



Analisis Pemilihan Katalis pada Proses Produksi Biodiesel melalui Reaksi Transesterifikasi Menggunakan Metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP)

Herdianza¹, Anjas Wilapangga²

¹ The Institution of Engineers, Indonesia

² Farmasi, Universtas Ibnu Chaldun, Jakarta, Indonesia

Correspondent Email: herdianzaipin@gmail.com

Abstrak

Biodiesel merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi menggantikan bahan bakar fosil karena bersifat ramah lingkungan, dapat diperbarui, serta mampu mengurangi emisi gas rumah kaca. Keberhasilan proses produksi biodiesel melalui reaksi transesterifikasi sangat dipengaruhi oleh pemilihan jenis katalis yang digunakan. Meskipun berbagai penelitian telah mengevaluasi kinerja katalis seperti natrium hidroksida (NaOH), kalium hidroksida (KOH), dan kalsium oksida (CaO), proses pemilihan katalis umumnya masih didasarkan pada satu parameter tertentu dan belum mempertimbangkan berbagai aspek teknis dan ekonomi secara terpadu. Penelitian ini bertujuan menentukan prioritas pemilihan katalis pada proses produksi biodiesel menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) berdasarkan tiga kriteria utama, yaitu rendemen biodiesel, konsentrasi katalis, dan harga katalis. Penelitian dilakukan melalui studi literatur dengan mengumpulkan data dari berbagai publikasi ilmiah, kemudian dianalisis menggunakan matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) untuk memperoleh bobot prioritas masing-masing kriteria dan alternatif. Konsistensi penilaian dievaluasi menggunakan Consistency Index (CI) dan Consistency Ratio (CR). Hasil analisis menunjukkan bahwa konsentrasi katalis merupakan kriteria yang paling berpengaruh dengan bobot sebesar 0,66, diikuti rendemen biodiesel (0,21) dan harga katalis (0,13). Berdasarkan evaluasi alternatif, katalis NaOH memperoleh bobot prioritas tertinggi sebesar 0,58, diikuti CaO sebesar 0,30 dan KOH sebesar 0,12. Hasil penelitian menunjukkan bahwa NaOH memiliki keseimbangan terbaik antara efisiensi teknis dan aspek ekonomi sehingga direkomendasikan sebagai katalis yang paling optimal pada proses transesterifikasi biodiesel. Pendekatan berbasis AHP yang diterapkan dalam penelitian ini dapat menjadi kerangka pengambilan keputusan yang sistematis dan objektif dalam pemilihan katalis, serta berpotensi mendukung pengembangan proses produksi biodiesel yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Kata kunci: *Analytical Hierarchy Process* (AHP), biodiesel, katalis, transesterifikasi, pengambilan keputusan multikriteria.

Abstract

Biodiesel has emerged as a promising renewable energy source due to its environmental sustainability, biodegradability, and potential to reduce greenhouse gas emissions. The efficiency of biodiesel production through transesterification is strongly influenced by the selection of an appropriate catalyst. Although numerous studies have evaluated the performance of catalysts such as sodium hydroxide (NaOH), potassium hydroxide (KOH), and calcium oxide (CaO), catalyst selection has generally been based on individual technical parameters rather than an integrated assessment of both technical and economic aspects. Therefore, this study aims to determine the optimal catalyst for biodiesel production using the Analytic Hierarchy Process (AHP) as a multi-criteria decision-making approach. Three evaluation criteria were considered, namely biodiesel yield, catalyst concentration, and catalyst cost. Data were collected through a comprehensive literature review and analyzed using pairwise comparison matrices to determine the relative weights of each criterion and catalyst alternative. The consistency of the decision-making process was evaluated using the Consistency Index (CI) and Consistency Ratio (CR). The results indicate that catalyst concentration is the most influential criterion, with a priority weight of 0.66, followed by biodiesel yield (0.21) and catalyst cost (0.13). Among the evaluated catalysts, NaOH achieved the highest overall priority score (0.58), followed by CaO (0.30) and KOH (0.12). The findings demonstrate that NaOH provides the best balance between technical performance and economic feasibility, making it the most suitable catalyst for biodiesel transesterification. This study presents a systematic and objective decision-making framework that can support researchers and industrial practitioners in selecting catalysts for efficient and sustainable biodiesel production.

Keywords: Analytic Hierarchy Process (AHP); Biodiesel; Catalyst Selection; Multi-Criteria Decision Making; Transesterification.

Accepted Date: 15 July 2026

Publish Date: 25 July 2026

Pendahuluan Latar Belakang

Peningkatan kebutuhan energi global yang diikuti dengan menipisnya cadangan bahan bakar fosil serta meningkatnya emisi gas rumah kaca telah mendorong berbagai negara untuk mengembangkan sumber energi terbarukan yang berkelanjutan. Ketergantungan terhadap bahan bakar minyak (BBM) tidak hanya menimbulkan permasalahan ketersediaan energi di masa depan, tetapi juga berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan melalui emisi karbon dioksida (CO₂), sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), partikulat, dan senyawa hidrokarbon yang berdampak terhadap perubahan iklim global. Oleh karena itu, pengembangan bahan bakar alternatif yang berasal dari sumber daya terbarukan menjadi salah satu strategi utama dalam mewujudkan sistem energi yang lebih ramah lingkungan.

Salah satu bahan bakar alternatif yang memiliki potensi besar adalah biodiesel, yaitu bahan bakar berbasis ester asam lemak (Fatty Acid Methyl Ester/FAME) yang dihasilkan melalui proses transesterifikasi minyak nabati, lemak hewan, maupun minyak limbah menggunakan alkohol rantai pendek. Biodiesel memiliki berbagai keunggulan dibandingkan bahan bakar diesel berbasis petroleum, di antaranya bersifat

biodegradable, tidak beracun, memiliki kandungan sulfur yang sangat rendah, menghasilkan emisi gas buang yang lebih sedikit, serta mempunyai angka setana (cetane number) dan kemampuan pelumasan yang lebih baik sehingga dapat meningkatkan performa sekaligus memperpanjang umur mesin diesel.

Proses produksi biodiesel umumnya dilakukan melalui reaksi transesterifikasi menggunakan katalis. Keberhasilan proses tersebut sangat dipengaruhi oleh jenis katalis yang digunakan karena katalis berperan dalam menentukan laju reaksi, efisiensi konversi trigliserida menjadi metil ester, kemurnian biodiesel yang dihasilkan, serta biaya produksi secara keseluruhan. Dengan demikian, pemilihan katalis merupakan salah satu faktor yang sangat menentukan kelayakan teknis maupun ekonomis dalam proses produksi biodiesel [1].

Berbagai penelitian telah melaporkan penggunaan katalis homogen maupun heterogen pada proses transesterifikasi. Katalis homogen seperti natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH) diketahui memiliki aktivitas katalitik yang tinggi sehingga mampu menghasilkan konversi biodiesel yang besar dalam waktu reaksi relatif singkat. Namun demikian, penggunaan katalis homogen masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti terbentuknya sabun (*soap formation*), kesulitan pemisahan katalis dari produk, serta meningkatnya kebutuhan proses pencucian biodiesel. Sebaliknya, katalis heterogen seperti kalsium oksida (CaO) menawarkan kemudahan pemisahan dan potensi penggunaan kembali (*reusability*), meskipun pada beberapa kondisi memerlukan konsentrasi katalis yang lebih tinggi maupun waktu reaksi yang lebih lama dibandingkan katalis homogen. Perbedaan karakteristik tersebut menunjukkan bahwa setiap katalis memiliki keunggulan dan keterbatasan sehingga pemilihannya tidak dapat didasarkan hanya pada satu parameter.

Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada optimasi kondisi reaksi, seperti konsentrasi katalis, rasio molar alkohol terhadap minyak, suhu reaksi, maupun waktu reaksi untuk memperoleh rendemen biodiesel yang maksimum. Namun demikian, dalam implementasi pada skala industri, pemilihan katalis tidak hanya mempertimbangkan rendemen biodiesel, tetapi juga harus memperhatikan aspek ekonomi, efisiensi penggunaan katalis, dan kemudahan operasional. Hingga saat ini, kajian yang mengintegrasikan berbagai kriteria teknis dan ekonomis dalam pemilihan katalis biodiesel menggunakan pendekatan pengambilan keputusan multikriteria (*Multi-Criteria Decision Making/MCDM*) masih relatif terbatas.

Salah satu metode *Multi-Criteria Decision Making* yang banyak digunakan dalam pengambilan keputusan adalah Analytic Hierarchy Process (AHP). Metode ini mampu menguraikan suatu permasalahan kompleks menjadi struktur hierarki, kemudian menentukan tingkat kepentingan relatif setiap kriteria melalui perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*). Pendekatan tersebut memungkinkan proses pengambilan keputusan menjadi lebih objektif, sistematis, dan terukur, terutama ketika beberapa kriteria memiliki tingkat kepentingan yang berbeda.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan menentukan katalis terbaik pada proses pembuatan biodiesel melalui reaksi transesterifikasi menggunakan metode Analytic Hierarchy Process (AHP). Evaluasi dilakukan terhadap tiga jenis katalis yang paling banyak digunakan, yaitu natrium hidroksida (NaOH), kalium hidroksida (KOH), dan kalsium oksida (CaO), dengan mempertimbangkan tiga kriteria utama, yaitu rendemen biodiesel, harga katalis, dan konsentrasi maksimum katalis. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan model pengambilan keputusan yang lebih komprehensif sehingga mampu memberikan rekomendasi pemilihan katalis yang tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis, tetapi

juga aspek ekonomi sebagai dasar pengembangan proses produksi biodiesel yang lebih efisien [2].

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Multi-Criteria Decision Making (MCDM) dengan metode Analytic Hierarchy Process (AHP) untuk menentukan jenis katalis yang paling sesuai pada proses produksi biodiesel melalui reaksi transesterifikasi. Pendekatan ini dipilih karena AHP mampu mengakomodasi berbagai kriteria teknis dan ekonomis secara simultan dalam proses pengambilan keputusan yang kompleks.

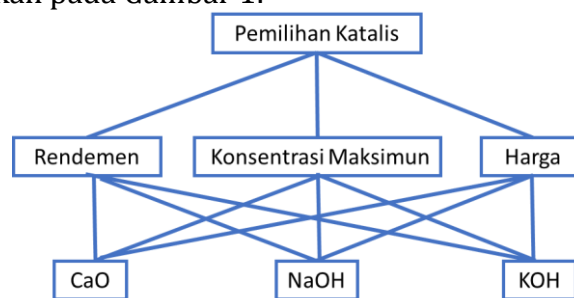
Data penelitian diperoleh melalui studi literatur sistematis (systematic literature review) terhadap berbagai artikel ilmiah, jurnal bereputasi, dan publikasi yang membahas penggunaan katalis pada proses transesterifikasi biodiesel. Literatur yang digunakan dipilih berdasarkan relevansi terhadap topik penelitian, kualitas publikasi, serta ketersediaan data kuantitatif mengenai karakteristik masing-masing katalis. Selain data literatur, penentuan tingkat kepentingan antar-kriteria juga mempertimbangkan pendapat ahli (*expert judgment*) yang memiliki kompetensi di bidang produksi biodiesel dan rekayasa proses kimia.

Berdasarkan hasil kajian literatur dan masukan para ahli, ditetapkan tiga kriteria utama yang digunakan dalam proses pengambilan keputusan, yaitu:

1. Rendemen biodiesel (%)
2. Harga katalis (Rp/g)
3. Konsentrasi maksimum katalis (%)

Ketiga kriteria tersebut dipilih karena mewakili aspek teknis dan ekonomis yang paling berpengaruh terhadap efisiensi proses produksi biodiesel. Alternatif yang dievaluasi dalam penelitian ini terdiri atas tiga jenis katalis yang umum digunakan dalam proses transesterifikasi, yaitu natrium hidroksida (NaOH), kalium hidroksida (KOH), dan kalsium oksida (CaO).

Selanjutnya disusun struktur hierarki AHP yang terdiri atas tiga tingkatan, yaitu tujuan (*goal*), kriteria (*criteria*), dan alternatif (*alternatives*). Tujuan utama adalah menentukan katalis terbaik untuk proses produksi biodiesel, sedangkan kriteria dan alternatif disusun sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur Hierarki Analytic Hierarchy Process (AHP) dalam Pemilihan Katalis Biodiesel

Tahapan analisis AHP diawali dengan penyusunan matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison matrix*) menggunakan skala fundamental Saaty. Setiap kriteria dibandingkan secara berpasangan untuk menentukan tingkat kepentingan relatif terhadap tujuan penelitian. Nilai perbandingan kemudian dinormalisasi untuk memperoleh vektor prioritas (priority vector) menggunakan metode eigenvector, sehingga diperoleh bobot masing-masing kriteria.

Keandalan hasil penilaian dievaluasi melalui perhitungan Consistency Index (CI) dan Consistency Ratio (CR). Nilai Consistency Index (CI) dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

dengan:

- $\lambda_{\max}$ = nilai eigen maksimum matriks perbandingan
- n = jumlah kriteria

Selanjutnya Consistency Ratio (CR) dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

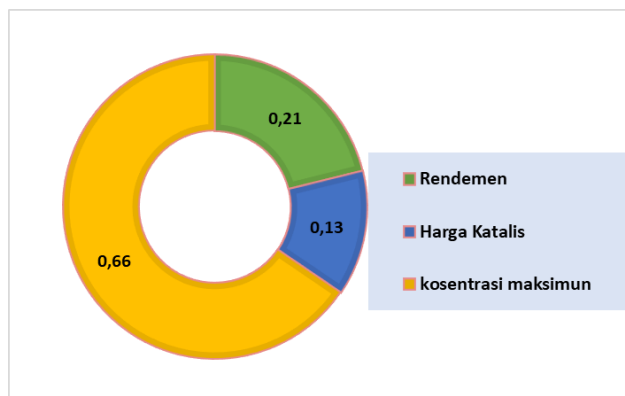
di mana RI merupakan Random Index sesuai jumlah elemen matriks berdasarkan nilai yang dikembangkan oleh Saaty.

Suatu matriks perbandingan dinyatakan memiliki tingkat konsistensi yang dapat diterima apabila nilai $CR \leq 0,10$. Apabila nilai $CR > 0,10$, maka penilaian perbandingan berpasangan harus ditinjau kembali hingga diperoleh tingkat konsistensi yang memenuhi kriteria. Dengan demikian, bobot prioritas yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan alternatif katalis terbaik secara objektif dan konsisten [3].

Pembahasan

Prioritas Kriteria dalam Pemilihan Katalis Menggunakan Metode AHP

Hasil analisis menggunakan metode Analytic Hierarchy Process (AHP) menunjukkan bahwa konsentrasi maksimum katalis merupakan kriteria yang memiliki tingkat kepentingan tertinggi dalam pemilihan katalis untuk proses produksi biodiesel melalui reaksi transesterifikasi, dengan bobot prioritas sebesar 0,66. Sementara itu, rendemen biodiesel menempati urutan kedua dengan bobot 0,21, sedangkan harga katalis berada pada prioritas terakhir dengan bobot 0,13. Distribusi bobot prioritas setiap kriteria disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bobot Prioritas Kriteria Pemilihan Katalis Menggunakan Metode AHP

Dominannya bobot konsentrasi katalis menunjukkan bahwa efisiensi penggunaan katalis merupakan faktor yang paling menentukan dalam pengambilan keputusan. Konsentrasi katalis yang optimal berperan penting dalam meningkatkan laju reaksi transesterifikasi melalui peningkatan jumlah situs aktif yang tersedia selama proses konversi trigliserida menjadi metil ester. Penggunaan konsentrasi katalis yang tepat memungkinkan reaksi berlangsung lebih cepat sehingga waktu produksi menjadi lebih singkat dan kapasitas produksi biodiesel dapat ditingkatkan. Selain meningkatkan

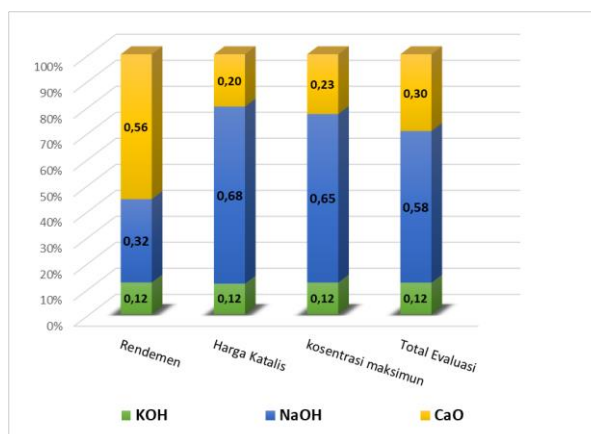
efisiensi proses, penggunaan katalis dalam jumlah minimum yang tetap mampu menghasilkan konversi maksimum juga memberikan keuntungan ekonomi. Semakin rendah kebutuhan katalis untuk menghasilkan biodiesel dengan kemurnian tinggi, semakin kecil biaya operasional yang harus dikeluarkan. Oleh karena itu, konsentrasi katalis tidak hanya merepresentasikan aspek teknis, tetapi juga mencerminkan efisiensi proses secara keseluruhan.

Kriteria rendemen biodiesel memperoleh bobot prioritas sebesar 0,21, menunjukkan bahwa keberhasilan proses konversi bahan baku menjadi biodiesel tetap menjadi indikator penting dalam evaluasi performa katalis. Rendemen yang tinggi mengindikasikan bahwa sebagian besar trigliserida berhasil dikonversi menjadi metil ester sehingga kehilangan bahan baku dapat diminimalkan. Dalam konteks produksi biodiesel skala industri, peningkatan rendemen secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas dan efisiensi pemanfaatan bahan baku. Sebaliknya, harga katalis memperoleh bobot prioritas paling rendah (0,13). Hasil ini menunjukkan bahwa aspek ekonomi bukan merupakan faktor utama apabila dibandingkan dengan parameter teknis yang secara langsung mempengaruhi kualitas biodiesel. Dalam praktik industri, peningkatan biaya pembelian katalis masih dapat diterima apabila mampu menghasilkan efisiensi proses, meningkatkan rendemen, serta menurunkan biaya produksi secara keseluruhan.

Keandalan model AHP dievaluasi menggunakan Consistency Index (CI) dan Consistency Ratio (CR). Hasil analisis menunjukkan nilai CI sebesar 0,027 dan CR sebesar 0,052, yang berada di bawah batas maksimum 0,10 sebagaimana direkomendasikan oleh Saaty. Nilai tersebut menunjukkan bahwa penilaian perbandingan berpasangan memiliki tingkat konsistensi yang baik sehingga bobot prioritas yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan yang reliabel [4].

3.2 Evaluasi Alternatif Katalis

Hasil sintesis AHP terhadap ketiga alternatif katalis menunjukkan bahwa natrium hidroksida (NaOH) merupakan alternatif terbaik dengan bobot prioritas sebesar 0,58. Selanjutnya, kalsium oksida (CaO) menempati urutan kedua dengan bobot 0,30, sedangkan kalium hidroksida (KOH) berada pada urutan terakhir dengan bobot 0,12. Hasil evaluasi alternatif disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Bobot Prioritas Alternatif Katalis Menggunakan Metode AHP

Dominasi NaOH sebagai alternatif terbaik menunjukkan bahwa katalis tersebut memiliki keseimbangan yang paling baik antara aspek teknis dan aspek ekonomi. Berdasarkan kriteria harga, NaOH memiliki biaya yang lebih rendah dibandingkan CaO maupun KOH sehingga memberikan keuntungan dalam pengurangan biaya produksi, khususnya pada proses biodiesel skala besar. Meskipun harga bukan merupakan kriteria utama dalam analisis AHP, efisiensi ekonomi tetap memberikan kontribusi terhadap nilai akhir alternatif.

Selain memiliki harga yang relatif ekonomis, NaOH juga memerlukan konsentrasi penggunaan yang lebih rendah dibandingkan dua katalis lainnya. Penggunaan katalis dalam konsentrasi rendah berpotensi mengurangi pembentukan produk samping, menurunkan konsumsi bahan kimia, serta menyederhanakan proses pemurnian biodiesel. Kondisi tersebut menjadikan NaOH lebih efisien baik dari aspek teknis maupun operasional.

Hasil penelitian ini konsisten dengan berbagai penelitian sebelumnya. Prayanto et al. melaporkan bahwa penggunaan NaOH sebesar 1% pada produksi biodiesel dari minyak kelapa menghasilkan rendemen sebesar 89,55%, sedangkan Sudrajat et al. menunjukkan bahwa penggunaan NaOH sebesar 0,5–1% pada minyak biji kesambi mampu menghasilkan rendemen hingga 96,83%. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa NaOH mampu menghasilkan konversi biodiesel yang tinggi meskipun digunakan dalam konsentrasi relatif rendah.

Sebaliknya, katalis CaO memerlukan konsentrasi yang lebih tinggi untuk menghasilkan rendemen yang sebanding. Setyoningrum et al. melaporkan bahwa penggunaan CaO sebesar 3,5% menghasilkan rendemen 96,43%, sedangkan Putri et al. memperoleh rendemen 87,41% menggunakan CaO sebesar 2%. Walaupun CaO memiliki keunggulan sebagai katalis heterogen yang mudah dipisahkan dan dapat digunakan kembali, kebutuhan katalis yang lebih besar menyebabkan efisiensi proses menjadi lebih rendah dibandingkan NaOH.

Sementara itu, KOH menunjukkan performa paling rendah dalam evaluasi AHP. Penelitian Sulaiman melaporkan bahwa penggunaan KOH sebesar 5% hanya menghasilkan

rendemen sekitar 64%, jauh lebih rendah dibandingkan NaOH maupun CaO. Selain membutuhkan konsentrasi yang lebih tinggi, penggunaan KOH juga berpotensi meningkatkan pembentukan sabun (*soap formation*) apabila bahan baku memiliki kadar asam lemak bebas yang tinggi, sehingga dapat menurunkan efisiensi pemisahan biodiesel dan gliserol.

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa pendekatan Analytic Hierarchy Process (AHP) mampu mengintegrasikan berbagai parameter teknis dan ekonomis secara simultan sehingga menghasilkan keputusan yang lebih komprehensif dibandingkan evaluasi berdasarkan satu parameter saja. Dominasi NaOH dalam analisis ini menunjukkan bahwa pemilihan katalis tidak hanya ditentukan oleh rendemen biodiesel, tetapi juga dipengaruhi oleh efisiensi penggunaan katalis serta biaya operasional. Dengan demikian, metode AHP dapat digunakan sebagai decision-support tool dalam pemilihan katalis untuk produksi biodiesel pada skala laboratorium maupun industri[5].

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode *Analytic Hierarchy Process (AHP)* dapat digunakan sebagai pendekatan yang sistematis dalam menentukan katalis terbaik pada proses pembuatan biodiesel melalui reaksi transesterifikasi. Berdasarkan hasil analisis, konsentrasi katalis merupakan kriteria yang paling berpengaruh dalam pengambilan keputusan, sedangkan NaOH terpilih sebagai alternatif terbaik dibandingkan CaO dan KOH karena memiliki kombinasi terbaik antara efisiensi penggunaan katalis, rendemen biodiesel, dan biaya yang lebih ekonomis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode AHP mampu mendukung pengambilan keputusan yang objektif dalam pemilihan katalis untuk meningkatkan efisiensi proses produksi biodiesel.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas model pengambilan keputusan dengan menambahkan parameter lain yang berpengaruh terhadap performa katalis, seperti konversi metil ester, aktivitas dan stabilitas katalis, kemampuan penggunaan ulang (*reusability*), waktu reaksi, konsumsi energi, dampak lingkungan, serta biaya siklus hidup (*life cycle cost*). Selain itu, hasil AHP dapat divalidasi menggunakan metode Multi-Criteria Decision Making (MCDM) lainnya, seperti TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE, atau Fuzzy-AHP, sehingga diperoleh model pengambilan keputusan yang lebih komprehensif dan memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi untuk mendukung implementasi biodiesel pada skala industri.

Daftar Pustaka

- 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, 2024, doi: 10.1007/s11356-024-32027-4.
- B. O. Yusuf, S. A. Oladepo, and S. A. Ganiyu, "Efficient and Sustainable Biodiesel Production via Transesterification: Catalysts and Operating Conditions," *Catalysts*, vol. 14, no. 9, 2024, doi: 10.3390/catal14090581.
- S. Maroa and F. Inambao, "A review of sustainable biodiesel production using biomass derived heterogeneous catalysts," *Eng. Life Sci.*, vol. 21, no. 12, pp. 790–824, 2021, doi: 10.1002/elsc.202100025.

A. K. Rajak, S. Dalal, M. Harikrishna, U. K. Sahoo, M. S. L. Karuna, and P. K. Sarangi, "A comprehensive review of biomass-derived heterogeneous catalysts for efficient biodiesel production," *Asian J. Water, Environ. Pollut.*, vol. 22, no. 5, pp. 1–54, 2025, doi: 10.36922/AJWEP025130095.

B. Changmai, C. Vanlalveni, A. P. Ingle, R. Bhagat, and L. Rokhum, "Widely used catalysts in biodiesel production: A review," *RSC Adv.*, vol. 10, no. 68, pp. 41625–41679, 2020, doi: 10.1039/d0ra07931f.