

Pengaruh Jenis Katalis *Heterogen* Terhadap Nilai Kalor Dari Minyak Jelantah Melalui Proses Transesterifikasi

Gusti Zakariya Gofururrohim¹, Asroful Abidin², dan Mokh. Hairul Bahri³

¹⁻³ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; Jalan Karimata No.49, Sumbersari, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68121, Indonesia

* Penulis Korespondensi : Gusti Zakariya Gofururrohim

Abstract: The depletion of fossil fuel resources and increasing environmental issues have intensified the need for sustainable renewable energy alternatives. Biodiesel has emerged as a promising substitute fuel due to its renewable nature, environmental compatibility, and its production from vegetable oils and waste cooking oil. This study investigates the influence of biomass-based heterogeneous catalysts on the calorific value of biodiesel derived from waste cooking oil through a transesterification reaction. The heterogeneous catalysts examined include papaya leaves, calcium oxide (CaO) obtained from calcined eggshells, and activated carbon produced from rice husk. The transesterification process was conducted using methanol with a methanol-to-oil ratio of 8:1 and a catalyst loading of 4% by weight of oil at a reaction temperature of 60°C. The produced biodiesel was subsequently evaluated for its energy characteristics by measuring the calorific value using a bomb calorimeter. The results demonstrate that the type of heterogeneous catalyst significantly affects the calorific value of biodiesel. The rice husk-based catalyst exhibited the highest calorific value of 922.28 Cal/gram, while the eggshell- and papaya leaf-based catalysts resulted in lower calorific values of -99.6 Cal/gram and -146.24 Cal/gram, respectively. These findings indicate that the physicochemical properties of the catalysts play a crucial role in determining biodiesel energy performance. Overall, rice husk shows strong potential as an efficient, low-cost, and environmentally friendly heterogeneous catalyst for sustainable biodiesel production.

Keywords: *Biodiesel; Waste Cooking Oil; Heterogeneous Catalyst; Biomass; Transesterification; Calorific Value*

Abstrak: Pemanfaatan energi terbarukan menjadi semakin penting seiring dengan menipisnya cadangan bahan bakar fosil dan meningkatnya dampak pencemaran lingkungan. Biodiesel merupakan salah satu sumber energi alternatif yang potensial karena dapat diperoleh dari minyak nabati maupun limbah minyak, bersifat ramah lingkungan, serta berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penggunaan katalis heterogen berbasis biomassa terhadap nilai kalor biodiesel yang diproduksi dari minyak jelantah melalui reaksi transesterifikasi. Katalis yang digunakan terdiri dari daun pepaya, kalsium oksida (CaO) hasil kalsinasi cangkang telur, dan karbon aktif yang berasal dari sekam padi. Proses transesterifikasi dilakukan dengan menggunakan metanol pada rasio metanol terhadap minyak sebesar 8:1 serta konsentrasi katalis 4% dari massa minyak, dengan suhu reaksi dijaga pada 60°C. Biodiesel yang dihasilkan kemudian diuji karakteristik energinya melalui pengukuran nilai kalor menggunakan bomb kalorimeter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan jenis katalis memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kalor biodiesel. Katalis berbasis sekam padi menghasilkan nilai kalor tertinggi sebesar 922,28 Cal/gram, sedangkan katalis dari cangkang telur dan daun pepaya menghasilkan nilai kalor yang lebih rendah, masing-masing sebesar -99,6 Cal/gram dan -146,24 Cal/gram. Temuan ini menegaskan bahwa sifat material katalis berperan penting dalam menentukan kualitas energi biodiesel, sehingga sekam padi berpotensi dikembangkan sebagai katalis heterogen alternatif yang efisien dan ramah lingkungan.

Diterima: May 18, 2026

Direvisi: May 26, 2026

Diterima: May 29, 2026

Diterbitkan: July 14, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

Kata kunci: Biodiesel; Minyak Jelantah; Katalis Heterogen; Biomassa; Transesterifikasi; Nilai Kalor

1. Pendahuluan

Kekurangan bahan bakar fosil dan kesadaran akan dampak ekologis telah mendesak pencarian energi berkelanjutan yang dapat diperbaharui. Biodiesel, yang merupakan bahan bakar pengganti yang dibuat dari bahan organik (seperti minyak tanaman atau lemak hewani), menawarkan peluang yang menjanjikan karena karakteristiknya yang terbarukan, mudah diurai secara alami, dan emisi CO₂-nya yang lebih rendah [1]. Transesterifikasi, sebagai reaksi inti dalam produksi biodiesel, mengubah minyak dan alkohol menjadi biodiesel serta gliserol. Efektivitas proses ini sangat bergantung pada keberadaan katalis. Akan tetapi, katalis homogen yang umum dipakai, beberapa contoh yang digunakan meliputi kalium hidroksida (KOH) dan natrium hidroksida (NaOH). menimbulkan permasalahan serius, yaitu kesulitan dalam pemisahan katalis, produksi limbah cair yang signifikan, dan sifatnya yang korosif terhadap peralatan [2].

Biodiesel yang dikenal sebagai salah satu bahan bakar ramah lingkungan kini semakin mendapat sorotan dalam pengembangan energi terbarukan serta teknologi katalisis. Pemanfaatan sumber daya hayati sebagai katalis menjadi pilihan alternatif untuk meningkatkan efektivitas proses pembuatan biodiesel [3]. Sebagai katalis alami, daun pepaya, cangkang telur, dan sekam padi menjanjikan efisiensi dalam mempercepat transesterifikasi.

Katalis heterogen dari bahan alam merupakan alternatif yang menjanjikan [4]. Daun pepaya (*Carica papaya*), Cangkang Telur, dan Sekam padi diduga kuat memiliki kemampuan sebagai katalis. Dengan menggunakan daun dalam wujud padat atau abu, sifat heterogen katalis ini diharapkan dapat mengatasi masalah pada katalis homogen. Keunggulannya mencakup proses pemisahan katalis yang lebih sederhana, penurunan jumlah limbah, serta efisiensi biaya produksi karena memanfaatkan sumber daya lokal yang tersedia dalam jumlah besar [3].

2. Tinjauan Literatur

2.1. Biodiesel

Biodiesel didefinisikan sebagai bahan bakar alternatif untuk mesin diesel yang terbuat dari material organik yang berkelanjutan, seperti lemak hewan dan minyak dari berbagai jenis tanaman [5]. Bahan bakar ini menawarkan berbagai keunggulan, di antaranya sifatnya yang tidak beracun, mudah terurai di alam, serta tingkat emisi sulfur dan hidrokarbon yang rendah. Dari segi teknis, Bahan bakar tersebut juga bisa diaplikasikan pada mesin diesel yang memenuhi spesifikasi tertentu [6].

2.2. Katalis

Suatu zat dapat dikategorikan sebagai katalis apabila berperan dalam mempercepat terjadinya reaksi kimia yang berlangsung tanpa menyebabkan perubahan pada zat tersebut atau terkonsumsi selama proses reaksi berlangsung. Mekanisme fundamental yang mendasari katalis berfungsi untuk menurunkan besarnya energi aktivasi [7].

2.2.1. Katalis Heterogen

Katalis heterogen merupakan katalis yang tidak melarut dalam reaktan maupun produk reaksi [6]. Katalis heterogen menawarkan beberapa keunggulan, di antaranya adalah kemampuannya untuk digunakan dalam beberapa siklus reaksi secara berulang dan efisiensi yang tinggi dalam proses pemisahan produk akhir [8].

2.2.2. Katalis Homogen

Katalis homogen adalah katalis yang berada pada fase yang sama dengan reaktan. Dalam sistem reaksi, umumnya dalam fase cair. Keberadaan katalis ini memungkinkan terjadinya interaksi secara langsung pada tingkat molekuler dengan pereaksi, sehingga membentuk intermediate reaksi yang stabil [9]. Dalam proses transesterifikasi untuk produksi biodiesel, katalis homogen seperti NaOH, KOH, atau asam sulfat mampu menghasilkan konversi yang tinggi dalam waktu relatif singkat [10].

2.3. Daun Pepaya

Daun pepaya (*Carica papaya* L.) merupakan salah satu bagian tanaman pepaya yang banyak dimanfaatkan dalam bidang kesehatan, pangan, maupun penelitian karena kandungan bioaktifnya yang beragam. Secara morfologi, daun pepaya berwarna hijau, berbentuk menjari (palmatus), dan memiliki getah putih (lateks) yang kaya akan enzim proteolitik [11]. Komposisi kimiawi daun pepaya menjadi dasar ilmiah pemanfaatannya sebagai katalis. Daun ini mengandung senyawa alkali alami yang tinggi, khususnya kalsium (Ca) dalam berbagai bentuk senyawa seperti kalsium karbonat (CaCO_3) dan kalsium oksida (CaO) [12]. Kalsium oksida yang terbentuk dikenal sebagai katalis basa kuat yang efektif untuk mempercepat reaksi transesterifikasi antara trigliserida (dalam minyak nabati) dan alkohol (seperti metanol), sehingga menghasilkan biodiesel [13].

2.4. Cangkang Telur

Cangkang telur mulai dikaji secara intensif sebagai kandidat material pendukung katalis heterogen yang aplikabel pada reaksi transesterifikasi pembuatan biodiesel [4]. Sumber potensi utamanya terletak pada kandungan dominan senyawa kalsium karbonat (CaCO_3) yang presentase massalnya dapat mencapai 93% hingga 97% [14]. Selain bagian utama tersebut, cangkang telur juga secara alami mengandung berbagai mineral tambahan dalam jumlah minor, di antaranya magnesium karbonat, kalsium fosfat, serta senyawa organik pembentuk matriks [15].

2.5. Sekam Padi

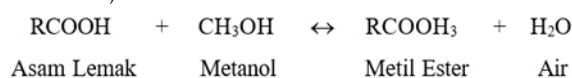
Sekam padi merupakan limbah hasil proses penggilingan gabah yang mulai dikaji potensinya sebagai bahan dasar katalis heterogen. Selama ini, reaksi transesterifikasi untuk menghasilkan biodiesel masih banyak bergantung pada penggunaan katalis homogen, misalnya natrium hidroksida (NaOH) atau kalium hidroksida (KOH) [16]. Aktivitas katalitik pada sekam padi terutama bersumber dari tingginya konsentrasi silika (SiO_2) yang dapat menyusun sekitar 15-20% dari massa totalnya [17].

2.6. Minyak Jelantah

Minyak jelantah adalah minyak nabati bekas pakai yang telah melalui siklus pemanasan berulang kali, sehingga mengakibatkan penurunan kualitas. Degradasi termal ini memicu naiknya nilai bilangan asam, kekentalan (viskositas), serta memicu terbentuknya senyawa-senyawa polar [18]. Walaupun membutuhkan tahap pra-perlakuan guna menurunkan kadar asam bebasnya, pemanfaatan minyak jelantah memberikan dua keuntungan strategis sekaligus, yaitu menekan biaya produksi biodiesel dan menangani permasalahan limbah minyak.

2.7. Esterifikasi

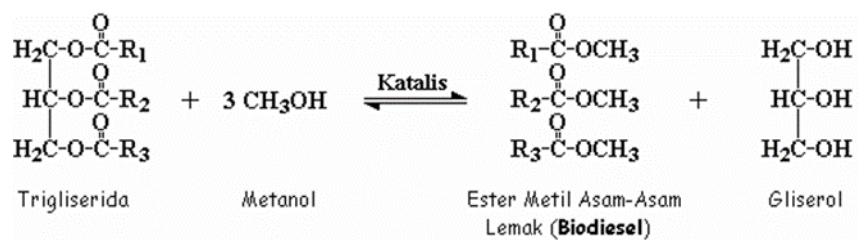
Esterifikasi merupakan mekanisme sintesis ester yang melibatkan reaksi antara senyawa alkohol dengan asam karboksilat. Proses konvensional berlangsung sebagai reaksi kondensasi yang memerlukan katalis asam, misalnya asam sulfat, dimana ester terbentuk disertai dengan produksi air [19]. Proses esterifikasi asam lemak yang menghasilkan metil ester. Reaksi esterifikasi dari asam lemak menjadi metil ester.



Gambar 1. Reaksi Esterifikasi

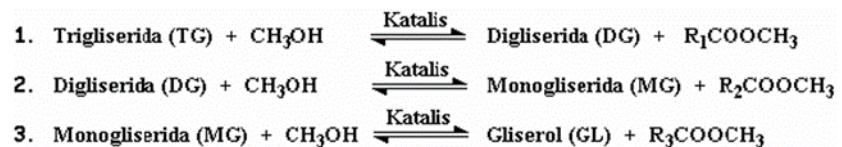
2.8. Transesterifikasi

Transesterifikasi merupakan suatu reaksi pertukaran gugus alkil ester, dimana gugus alkoksi dari suatu senyawa ester digantikan oleh gugus alkoksi yang berasal dari suatu alkohol. sintesis biodiesel (Fatty Acid Methyl Ester/FAME) dari bahan baku trigliserida (minyak nabati/hewani) dan alkohol rantai pendek seperti metanol, yang menghasilkan ester alkil dan gliserol [20]. Reaksi transesterifikasi yang mengubah trigliserida mengalami proses konversi sehingga menghasilkan senyawa metil ester:



Gambar 2. Reaksi Transesterifikasi Trigliserida

Reaksi transesterifikasi sebenarnya berlangsung dalam 3 tahap yaitu sebagai berikut:



Gambar 3. Tahap Transesterifikasi

3. Metode

3.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan eksperimental laboratorium untuk menganalisis nilai kalor biodiesel yang dihasilkan dari transesterifikasi minyak sawit menggunakan tiga katalis heterogen berbasis biomassa, yaitu daun pepaya, kalsium oksida (CaO) dari cangkang telur, dan karbon aktif dari abu sekam padi.

3.2. Alat dan Bahan

Alat :

- Labu leher tiga
- Corong pemisah
- Hot plate
- Termometer
- Kondenser
- Labu ukur

Bahan :

- Daun Pepaya
- Cangkang
- Abu Sekam Padi
- Minyak Jelantah
- Methanol
- Aquades

3.3. Prosedur Penelitian

1. Sampel daun pepaya, cangkang telur dan abu sekam padi dipanaskan pada suhu 60°C
2. Campurkan methanol (methanol:minyak = 8:1) dan Katalis (4% berat minyak)
3. Larutan katalis dan methanol lalu minyaknya dipanaskan sehingga 60°C
4. Hasil reaksi dituangkan, selanjutnya larutan dimasukkan ke corong pemisah dan didiamkan hingga proses pemisahan berlangsung secara alami yakni 60 menit hingga terbentuk dua fase.
5. Masukkan ke corong pemisah dan diamkan selama 20 menit, buang lapisan yang mengendap ke bawah.

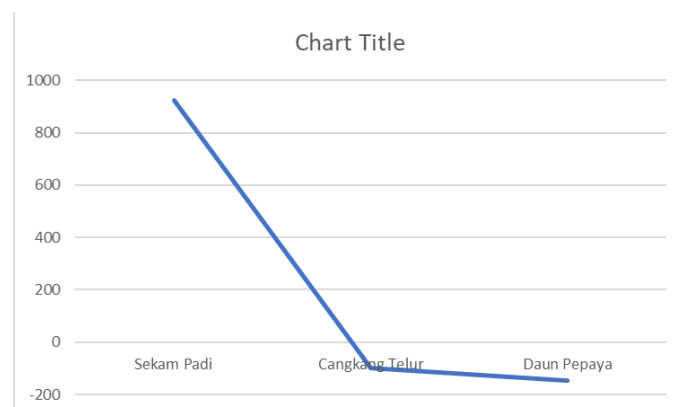
6. Biodiesel dicuci dengan air hangat (60°C) sebanyak 1 kali.
7. Biodiesel yang telah bersih kemudian dikeringkan menggunakan corong pemisah.
8. Pengambilan metil ester dan di uji nilai menggunakan bomb calorimeter.

4. Hasil dan Pembahasan

Pengujian nilai kalor bertujuan untuk mengukur besarnya energi panas yang dihasilkan oleh masing-masing jenis katalis. Pengujian ini dilakukan menggunakan bom kalorimeter, yang berfungsi untuk mengukur energi panas yang dilepaskan ketika sampel dibakar secara sempurna. Hasil uji nilai kalor dalam satuan Cal/gram disajikan pada Tabel 4.1.

NO	Jenis Katalis	Nilai Kalor (Cal/gram)
1	Sekam Padi	922,28
2	Cangkang Telur	-99,6
3	Daun Pepaya	-146,24

Berdasarkan hasil pengujian, sekam padi memiliki nilai kalor tertinggi sebesar 922,28 Cal/gram. Selanjutnya, cangkang telur menunjukkan nilai kalor sebesar -99,6 Cal/gram, sedangkan daun pepaya memiliki nilai kalor terendah yaitu -146,24 Cal/gram. Perbedaan nilai kalor tersebut menunjukkan adanya variasi karakteristik energi dari masing-masing jenis katalis.



Gambar 1 Grafik Hasil Pengujian Nilai Kalor

Gambar 4 menunjukkan bahwa jenis katalis memengaruhi nilai kalor yang dihasilkan, di mana sekam padi memiliki nilai kalor tertinggi sebesar 922,28 Cal/gram sehingga mampu menghasilkan energi panas lebih besar dibandingkan katalis lainnya. Sebaliknya, cangkang telur dan daun pepaya masing-masing menghasilkan nilai kalor sebesar -99,6 Cal/gram dan -146,24 Cal/gram, yang menandakan kontribusi energi panas yang relatif rendah. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi nilai kalor suatu katalis, semakin besar energi yang dilepaskan selama proses pembakaran, sehingga sekam padi dapat dinilai memiliki potensi paling baik sebagai katalis dibandingkan cangkang telur dan daun pepaya berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4.

5. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan katalis heterogen berbasis biomassa berpengaruh terhadap nilai kalor biodiesel yang dihasilkan yang diperoleh dari minyak jelantah dengan proses transesterifikasi. Di antara katalis yang digunakan, sekam padi menghasilkan nilai kalor tertinggi sebesar 922,28 Cal/gram, sehingga menunjukkan kemampuan terbaik dalam menghasilkan biodiesel dengan kandungan energi yang lebih tinggi. Sebaliknya, katalis cangkang telur dan daun pepaya menghasilkan nilai kalor yang lebih rendah, masing-masing sebesar -99,6 Cal/gram dan -146,24 Cal/gram.

Perbedaan tersebut menegaskan bahwa sifat dan aktivitas katalitik dari masing-masing bahan berperan penting dalam menentukan kualitas energi biodiesel. Dengan

mempertimbangkan hasil pengujian dan ketersediaan bahan, sekam padi berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai katalis heterogen alternatif yang ekonomis dan ramah lingkungan dalam produksi biodiesel berkelanjutan.

Kontribusi Penulis: Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam bidang energi terbarukan, khususnya terkait pemanfaatan katalis heterogen berbasis biomassa pada proses produksi biodiesel. Secara akademik, penelitian ini memperkaya pengetahuan ilmiah melalui penyajian data eksperimental mengenai pengaruh penggunaan katalis alami, yaitu daun pepaya, cangkang telur, dan abu sekam padi, terhadap nilai kalor biodiesel yang dihasilkan dari minyak jelantah. Dari aspek aplikatif, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa limbah dari minyak jelantah dapat dimanfaatkan secara optimal dimanfaatkan sebagai komponen utama serta katalis biodiesel yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, sehingga dapat berkontribusi dalam upaya pengurangan limbah serta penyediaan sumber energi alternatif yang lebih berkelanjutan..

Pendanaan: Penelitian ini dilaksanakan tanpa menerima dukungan pendanaan dari pihak atau lembaga eksternal. Seluruh kegiatan penelitian, mulai dari perencanaan, pelaksanaan eksperimen, pengolahan serta analisis data, hingga penyusunan naskah, sepenuhnya dibiayai oleh penulis. Pernyataan ini disampaikan untuk memastikan bahwa tidak terdapat kepentingan finansial yang berpotensi memengaruhi proses penelitian, hasil yang diperoleh, maupun interpretasi terhadap temuan penelitian.

Pernyataan Ketersediaan Data: Data yang mendasari temuan penelitian ini menggunakan data yang bersumber dari hasil pengujian laboratorium selama pelaksanaan penelitian. Data tersebut tersedia melalui penulis korespondensi dan dapat diberikan atas permintaan yang wajar. Seluruh data tidak dibatasi oleh ketentuan privasi maupun etika, sehingga dapat dimanfaatkan untuk kepentingan ilmiah dan penelitian selanjutnya.

Ucapan Terima Kasih: Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Jember atas dukungan yang diberikan. fasilitas laboratorium Biologi Dasar serta bantuan teknis yang diberikan selama proses penelitian. Selain itu, penulis juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan lancar.

Konflik Kepentingan: Penelitian ini dilaksanakan tanpa konflik kepentingan dan tanpa dukungan atau keterlibatan pihak pendana dalam perencanaannya, proses pengumpulan, analisis, maupun interpretasi data, serta tidak berperan dalam penulisan naskah maupun pengambilan keputusan untuk mempublikasikan hasil penelitian.

Referensi

- [1] A. Suhara *et al.*, "Biodiesel Sustainability : Review of Progress and Challenges of Biodiesel as Sustainable Biofuel," *Clean Technol.*, pp. 886–906, 2024.
- [2] E. Kurniasih, "Penggunaan Katalis Heterogen Untuk Produksi Biodisel," *J. Sains dan Teknol. Reaksi*, vol. 15, no. 1, pp. 30–34, 2018, doi: 10.30811/jstr.v15i1.522.
- [3] S. Y. Chua *et al.*, "Biodiesel synthesis using natural solid catalyst derived from biomass waste — A review," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 81, pp. 41–60, 2020, doi: 10.1016/j.jiec.2019.09.022.
- [4] M. Jayakumar *et al.*, "Heterogeneous base catalysts: Synthesis and application for biodiesel production – A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 331, no. March, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125054.
- [5] Y. Suryatini and N. M. Milati, "Emasains Jurnal Edukasi Matematika dan Sains," *Jurnal edukasi Mat. dan sains*, vol. 12, no. 1, pp. 116–125, 2023.
- [6] A. A. Budiman and S. Samik, "Review Artikel : Produksi Biodiesel Dari Minyak Goreng Bekas Dengan Metode Transesterifikasi Menggunakan Katalis," *Unesa J. Chem.*, vol. 12, no. 2, pp. 36–48, 2023, doi: 10.26740/ujc.v12n2.p36-48.
- [7] H. Kral and W. Reschetilowski, "A Reconsideration of the Conventional Rule in Catalysis and the Consequences," *Processes*, vol. 13, no. 3, pp. 1–9, 2025, doi: 10.3390/pr13030917.
- [8] M. I. Al Ghifari and dan S. Samik, "C. Kata kunci : biodiesel, transesterifikasi, katalis, limbah tulang," *Unesa J. Chem.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 2023.
- [9] E. Muramoto, D. A. Patel, W. Chen, P. Sautet, E. C. H. Sykes, and R. J. Madix, "Direct Observation of Solvent-Reaction Intermediate Interactions in Heterogeneously Catalyzed Alcohol Coupling," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 144, no. 38, pp. 17387–17398, 2022, doi: 10.1021/jacs.2c02199.

-
- [10] H. H. Hamed, A. E. Mohammed, O. A. Habeeb, O. M. Ali, O. H. S. Aljaf, and M. A. Abdulqader, "Biodiesel production from waste cooking oil using homogeneous catalyst," *Egypt. J. Chem.*, vol. 64, no. 6, pp. 2827–2832, 2021, doi: 10.21608/ejchem.2021.62395.3339.
- [11] B. Koul *et al.*, "Carica papaya L.: A Tropical Fruit with Benefits beyond the Tropics," *Diversity*, vol. 14, no. 8, 2022, doi: 10.3390/d14080683.
- [12] M. W. Alam *et al.*, "Phyto Synthesis of Manganese-Doped Zinc Nanoparticles Using Carica papaya Leaves: Structural Properties and Its Evaluation for Catalytic, Antibacterial and Antioxidant Activities," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 9, 2022, doi: 10.3390/polym14091827.
- [13] G. Chavez-esquivel *et al.*, "State of Art of Alkaline Earth Metal Oxides Catalysts Used in the Transesterification of Oils for Biodiesel Production," *Energies*, vol. 14, pp. 1–24, 2021.
- [14] P. Puspitasari, D. M. Utomo, H. F. N. Zhorifah, A. A. Permanasari, and R. W. Gayatri, "Physicochemical determination of calcium carbonate (CaCO₃) from chicken eggshell," *Key Eng. Mater.*, vol. 840 KEM, pp. 478–483, 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.840.478.
- [15] M. Baláž *et al.*, "State-of-the-Art of Eggshell Waste in Materials Science: Recent Advances in Catalysis, Pharmaceutical Applications, and Mechanochemistry," *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 8, no. January, 2021, doi: 10.3389/fbioe.2020.612567.
- [16] B. Wang, B. Wang, S. K. Shukla, and R. Wang, "Enabling Catalysts for Biodiesel Production," *Catalysts*, vol. 13, no. April 2023, pp. 1–23, 2023.
- [17] J. A. B. U. Silikat, "3116-8625-2-Pb," vol. 22, no. 2, pp. 55–62, 2022.
- [18] T. Yao, N. Zhang, J. Hu, X. Liao, Y. Shen, and Z. Gan, "Effect of Temperature on the Chemical Composition and Physicochemical Properties of Diester Aviation Lubrication Oil," *Int. J. Chem. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8829206.
- [19] P. Vignesh, A. R. Pradeep Kumar, N. Shankar Ganesh, V. Jayaseelan, and K. Sudhakar, "A review of conventional and renewable biodiesel production," *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 40, pp. 1–17, 2021, doi: 10.1016/j.cjche.2020.10.025.
- [20] M. Gotovuša, I. Pucko, M. Racar, and F. Faraguna, "Biodiesel Produced from Propanol and Longer Chain Alcohols—Synthesis and Properties," *Energies*, vol. 15, no. 14, 2022, doi: 10.3390/en15144996.