol ve potasyum hidroksit (KOH) katalizörü kullanılarak transesterifikasyon yoluyla biyodizele dönüştürülmesi için 45, 55 ve 65 °C sıcaklıklarında ve 30, 60, 90 ve 120 dakika süreyle reaksiyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, biyodizel veriminin reaksiyon sıcaklığı ve süresiyle arttığını, en yüksek verimin ise 65 °C ve 120 dakika sonunda elde edildiğini göstermiştir. Kinetik analizler, reaksiyonun pseudo birinci dereceden olduğunu ve hız sabitinin sıcaklıkla arttığını ortaya koymuştur. Termodinamik analizler ise, reaksiyonun endotermik olduğunu ve yüksek bir aktivasyon enerjisine ihtiyaç duymadan gerçekleştirilebildiğini göstermektedir. Bu çalışma, atık pişirme yağlarının sürdürülebilir bir biyodizel üretimi için ekonomik ve çevresel olarak uygun bir hammadde olduğunu ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler** – Biyodizel, Atık Pişirme Yağı, Transesterifikasyon, Kinetik Analiz, Termodinamik Analiz.

## I. GİRİŞ

Küresel enerji talebinin artması ve fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmaktadır. Aynı zamanda, fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan sera gazı emisyonları, çevresel kirlilik ve iklim değişikliği gibi önemli sorunlara yol açmaktadır. Bu bağlamda, çevre dostu ve yenilenebilir bir yakıt kaynağı olan biyodizel, giderek daha fazla ilgi görmektedir. Biyodizel, yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir olmasının yanı sıra düşük karbon ayak izi ve daha az zararlı emisyonlar üretmesi gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır.

Dünyada biyodizel endüstrisi halen gelişim aşamasındadır ve sürdürülebilir bir biyodizel üretimi için mevcut kaynakların etkin bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Ancak, Türkiye'nin tarım sektörü ve sınırlı tarımsal arazi kaynakları göz önünde bulundurulduğunda, yenilebilir yağların biyodizel üretimi için kullanılması ekonomik olarak sürdürülebilir değildir. Ayrıca, ülkemizdeki yemeklik yağ üretiminin sınırlı olması ve bu yağların ithalatına duyulan bağımlılığın artması, biyodizel üretimi için alternatif ve sürdürülebilir bir hammadde kaynağının bulunmasını zorunlu kılmaktadır. Bu noktada, atık pişirme yağları, biyodizel üretimi için uygun bir alternatif kaynak olarak karşımıza çıkmaktadır.

Atık pişirme yağları, yemek hazırlama süreçlerinden sonra genellikle atık olarak bırakılmaktadır ve bu yağların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi gerekmektedir. Ancak, atık pişirme yağlarının biyodizele dönüştürülmesi hem atık yönetimi açısından hem de biyodizel üretim maliyetlerinin düşürülmesi bakımından büyük bir potansiyel sunmaktadır. Şekil 1, 2017 ve 2019 yılları arasında dünya genelinde ve

önde gelen ülkelerde kişi başına düşen bitkisel yağ tüketimini (kg cinsinden) ve 2029 yılı projeksiyonunu göstermektedir [1]. 2029'da tüketimin dünya genelinde %8 artması beklenmektedir. Bu nedenle, bu kaynaktan elde edilen atık yakın gelecekte de bir sorun olmaya devam edecektir ve atık pişirme yağının uygun değerlendirme yollarından biri, biyodizel hammaddesi olarak kullanılmalıdır. Türkiye'de yılda kişi başı yaklaşık 26 ila 26.5 kg bitkisel yağ tüketilmektedir ve bu yağın yaklaşık %30'u atık olarak kalmaktadır. Atık pişirme yağlarının biyodizele dönüştürülmesi, sadece yakıt üretim maliyetlerini azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda çevreye yönelik olumsuz etkilerin de azalmasına katkı sağlayacaktır.

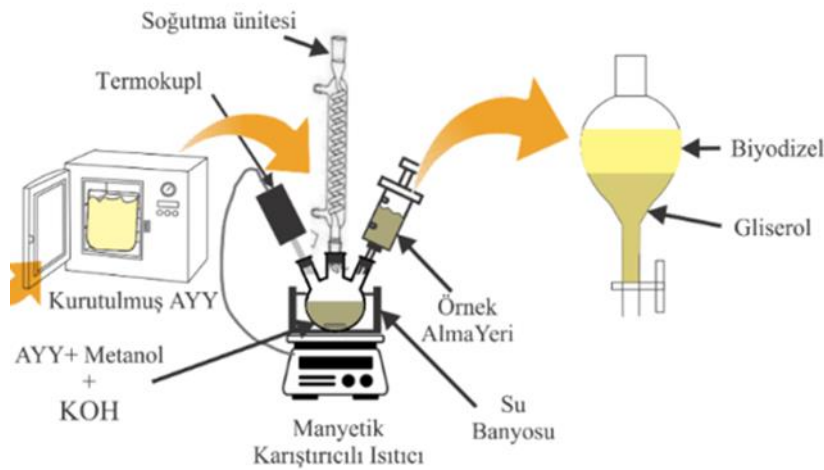
Bu çalışmada, atık pişirme yağlarından biyodizel üretiminde ana faktör olan reaksiyon sıcaklığı optimize edilmiştir. Çalışmada reaksiyon kinetiği ve termodinamiği incelenerek atık pişirme yağlarının biyodizele dönüşüm mekanizması detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmanın sonuçları, Türkiye'de atık pişirme yağlarının biyodizel üretiminde sürdürülebilir bir hammadde olarak kullanılmasının, biyodizel endüstrisinin gelişimine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

### A. Biyodizel Üretimi

**Transesterifikasyon Reaksiyonu:** Transesterifikasyon reaksiyonu için, 6:1 molar oranında metanol karışımı ve ağırlıkça %1 oranında potasyum hidroksit (KOH) katalizörü kullanılmıştır. Reaksiyon, 45, 55 ve 65 °C sıcaklıklarında 30, 60, 90 ve 120 dakika olarak gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon işlemi, geleneksel biyodizel üretim yöntemi esas alınarak gerçekleştirilmiştir ve reaktör olarak üç boyunlu bir joje balon kullanılmıştır. Reaktör, manyetik karıştırıcı bir ısıtıcının üzerine yerleştirilen su dolu bir banyoya yerleştirilmiştir [2,3].

**Reaksiyonun Kurulumu ve Kontrolü:** Reaktörün üç çıkışından biri reaksiyon sıcaklığını izlemek ve kontrol etmek amacıyla bir termokupl ile donatılmıştır. İkinci çıkış, reaksiyon sırasında buharlaşan metanolün yoğunlaşarak tekrar reaktör içine dönmesini sağlamak amacıyla bir soğutma ünitesine bağlanmıştır. Üçüncü çıkış ise, reaksiyon sırasında örnek almak için bir şırınga yerleştirilmiştir. Reaksiyon karışımının homojen bir şekilde karışmasını sağlamak için reaktör içerisine manyetik bir karıştırıcı yerleştirilmiştir ve karıştırma hızı 600 rpm olarak ayarlanarak sabit tutulmuştur. Şekil 1'de deney düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Geleneksel biyodizel üretim prosesinin şematik gösterimi

**Reaksiyon Prosedürü:** Su içeriğinden arındırılmış atık yemek yağı, 100 ml ölçülerek tartılmış ve reaktör içerisine konulmuştur. Transesterifikasyon reaksiyonu 45, 55 ve 65 °C sıcaklıklarında 30, 60, 90 ve 120 dakika olarak gerçekleştirilmiş olup, atık yemek yağı belirtilen sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır. Katalizör çözeltisi, atık yemek yağının ağırlığının %1'i oranında KOH ve belirlenen oranda metanol ile karıştırılarak hazırlanmış ve reaktör içerisine ilave edilmiştir. Reaksiyon süresi her sıcaklık için 30, 60, 90 ve 120 dakika

olarak belirlenmiş ve metanol karışımının reaktöre ilave edilmesiyle reaksiyon başlatılmıştır. Reaksiyon boyunca soğutma suyu sürekli olarak açık tutulmuştur.

Numunenin İşlenmesi ve Temizlenmesi: Transesterifikasyon reaksiyonunun tamamlanmasının ardından, reaktör oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numune, biyodizel ve gliserin karışımından oluştuğu için yoğunluk farkından yararlanılarak ayrışması sağlanmıştır. Bu amaçla, karışım ayırma hunisine alınmış ve bir gün boyunca ayrışması için bekletilmiştir. Alt tabakada biriken gliserin alınarak uzaklaştırılmış ve elde edilen biyodizelin safsızlıklarından arındırılması için 80 °C’de saf su ile yıkanmıştır. Ardından, biyodizel kurutulmuş ve elde edilen biyodizelin ağırlığı belirlenmiştir.

Verim Hesaplaması: Biyodizel üretim verimi (BV), Denklem (1) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada BV biyodizel verimini (%), BA biyodizelin ağırlığını (g) ve AYYA ise başlangıçta kullanılan atık yemek yağının ağırlığını (g) ifade etmektedir [2,3].

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

### B. Kinetik Parametreler ve Termodinamik Analiz

TER'in (transesterifikasyon reaksiyonu) pseudo birinci dereceden bir reaksiyon olduğu tanımlanmıştır [4-7]. Reaksiyon sıcaklıkları biyodizel üretimi için ise 45, 55 ve 65°C olarak seçilmiştir. Reaksiyon hız sabiti genellikle reaksiyon sıcaklığı ve zaman arasındaki ilişkiye bağlıdır [4, 5, 8]. Bu nedenle, her iki reaksiyon için reaksiyon hız sabitleri Denklem (2)'a göre hesaplanmıştır. Ayrıca, aktivasyon enerjisi Denklem (3)'da sunulan Arrhenius denkleminde göre hesaplanmıştır [4-7].

$$\ln\left(\frac{1}{1-P_y}\right) = kt \quad (2)$$

$$k = Ae^{\left[-\frac{E_a}{RT}\right]} \quad (3)$$

Burada P(y) (%) üretim verimini gösterir ki bu, biyodizel üretimi için biyodizel verimini (%) ifade eder, k (1/dak) hız sabitini belirtir ve t (dak) reaksiyon süresini gösterir. A (1/dak) frekans faktörünü belirtir, E(a) (J/mol) aktivasyon enerjisidir, R evrensel gaz sabitini (8.314 J/(mol K)) ifade eder, T ise mutlak sıcaklıktır (K). k, -ln(1-y)'ye karşı t grafiğinin eğimi olarak hesaplanabilir. Reaksiyonların E(a) ve A değerleri ln(k)'ya karşı 1/T grafiğinden belirlenmiştir. Grafiğin eğimi E(a)'yı gösterirken, y ekseninin kesişim noktası A'yı gösterir.

Entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerjisi gibi reaksiyon parametreleri, reaksiyon özelliklerini belirlemek için önemlidir. Bu parametreler arasındaki ilişki Denklem (4) ve (5)'de verilmiştir. Termodinamik analizde, reaksiyonun termodinamik parametreleri Denklem (6)'de verilen Eyring denklemi ile tanımlanabilir.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (4)$$

$$k = \frac{k_b T}{h} e^{\left[-\frac{\Delta G}{RT}\right]} \quad (5)$$

$$\ln \frac{k}{T} = -\left(\frac{\Delta H}{RT}\right) + \left[\frac{\Delta S}{T} + \ln \frac{k_b}{h} + \ln \kappa\right] \quad (6)$$

Burada ΔG (kJ/mol), ΔH (kJ/mol) ve ΔS (kJ/(mol K)) sırasıyla reaksiyonların Gibbs serbest enerji, entalpi ve entropi farklarını belirtir. k<sub>b</sub> (1.38x10<sup>-23</sup> K) ve h (6.63x10<sup>-34</sup> Js) sırasıyla Boltzmann ve Planck sabitlerini ifade eder. κ bir faktördür ve genellikle 1 olarak kabul edilir [4, 8].

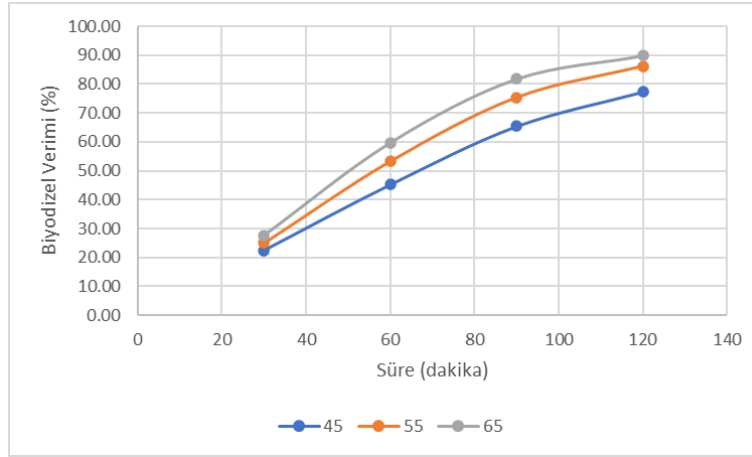
### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### A. Biyodizel Verimi

Şekil 2, biyodizel üretiminin farklı sıcaklık (45, 55 ve 65 °C) ve sürelerde (30, 60, 90 ve 120 dakika) elde edilen verimlerini göstermektedir.

Şekilde de görülebileceği gibi, reaksiyon süresi ve sıcaklık arttıkça biyodizel verimi de artış göstermiştir. 30 dakika sonunda 45 °C'de %22.45 verim elde edilirken, bu oran 65 °C'de %27.65'e yükselmiştir. Benzer şekilde, 120 dakika boyunca reaksiyona tabi tutulduğunda, 45 °C'de %77.35, 55 °C'de %86.11 ve 65 °C'de en yüksek verim olan %89.83 elde edilmiştir. Bu sonuçlar, transesterifikasyon reaksiyonunun sıcaklık ve zaman faktörlerine oldukça duyarlı olduğunu ve biyodizel üretim veriminin bu parametrelerin optimizasyonu ile artırılabilirliğini göstermektedir. Reaksiyon süresi ve sıcaklığın artması, sistemdeki kinetik enerji ve moleküllerin hareketliliğini artırarak daha etkili bir transesterifikasyon sağlamıştır.

Bu sonuçlar, biyodizel üretiminde optimum koşulların belirlenmesinde sıcaklık ve süre faktörlerinin kritik rol oynadığını göstermektedir ve bu çalışmada, atık yemek yağlarından biyodizel üretimi için en verimli sonuçların 120 dakika ve 65 °C sıcaklıkta elde edildiği belirlenmiştir.

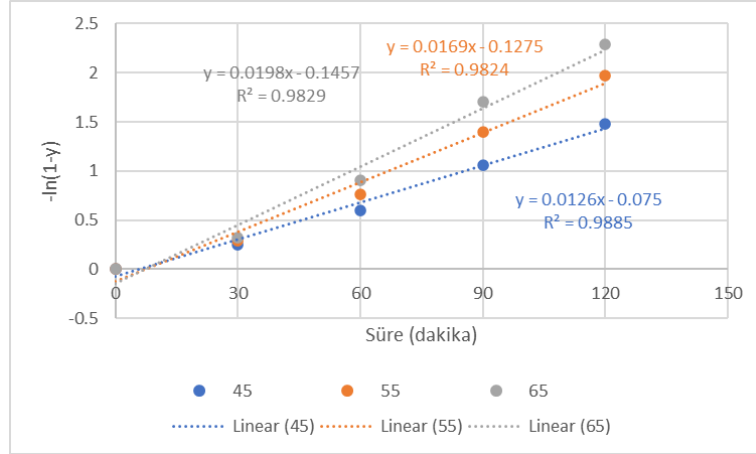


Şekil 2. Sıcaklıkla birlikte reaksiyon süresinin biyodizel verim üzerindeki etkileri

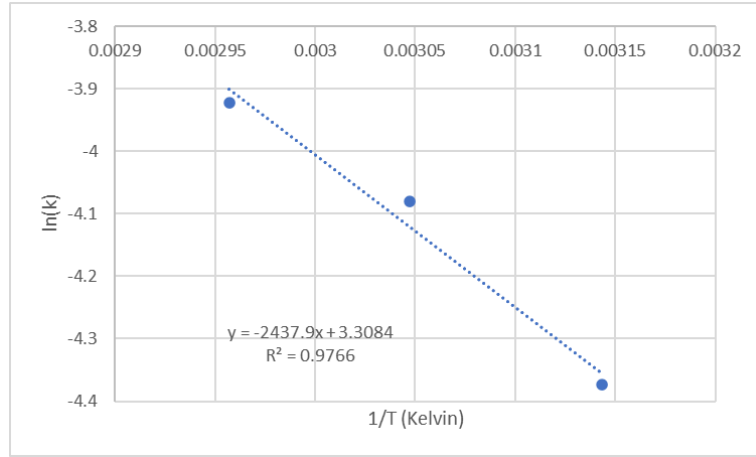
#### B. Transesterifikasyon Reaksiyon İçin Kinetik ve Termodinamik Parametrelerin Belirlenmesi

Kinetik ve termodinamik parametreler, reaksiyonlar hakkında bilgi edinmek için önemlidir. Aktivasyon enerjisi ve hız sabiti, reaksiyonların kinetik çalışması ile belirlenebilirken, Gibbs serbest enerjisi, entalpi ve entropi termodinamik inceleme ile tanımlanabilir. transesterifikasyon reaksiyonu kinetik parametreleri, 45, 55 ve 65 °C olmak üzere üç farklı reaksiyon sıcaklığı altında incelenirken, diğer reaksiyon parametreleri olan %1 KOH katalizör yüklemesi, 6:1 metanol ve yağ molar oranı ve 120 dakika reaksiyon süresi değiştirilmeden tutuldu. Yukarıda bahsedildiği gibi, reaksiyon sıcaklığının biyodizel dönüşüm oranı üzerinde olumlu bir etkisi vardır. Sıcaklık 45°C'den 65°C'ye yükseldiğinde, biyodizel verimi sırasıyla %77.35'tan %89.83'ye yükseldi. Kütle transferi difüzyonunun, özellikle metanol ve yağ gibi çok fazlı bir reaksiyonda, reaksiyon sıcaklığının artmasıyla değiştiği bildirilmiştir [5]. Bu nedenle, diğer reaksiyon parametreleri değiştirilmeden farklı sıcaklıklarda reaksiyon kinetiğini ve termodinamik analizini incelemek uygun bir yaklaşımdır. Reaksiyon hız sabiti, Şekil 3 (a)'da görüldüğü gibi  $-\ln(1-y)$ 'ye karşı zaman grafiğinin eğimi olarak belirlenir. Biyodizel üretiminin hız sabitleri 45, 55 ve 65 °C için sırasıyla 0.0126, 0.0169 ve 0.0198  $dk^{-1}$  olarak bulundu. Elde edilen regresyon değerleri tüm durumlar için 0.95'ten yüksekti. Reaksiyon sıcaklığı arttıkça hız sabitinin de arttığı gözlemlendi. Ayrıca, frekans faktörü (A) ve aktivasyon enerjisi (E(a)) Arrhenius grafiğinden sırasıyla y-ekseninin kesişimi ve grafiğin eğimi olarak bulundu, bu Şekil 3 (b)'de görülebilir. Transesterifikasyon reaksiyonu E(a) ve A değerleri  $R^2 > 0.98$  ile sırasıyla 21.53 kJ/mol ve 27.34  $dk^{-1}$  olarak hesaplandı. En yaygın baz katalizörlerin aktivasyon enerjisinin KOH için 21.36 ile 57.82 J/mol arasında [4, 9], NaOH için ise 38.7 ile 73.15 J/mol arasında [10, 11] olduğu rapor edilmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonu daha düşük aktivasyon enerjisine sahip olduğu, sonuç olarak reaksiyonun

yoğun enerji gerektirmediği görülmektedir. Bu nedenle, katalizörün büyük ölçekli biyodizel üretimi için uygun olduğu ve daha düşük aktivasyon enerjisi nedeniyle sürecin ekonomik olması gerektiği sonucuna varılabilir.



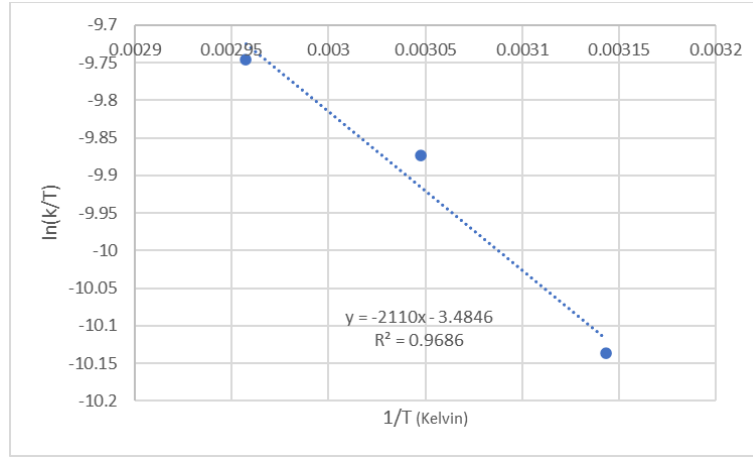
(a)



(b)

Şekil 3. Transesterifikasyon Reaksiyonunun kinetik parametresi için  $-\ln(1-y)$  ile zaman grafiği (a) ve Transesterifikasyon Reaksiyonunun grafiği (b)

$\Delta G$ ,  $\Delta H$  ve  $\Delta S$  gibi termodinamik parametreleri belirlemek için, Şekil 4'de gösterildiği gibi Eyring Polanyi denkleminin grafiği kullanıldı. Transesterifikasyon reaksiyonu için  $\Delta G$ ,  $\Delta H$  ve  $\Delta S$ , 55°C reaksiyon sıcaklığında sırasıyla 92,40 kJ/mol, 18,60 kJ/mol ve -0.25 kJ/(mol K) olarak hesaplandı. Sonuçlara dayanarak, pozitif  $\Delta G$  değeri reaksiyonun endergonik ve kendiliğinden gerçekleşmediğini gösterdi. Ayrıca,  $\Delta H$  0'dan büyüktü ve bu reaksiyonun endotermik olduğunu doğruladı. Ek olarak,  $\Delta S$  negatif bir değer olarak hesaplandı, bu da reaktanın ürüne çok iyi dönüştüğünü gösterir. Bu aynı zamanda geçiş durumunun, temel durumdaki reaktanlara kıyasla daha yüksek derecede düzenli bir hizalamaya sahip olduğunu ve reaksiyonun temel durumdaki reaktana ulaşmak için ısıya ihtiyaç duyduğunu anlamına gelir [5, 16, 17].



Şekil 4. Biyodizel üretimi için Eyring grafiği

#### IV. SONUÇLAR

Bu araştırma, atık pişirme yağlarından biyodizel üretiminin sürdürülebilir bir alternatif yakıt kaynağı oluşturma potansiyelini kanıtlamaktadır. Biyodizel üretiminde sıcaklık ve süre gibi faktörlerin optimizasyonu, verimi önemli ölçüde artırmış ve 65 °C'de 120 dakikada en yüksek verimin %89.83 olarak elde edildiğini göstermiştir. Kinetik analizler, transesterifikasyon reaksiyonunun verimli bir şekilde gerçekleştiğini ve düşük aktivasyon enerjisi sayesinde ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu doğrulamıştır. Termodinamik bulgular, reaksiyonun endotermik doğasını vurgulamaktadır. transesterifikasyon reaksiyonu için Gibbs serbest enerjisinin ( $\Delta G$ ) 92.40 kJ/mol olduğunu ortaya koyarak reaksiyonun kendiliğinden gerçekleşmediğini göstermiştir. Entalpi ( $\Delta H$ ) 18.60 kJ/mol olarak hesaplanmış ve reaksiyonun endotermik olduğunu göstermiştir. Entropi ( $\Delta S$ ) ise -0.25 kJ/(mol K) bulunarak, reaktanlardan ürünlere geçişte düzensizliğin azaldığını ortaya koymuştur. Bu çalışmanın sonuçları, atık pişirme yağlarının biyodizel üretiminde kullanılmasının hem çevresel kirliliği azaltmada hem de biyodizel endüstrisinin sürdürülebilirliğini artırmada önemli bir katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] OECD/FAO, OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030. 2021: Paris.
- [2] Atabani, A.E., et al., Integrated valorization of waste cooking oil and spent coffee grounds for biodiesel production: Blending with higher alcohols, FT-IR, TGA, DSC and NMR characterizations. *Fuel*, 2019. 244(January): p. 419-430.
- [3] Atabani, A.E., et al., Valorization of spent coffee grounds recycling as a potential alternative fuel resource in Turkey: An experimental study. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2018. 68(3): p. 196-214.
- [4] Pugazhendhi, A., et al., Optimization, kinetic and thermodynamic studies on sustainable biodiesel production from waste cooking oil: An Indian perspective. *Fuel*, 2020. 273(January): p. 117725-117725.
- [5] Sun, C., 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*, 2022. 181: p. 1419-1430.
- [6] Wang, X., et al., Highly active porous Co-B nanoalloy synthesized on liquid-gas interface for hydrolysis of sodium borohydride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018. 43(37): p. 17543-17555.
- [7] Patel, N., R. Fernandes, and A. Miotello, Hydrogen generation by hydrolysis of NaBH<sub>4</sub> with efficient Co-P-B catalyst: A kinetic study. *Journal of Power Sources*, 2009. 188(2): p. 411-420.
- [8] Nautiyal, P., K.A. Subramanian, and M.G. Dastidar, Kinetic and thermodynamic studies on biodiesel production from *Spirulina platensis* algae biomass using single stage extraction-transesterification process. *Fuel*, 2014. 135: p. 228-234.
- [9] Sharma, A., P. Kodgire, and S.S. Kachhwaha, Investigation of ultrasound-assisted KOH and CaO catalyzed transesterification for biodiesel production from waste cotton-seed cooking oil: Process optimization and conversion rate evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 2020. 259: p. 120982-120982.
- [10] Tubino, M., J.G.R. Junior, and G.F. Bauerfeldt, Biodiesel synthesis: A study of the triglyceride methanolysis reaction with alkaline catalysts. *Catalysis Communications*, 2016. 75: p. 6-12.

- [11] Suganya, T., N. Nagendra Gandhi, and S. Renganathan, Production of algal biodiesel from marine macroalgae *Enteromorpha compressa* by two step process: Optimization and kinetic study. *Bioresource Technology*, 2013. 128: p. 392-400.
- [12] Yahya, N.Y., et al., Transesterification of used cooking oil (UCO) catalyzed by mesoporous calcium titanate: Kinetic and thermodynamic studies. *Energy Conversion and Management*, 2018. 164(March): p. 210-218.
- [13] Wu, L., et al., Bentonite-enhanced biodiesel production by NaOH-catalyzed transesterification: Process optimization and kinetics and thermodynamic analysis. *Fuel*, 2016. 182: p. 920-927.
- [14] 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..
- [15] 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>.
- [16] 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.
- [17] 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.