El Pasado y el Futuro del Biodiésel: Breve Acercamiento al Método Electroquímico para su Obtención

Berenice Sánchez Cerón [1], Erika Méndez Albores [1,2] y Miguel A. González Fuentes [1,2,*]

[1] Posgrado en Ciencias Ambientales, ICUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México
[2] Facultad de Ciencias Químicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México
* Autor de correspondencia: miguel.gonzalezfuentes@correo.buap.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 6 de agosto de 2026 Aceptado: 15 de septiembre de 2026 Publicado: 15 de noviembre de 2026
DOI: https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.741

Resumen: El biodiésel es uno de los biocombustibles más importantes por su potencial para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir el impacto ambiental asociado al transporte. En este trabajo se aborda el desarrollo histórico del biodiésel, así como las principales materias primas empleadas y los métodos convencionales de producción, con énfasis en la reacción de transesterificación. Asimismo, se describe la obtención de biodiésel mediante procesos de electrólisis, una alternativa emergente que aprovecha reacciones electroquímicas para favorecer la formación de especies reactivas y la conversión de triglicéridos a ésteres metílicos. Se analizan los factores que influyen en el desempeño de este proceso, como el material de los electrodos, el potencial aplicado, el uso de catalizadores y el contenido de agua. Finalmente, se destaca que, aunque esta tecnología aún se encuentra en desarrollo, ofrece ventajas prometedoras, entre ellas la posibilidad de operar bajo condiciones más suaves, reducir el consumo de reactivos y emplear materias primas con mayor contenido de agua, lo que la convierte en una línea de investigación con potencial para impulsar procesos de producción de biodiésel más sustentables.

Palabras clave: biodiésel, energías renovables, transesterificación electroquímica, aceite comestible usado

Introducción

Los biocombustibles se producen a partir de biomasa como madera, cultivos o desechos biológicos (Müller & Günthner, 2024). El biodiésel es uno de los biocombustibles líquidos más importantes y comercialmente disponibles; se elabora a partir de aceites vegetales y grasas animales, principalmente mediante el proceso de transesterificación (Zaky *et al.*, 2022). El término químico para el biodiésel corresponde a los ésteres metílicos de ácidos grasos de cadena larga (FAME, por sus siglas en inglés), que pueden obtenerse a partir de triglicéridos, moléculas presentes en aceites y grasas, mediante una reacción de transesterificación. En esta reacción los triglicéridos interactúan con un alcohol para formar ésteres y glicerol. Cuando la materia prima contiene ácidos grasos libres, estos pueden reaccionar directamente con un alcohol mediante la reacción de esterificación.

El biodiésel ha llamado la atención en investigación debido a su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles convencionales como el diésel o la gasolina de petróleo. Sin embargo, los beneficios ambientales del biodiésel dependen de factores como la materia prima utilizada y el proceso de producción. Asimismo, el biodiésel presenta menor contenido de azufre y otros contaminantes, como lo son los compuestos aromáticos, que el diésel fósil. Las emisiones resultantes de la combustión del biodiésel deben evaluarse de acuerdo con su ciclo de vida.

Algunas de las principales propiedades fisicoquímicas del biodiésel son: alta capacidad de lubricación, alto número de cetano (parámetro relacionado con la facilidad de ignición de un combustible en las condiciones de presión y temperatura de un motor), mayor punto de inflamación y combustión, viscosidad moderada (generalmente mayor que la del diésel fósil) y menor contenido de compuestos aromáticos.

Desarrollo

De diésel de petróleo a una alternativa menos contaminante: breve descripción histórica del biodiésel

Para profundizar en cómo surgió el biodiésel, primero es necesario considerar que, durante el siglo XIX, la expansión de la industria, el transporte y el uso masivo de máquinas en la agricultura propició un incremento en la demanda de energía. En este contexto, los combustibles fósiles adquirieron mayor importancia frente al carbón y otras fuentes de

energía, favorecido por la expansión del motor de combustión interna y la producción en masa de maquinaria agrícola y vehículos destinados al transporte de mercancías, alimentos y personas (Zaky *et al.*, 2022).

El uso del diésel representó un crecimiento exponencial de estas industrias y, en general, de la sociedad. Sin embargo, las emisiones de gases contaminantes derivadas de su combustión agravaron problemas ambientales como el calentamiento global, además de que la posible escasez de combustibles fósiles en el futuro plantea problemas de seguridad energética (De Oliveira & Coelho, 2017). Esto hace esencial la diversificación de las fuentes de energía hacia alternativas menos contaminantes.

La historia del biodiésel se remonta al siglo XIX, cuando los investigadores británicos E. Duffy y J. Patrick evaluaron por primera vez triglicéridos en reacciones de transesterificación, obteniendo un líquido que actualmente se reconoce como biodiésel (Yousuf *et al.*, 2025; Zaky *et al.*, 2022). Posteriormente, en la década de 1970, debido a la crisis energética y al aumento en el costo del diésel de petróleo, comenzó el desarrollo de la industria del biodiésel. Para 1985, se estableció la primera planta de biodiésel en Austria, iniciando su obtención a escala industrial. Finalmente, en 2009 se reportó por primera vez el uso de la electrólisis para la generación de biodiésel (Guan & Kusakabe, 2009), marcando una nueva etapa en su desarrollo desde la electroquímica.

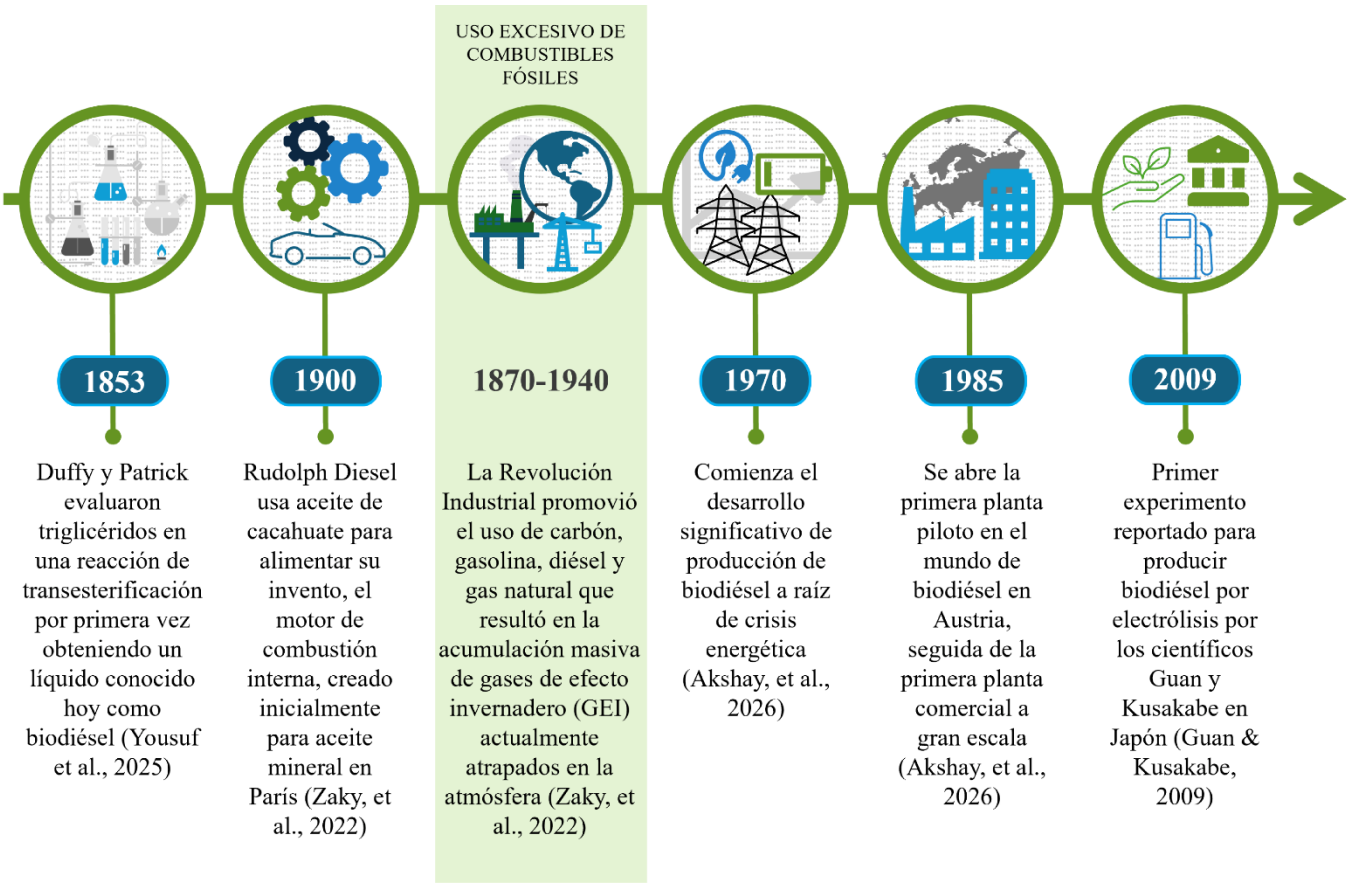


Figura 1. Desarrollo histórico del biodiésel.

¿Cómo se genera el biodiésel?

Los métodos de obtención de biodiésel son diversos, entre los que se encuentran la microemulsión, la pirólisis y la transesterificación, siendo esta última la más utilizada debido a su eficiencia. Sin embargo, estas tecnologías pueden presentar desafíos como el requerimiento de altas temperaturas o grandes cantidades de catalizador.

La reacción de transesterificación es la más común en la producción de biodiésel. En ésta, los triglicéridos reaccionan con un alcohol (metanol o etanol) para generar ésteres metílicos o etílicos y glicerol como subproducto.

Específicamente, desde el punto de vista estequiométrico, la reacción de transesterificación requiere tres moles de alcohol por cada mol de triglicérido para generar tres moles de biodiésel y uno de glicerol (Figura 2) (Ogunkunle & Ahmed, 2019). Esta reacción suele ser catalizada por bases, ácidos o enzimas, siendo el hidróxido de sodio o potasio los más utilizados (Yousuf *et al.*, 2025).

La obtención de biodiésel puede llevarse a cabo a partir de diversas materias primas, como aceites vegetales, aceites comestibles usados (ACU) y grasas animales. Estas últimas opciones contribuyen a la valorización de residuos industriales. Entre las materias primas más utilizadas destaca el aceite de soja (~30%), seguido del aceite de colza (~25%) y el aceite de palma (~18%). Asimismo, el ACU representa aproximadamente el 10%, mientras que las grasas animales constituyen alrededor del 6% (Zhao *et al.*, 2023).

Una reacción especial: transesterificación por electrólisis

La electrólisis se define como el conjunto de cambios químicos que ocurren al hacer pasar corriente eléctrica a través de una sustancia, provocando reacciones de oxidación y reducción (Schmiermund, 2023). Esta técnica electroquímica puede ser usada también para llevar a cabo el proceso de transesterificación. La reacción ocurre en una celda electroquímica conectada a una fuente de poder mediante dos electrodos: el ánodo, donde ocurre la oxidación, y el cátodo, dónde ocurre la reducción (Figura 2). El medio electrolítico está conformado por la materia prima, alcohol, electrolito (sustancia que favorece el transporte de carga en el medio), agua, codisolvente y, en algunos casos, catalizador (sustancia que acelera la reacción química). El sistema se mantiene bajo agitación con el uso de una barra magnética.

Durante la electrólisis, el cátodo genera iones hidróxido (OH^-). Estas especies favorecen la transformación del alcohol presente en el medio al retirar un protón de su molécula, formando iones metóxido (CH_3O^-). Estos últimos son especies reactivas que atacan a los triglicéridos y favorecen su transformación en ésteres metílicos, es decir, biodiésel (Sarno & Ponticorvo, 2020). La generación de especies reactivas está ilustrada por medio de las reacciones electroquímicas de la Figura 2. Una de las principales ventajas de este método es la generación continua de especies reactivas durante el proceso.

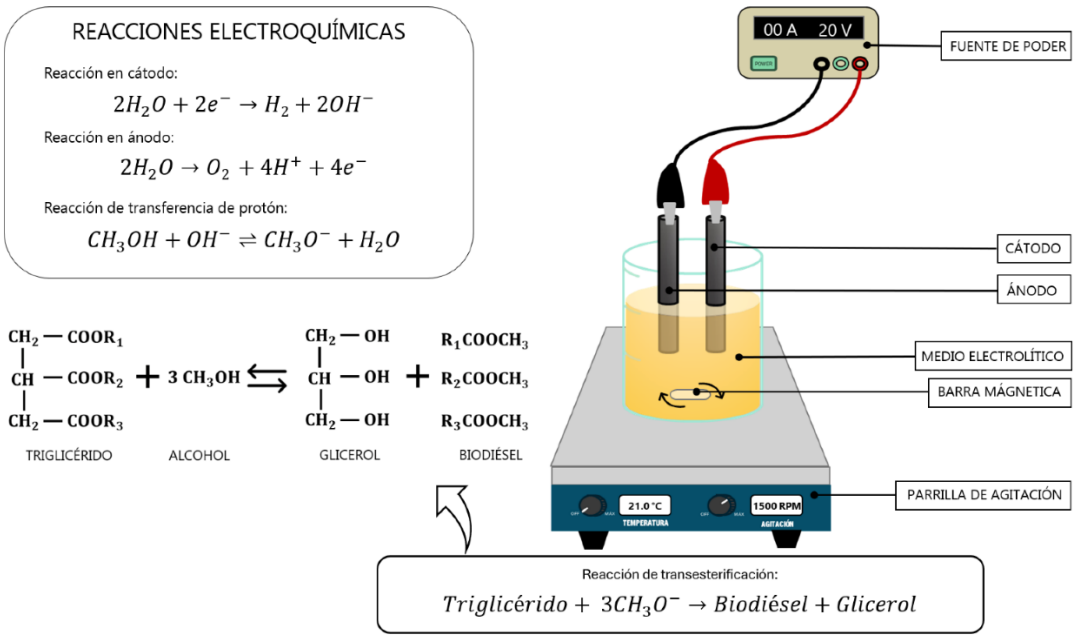


Figura 2. Esquema general de una celda electroquímica para producir biodiésel y las reacciones químicas y electroquímicas involucradas.

Esta técnica puede operar a temperaturas moderadas y, en algunos casos, sin necesidad de catalizador o codisolvente (Darwin *et al.*, 2023), además de ser tolerante a mayores contenidos de agua. Entre los factores que influyen en la conversión se encuentran el material del electrodo, la materia prima, el voltaje aplicado de manera constante a la celda electroquímica, la temperatura, el electrolito y el tiempo de reacción (Thangaraj & Solomon, 2021).

El camino de la electroquímica en la generación de biodiésel

En 2009, Guan y Kusakabe realizaron el primer estudio del uso de la electrólisis para producir biodiésel empleando aceite comestible usado y aceite de maíz, con electrodos de platino, alcanzando conversiones de hasta 97 %. Desde estos primeros estudios se observó que la adición de una pequeña cantidad de agua desionizada favorece la formación de iones OH^- durante las reacciones catódicas. Esto constituye una ventaja del método electroquímico, ya que los procesos convencionales de transesterificación suelen ser sensibles incluso a pequeñas cantidades de agua presentes en la materia prima.

Por otro lado, en los estudios sobre el efecto del potencial aplicado se han reportado valores desde 5 V (Cui *et al.*, 2024; Karimi & Saidi, 2022; Sarno & Ponticorvo, 2020) hasta 55 V (Fereidooni *et al.*, 2021).

El material de los electrodos también ha sido ampliamente investigado. Inicialmente se empleó platino, pero posteriormente se incorporaron materiales como grafito (Moeksin *et al.*, 2019; Putra *et al.*, 2015; Rachman *et al.*, 2018), aluminio (Moeksin *et al.*, 2020) y plata (Darwin *et al.*, 2023). El grafito destaca por su estabilidad química, buena conductividad eléctrica y facilidad de manejo.

Por último, el uso de catalizadores ha sido ampliamente explorado, incluyendo bases como KOH y NaOH (Abdollahi Asl *et al.*, 2020; Rachman *et al.*, 2018), así como sistemas sin catalizador (Aregawi *et al.*, 2023; Nguyen *et al.*, 2023). El catalizador puede ayudar a disolver de mejor manera la fase oleosa con el alcohol de elección. A continuación, se muestran algunos parámetros estudiados a nivel laboratorio en la obtención de biodiésel por el método electroquímico (Tabla 1). La comparación de parámetros permite observar la diversidad de materias primas, catalizadores, materiales de electrodo, potenciales (voltajes) aplicados y electrolitos empleados.

Tabla 1. Parámetros más estudiados en electrólisis para la generación de biodiésel

Materia prima	Catalizador	Material de electrodo	Intervalo de potencial (V)	Electrolito soporte	Referencia
Aceite de maíz	NR*	Platino	5 – 20	NaCl	Guan & Kusakabe, 2009
ACU	Quitosano	Grafito	18	NaCl	Putra *et al.*, 2015
ACU y aceite de palma	KOH y NaOH	Grafito	14 – 24	NaCl	Rachman *et al.*, 2018
ACU	NaOH	Grafito	6 – 12	NaCl	Moeksin *et al.*, 2019
Aceite de semilla de limón	NR*	Carbón vitreo y Platino	5 – 25	NaCl	Sarno & Ponticorvo, 2020
ACU	KOH y NaOH	Grafito	30 – 50	NR*	Abdollahi Asl *et al.*, 2020
ACU	KOH	Aluminio y Acero inoxidable	15 – 35	NaCl	Moeksin *et al.*, 2020
ACU	Zeolita y Quitosano	Grafito	20 – 55	NaCl	Fereidooni *et al.*, 2021
Aceite de semilla de Neem	H_2SO_4	Sin información	5 – 15	NaCl	Karimi & Saidi, 2022
ACU y aceite de palma	KOH	Grafito, Platino y Plata	12	NR*	Darwin *et al.*, 2023
Aceite de soja	NR*	Titanio revestido de platino	18	Cloruro de 1-etil-3-metilmidazolio	Aregawi *et al.*, 2023
Aceite de soja	NR*	Titanio revestido de platino	21	NR*	Nguyen *et al.*, 2023
ACU	rGO@ SnO_2/ZnO	Grafito	5 – 50	NaCl	Cui *et al.*, 2024

Nota. *NR: No Reportado.

La información resumida en la Tabla 1 muestra que la obtención electroquímica de biodiésel ha evolucionado hasta el desarrollo de sistemas que incorporan materiales de menor costo, nuevos catalizadores y electrolitos alternativos. Es importante mencionar que actualmente no existe una única combinación de materia prima, material electródico o condiciones de operación que pueda considerarse óptima para todos los casos, por lo que la búsqueda de configuraciones más eficientes continúa siendo uno de los principales objetivos de esta línea de investigación.

Conclusiones

El biodiésel es un biocombustible que se ha desarrollo como alternativa a los combustibles fósiles. Los procesos por los que se obtiene se han diversificado mucho, así como la materia prima de la cual se genera. Los posibles beneficios ambientales asociados a su uso dependen de factores como la materia prima y el proceso de producción, por lo que deben evaluarse considerando el contexto particular y el ciclo de vida del combustible. La experiencia en países como Brasil muestra un ejemplo del impacto que puede tener la implementación sostenida de biocombustibles cuando existen las condiciones de producción y regulatorias (De Oliveira & Coelho, 2017). Sin embargo, México requiere de considerar la disponibilidad de materia prima, las condiciones de producción y el marco regulatorio nacional.

En este contexto, la transesterificación electroquímica representa una alternativa prometedora en la generación de biodiésel. La posibilidad de generar especies reactivas mediante la aplicación de potencial eléctrico, operar bajo condiciones diversas y emplear materias primas con mayor contenido de agua son características que han impulsado su investigación. Esta tecnología aún está en desarrollo y presenta desafíos que deben atenderse, entre los que destaca mayor validación en aspectos como el escalamiento de los procesos, el consumo energético, los costos de operación y la estabilidad y durabilidad de los electrodos. Asimismo, es fundamental evaluar las condiciones particulares de cada región para identificar las materias primas disponibles, los impactos ambientales y las escalas de producción más adecuadas. Esto permitirá desarrollar tecnologías adaptadas a las necesidades de cada país y maximizar los beneficios ambientales y económicos del biodiésel. Aunque la síntesis electroquímica de biodiésel se encuentra en una etapa temprana de desarrollo, los avances alcanzados en los últimos años muestran que puede convertirse en una alternativa más sustentable en comparación con los métodos convencionales. La posibilidad de operar bajo condiciones más suaves, reducir el consumo de reactivos y tolerar materias primas con mayor contenido de agua ayuda a superar desafíos actuales del biodiésel. En este sentido, su estudio y desarrollo podrían desempeñar un papel importante en la transición hacia sistemas de obtención de energía más amigables con el ambiente.

Bibliografía

Abdollahi Asl, M., Tahvildari, K., & Bigdeli, T. (2020). Eco-friendly synthesis of biodiesel from WCO by using electrolysis technique with graphite electrodes. *Fuel, 270*. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117582

Aregawi, B. H., Nguyen, H. C., Fu, C. C., Ong, H. C., Barrow, C. J., Su, C. H., Wu, S. J., Juan, H. Y., & Wang, F. M. (2023). Biodiesel production through electrolysis using an ionic liquid, 1-ethyl-3-methylimidazolium chloride as a supporting electrolyte. *International Journal of Energy Research, 2023*. https://doi.org/10.1155/2023/4719589

Cui, P., Gao, C., Gu, L., Li, Z., & Liao, B. (2024). rGO@SnO_2/ZnO nanocomposite as a highly reactive heterogeneous catalyst toward biodiesel synthesis by electrolysis procedure: Central composite design optimization. *Process Safety and Environmental Protection, 191*, 287–303. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.08.077

Darwin, Thifal, M., Alwi, M., Murizal, Z., Pratama, A., & Rizal, M. (2023). The synthesis of biodiesel from palm oil and waste cooking oil via electrolysis by various electrodes. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 8*. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100512

De Oliveira, F. C., & Coelho, S. T. (2017). History, evolution, and environmental impact of biodiesel in Brazil: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75*, 168–179. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.060

Fereidooni, L., Abbaspourrad, A., & Enayati, M. (2021). Electrolytic transesterification of waste frying oil using Na+/zeolite–chitosan biocomposite for biodiesel production. *Waste Management, 127*, 48–62. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.020

Guan, G., & Kusakabe, K. (2009). Synthesis of biodiesel fuel using an electrolysis method. *Chemical Engineering Journal, 153*(1–3), 159–163. https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.06.005

Karimi, S., & Saidi, M. (2022). Biodiesel production from Azadirachta India-derived oil by electrolysis technique: Process optimization using response surface methodology (RSM). *Fuel Processing Technology, 234*. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107337

Moeksin, R., Ali, F., & Arita, S. (2020). Production of ethyl ester with the influence of electrode type, rection time and electric voltage from used frying oil. *Journal of Physics: Conference Series, 1500*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012046

Moeksin, R., Aprianti, T., & Miskah, S. (2019). Biodiesel production from used frying oil using electrolysis method with methanol addition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 298*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/298/1/012010

Müller, F., & Günthner, M. (2024). A detailed comparison of ethanol–diesel direct fuel blending to conventional ethanol–diesel dual-fuel combustion. *Automotive and Engine Technology, 10*(1), 1. https://doi.org/10.1007/s41104-024-00147-1

Nguyen, H. C., Aregawi, B. H., Fu, C. C., Ong, H. C., Barrow, C. J., Su, C. H., Wu, S. J., Juan, H. Y., & Wang, F. M. (2023). Biodiesel production through electrolysis in the presence of choline chloride-based deep eutectic solvent: Optimization by response surface methodology. *Journal of Molecular Liquids, 379*. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121633

Ogunkunle, O., & Ahmed, N. A. (2019). A review of global current scenario of biodiesel adoption and combustion in vehicular diesel engines. *Energy Reports, 5*, 1560–1579. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.028

Putra, R. S., Hartono, P., & Julianto, T. S. (2015). Conversion of methyl ester from used cooking oil: The combined use of electrolysis process and chitosan. *Energy Procedia, 65*, 309–316. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.057

Rachman, S. A., Komariah, L. N., Andwikaputra, A. I., & Umbara, N. B. (2018). High conversion and yield of biodiesel using electrolysis method. *Journal of Physics: Conference Series, 1095*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1095/1/012040

Sarno, M., & Ponticorvo, E. (2020). A new nanohybrid for electrocatalytic biodiesel production from waste Amalfi coast lemon seed oil. *Fuel, 267*. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117178

Schmiermund, T. (2023). Electrolysis. En *The chemistry knowledge for firefighters* (pp. 295–304). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64423-2_20

Thangaraj, B., & Solomon, P. R. (2021). Biodiesel production by the electrocatalytic process: A review. *Clean Energy, 5*(1), 19–31. https://doi.org/10.1093/ce/zkaa026

Yousuf, M., Das, A. P., Masurkar, P., Bag, M. K., Mitra, D., & Ray, A. (2025). Recent advances and research in biodiesel as a sustainable, eco-friendly approach toward the green economy. En *Environmental Science and Engineering: Part F218* (pp. 305–329). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81615-4_13

Zaky, A. S., Moirangthem, K., & Wahid, R. (2022). Biofuels: An overview. En *Waste-to-energy: Recent developments and future perspectives towards circular economy* (pp. 85–144). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91570-4_4

Zhao, C., Xu, Q., Gu, Y., Nie, X., & Shan, R. (2023). Review of advances in the utilization of biochar-derived catalysts for biodiesel production. *ACS Omega, 8*(9), 8190–8200. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07909