

Studi Eksperimen Pengaruh Suhu terhadap Hasil Biodiesel Menggunakan Katalis Heterogen $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--CaO}$

Ahmad Alan Yanuarta¹, Akhmad Faruq Alhikami²

Fakultas Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
Jl. Mayjen Haryono No. 193, Kota Malang 65144
Email korespondensi: Ahmadalanyanuarta5@gmail.com

Abstrak

Reaksi transesterifikasi dipengaruhi oleh berbagai kondisi operasi, dan suhu merupakan faktor kunci yang menentukan keberhasilan pembentukan biodiesel. Pada studi ini, kinerja katalis heterogen $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--CaO}$ dievaluasi melalui variasi suhu reaksi 60°C, 63°C, 66°C, dan 70°C menggunakan minyak jelantah sebagai bahan baku. Proses dilakukan dengan rasio molar metanol terhadap minyak (MTOR) 1:8 dan massa katalis 1 gram. Sintesis katalis dilakukan melalui pencampuran CaO dan Fe_3O_4 yang kemudian diaplikasikan pada proses esterifikasi dan transesterifikasi. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada nilai yield biodiesel dari setiap kondisi suhu. Suhu 60°C memberikan hasil tertinggi sebesar 9,308%, sedangkan penurunan yield terjadi pada suhu di atasnya akibat peningkatan laju penguapan metanol yang menghambat reaksi. Temuan ini mengonfirmasi bahwa rentang suhu 55–65°C merupakan kondisi optimal untuk reaksi transesterifikasi dengan katalis basa heterogen. Secara keseluruhan, operasi pada 60°C dinilai paling efisien karena mampu mempertahankan interaksi reaktan dan meminimalkan kehilangan metanol, sehingga menghasilkan konversi biodiesel yang lebih baik.

Kata kunci: biodiesel, suhu reaksi, katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--CaO}$, transesterifikasi, yield

Abstract

The transesterification reaction is influenced by various operating conditions, and temperature is a key factor determining the success of biodiesel formation. In this study, the performance of the heterogeneous $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--CaO}$ catalyst was evaluated at reaction temperatures of 60°C, 63°C, 66°C, and 70°C using waste cooking oil as the feedstock. The process was carried out with a methanol-to-oil molar ratio (MTOR) of 1:8 and a catalyst mass of 1 gram. The catalyst was synthesized by combining CaO and Fe_3O_4 , which was then applied in both esterification and transesterification processes. The results showed a significant difference in biodiesel yield under each temperature condition. The highest yield, 9.308%, was obtained at 60°C, while higher temperatures resulted in decreased yields due to increased methanol evaporation, which inhibited the reaction. These findings confirm that the temperature range of 55–65°C is optimal for the transesterification reaction using a heterogeneous base catalyst. Overall, operating at 60°C is considered the most efficient condition, as it maintains effective reactant interaction and minimizes methanol loss, thereby producing better biodiesel conversion.

Keywords: biodiesel, reaction temperature, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--CaO}$ catalyst, transesterification, yield

1. Pendahuluan

Krisis energi global dan dampak negatif bahan bakar fosil terhadap lingkungan mendorong pengembangan sumber energi terbarukan yang berkelanjutan. Biodiesel telah menjadi fokus utama sebagai pilihan yang lebih ramah lingkungan daripada bahan bakar diesel konvensional karena kemampuannya dalam menurunkan emisi gas rumah kaca dan polutan udara. [1]. Permintaan energi global meningkat pesat akibat pertumbuhan populasi, urbanisasi, dan perkembangan industri yang menjadikan biodiesel sebagai solusi potensial [2].

Penelitian terdahulu menunjukkan perkembangan signifikan dalam penggunaan katalis heterogen untuk produksi biodiesel. Studi sebelumnya membuktikan katalis heterogen dapat mengatasi masalah katalis homogen seperti toksisitas, korosi, produk samping sabun dan gliserol, serta limbah air yang tinggi [3]. Penelitian terkini mengeksplorasi sintesis biodiesel

dari bahan baku non-pangan menggunakan katalis bio-komposit heterogen sebagai strategi berkelanjutan [4].

Meskipun katalis heterogen telah banyak dikembangkan, masih terdapat kesenjangan terkait optimasi katalis magnetik $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--CaO}$ pada berbagai kondisi suhu. Penelitian menunjukkan katalis berbasis CaO mengalami deaktivasi kuat setelah lima siklus penggunaan, sehingga fase aktif CaO dicampur dengan Fe_3O_4 untuk menghasilkan katalis magnetik yang lebih stabil [5]. Studi nanokatalis magnetik $\text{CaO/KOH-Fe}_3\text{O}_4$ mencapai yield biodiesel 98,1% pada suhu 25°C, namun belum mengeksplorasi variasi suhu secara komprehensif [6]. Katalis berbasis Fe_3O_4 yang didoping logam alkali menunjukkan efisiensi katalitik tinggi, tetapi pengaruh suhu reaksi terhadap performa katalis belum diteliti secara mendalam [7].

Penelitian ini menghadirkan kebaruan melalui investigasi sistematis pengaruh variasi suhu (60°C,

63°C, 66°C, dan 70°C) terhadap yield biodiesel menggunakan katalis heterogen $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CaO}$ dengan rasio molar metanol terhadap minyak (MTOR) 1:8 dan konsentrasi katalis 1%. Studi terbaru menunjukkan bahwa katalis CaO yang dikalsinasi pada suhu 800°C menghasilkan yield biodiesel hingga 98% pada kondisi optimal dengan suhu reaksi 65°C [8]. Nanokatalis $\text{CaO/K}_2\text{CO}_3$ menghasilkan kualitas biodiesel yang sangat sesuai dengan Amerika (ASTM D-6751) yang beroperasi pada suhu 40°C selama 84 menit [9]. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi suhu optimal produksi biodiesel dalam rentang 60-70°C menggunakan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CaO}$ untuk memastikan efisiensi konversi maksimal dan berkontribusi pada pengembangan teknologi biodiesel yang lebih ramah lingkungan.

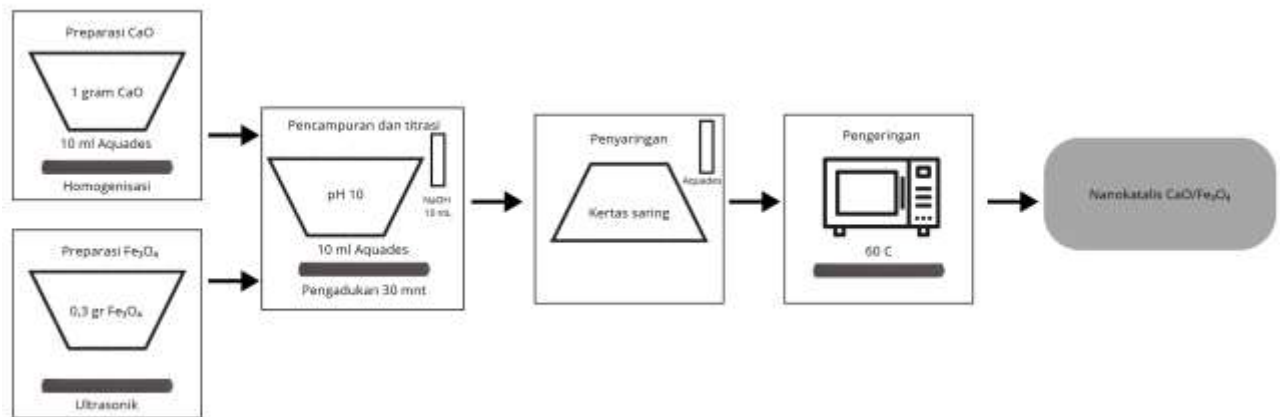
2.1 Metode material

Sintesis nanokatalis $\text{CaO/Fe}_3\text{O}_4$ dilakukan melalui proses pencampuran dua komponen utama, yaitu CaO dan magnetit (Fe_3O_4). Pada tahap awal, sebanyak 1 gr CaO dilarutkan dalam 10 mL akuades hingga terbentuk larutan homogen. Kemudian, 0,3 gr Fe_3O_4 ditambahkan ke dalam larutan tersebut dan didispersikan menggunakan ultrasonik untuk mencegah terjadinya suspensi atau aglomerasi partikel. Proses dilanjutkan dengan penambahan 10 mL larutan NaOH secara titrasi hingga pH mencapai 10, kemudian campuran diaduk selama ± 30 menit untuk memastikan homogenisasi sempurna. Setelah itu, campuran disaring menggunakan kertas saring, dan residu dicuci berulang kali dengan air deionisasi serta alkohol untuk menghilangkan pengotor. Serbuk hasil filtrasi dikeringkan pada suhu 60°C hingga diperoleh nanokatalis $\text{CaO/Fe}_3\text{O}_4$.

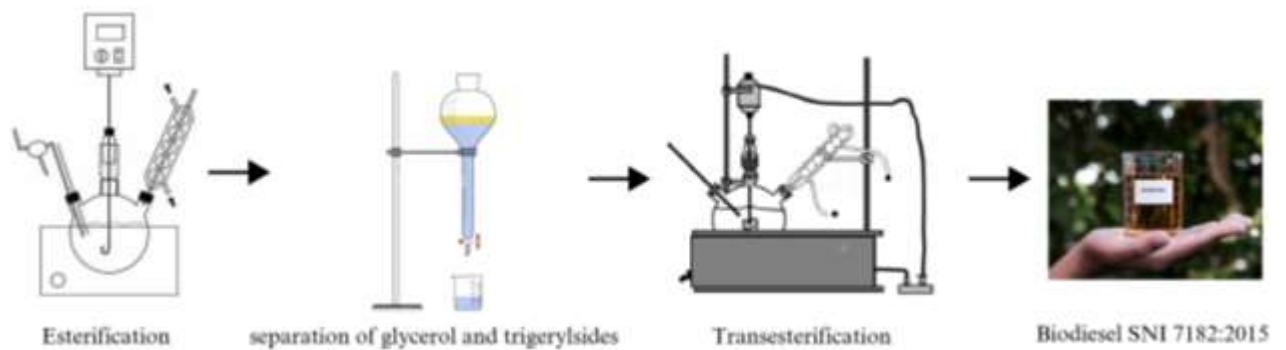
Minyak jelantah perlu melalui tahap pemurnian sebelum digunakan sebagai bahan baku biodiesel. Proses awal ini bertujuan untuk menghilangkan kotoran padat, residu, dan senyawa pengotor yang dapat mengganggu reaksi kimia selanjutnya. Pemurnian dilakukan melalui beberapa langkah, yaitu penyaringan untuk memisahkan partikel kasar, pengendapan agar kotoran berat turun ke dasar, serta penambahan larutan asam fosfat yang berfungsi menghilangkan getah atau gum. Selain itu, adsorben seperti karbon aktif atau bentonit juga ditambahkan untuk meningkatkan kejernihan dan kualitas minyak. Setelah minyak mencapai tingkat kebersihan tertentu, minyak jelantah yang memiliki kadar asam lemak bebas (FFA) tinggi kemudian menjalani proses esterifikasi. Pada tahap ini, minyak direaksikan dengan metanol menggunakan katalis asam seperti H_2SO_4 . Campuran dipanaskan pada suhu sekitar 50–60°C dan diaduk selama 60–120 menit hingga FFA berubah menjadi metil ester dan air. Produk hasil esterifikasi kemudian dipisahkan, dan minyak yang telah dimurnikan tersebut siap memasuki proses transesterifikasi untuk menghasilkan biodiesel.

Penelitian ini menggunakan minyak jelantah sebagai bahan baku utama, metanol sebagai reaktan, dan katalis heterogen $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CaO}$ yang disintesis secara in-house. Pemilihan katalis heterogen mengacu pada penelitian sebelumnya yang telah mengembangkan nanokatalis biokomposit berkelanjutan untuk produksi biodiesel [10]. Metode yang diterapkan dalam penelitian tersebut menjadi dasar pengembangan prosedur transesterifikasi yang dilakukan. Proses transesterifikasi dilakukan untuk menghasilkan biodiesel dengan menggunakan katalis campuran $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CaO}$ 1% terhadap massa minyak. Rasio molar metanol terhadap minyak (MTOR) yang digunakan adalah 1:8. Variasi suhu reaksi dilakukan pada empat tingkat 60°C, 63°C, 66°C, dan 70°C. Setiap percobaan dilakukan dengan waktu dan kondisi pengadukan yang konstan untuk memastikan bahwa perbedaan yield biodiesel hanya dipengaruhi oleh perubahan suhu reaksi. Rendemen biodiesel dihitung untuk mengetahui seberapa besar hasil biodiesel yang diperoleh dibandingkan dengan jumlah bahan baku minyak jelantah yang digunakan. Nilai rendemen menggambarkan efisiensi proses transesterifikasi dalam mengubah trigliserida menjadi metil ester (biodiesel). Persentase rendemen biodiesel ditentukan menggunakan persamaan (1).

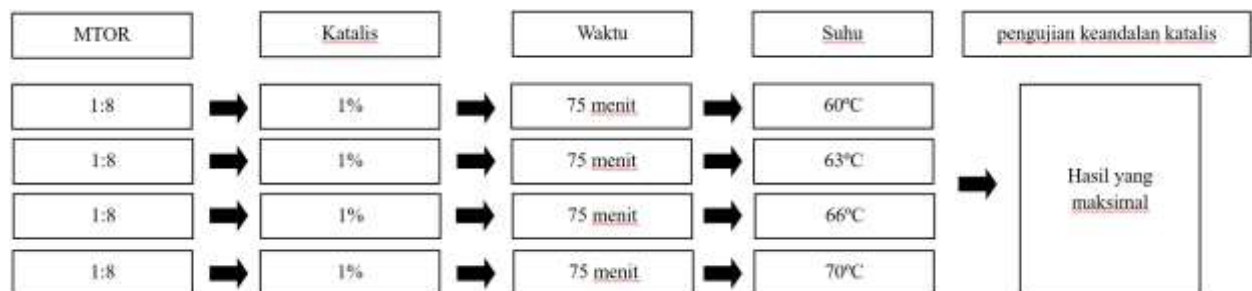
$$\text{Rendemen (\%)} = \frac{\text{Weight biodiesel (g)}}{\text{Weight minyak jelantah}} \times 100 \quad (1)$$



Gambar 1. proses sintesis CaO/Fe₃O₄



Gambar 2. Proses esterifikasi dan transesterifikasi



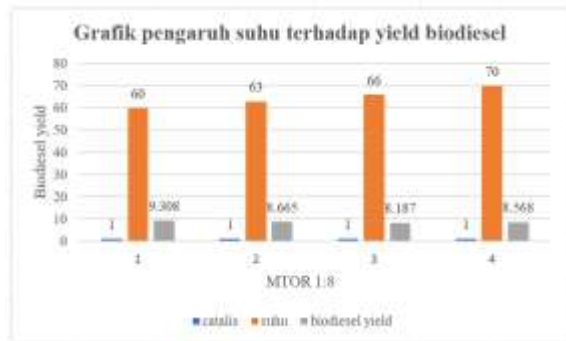
Gambar 3. Desain riset

2. Hasil dan Pembahasan

Table 1. Data Hasil Pengaruh Variasi Suhu terhadap Yield Biodiesel pada Penggunaan Katalis 1 Gram

Catalis (g)	Suhu (°C)	Biodiesel yield (%)
1	60°	9.308
1	63°	8.665
1	66°	8.187
1	70°	8.568

Grafik 1 Pengaruh suhu terhadap yield biodiesel



Data hasil penelitian pada Tabel 3 dan Grafik 3 menunjukkan pengaruh variasi suhu terhadap yield biodiesel dengan penggunaan katalis campuran sebesar 1 gram dan rasio molar metanol terhadap minyak (MTOR) 1:8. Berdasarkan hasil pengolahan data, diperoleh bahwa nilai yield tertinggi terdapat pada suhu 60°C sebesar 9,308%, sedangkan nilai terendah diperoleh pada suhu 66°C sebesar 8,187%. Ketika suhu dinaikkan dari 60°C hingga 70°C, terjadi penurunan dan sedikit peningkatan kembali pada akhir percobaan, menunjukkan adanya titik optimum reaksi pada suhu 60°C. Data yang disajikan dalam bentuk grafik mempermudah pengamatan tren perubahan yield akibat variasi suhu reaksi.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa suhu reaksi memiliki peran penting terhadap efisiensi pembentukan biodiesel. Pada suhu 60°C, proses transesterifikasi berlangsung optimal karena energi kinetik partikel cukup untuk mempercepat tumbukan antara trigliserida dan metanol, tanpa menyebabkan penguapan berlebih. Namun, ketika suhu dinaikkan melebihi 63°C, sebagian metanol cenderung menguap sebelum bereaksi sempurna, sehingga jumlah biodiesel yang terbentuk menurun. Pola ini sesuai dengan konsep dasar kinetika reaksi kimia, di mana peningkatan suhu awalnya mempercepat laju reaksi, tetapi jika terlalu tinggi dapat menurunkan efektivitas karena hilangnya salah satu reaktan utama.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Belkhanchi et al (2024)[11] . yang menyebutkan bahwa suhu optimal untuk reaksi transesterifikasi minyak nabati berada pada rentang 55-65°C, di mana peningkatan suhu di atas batas optimal justru menurunkan hasil produksi biodiesel. Penelitian serupa oleh Hasan et al (2022) [12]. juga melaporkan

bahwa suhu 60°C menghasilkan yield biodiesel yang optimal dibandingkan suhu yang lebih tinggi. Selain itu, penelitian Wahyuni et al (2022) [13]. Menjelaskan bahwa kondisi operasi pada suhu 60°C dengan rasio molar metanol terhadap minyak 6:1 dan katalis 1,2% menghasilkan yield biodiesel mencapai 99,77%. Perbedaan nilai yield yang didapat dapat disebabkan oleh perbedaan jenis minyak, jenis katalis, perbandingan metanol dengan minyak, dan waktu reaksi yang digunakan dalam penelitian ini. Secara teori, hasil penelitian ini memperkuat pentingnya menjaga keseimbangan antara energi reaksi dan kestabilan bahan dalam proses pembuatan biodiesel.

Dari segi penerapan, penggunaan suhu 60°C memberikan beberapa keuntungan praktis: (1) hemat energi karena tidak perlu pemanasan yang terlalu tinggi; (2) biaya produksi lebih rendah karena konsumsi energi berkurang; (3) produk samping yang terbentuk lebih sedikit sehingga kualitas biodiesel lebih baik; dan (4) katalis dapat digunakan lebih lama karena tidak rusak akibat suhu tinggi. Hasil penelitian ini bermanfaat untuk produsen biodiesel skala kecil dan menengah yang ingin meningkatkan hasil produksi dengan biaya yang efisien, karena pengaturan suhu yang tepat dapat meningkatkan yield lebih dari 1% dibandingkan dengan suhu yang kurang optimal.

3. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa suhu reaksi berpengaruh signifikan terhadap yield biodiesel. Suhu optimum proses transesterifikasi dengan katalis campuran 1 gr dan rasio molar metanol terhadap minyak (MTOR) 1:8 diperoleh pada suhu 60°C dengan yield tertinggi sebesar 9,308%. Peningkatan suhu di atas 60°C menyebabkan penurunan yield akibat penguapan metanol yang menghambat reaksi. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan suhu optimum berada pada kisaran 55–65°C. Secara praktis, penggunaan suhu 60°C dinilai paling efisien karena mampu menghemat energi, menekan biaya produksi, dan menghasilkan biodiesel dengan kualitas yang lebih baik.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk meneliti pengaruh suhu di sekitar titik optimum 60°C dengan kombinasi rasio metanol dan katalis yang berbeda, agar diperoleh kondisi reaksi paling efisien dalam menghasilkan biodiesel.

Ucapan Terima Kasih

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Terima kasih disampaikan kepada dosen pembimbing atas bimbingan dan arahan teknis yang sangat berharga. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada Laboratorium Teknik Mesin, keluarga, dan rekan-rekan seperjuangan atas dukungan, bantuan, serta

semangat yang menjadi bagian penting dalam penyelesaian penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] S. M. Farouk, A. M. Tayeb, S. M. S. Abdel-Hamid, and R. M. Osman, "Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production, challenges, and prospects: a comprehensive review," *Environ Sci Pollut Res*, vol. 31, no. 9, pp. 12722–12747, Jan. 2024, doi: 10.1007/s11356-024-32027-4.
- [2] M. Yaghi, S. Chidiac, S. Awad, Y. El Rayess, and N. Zgheib, "An Overview of Biodiesel Production via Heterogeneous Catalysts: Synthesis, Current Advances, and Challenges," *Clean Technol.*, vol. 7, no. 3, p. 62, July 2025, doi: 10.3390/cleantechnol7030062.
- [3] S. Maroa and F. Inambao, "A review of sustainable biodiesel production using biomass derived heterogeneous catalysts," *Engineering in Life Sciences*, vol. 21, no. 12, pp. 790–824, Dec. 2021, doi: 10.1002/elsc.202100025.
- [4] L. D. Abo and H. A. Areti, "Advancements in Heterogeneous Biobased and Bio-Composite Catalysts: A Comprehensive Review on Synthesis, Characterizations, and Applications in Biodiesel Production," *Bioenerg. Res.*, vol. 18, no. 1, p. 68, July 2025, doi: 10.1007/s12155-025-10868-2.
- [5] J. L. Aleman-Ramirez, O. Reyes-Vallejo, P. U. Okoye, R. Sanchez-Albores, A. Maldonado-Álvarez, and P. J. Sebastian, "Crystal phase evolution of high temperature annealed Fe_3O_4 -CaO catalysts for biodiesel production," *Biofuels Bioprod Bioref*, vol. 17, no. 4, pp. 843–858, July 2023, doi: 10.1002/bbb.2478.
- [6] V. Mandari and S. K. Devarai, "Biodiesel Production Using Homogeneous, Heterogeneous, and Enzyme Catalysts via Transesterification and Esterification Reactions: a Critical Review," *Bioenerg. Res.*, vol. 15, no. 2, pp. 935–961, June 2022, doi: 10.1007/s12155-021-10333-w.
- [7] X. Li, S. Zhang, X. Jia, W. Li, and J. Song, "Catalytic Properties and Structural Optimization of Solid Transesterification Catalysts to Enhance the Efficiency of Biodiesel Synthesis," *Catalysts*, vol. 15, no. 3, p. 239, Mar. 2025, doi: 10.3390/catal15030239.
- [8] X. Li *et al.*, "Comparison of High-Efficiency $\text{MgO}/\text{Na}_2\text{CO}_3$ and $\text{MgO}/\text{K}_2\text{CO}_3$ as Heterogeneous Solid Base Catalysts for Biodiesel Production from Soybean Oil," *Molecules*, vol. 30, no. 13, p. 2876, July 2025, doi: 10.3390/molecules30132876.
- [9] A. H. Abu-Ghazala *et al.*, "Boosting biodiesel production from WCO utilizing marble waste powder as precursor for $\text{CaO}/\text{K}_2\text{CO}_3$ nanocatalyst at low temperature *via* RSM optimization," *RSC Adv.*, vol. 15, no. 37, pp. 30829–30848, 2025, doi: 10.1039/D5RA04881H.
- [10] M. D. Ramadhani *et al.*, "Green Nanocatalysts From Biomass For Sustainable Biodiesel Production From Used Cooking Oil," *REM*, vol. 8, no. 01, pp. 46–55, Mar. 2025, doi: 10.25299/rem.2025.20647.
- [11] S. M. Farouk, A. M. Tayeb, S. M. S. Abdel-Hamid, and R. M. Osman, "Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production, challenges, and prospects: a comprehensive review," *Environ Sci Pollut Res*, vol. 31, no. 9, pp. 12722–12747, Jan. 2024, doi: 10.1007/s11356-024-32027-4.
- [12] N. Hasan and M. V. Ratnam, "Biodiesel Production from Waste Animal Fat by Transesterification Using H_2SO_4 and KOH Catalysts: A Study of Physiochemical Properties," *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2022, pp. 1–7, Mar. 2022, doi: 10.1155/2022/6932320.
- [13] M. A. Hazrat *et al.*, "Kinetic Modelling of Esterification and Transesterification Processes for Biodiesel Production Utilising Waste-Based Resource," *Catalysts*, vol. 12, no. 11, p. 1472, Nov. 2022, doi: 10.3390/catal12111472.