

OPTIMASI PENURUNAN KADAR FFA LIMBAH MINYAK JELANTAH SEBAGAI BAHAN BIODIESEL PADA PROSES ESTERIFIKASI

Giovanni Firmansyah Putra^{1*}, M. Hasan Abdullah²

^{1,2}Teknik Industri Universitas Wijaya Putra
Email: giovannifirmansyahp@gmail.com^{1*},
mhasanabdullah@uwp.ac.id²

*corresponding author

Abstract

This study aims to optimize the acid esterification of waste cooking oil (WCO) in order to reduce free fatty acid (FFA) as a pretreatment step prior to alkaline transesterification for biodiesel production. A response surface methodology-central composite design (RSM-CCD) was used to study the combined effects of methanol to oil molar ratio (6–13), H₂SO₄ catalyst concentration (1–3% v/v), reaction temperature (40–65 °C), reaction time (30–90 min), and stirring speed (300–700 rpm) on FFA reduction. The initial FFA content of the WCO was 3.75%, while the experimental runs produced final FFA values in the range of 1.74–22.83%. Contour and surface plots showed that moderate catalyst loadings together with higher temperatures and adequate molar ratios give the largest decrease in FFA, with a strong interaction between molar ratio and temperature. Response optimization indicated an optimum at a molar ratio of 13.242, catalyst concentration of 1.323%, temperature of 65 °C, reaction time of 17.58 min, and stirring speed of 700 rpm, where the model predicts FFA levels close to zero. These conditions are therefore recommended as an efficient esterification pretreatment for WCO, while further experimental validation around the predicted optimum is suggested.

Keywords: waste cooking oil, FFA, esterification, H₂SO₄, RSM

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengoptimasi proses esterifikasi asam pada minyak jelantah (waste cooking oil, WCO) untuk menurunkan kadar free fatty acid (FFA) sebagai tahap pretreatment sebelum transesterifikasi basa pada produksi biodiesel. Metode response surface methodology dengan central composite design (RSM-CCD) digunakan untuk mengkaji pengaruh gabungan rasio molar metanol:minyak (6–13), konsentrasi katalis H₂SO₄ (1–3% b/v), suhu reaksi (40–65 °C), waktu reaksi (30–90 menit), dan kecepatan pengadukan (300–700 rpm) terhadap penurunan FFA. Kadar FFA awal minyak jelantah sebesar 3,75%, sedangkan hasil percobaan menunjukkan FFA akhir berada pada rentang 1,74–22,83%. Plot kontur dan permukaan memperlihatkan bahwa penggunaan katalis pada level moderat dengan suhu tinggi dan rasio molar yang memadai menghasilkan penurunan FFA terbesar, dengan interaksi yang kuat antara rasio molar dan suhu. Hasil response optimization memberikan kondisi optimum pada rasio molar 13,242, konsentrasi katalis 1,323%, suhu 65 °C, waktu reaksi 17,58 menit, dan kecepatan pengadukan 700 rpm, di mana model memprediksi FFA mendekati nol. Kondisi tersebut direkomendasikan sebagai pretreatment esterifikasi yang efisien untuk minyak jelantah, dengan perlunya validasi eksperimen lanjutan di sekitar titik optimum.

Kata kunci: minyak jelantah, FFA, esterifikasi, H₂SO₄, RSM

PENDAHULUAN

Pemanfaatan minyak jelantah sebagai bahan baku biodiesel semakin banyak diteliti karena sifatnya yang murah dan ketersediaannya melimpah, namun kadar free fatty acid (FFA) yang tinggi membuat minyak jelantah tidak dapat langsung diproses dengan transesterifikasi alkali karena akan menghasilkan sabun dan menurunkan rendemen biodiesel (Juera-Ong, Pongraktham, Oo, & Somnuk, 2022). Proses pretreatment berupa esterifikasi asam diperlukan untuk menurunkan FFA sebelum tahap reaksi berikutnya dapat dilakukan secara optimal (Sofyan et al., 2024)

Studi-studi terkini menegaskan bahwa efektivitas proses esterifikasi dipengaruhi oleh beberapa variabel utama seperti rasio molar metanol:minyak, suhu reaksi, kecepatan pengadukan, konsentrasi katalis, dan waktu reaksi (Bai, Tian, Talifu, Okitsu, & Abulizi, 2022). Selain katalis homogen seperti H_2SO_4 , penelitian terbaru juga mengevaluasi katalis heterogen misalnya biochar ter-sulfonasi atau karbon padat yang dinilai lebih mudah dipisahkan dan dapat digunakan ulang, meskipun stabilitas jangka panjangnya masih menjadi tantangan (Sofyan et al., 2024; Zhang et al., 2023)

Penelitian (Al-Hamamre, Sandouqa, Al-Saida, Shawabkeh, & Alnaief, 2023), juga menunjukkan bahwa penggunaan katalis heterogen berbasis KNO_3 /ash mampu meningkatkan efisiensi produksi biodiesel dari minyak jelantah sekaligus mempermudah proses pemisahan katalis, sehingga memperkuat tren penggunaan katalis padat dalam proses esterifikasi dan transesterifikasi.

Penggunaan pendekatan desain eksperimen seperti Response Surface Methodology (RSM) semakin umum dalam menentukan kondisi optimum esterifikasi karena mampu memetakan interaksi antar faktor proses secara lebih akurat (Ngomade et al., 2022). Metode RSM terbukti menghasilkan kondisi optimum esterifikasi yang menurunkan FFA hingga <1%, sehingga minyak jelantah dapat diproses ke tahap transesterifikasi alkali dengan efisiensi lebih tinggi (Yamin, Al-hamamre, & Sandouqa, 2024). Selain itu, penelitian tahun 2023–2024 juga menunjukkan bahwa penguatan proses menggunakan ultrasound atau peningkatan efisiensi pencampuran dapat mempercepat laju konversi FFA tanpa menambah penggunaan katalis secara signifikan (Ulukardesler, 2023).

Secara keseluruhan, gap riset yang masih tersisa adalah perlunya optimasi yang mempertimbangkan beberapa faktor sekaligus bahan minyak jelantah yang bervariasi, suhu reaksi, rpm, waktu reaksi, dan konsentrasi katalis untuk menghasilkan kondisi proses yang tidak hanya efektif menurunkan FFA, tetapi juga stabil, ekonomis, dan mudah direplikasi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan melakukan optimasi penurunan kadar FFA minyak jelantah melalui proses esterifikasi dengan memvariasikan faktor-faktor utama tersebut, berdasarkan pendekatan yang telah direkomendasikan berbagai studi terbaru (Monika, Banga, & Pathak, 2023; Rezki, Essamlali, Aadil, Semlal, & Zahouily, 2020)

METODE PENELITIAN

Tahapan Metode Penelitian

Tabel 1. Tahapan Metode Penelitian

NO	Tahapan	Keterangan
1	Persiapan Bahan dan Alat	Pada tahap ini dilakukan pemilihan bahan baku berupa minyak jelantah yang telah disaring dari kotoran padat. Metanol 99%, katalis H_2SO_4 , serta alat laboratorium seperti hot plate stirrer, gelas ukur, labu reaksi, termometer, dan

		timbangan analitik disiapkan. Karakterisasi awal minyak dilakukan untuk menentukan kadar FFA sebagai baseline.
2	Penentuan Variabel Penelitian	Variabel yang dioptimasi ditetapkan meliputi: rasio molar metanol:minyak, suhu reaksi, kecepatan pengadukan (rpm), waktu reaksi, dan konsentrasi katalis H ₂ SO ₄ (% berat minyak). Variabel-variabel ini dirancang menggunakan metode Response Surface Methodology (RSM) tipe Central Composite Design (CCD) pada software Minitab.
3	Perancangan Eksperimen Menggunakan Minitab	Rancangan percobaan CCD dibuat di Minitab untuk menghasilkan kombinasi run yang terdiri dari level rendah, tinggi, axial, dan central points. Output berupa 43 run percobaan yang masing-masing mewakili kombinasi faktor berbeda untuk menguji efek terhadap penurunan FFA.
4	Pelaksanaan Proses Esterifikasi	Setiap run dilakukan dengan mencampurkan minyak jelantah, metanol sesuai rasio molar, dan H ₂ SO ₄ pada konsentrasi tertentu. Reaksi dijalankan pada suhu dan waktu sesuai desain, dengan pengadukan menggunakan stirrer. Setelah reaksi selesai, campuran didiamkan untuk memisahkan fase, kemudian minyak hasil esterifikasi diambil untuk dianalisis.
5	Analisis Kadar FFA Setelah Reaksi	Pengukuran FFA dilakukan menggunakan metode titrasi alkalimetri. Nilai FFA hasil esterifikasi dibandingkan dengan FFA awal untuk memperoleh persentase penurunan FFA sebagai respon utama penelitian.
6	Analisis Data Menggunakan RSM Minitab	Data respon yang diperoleh dimasukkan ke Minitab untuk dianalisis menggunakan model kuadratik. Tahap ini menghasilkan: ANOVA, model prediksi, grafik permukaan respon, dan titik optimum kondisi proses esterifikasi. Optimasi digunakan untuk menentukan kombinasi faktor yang menghasilkan penurunan FFA maksimum.
7	Validasi Kondisi Optimum	Kondisi optimum yang diperoleh dari Minitab diuji ulang secara eksperimental. Hasil validasi dibandingkan dengan nilai prediksi model untuk menilai kesesuaian, error, serta reliabilitas model matematis terhadap kondisi nyata.

Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa jenis variabel untuk memastikan proses optimasi esterifikasi dapat dianalisis secara menyeluruh, yaitu:

a. Variabel Bebas (Independent Variables)

Variabel yang divariasikan dalam desain eksperimen RSM (CCD), yaitu:

1. Rasio molar metanol:minyak
2. Suhu reaksi (°C)
3. Kecepatan pengadukan (rpm)
4. Waktu reaksi (menit)
5. Konsentrasi katalis H₂SO₄ (% b/b minyak)

b. Variabel Terikat (Dependent Variable)

Respon utama penelitian adalah:

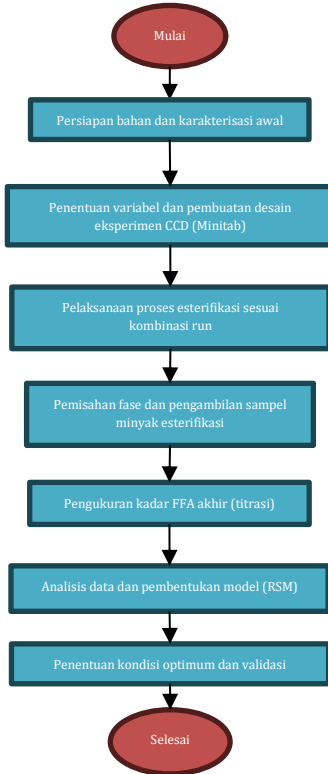
- **Persentase penurunan kadar FFA setelah proses esterifikasi** yang dihitung dari selisih antara FFA awal dan FFA akhir.

c. Variabel Kontrol

Variabel yang dijaga konstan untuk memastikan hasil eksperimen tidak terpengaruh faktor luar, yaitu:

- Massa minyak jelantah (1000 g per run)
- Jenis katalis (H_2SO_4 teknis)
- Kemurnian metanol (99%)
- Jenis alat reaksi (hot plate stirrer)
- Tekanan atmosfer (reaksi dilakukan pada tekanan ruang)
- Prosedur analisis FFA (titrasi alkalimetri)

Diagram Alir Penelitian



Rumus Perhitungan Respon Penelitian

Respon utama berupa persentase penurunan FFA dihitung menggunakan rumus berikut:

$$FFA\% = \frac{V_{KOH} - N_{KOH} \times 25,6}{W}$$

Keterangan:

- V_{KOH} = volume titran KOH yang digunakan (mL)
- N_{KOH} = normalitas KOH (umumnya 0,1 N)
- **25,6** = bobot ekuivalen asam oleat
- W = berat sampel (gram)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Awal dan Ringkasan Respon

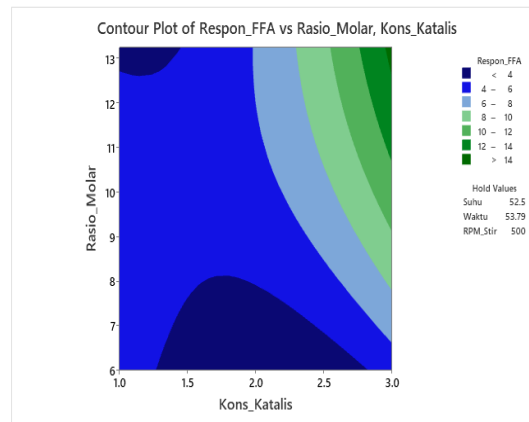
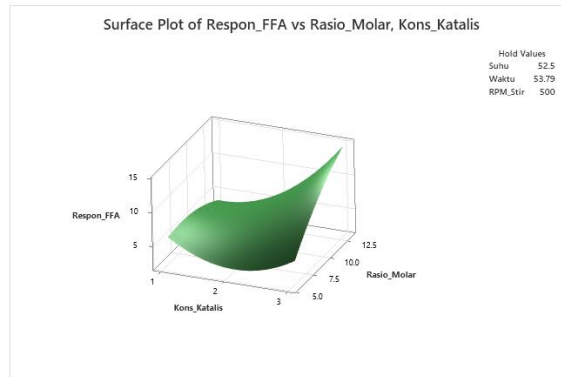
Minyak jelantah yang digunakan pada penelitian ini memiliki kadar asam lemak bebas (FFA) awal sebesar 3,75%. Setelah dilakukan proses esterifikasi dengan berbagai kombinasi kondisi operasi, nilai FFA akhir berada pada kisaran 1,74% sampai 22,83%. Hal ini menunjukkan bahwa

variasi rasio molar metanol:minyak, konsentrasi katalis H_2SO_4 , suhu, waktu reaksi, dan kecepatan pengadukan memberikan pengaruh yang berbeda-beda terhadap efektivitas penurunan FFA.

Jika dibandingkan dengan teori bahwa minyak jelantah ber-FFA tinggi memerlukan tahap pretreatment yang terkontrol sebelum transesterifikasi, hasil ini sejalan karena tidak semua kombinasi kondisi mampu menurunkan FFA hingga mendekati nol. Hanya kombinasi tertentu yang memberikan FFA rendah, sehingga penelitian ini memperkuat pandangan bahwa penentuan kondisi operasi optimum sangat penting agar minyak jelantah layak dikonversi menjadi biodiesel.

Pengaruh Rasio Molar dan Konsentrasi Katalis terhadap Respon FFA

Hasil pemodelan yang divisualisasikan melalui contour plot dan surface plot rasio molar konsentrasi katalis.



menunjukkan bahwa zona dengan respon FFA terendah berada pada rasio molar rendah-menengah ($\pm 6-9$) dan katalis rendah-menengah ($\pm 1-2\%$). Ketika konsentrasi katalis dinaikkan mendekati batas atas (sekitar 3%), permukaan respon cenderung meningkat dan kontur bergeser ke warna yang menunjukkan FFA lebih tinggi. Artinya, penambahan katalis yang berlebihan tidak secara otomatis menghasilkan penurunan FFA yang lebih besar.

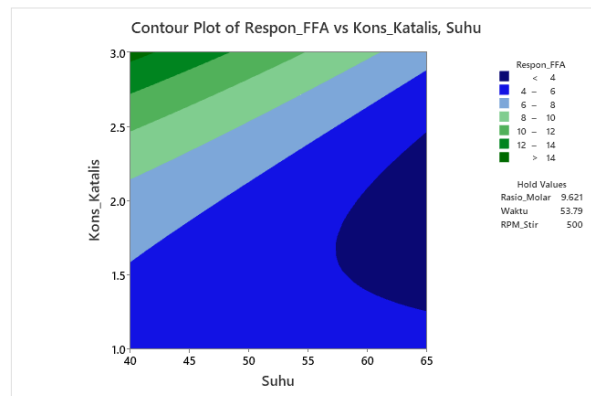
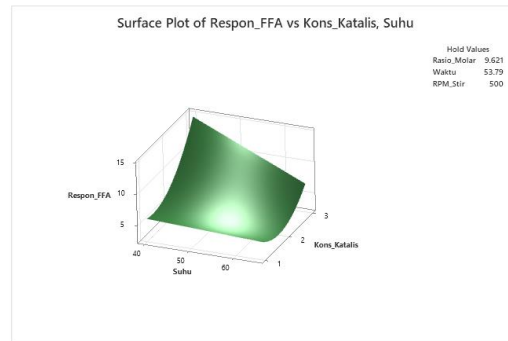
Secara teori, katalis asam mempercepat esterifikasi dengan menurunkan energi aktivasi dan menyediakan situs aktif untuk reaksi antara FFA dan metanol. Beberapa penelitian terdahulu melaporkan adanya nilai optimum katalis di kisaran rendah-menengah, di mana penambahan katalis di atas nilai tersebut tidak lagi meningkatkan konversi secara signifikan. Hasil penelitian ini memperkuat teori dan temuan tersebut, karena terlihat jelas bahwa dosis katalis yang terlalu tinggi justru berkaitan dengan FFA yang lebih besar.

Perbedaannya, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi rasio metanol dan katalis yang moderat sudah mampu menghasilkan FFA yang rendah, sehingga dari sisi efisiensi bahan kimia,

kondisi ini lebih menguntungkan dibanding studi yang menggunakan katalis tinggi. Dengan demikian, hasil ini tidak hanya mengkonfirmasi teori umum tentang peran katalis, tetapi juga memberikan argumen baru bahwa penggunaan katalis yang berlebihan tidak diperlukan selama rasio molar dan kondisi lain diatur dengan tepat.

Pengaruh Konsentrasi Katalis dan Suhu terhadap Respon FFA

Contour plot dan surface plot konsentrasi katalis–suhu (Gambar 3 dan Gambar 4)



menunjukkan bahwa suhu tinggi (sekitar 60–65°C) dengan katalis rendah–menengah (± 1 –2%) menghasilkan respon FFA paling rendah. Sebaliknya, pada suhu rendah dengan katalis tinggi, nilai FFA cenderung lebih besar. Permukaan respon menurun tajam ketika suhu dinaikkan hingga mendekati 65°C, terutama ketika konsentrasi katalis tidak berada pada level yang terlalu tinggi.

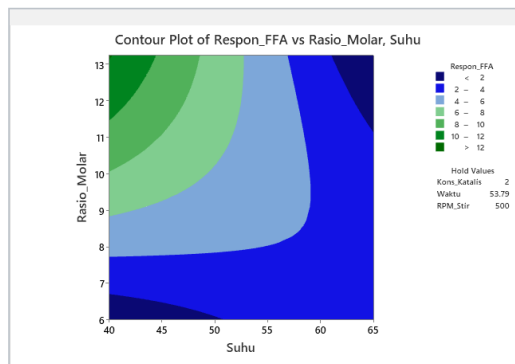
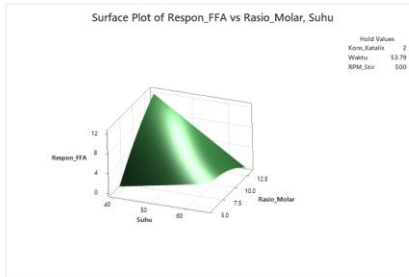
Secara teoritis, peningkatan suhu meningkatkan energi kinetik molekul dan frekuensi tumbukan antara FFA dan metanol, sehingga laju reaksi esterifikasi meningkat. Berbagai penelitian sebelumnya juga melaporkan bahwa esterifikasi minyak jelantah umumnya optimum pada kisaran suhu 60–65°C. Dengan demikian, hasil penelitian ini sejalan dan memperkuat teori maupun hasil penelitian terdahulu mengenai pentingnya suhu tinggi untuk menurunkan FFA.

Perbedaannya, penelitian ini menunjukkan bahwa pada kisaran suhu yang sama, katalis tidak perlu digunakan pada konsentrasi maksimum untuk mencapai penurunan FFA yang baik. Hal ini memberikan keunggulan praktis dibanding penelitian yang menggunakan kombinasi suhu tinggi dan katalis tinggi, karena kondisi optimum yang diperoleh lebih hemat bahan kimia, berpotensi mengurangi korosivitas, dan lebih mudah diterapkan pada skala lebih besar.

Interaksi Rasio Molar dan Suhu terhadap Respon FFA

Interaksi antara rasio molar metanol: minyak dan suhu reaksi divisualisasikan pada contour plot dan surface plot rasio molar-suhu.

Surface Plot of Respon_FFA vs Rasio_Molar, Suhu



Zona respon FFA paling rendah muncul pada kombinasi suhu tinggi ($\pm 60-65^{\circ}\text{C}$) dan rasio molar menengah hingga tinggi, sedangkan rasio molar tinggi pada suhu rendah justru menghasilkan FFA yang lebih besar. Bentuk permukaan yang tidak simetris menunjukkan adanya interaksi antara kedua variabel tersebut.

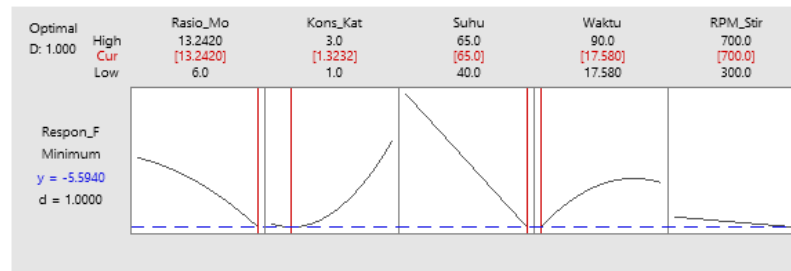
Penelitian terdahulu banyak menyebutkan bahwa rasio metanol dan suhu merupakan faktor penting secara individual, namun tidak selalu menggambarkan bagaimana keduanya saling mempengaruhi. Hasil penelitian ini menambahkan pemahaman baru bahwa peningkatan rasio metanol hanya efektif menurunkan FFA ketika didukung oleh suhu yang cukup tinggi. Peningkatan rasio metanol pada suhu rendah tidak memberikan penurunan FFA yang berarti, sehingga efek rasio dan suhu tidak bisa dipisahkan.

Dengan kata lain, penelitian ini tidak hanya menguatkan pernyataan bahwa rasio metanol dan suhu adalah faktor kunci, tetapi juga menunjukkan perbedaan pendekatan dengan studi yang hanya memvariasikan satu faktor. Di sini, interaksi keduanya ditampilkan secara eksplisit, sehingga memberikan argumen bahwa rancangan percobaan berbasis RSM lebih mampu menjelaskan perbedaan hasil antar penelitian yang menggunakan kondisi operasi berbeda.

3.5 Kondisi Optimum Esterifikasi Berdasarkan Response Optimization

Penentuan kondisi optimum dilakukan menggunakan fitur response optimization dengan tujuan meminimalkan FFA. Berdasarkan model RSM, diperoleh kombinasi kondisi operasi yang memberikan respon minimum sebagai berikut: rasio molar metanol: minyak 13,242, konsentrasi katalis H_2SO_4 1,323%, suhu reaksi 65°C , waktu reaksi 17,58 menit, dan kecepatan pengadukan 700

rpm, dengan nilai desirability 1,000. Pada kondisi ini, model memprediksi nilai Respon_FFA sebesar -5,59%.



Secara fisik, FFA tidak mungkin bernilai negatif. Nilai prediksi negatif ini merupakan konsekuensi matematis dari model kuadrat yang tidak dibatasi pada nilai $FFA \geq 0$, sehingga di sekitar titik minimum model dapat “melewati” nol. Oleh karena itu, nilai tersebut diinterpretasikan sebagai indikasi bahwa FFA sangat rendah atau mendekati nol pada kondisi optimum yang direkomendasikan model.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang berhasil menurunkan FFA hingga di bawah 1%, hasil optimasi ini sejalan dengan kecenderungan bahwa kombinasi suhu tinggi, rasio metanol cukup besar, dan katalis asam efektif dapat menghasilkan FFA yang sangat rendah. Perbedaannya, kondisi optimum pada penelitian ini menggunakan katalis pada level moderat dan waktu reaksi yang relatif singkat, sehingga dapat dianggap sebagai alternatif kondisi optimum yang lebih efisien dari sisi konsumsi bahan kimia dan waktu proses. Dengan demikian, hasil ini sekaligus memperkuat teori yang ada dan menawarkan variasi kondisi operasi yang lebih praktis untuk diaplikasikan.

Namun, karena nilai optimum ini masih bersifat hasil model, diperlukan **validasi eksperimen** pada titik tersebut untuk mengkonfirmasi nilai FFA aktual dan menghitung selisihnya terhadap prediksi.

Persamaan, Perbedaan, dan Keterbatasan Penelitian

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan beberapa persamaan dengan teori dan penelitian terdahulu, antara lain: suhu optimum esterifikasi berada pada kisaran 60–65°C, rasio metanol yang cukup besar membantu menurunkan FFA, dan katalis asam efektif digunakan sebagai pretreatment minyak jelantah ber-FFA tinggi. Persamaan ini menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh memperkuat dan mendukung teori serta temuan sebelumnya.

Di sisi lain, terdapat juga perbedaan yang dapat dipandang sebagai temuan baru, yaitu:

1. Penggunaan katalis pada konsentrasi moderat sudah cukup untuk mencapai FFA rendah bila dikombinasikan dengan suhu tinggi dan rasio metanol yang sesuai, sehingga memberikan alternatif kondisi proses yang lebih efisien.
2. Interaksi rasio molar–suhu ditampilkan secara jelas melalui contour dan surface plot, sehingga memberikan gambaran lebih rinci tentang cara kedua variabel tersebut bekerja bersama, bukan hanya secara terpisah.

Keterbatasan penelitian ini adalah model RSM yang digunakan belum divalidasi secara eksperimen pada titik optimum, dan masih terdapat ketidakpastian dalam prediksi yang tercermin dari interval kepercayaan yang cukup lebar. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk menambah jumlah run atau memperbaiki rancangan percobaan serta melakukan uji validasi di sekitar kondisi optimum untuk memperkuat kesimpulan yang diperoleh.

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Proses esterifikasi yang dilakukan pada minyak jelantah dengan FFA awal 3,75% mampu menurunkan FFA akhir (Respon_FFA) ke kisaran 1,74% - 22,83%, menunjukkan bahwa efektivitas penurunan FFA sangat bergantung pada kombinasi kondisi operasi yang diterapkan.
2. Variasi rasio molar metanol:minyak, konsentrasi katalis H_2SO_4 , dan suhu reaksi memberikan pengaruh yang nyata terhadap respon FFA. Kombinasi rasio molar dan katalis pada level moderat menghasilkan penurunan FFA yang lebih baik dibanding penggunaan katalis tinggi, sedangkan suhu tinggi (60–65°C) terbukti mempercepat proses esterifikasi.
3. Hasil contour plot dan surface plot menunjukkan adanya interaksi penting antara rasio molar dan suhu, di mana peningkatan rasio metanol baru efektif menurunkan FFA bila didukung oleh suhu yang cukup tinggi. Temuan ini memperkaya pemahaman bahwa efek masing-masing faktor tidak dapat dilihat secara terpisah.
4. Melalui response optimization, diperoleh kondisi optimum berdasarkan model RSM pada rasio molar 13,242, konsentrasi katalis 1,323%, suhu 65°C, waktu 17,58 menit, dan kecepatan pengadukan 700 rpm dengan nilai desirability 1,000. Pada kombinasi ini, model memprediksi FFA sangat rendah (mendekati nol), sehingga kondisi tersebut direkomendasikan sebagai pretreatment esterifikasi minyak jelantah sebelum proses transesterifikasi.
5. Secara umum, penelitian ini memperkuat teori dan hasil penelitian terdahulu mengenai pentingnya suhu dan rasio metanol dalam penurunan FFA, sekaligus menawarkan kombinasi kondisi operasi yang relatif lebih efisien dari sisi penggunaan katalis dan waktu reaksi.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian, beberapa saran yang dapat diajukan adalah:

1. Perlu dilakukan validasi eksperimen pada kondisi optimum yang diperoleh dari response optimization, serta pada beberapa titik di sekitarnya, untuk mengonfirmasi nilai FFA aktual dan mengevaluasi ketepatan model RSM.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi tahap transesterifikasi setelah pretreatment optimum ini, termasuk karakteristik biodiesel yang dihasilkan (angka setana, viskositas, densitas, dan lain-lain) sehingga diperoleh gambaran menyeluruh kinerja proses.
3. Disarankan menguji variasi sumber minyak jelantah dan/atau menggunakan katalis lain (misalnya katalis heterogen) guna menilai pengaruh kualitas bahan baku dan mempelajari alternatif proses yang lebih mudah dipisahkan serta dapat digunakan kembali.
4. Untuk memperkuat model statistik, penelitian lanjutan dapat melakukan penyempurnaan rancangan percobaan dengan menambah jumlah run dan titik pusat (center point), sehingga estimasi parameter dan uji lack-of-fit menjadi lebih reliabel.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan koreksi selama proses penelitian dan penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Laboratorium/Program Studi Teknik Industri Universitas Wijaya Putra (sesuaikan nama fasilitas) atas dukungan sarana dan prasarana yang diberikan selama pelaksanaan percobaan.

Tidak lupa penulis berterima kasih kepada rekan-rekan dan keluarga yang senantiasa memberikan dukungan moral, motivasi, serta bantuan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

- Al-Hamamre, Z., Sandouqa, A., Al-Saida, B., Shawabkeh, R. A., & Alnaief, M. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous KNO₃/Oil shale ash catalyst. *Renewable Energy*, 211, 470–483. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.05.025>
- Bai, H., Tian, J., Talifu, D., Okitsu, K., & Abulizi, A. (2022). Process optimization of esterification for deacidification in waste cooking oil: RSM approach and for biodiesel production assisted with ultrasonic and solvent. *Fuel*, 318(February), 123697. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123697>
- Juera-Ong, P., Pongraktham, K., Oo, Y. M., & Somnuk, K. (2022). Reduction in Free Fatty Acid Concentration in Sludge Palm Oil Using Heterogeneous and Homogeneous Catalysis: Process Optimization, and Reusable Heterogeneous Catalysts. *Catalysts* 2022, Vol. 12, Page 1007, 12(9), 1007. <https://doi.org/10.3390/CATAL12091007>
- Monika, Banga, S., & Pathak, V. V. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogenous catalysts. *Energy Nexus*, 10, 100209. <https://doi.org/10.1016/J.NEXUS.2023.100209>
- Ngomade, S. B. L., Tchuifon, R. D. T., Tagne, R. F. T., Ngueteu, M. L. T., Patai, H. M., Nche, G. N. A., & Anagho, S. G. (2022). Optimization by Response Surface Methodology of Biodiesel Production from Podocarpus falcatus Oil as a Cameroonian Novel Nonedible Feedstock. *Journal of Chemistry*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3786602>
- Rezki, B., Essamlali, Y., Aadil, M., Semlal, N., & Zahouily, M. (2020). Biodiesel production from rapeseed oil and low free fatty acid waste cooking oil using a cesium modified natural phosphate catalyst. *RSC Advances*, 10(67), 41065–41077. <https://doi.org/10.1039/d0ra07711a>
- Sofyan, M. I., Mailani, P. J., Setyawati, A. W., Sulistia, S., Suciati, F., Hauli, L., ... Joelianingsih, J. (2024). Use of Sulfuric Acid-Impregnated Biochar Catalyst in Making of Biodiesel From Waste Cooking Oil Via Leaching Method. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 19(1), 160–170. <https://doi.org/10.9767/BCREC.20113>
- Ulukardesler, A. H. (2023). *Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Different*.
- Yamin, J., Al-hamamre, Z., & Sandouqa, A. (2024). Modelling and optimisation of biodiesel production using waste cooking oil using the response surface methodology. *International Journal of Sustainable Energy*, 6451, 1–23. <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2355654>
- Zhang, B., Wang, X., Tang, W., Wu, C., Wang, Q., & Sun, X. (2023). *Carbon-Based Solid Acid Catalyzed Esterification of Soybean Saponin-Acidified Oil with Methanol Vapor for Biodiesel Synthesis*.