

Waste to Energy: Utilization of Eggshell Catalysts in the Production of Waste Cooking Oil-Based Biodiesel

Sister Sianturi¹, Gesha D. Alisha^{1*}, Febry R. Hasibuan²

¹Faculty of Forestry and Tropical Environment, Mulawarman University, Samarinda, Indonesia 75242

²Faculty of Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Mulawarman University, Samarinda, Indonesia 75242

* email korespondensi: geshada@fahutan.unmul.ac.id

Abstract

This study aims to investigate the utilization of eggshell waste as a catalyst in biodiesel production from waste cooking oil within the waste to energy concept. The catalyst was synthesized through a calcination process to produce calcium oxide (CaO), which acts in the transesterification reaction. Biodiesel production was carried out by reacting waste cooking oil with methanol in the presence of CaO catalyst. The resulting biodiesel was analyzed for yield, chemical composition using GC–MS, and physical properties including viscosity and density. The results showed that the biodiesel yield reached 70%. GC–MS analysis revealed that the product was dominated by fatty acid methyl esters (FAME), such as methyl palmitate, methyl oleate, and methyl linoleate. The density value of 0.9429 g/mL met the SNI 7182:2015, while the viscosity value of 2.0821 cSt was slightly below the minimum standard limit. Overall, this study demonstrates that eggshell waste has significant potential as an environmentally friendly alternative catalyst for biodiesel production from waste cooking oil, although further optimization is required to improve the quality of the produced biodiesel.

Keyword: Biodiesel, eggshell, transesterification, waste cooking oil, waste to energy.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan limbah cangkang telur sebagai katalis dalam produksi biodiesel dari minyak jelantah dalam konsep waste to energy. Katalis disintesis melalui proses kalsinasi untuk menghasilkan kalsium oksida (CaO) yang berperan dalam reaksi transesterifikasi. Proses produksi biodiesel dilakukan dengan mereaksikan minyak jelantah dan metanol menggunakan katalis CaO. Biodiesel yang dihasilkan kemudian dianalisis rendemen, komposisi kimia menggunakan GC–MS, serta

sifat fisik meliputi viskositas dan densitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rendemen biodiesel yang diperoleh sebesar 70%. Analisis GC-MS mengidentifikasi bahwa produk didominasi oleh senyawa fatty acid methyl esters (FAME) seperti methyl palmitate, methyl oleate, dan methyl linoleate. Nilai densitas biodiesel sebesar 0,9429 g/mL telah memenuhi standar SNI 7182:2015, sedangkan nilai viskositas sebesar 2,0821 cSt masih sedikit di bawah batas minimum standar. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa limbah cangkang telur berpotensi sebagai katalis alternatif yang ramah lingkungan dalam produksi biodiesel dari minyak jelantah, meskipun diperlukan optimasi lebih lanjut untuk meningkatkan kualitas biodiesel yang dihasilkan.

Kata Kunci: Biodiesel, cangkang telur, minyak jelantah, transesterifikasi, *waste to energy*

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi dunia saat ini terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi, industrialisasi, dan perkembangan teknologi. Sampai saat ini, sebagian besar kebutuhan energi masih bergantung pada bahan bakar fosil. Ketergantungan yang tinggi ini mengakibatkan keterbatasan sumber daya, fluktuasi harga energi, dan memberikan dampak negatif terhadap lingkungan seperti peningkatan emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi alternatif yang bersifat terbarukan dan ramah lingkungan menjadi salah satu solusi penting dalam mendukung ketahanan energi dan pembangunan berkelanjutan.

Biodiesel merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang potensial untuk menggantikan bahan bakar fosil. Biodiesel adalah bahan bakar yang dihasilkan melalui reaksi transesterifikasi minyak nabati atau

lemak dengan alkohol (methanol atau etanol) yang digabungkan dengan katalis. Keunggulan biodiesel antara lain bersifat biodegradable, memiliki emisi gas buang yang rendah, dan dapat diproduksi dengan berbagai sumber bahan baku yang dapat diperbaharui [1], [2]. Salah satu bahan baku yang berpotensi dimanfaatkan untuk produksi biodiesel adalah minyak jelantah.

Minyak jelantah merupakan limbah rumah tangga dan industri makanan yang jumlahnya terus meningkat, serta tidak dapat didaur ulang atau digunakan kembali [3]. Pengelolaan minyak jelantah yang tidak tepat dapat menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan, diantaranya pencemaran air dan tanah. Selain itu, penggunaan kembali minyak jelantah dapat membahayakan kesehatan karena telah mengalami degradasi kimia selama proses penggorengan berulang. Oleh karena itu, pemanfaatan minyak jelantah

sebagai bahan baku biodiesel merupakan solusi yang efektif untuk mengurangi pencemaran lingkungan sekaligus meningkatkan nilai tambah dari limbah tersebut [3], [4], [5], [6].

Dalam proses produksi biodiesel, katalis memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi reaksi transesterifikasi. Secara umum, katalis yang digunakan adalah katalis heterogen dan homogen. Namun, penggunaan katalis homogen memiliki beberapa kelemahan, seperti sulit dipisahkan dari produk campuran, mengakibatkan korosi pada peralatan, dan menghasilkan limbah kimia yang memerlukan proses pemurnian lebih lanjut [7], [8]. Oleh karena itu pengembangan katalis heterogen yang lebih ramah lingkungan dan mudah dipisahkan dari campuran menjadi fokus dalam riset ini [8], [9].

Salah satu bahan limbah yang berpotensi dimanfaatkan sebagai katalis heterogen adalah cangkang telur. Cangkang telur diketahui mengandung kalsium karbonat (CaCO_3) dalam jumlah yang sangat tinggi, yang dapat dikonversi menjadi kalsium oksida (CaO) melalui proses kalsinasi. Kalsium oksida merupakan katalis basa yang efektif dalam reaksi transesterifikasi untuk produksi biodiesel. Pemanfaatan limbah cangkang telur sebagai sumber katalis tidak hanya dapat menurunkan biaya produksi biodiesel, tetapi

juga mendukung konsep pengelolaan limbah berbasis ekonomi sirkular. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan katalis berbasis cangkang telur dalam proses produksi biodiesel dari minyak jelantah.

II. METODOLOGI

2.1. Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini, adalah GCMS QP-2010 Ultra (Shimadzu, Japan) dengan menggunakan column RTX-5MS ($30\text{m} \times 0,25\text{mm (ID)} \times 0,25\text{ }\mu\text{m}$ quartz capillary column), piknometer, viscometer, furnace, neraca digital, oven, termometer, seperangkat alat gelas, *magnetic stirrer*, hotplate, lumpang dan alu.

2.2. Alat Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah cangkang telur, minyak jelantah, metanol, aquades.

2.3. Preparasi Katalis

Cangkang telur dicuci menggunakan aquades hingga bersih. Selanjutnya, cangkang telur di keringkan pada suhu 100°C selama 24 jam. Cangkang telur yang telah kering di gerus, kemudian dikalsinasi pada suhu 900°C selama 2 jam. Hal ini dilakukan untuk mengubah CaCO_3 menjadi CaO [10].

2.4. Transesterifikasi Minyak Jelantah menggunakan Katalis Cangkang Telur

Transesterifikasi minyak jelantah menjadi biodiesel dilakukan dengan menggunakan katalis cangkang telur. Katalis cangkang telur ditambahkan dengan berat 8% dari perbandingan rasio minyak dan metanol. Dimana, rasio perbandingan minyak:metanol adalah 1:12 (v/v). Selanjutnya, campuran direfluks pada suhu 65°C selama 2 jam. Kemudian, campuran yang diperoleh didiamkan selama 2 jam sampai terbentuk 2 lapisan. Setelah itu, diambil lapisan paling atas yang merupakan hasil biodiesel (metil ester) dan dicuci menggunakan aquades untuk menghilangkan sisa metanol dan katalis yang masih tersisa. Hasil metil ester dipanaskan selama 2 jam dengan suhu 60°C untuk menghilangkan sisa aquades. Dilakukan karakterisasi metil ester menggunakan piknometer, viskometer, dan GCMS. Selain itu, dilakukan perhitungan rendemen biodiesel dengan persamaan (1).

$$\text{Rendemen (\%)} = \frac{\text{massa produk biodiesel}}{\text{massa bahan baku}} \times 100\%, (1)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Cangkang telur dalam penelitian ini dimanfaatkan sebagai katalis untuk membantu proses transesterifikasi biodiesel. Cangkang telur dikalsinasi dengan tujuan mengubah

CaCO₃ menjadi CaO. Hal ini bertujuan untuk mengubah cangkang telur menjadi katalis basa padat yang membantu proses transesterifikasi minyak dan metanol menjadi biodiesel [11].

3.1. Analisis Rendemen Biodiesel

Rendemen biodiesel adalah persentase jumlah metil ester yang dihasilkan dari total bahan baku (minyak jelantah). Hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa rendemen biodiesel yang diperoleh dalam proses transesterifikasi minyak jelantah menggunakan katalis cangkang telur sebesar 70% (b/b). Nilai rendemen ini menunjukkan bahwa sebagian besar trigliserida dalam minyak jelantah telah berhasil dikonversi menjadi metil ester.

Hasil rendemen yang didapatkan termasuk kedalam kategori cukup baik. Penyebab kurang maksimalnya hasil rendemen biasanya disebabkan oleh kadar asam lemak bebas (ALB), air, dan senyawa hasil degradasi termal yang dapat menghambat reaksi transesterifikasi [12]. Kandungan ALB yang tinggi berpotensi menyebabkan reaksi samping berupa pembentukan sabun (saponifikasi), terutama ketika menggunakan katalis basa seperti CaO dari cangkang telur. Reaksi ini dapat menurunkan efektivitas katalis serta menghambat pemisahan produk, sehingga

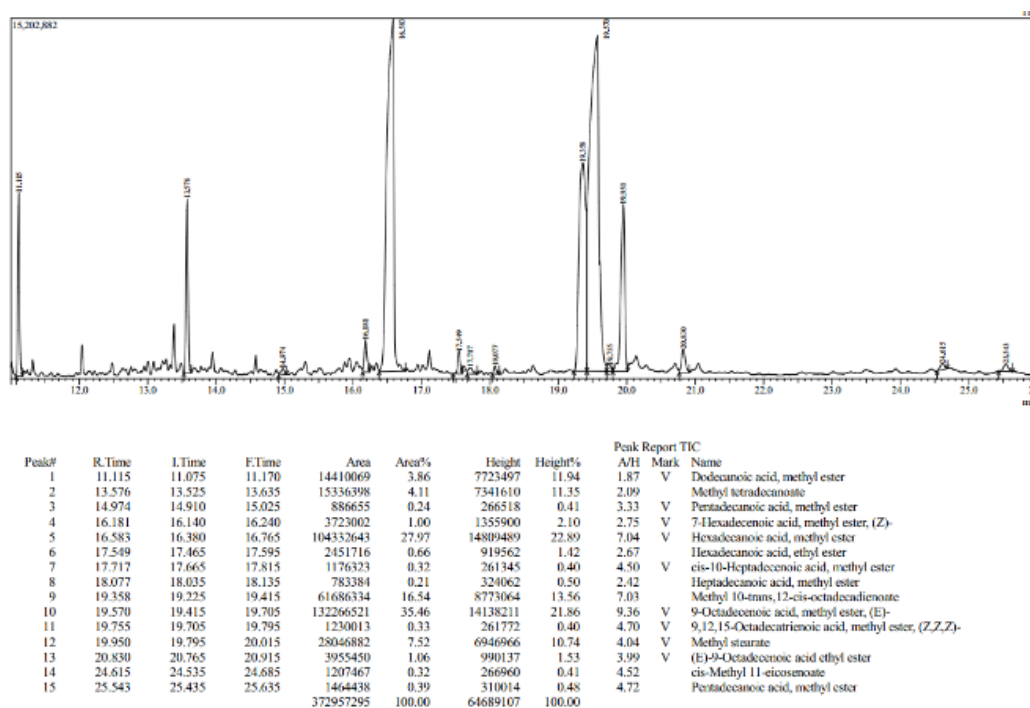
berdampak pada penurunan rendemen biodiesel yang dihasilkan [13].

Selain itu, faktor lain penyebab hasil rendemen adalah kondisi reaksi, seperti rasio molar metanol:minyak, konsentrasi katalis, suhu, dan waktu reaksi. Katalis yang digunakan juga dapat menjadi faktor penyebab rendemen yang rendah. Katalis CaO yang berasal dari limbah cangkang telur memiliki aktivitas basa yang cukup tinggi, namun efektivitasnya sangat bergantung pada proses preparasi, khususnya suhu kalsinasi. Kalsinasi yang tidak optimal dapat menyebabkan konversi CaCO_3 menjadi CaO tidak sempurna, sehingga menurunkan aktivitas katalitik.

3.2. Hasil Analisis Kandungan Biodiesel

Analisis kandungan biodiesel dilakukan menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). Analisis ini dilakukan untuk mengidentifikasi komponen kimia yang terkandung dalam produk biodiesel hasil konversi menggunakan katalis berbasis cangkang telur. Hasil kromatogram pada Gambar 1 menunjukkan adanya sejumlah puncak utama pada rentang waktu retensi 11-25 menit yang mempresentasikan senyawa *fatty acid methyl esters* (FAME) sebagai produk utama reaksi transesterifikasi.

Hasil kromatografi menunjukkan bahwa terdapat beberapa senyawa *fatty acid methyl esters* (FAME) yang terdeteksi. Senyawa-senyawa yang terdapat pada hasil biodiesel minyak jelantah dengan menggunakan katalis cangkang telur adalah 27,96% Hexadecanoic acid methyl ester, 16,45% 9-Octadecenoic acid methyl ester, 13,56% Methyl 10-trans, 12-cis-octadecadienoate, 11,35% Tetradecanoic acid methyl ester, 7,64% Pentadecanoic acid methyl ester, 4,50% 9-Hexadecenoic acid methyl ester, dan 2,42% Heptadecanoic acid methyl ester. Senyawa-senyawa tersebut merupakan komponen khas biodiesel yang berasal dari minyak nabati khususnya minyak goreng berbasis kelapa sawit [14]. Selain itu, identifikasi senyawa dilakukan berdasarkan nilai waktu retensi dan pencocokan spektrum massa dengan database. Dimana, pola senyawa yang terdeteksi didominasi oleh ester asam lemak rantai C14-C19 [15]. Hal ini juga menjadi dasar bahwa ditemukan adanya kandungan biodiesel. Hasil *fatty acid methyl ester* (FAME) yang diperoleh sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya yang menggunakan minyak goreng bekas sebagai bahan baku biodiesel [16], [17], [18].



Gambar 1. Kromatogram Hasil Biodiesel

Berdasarkan persentase luas area kromatogram yang ditunjukkan pada Tabel 1, komponen dominan dalam biodiesel adalah *methyl palmitate*, *methyl oleate*, dan *methyl linoleate* atau turunannya. Kandungan *methyl palmitate* yang besar menunjukkan bahwa minyak jelantah memiliki kandungan asam lemak jenuh yang cukup tinggi. Hal ini tentunya sesuai dengan karakteristik minyak sawit yang umumnya mengandung asam palmitat dalam jumlah besar [13]. Selain itu, keberadaan asam lemak tak jenuh seperti *methyl oleate* dan *methyl linoleate* berperan dalam meningkatkan efisiensi pembakaran, meskipun memiliki kecenderungan lebih tinggi terhadap oksidasi dibandingkan asam

lemak jenuh [19]. Sehingga dapat disimpulkan bahwa komposisi campuran antara asam lemak jenuh dan tak jenuh dalam biodiesel yang dihasilkan menunjukkan keseimbangan sifat bahan bakar yang cukup baik.

Tidak terdeteksinya puncak signifikan yang mengindikasikan keberadaan trigliserida, digliserida, maupun monogliserida menunjukkan bahwa reaksi transesterifikasi berlangsung secara efektif. Hal ini mengindikasikan bahwa katalis CaO yang berasal dari limbah cangkang telur memiliki aktivitas katalitik yang baik dalam mempercepat reaksi dan meningkatkan konversi minyak jelantah menjadi biodiesel. Katalis heterogen berbasis CaO diketahui

memiliki sifat basa kuat yang mampu membantu reaksi antara trigliserida dan alkohol (metanol) untuk menghasilkan metil ester dan gliserol.

Tabel 1. Persentase area komponen utama biodiesel

No.	Senyawa	% Area	Keterangan
1	Hexadecanoic acid methyl ester (Methyl palmitate)	27,96%	Komponen dominan biodiesel
2	9-Octadecenoic acid, methyl ester (Methyl oleate)	16,54%	Asam lemak tak jenuh
3	Methyl 10-trans,12-cis-octadecadienoate	13,56%	Asam lemak tak jenuh
4	Tetradecanoic acid, methyl ester	11,35%	Asam lemak jenuh
5	Pentadecanoic acid, methyl ester	7,64%	Asam lemak jenuh
6	9-Hexadecenoic acid, methyl ester	4,50%	Asam lemak tak jenuh
7	Heptadecanoic acid, methyl ester	2,42%	Asam lemak jenuh

3.3. Analisis Viskositas Biodiesel

Viskositas merupakan parameter penting dalam menentukan kualitas biodiesel. Hal ini dikarenakan berpengaruh terhadap proses penginjeksian bahan bakar, atomisasi serta efisiensi pembakaran dalam mesin diesel. Berdasarkan hasil pengujian, biodiesel yang dihasilkan memiliki nilai viskositas sebesar 2,0821 cSt. Jika dibandingkan dengan Standar Nasional Indonesia, yaitu SNI 7182:2015 rentang viskositas kinematik biodiesel yang ditentukan adalah sebesar 2,3-

6,0 cSt. Sehingga, nilai viskositas sebesar 2,0821 cSt menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan berada sedikit dibawah batas minimum standar SNI.

Nilai viskositas yang lebih encer dari standar ini menunjukkan bahwa biodiesel memiliki sifat yang lebih encer. Secara teknis, viskositas yang rendah dapat memberikan keuntungan berupa proses atomisasi bahan bakar yang lebih baik saat injeksi, sehingga meningkatkan efisiensi pembakaran. Namun, viskositas yang terlalu rendah dapat

berdampak negatif terhadap kemampuan pelumasan (*lubricity*) bahan bakar. Hal ini berpotensi menyebabkan peningkatan keausan pada sistem injeksi mesin diesel [20].

Rendahnya viskositas biodiesel ini dapat kemungkinan disebabkan oleh beberapa faktor. Salah satunya adalah komposisi asam lemak berdasarkan hasil GC–MS yang menunjukkan dominasi asam lemak tak jenuh seperti *methyl oleate* dan *methyl linoleate*. Senyawa ini cenderung memiliki viskositas lebih rendah dibandingkan asam lemak jenuh [21]. Selain itu, kemungkinan adanya sisa metanol atau kandungan air dalam biodiesel akibat proses pemurnian yang belum optimal juga dapat menyebabkan penurunan viskositas [22].

3.4. Analisis Densitas Biodiesel

Densitas merupakan salah satu parameter penting dalam karakterisasi biodiesel. Hal ini dikarenakan berkaitan dengan kualitas bahan bakar, khususnya dalam proses penginjeksian, pembakaran, serta kandungan energi per satuan volume. Berdasarkan hasil pengujian, biodiesel yang dihasilkan memiliki nilai densitas 0,9429 gr/mL. Jika dibandingkan dengan Standar Nasional Indonesia yaitu SNI 7182:2015, dimana densitas biodiesel yang ditentukan berada pada rentang 0,940-0,985 gr/mL. Dengan demikian, nilai densitas hasil

biodiesel pada penelitian ini menunjukkan bahwa telah memenuhi standar SNI.

Nilai densitas yang berada dalam kisaran standar menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki komposisi yang sesuai, terutama didominasi oleh senyawa *fatty acid methyl esters* (FAME). Hal ini sesuai dengan hasil analisis GC–MS yang menunjukkan keberadaan senyawa seperti *methyl palmitate*, *methyl oleate*, dan *methyl linoleate* sebagai komponen utama. Senyawa FAME umumnya memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan trigliserida, sehingga nilai densitas yang diperoleh juga mengindikasikan bahwa proses transesterifikasi berlangsung dengan baik dan menghasilkan produk yang relatif murni.

Densitas yang cenderung berada pada batas bawah dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor. Salah satunya adalah dominasi asam lemak tak jenuh dalam komposisi biodiesel, yang umumnya memiliki densitas lebih rendah dibandingkan asam lemak jenuh. Selain itu, kemungkinan adanya sisa metanol dalam biodiesel juga dapat menurunkan nilai densitas. Hal ini dikarenakan metanol memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan FAME. Oleh karena itu, proses pemurnian seperti pemisahan dan penguapan metanol perlu diperhatikan untuk memastikan kualitas biodiesel yang optimal [20].

Tabel 2. Perbandingan Data Hasil Analisis dan SNI

No.	Karakteristik	Hasil Penelitian	SNI 7182:2015
1	Viskositas	2,0821 cSt	2,3-6,0 cSt
2	Densitas	0,9429 gr/mL	0,940-0,985 gr/mL

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, pemanfaatan limbah cangkang telur sebagai katalis dalam produksi biodiesel dari minyak jelantah terbukti efektif dalam mendukung konsep *waste to energy*. Proses transesterifikasi yang dilakukan menghasilkan biodiesel dengan rendemen sebesar 70%, yang menunjukkan bahwa konversi minyak jelantah menjadi metil ester telah berlangsung dengan cukup baik meskipun belum optimal. Hasil analisis GC–MS mengonfirmasi bahwa produk biodiesel didominasi oleh senyawa *fatty acid methyl esters* (FAME) seperti *methyl palmitate*, *methyl oleate*, dan *methyl linoleate* yang termasuk komponen utama biodiesel. Karakteristik fisik biodiesel menunjukkan bahwa nilai densitas sebesar 0,9429 gr/mL telah memenuhi standar SNI 7182:2015, sedangkan nilai viskositas sebesar 2,0821 cSt masih sedikit di bawah batas minimum standar. Namun secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa limbah minyak jelantah dan cangkang telur memiliki potensi besar sebagai bahan baku dan katalis dalam produksi biodiesel yang ramah lingkungan, meskipun masih

diperlukan optimasi lebih lanjut pada kondisi reaksi dan proses pemurnian untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas biodiesel yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] “Aishwarya Sarvade, "A Review Article of Biodiesel Production," *Int. J. Sci. R. Tech.*, 2(4), 655-658,” 2025.
- [2] S. Sukpancharoen, T. Katongtung, N. Rattanachoung, and N. Tippayawong, “Unlocking the potential of transesterification catalysts for biodiesel production through machine learning approach,” *Bioresource Technology*, vol. 378, p. 128961, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.biortech.2023.128961.
- [3] A. N. Setiawan, S. N. Wijayanti, P. P. Haresmita, and S. N. N. Nazhifah, “Pengelolaan Limbah Minyak Goreng Agar Aman Dan Bermanfaat,” *JMM*, vol. 8, no. 2, p. 2432, Apr. 2024, doi: 10.31764/jmm.v8i2.21838.
- [4] K. Yuniari Suryatini, “Pemanfaatan Potensi Minyak Goreng Bekas (Jelantah) sebagai Biodiesel,”

- Emasains*, vol. XII, no. 1 Mar. 2023, doi: 10.5281/ZENODO.7902815.
- [5] A. Akbar, L. Maulinda, F. Hasfita, and N. Sylvia, "Pembuatan Biodiesel dari Limbah Minyak Jelantah Melalui Proses Transesterifikasi Menggunakan Katalis Berbasis By Product Biomass Pyrolysis dari Typha Latifolia (Tanaman Ekor Kucing)," *Chemical Engineering Journal Storage*, vol. 5, no. 6, pp. 1495-1511, Des. 2025. doi: 10.29103/cejs.v5i6.21485
- [6] F. Azhari and N. P. Miefthawati, "Pemanfaatan Minyak Jelantah Sebagai Pengganti Bahan Bakar Solar Dalam Upaya Menurunkan Dampak Gas Rumah Kaca (Studi Kasus: Kota Padang, Sumatera Barat)," *Rang Teknik Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 296–304, Jun. 2025, doi: 10.31869/rtj.v8i2.6262.
- [7] R. Muthia, M. F. Ramadhan, R. Andika, and J. M. O. Aberilla, "Sustainability assessment of biodiesel production in conventional reactor-distillation and reactive distillation processes by homogeneous and heterogeneous base catalysts," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 223, pp. 396–414, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.cherd.2025.10.004.
- [8] S. Kademani, K. S. Katagi, M. Akki, A. Jaggal, V. Babagond, and A. Shirahatti, "Heterogeneous catalyst derived from eggshell waste for sustainable biodiesel production from Feronia elephantum seed Oil: A green metrics analysis," *Total Chemistry*, vol. 2, p. 100027, Dec. 2026, doi: 10.1016/j.totche.2026.100027.
- [9] R. Chen *et al.*, "The application of heterogeneous catalysts in esterification/ transesterification for biodiesel production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 226, p. 116262, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.rser.2025.116262.
- [10] V. Sisca and J. Rahayuningsih, "Pembuatan Limbah Cangkang Telur Sebagai Katalis Heterogen untuk Produksi Biodisel, " *Journal of Research and Education Chemistry*, vol. 4, no. 2, 2022
- [11] S. Oko and M. Feri, "Pengembangan Katalis Cao Dari Cangkang Telur Ayam Dengan Impregnasi Koh Dan Aplikasinya Terhadap Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Jarak," *Jurnal Teknologi*, vol. 11, no. 2, 2019.
- [12] A. A. Budiman and S. Samik, "Review Artikel : Produksi Biodiesel Dari Minyak Goreng Bekas Dengan Metode Transesterifikasi Menggunakan Katalis," *UNESA Journal of Chemistry*,

- vol. 12, no. 2, pp. 36–48, Sep. 2023, doi: 10.26740/ujc.v12n2.p36-48.
- [13] S. Oko, M. Mustafa, A. Kurniawan, and K. N. E. Putri, “Sintesis Biodiesel dari Minyak Jelantah Menggunakan Katalis NaOH/CaO/C dari Cangkang Telur,” *j.res.technol.ind.*, vol. 15, no. 2, p. 147, Sep. 2021, doi: 10.26578/jrti.v15i2.6835.
- [14] R. Maisari, L. E. Simanullang, R. Alvira, T. A. Fadlly, and R. A. Putra, “Produksi Biodiesel Menggunakan Katalis Komposit CaO/Karbon Aktif Dari Cangkang Kerang Dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (Tkks) Limbah Lokal,” *Hadron Jurnal Fisika dan Terapan*, vol. 7, no. 1, 2025.
- [15] A. R. Meilano, H. Soetjipto, and M. N. Cahyanti, “Pengaruh Proses Degumming dan Netralisasi Terhadap Sifat Fisiko Kimia dan Profil Asam Lemak Penyusun Minyak Biji Gambas (*Luffa acutangula* Linn.),” *Chim. Nat. Acta*, vol. 5, no. 2, p. 50, Aug. 2017, doi: 10.24198/cna.v5.n2.14604.
- [16] A. S. Suryandari, Z. R. Ardiansyah, V. N. Andhani, I. Arfiansyah, A. Mustain, H. Dewajani and Mufid, “Sintesis Biodiesel melalui Transesterifikasi Minyak Goreng Bekas Berbasis Katalis Heterogen CaO dari Limbah Cangkang Telur Ayam,” *Jurnal Rekayasa Bahan Alam dan Energi Berkelanjutan*, vol. 5, no. 1, 2021.
- [17] E. Ginting, “Biodiesel Conversion from Used Cooking Oil: An Eggshell-Based ZnO/CaO Supported on Activated Carbon Catalyst with Microwave Heating,” *J. Kartika Kimia*, vol. 8, no. 2, p. 1, May 2025, doi: 10.26874/jkk.v8i2.994.
- [18] Y. C. Wong and R. X. Ang, “Study of calcined eggshell as potential catalyst for biodiesel formation using used cooking oil,” *Open Chemistry*, vol. 16, no. 1, pp. 1166–1175, Nov. 2018, doi: 10.1515/chem-2018-0127.
- [19] - Muhaji and I. N. G. Wardana, “The Effect of Fatty Acid Composition on Combustion Characteristics of Vegetable Oils,” *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 340–346, Jan. 2022, doi: 10.18517/ijaseit.12.1.13983.
- [20] N. Azmi, E. Kurniawan, and L. Hakim, “Produksi Biodiesel dari Minyak Campuran Minyak Jelantah dengan Minyak Jarak Kaliki (*Ricinus Communis*) Menggunakan Katalis Heterogen CaO Dari Limbah Cangkang Kepiting,” *Journal of Biodiese Research and Innovation*, vol. 2, no. 1, pp21-26, 2024.

- [21] D. R. Ramadhani, M. Zamhari, and R. Junaidi, “Optimalisasi Proses Transesterifikasi Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel dengan Variasi Waktu dan Konsentrasi Katalis,” *Chemical Engineering Journal Storage*, vol. 5, no. 4, pp. 665-681, 2025.
- [22] M. Raihan, D. Yuvenda, A. Kurniawan, S. R. P. Primandari, and M. C. Kurnia, “Pengaruh Variasi Temperatur terhadap Kualitas Biodiesel dari Minyak Jelantah dengan Metode Transesterifikasi sebagai Pengganti Bahan Bakar Mesin Diesel”, *Journal of Innovative and Creativity*, vol. 5, no. 2, pp 16340-16349, 2025.