

Sintesis Biodiesel dari Minyak Jelantah dengan Katalis $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$

Fitriyani Yetti Handayani¹, Rochim Bakti Cahyono², dan Arief Budiman^{2*}

¹Program Studi Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta 55281

²Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta 55281

*Email: abudiman@ugm.ac.id

Abstract

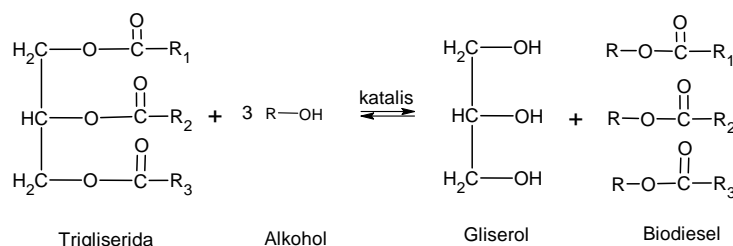
Biodiesel is an environmentally friendly alternative fuels. The price of biodiesel is still relatively expensive due to the high price of raw materials. Thus, cheaper raw materials such as used cooking oils can be used. Used cooking oils can be used to produce biodiesel by transesterification reaction using alcohol and catalyst. The effect of temperature on the conversion was studied in this research. The research was carried out in batch at various temperatures of 45, 55 and 65 °C by reacting used cooking oil and bioethanol with catalyst $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$. The ratio of used cooking oil and bioethanol is 1:9 and the concentration of catalyst is 3%. The reaction was run for 5, 10, 15, 30, 60, and 120 minutes, then the biodiesel was separated from the catalyst and glycerol. Furthermore, the biodiesel samples were analyzed by GC-MS to determine the alkyl ester content. The result showed that the highest conversion was 86.39% at 65°C. The biodiesel product complies with SNI 7182:2015, with a density of 871.7 kg/m³, kinematic viscosity of 4.82 mm²/s, flash point of 176°C, cloud point of 9°C, copper plate corrosion number 1, acid number 0.39 mg-KOH/g, total glycerol 0.16%, and ester content 98.3%.

Keywords: biodiesel; used cooking oil; bioethanol; $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$; transesterification

Pendahuluan

Energi adalah salah satu pilar utama bagi pembangunan ekonomi dan sosial suatu negara. Saat ini, kebutuhan energi dunia masih dipasok oleh sumber tak terbarukan, yang menyumbang sekitar 78% dari total energi. Sumber ini menghasilkan karbondioksida dan emisi gas rumah kaca yang memicu polusi, kerusakan lingkungan dan pemanasan global. Gas CO₂ ini menyebabkan perubahan iklim. Akibatnya pengurangan emisi menjadi sangat penting termasuk diantaranya pemanfaatan energi terbarukan. Oleh sebab itu, perlunya mencari alternatif non-fosil sistem energi berbasis bahan bakar yang terbarukan, berkelanjutan, ekonomis, dan ramah lingkungan (Erchamo *et al.*, 2021).

Biofuel adalah kandidat yang baik untuk energi terbarukan sebagai substitusi bahan bakar fosil yang ada (batu bara, minyak, dan gas bumi), karena *biofuel* sangat ramah lingkungan dan dapat mengurangi meningkatnya masalah pemanasan global dan ketidakstabilan harga bahan bakar fosil (Galadima and Muraza, 2020). Di antara banyak bahan bakar alternatif, biodiesel memiliki peluang untuk mengatasi masalah energi yang ada (Naeem *et al.*, 2021). Biodiesel adalah pengganti bahan bakar diesel, yang diperoleh dengan reaksi transesterifikasi lipid (biji/lemak hewan/mikroorganisme) dengan penambahan alkohol dan katalis (Fangfang *et al.*, 2021). Reaksi transesterifikasi merupakan reaksi antara trigliserida dan alkohol menghasilkan alkil ester (biodiesel) dan gliserol sebagai hasil samping, dengan reaksi seperti Gambar 1.



Gambar 1. Persamaan reaksi transesterifikasi trigliserida dengan alkohol

Dibandingkan dengan bahan bakar minyak bumi, biaya produksi biodiesel relatif tinggi. Bahan baku yang dapat digunakan untuk pembuatan biodiesel adalah minyak pangan seperti minyak kelapa sawit, minyak kedelai, minyak bunga matahari yang dikenal dengan biodiesel generasi 1, atau minyak non pangan seperti minyak jarak, lemak hewan, dan minyak goreng bekas adalah yang dikenal dengan biodiesel generasi 2 (Guo *et al.*, 2021). Di antara berbagai

bahan baku yang tidak dapat dimakan, minyak jelantah paling mudah tersedia dan lebih murah daripada minyak nabati murni. Pembuangan minyak jelantah secara ilegal dapat menghambat saluran pipa limbah dan menimbulkan pencemaran lingkungan yang merusak kehidupan flora dan fauna serta menyebabkan berbagai penyakit pada manusia (Naeem *et al.*, 2021).

Produksi biodiesel dari bahan baku minyak jelantah telah dilakukan beberapa peneliti. Seperti yang dilakukan Hamed *et al.* (2021), produksi biodiesel dari minyak jelantah direaksikan dengan metanol. Katalis yang digunakan adalah katalis homogen yaitu NaOH dan KOH. Hasil produksi biodiesel meningkat secara teratur dengan peningkatan reaksi suhu kemudian cenderung menurun setelah nilai maksimum. Konversi dan yield biodiesel maksimum menggunakan katalis KOH dan NaOH masing-masing adalah 97,76 dan 94,4%, dengan kondisi operasi optimum suhu reaksi 60 °C, waktu reaksi 3 jam, dan katalis pada berat 4%.

Produksi biodiesel dengan minyak jelantah juga telah dilakukan dengan pereaksi metanol dan katalisnya KOH. Kondisi optimum diperoleh pada suhu 66,5°C, rasio molar metanol dan minyak 6,18:1 dan 1% berat KOH menghasilkan kadar ester biodiesel 92,76%. Produk biodiesel yang dihasilkan memenuhi standar SNI Biodiesel dengan *specific gravity* 877 kg/m³, *viscosity kinematic* 4,971 mm²/s, *flash point* 180,5°C, dan *pour point* 3°C (Kawentar, 2013).

Minyak jelantah juga digunakan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel dengan pereaksi metanol, katalis bifungsional iron (Fe₂O₃ & Fe(NO₃)₃·9H₂O) pada CaO yang memiliki potensi untuk mengkatalisis esterifikasi dan transesterifikasi secara bersamaan. Persentase FAME yang diperoleh dengan katalis ini adalah 90% pada kondisi reaksi optimum: 10% berat besi di atas CaO, rasio metanol/minyak 12:1, 5% berat katalis, suhu reaksi 60 °C, tekanan atmosfer, dan 1 jam waktu reaksi (Gonzaga *et al.*, 2021).

Komintarachat dan Chuepeng (2020) juga melakukan penelitian tentang biodiesel dari minyak jelantah dengan reaktan etanol dan CaO dari cangkang kerang hijau diimpregnasi dengan KCl sebagai katalis. Hasil penelitian menunjukkan nilai maksimum FAEE sebesar 97% w/w dari kondisi optimum berikut: rasio katalis 4,0% w/w, rasio molar EtOH:WCO 10:1 pada 80°C dalam 3 jam.

Gutiérrez-Zapata *et al.* (2017) melakukan studi produksi biodiesel dari minyak bunga matahari dan minyak jelantah. Pereaksi yang digunakan metanol dan katalis yang digunakan adalah katalis homogen (NaOH) dan heterogen (K₂CO₃/γ-Al₂O₃ dan Na₂CO₃/γ-Al₂O₃). Dari studi yang dilakukan dilaporkan bahwa penggunaan katalis NaOH didapatkan konversi 97,60% untuk *sunflower oil* dan 95,40% untuk *used cooking oil*. Biodiesel dengan katalis Na₂CO₃/γ-Al₂O₃ diperoleh konversi 80,0% dengan *sunflower oil* dan 80,9% dengan *used cooking oil*. Konversi biodiesel dengan katalis K₂CO₃/γ-Al₂O₃ diperoleh 89,8% dengan *sunflower oil* dan 82,90% dengan *used cooking oil*.

Beberapa faktor yang mempengaruhi reaksi transesterifikasi, yaitu jenis alkohol, rasio molar alkohol dengan trigliserida, katalis, suhu reaksi dan air. Jenis alkohol yang dapat digunakan yaitu metanol, etanol, propanol, maupun butanol. Semakin pendek rantai C, semakin kecil hambatan steriknya sehingga akan mempermudah penyerangan gugus karbonil gliserida terhadap alkoksida. Rasio molar alkohol dengan trigliserida akan mempengaruhi kesetimbangan agar bergeser ke arah produk, sehingga digunakan alkohol berlebih. Katalis digunakan untuk meningkatkan laju reaksi sehingga reaksi berjalan lebih cepat. Pengaruh suhu terhadap reaksi transesterifikasi adalah suhu reaksi sebanding dengan laju reaksi, semakin tinggi suhu semakin cepat reaksinya. Akan tetapi kenaikan suhu akan menggeser kesetimbangan ke arah reaktan karena reaksi transesterifikasi termasuk reaksi eksotermis sehingga jumlah produk berkurang dan konversi turun. Selain itu suhu terlalu tinggi menyebabkan alkohol menguap, sehingga dipilih suhu di bawah titik didih alkohol. Umumnya reaksi dijalankan pada suhu 60-65°C. Adanya air akan menyebabkan terjadinya reaksi samping yang tidak diinginkan sehingga menyebabkan *yield* dari alkil ester menurun (Budiman dkk., 2017).

Berdasarkan tinjauan beberapa penelitian di atas, akan dipelajari pengaruh suhu terhadap produksi biodiesel dari minyak jelantah dan bioetanol secara *batch* dengan katalis padat berupa K₂CO₃/γ-Al₂O₃. Diharapkan terjadi proses pemurnian yang lebih sederhana, tingkat korosivitas yang rendah dan mampu menghasilkan biodiesel yang memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan sebagai bahan bakar.

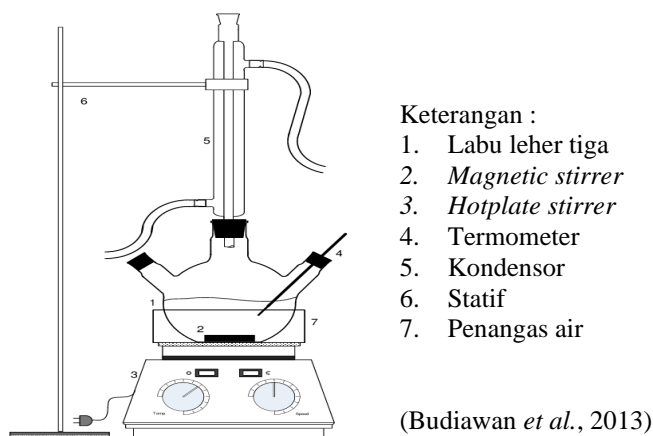
Metode Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu K₂CO₃, p.a. Merck dibeli dari CV. Aneka Medika Yogyakarta, γ-Al₂O₃, p.a. Merck dibeli dari CV. Aneka Medika Yogyakarta, bioetanol diperoleh dari PT. Madubaru dengan kadar 95%, dan minyak jelantah yang diperoleh dari suatu sekolah asrama di Yogyakarta. Nilai asam lemak dalam minyak jelantah ditentukan dengan GC-MS. Kandungan asam lemak terbanyak dalam minyak jelantah yaitu asam palmitat 29,19%, asam oleat, 26,11%, asam linoleat 9,55%, dan asam stearat 9,47%. Nilai asam lemak bebas minyak jelantah sebesar 0,64%.

Penelitian dimulai dengan menyiapkan katalis, dengan cara *support* katalis γ-Al₂O₃ dikalsinasi pada suhu 800°C di dalam *furnace* selama 3 jam. Kemudian γ-Al₂O₃ diimpregnasi dengan larutan K₂CO₃ 35% selama 1 jam. Katalis hasil impregnasi kemudian dikeringkan di dalam oven selama 24 jam dan dikalsinasi di *muffle furnace* pada suhu 900°C selama 4 jam. Katalis K₂CO₃/γ-Al₂O₃ selanjutnya dilakukan karakterisasi untuk mengetahui luas permukaan, volume, rerata jari-jari pori katalis, dan struktur kristalnya.

Langkah berikutnya adalah penyiapan bahan baku minyak jelantah dan bioetanol. Minyak jelantah sebelum digunakan reaksi transesterifikasi, dilakukan penyaringan dan pemanasan. Penyaringan dilakukan untuk memisahkan partikel padat yang terikut, sedangkan pemanasan dilakukan untuk menghilangkan air yang akan mengganggu reaksi transesterifikasi. Penyiapan bioetanol dilakukan dengan cara *mereflux* campuran bioetanol 95% dan kapur tohor selama 1 jam. Setelah didiamkan 30 menit, dilakukan distilasi. Selanjutnya dilakukan pengujian kadar bioetanol dengan alkoholmeter. Langkah ini dilakukan sampai mendapatkan etanol dengan kemurnian mendekati 100%.

Reaksi transesterifikasi dilaksanakan dengan cara bioetanol dan katalis dicampur lalu dipanaskan ke dalam labu leher tiga yang dilengkapi dengan pendingin balik, termometer dan saluran air pendingin sampai suhu reaksi yang diinginkan seperti pada Gambar 2. Minyak jelantah dengan massa yang sesuai dipanaskan di dalam gelas beaker sampai suhu reaksi yang digunakan. Minyak jelantah yang suhunya telah seragam dicampurkan ke dalam campuran bioetanol dan katalis heterogen yang telah dipanaskan. Selanjutnya, dilakukan pengadukan dengan *magnetic stirrer* dan suhu diatur agar konstan selama waktu reaksi. Penelitian dilakukan dengan variasi suhu reaksi 45, 55, dan 65°C dengan konsentrasi katalis 3% berat minyak jelantah dan rasio mol minyak jelantah terhadap bioetanol adalah 1:9.



Gambar 2. Rangkaian alat reaksi transesterifikasi

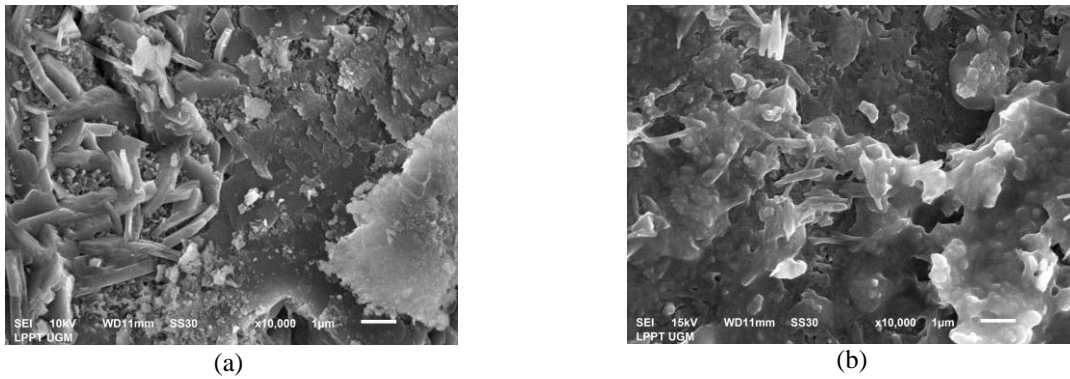
Hasil reaksi transesterifikasi dilakukan penyaringan dengan bantuan pompa vakum untuk memisahkan katalis. Selanjutnya dilakukan pemisahan biodiesel dari gliserol dengan cara dekantasi di dalam corong pisah selama 24 jam. Kemudian biodiesel dilakukan pencucian dilanjutkan pengovenan pada suhu 110°C selama 4 jam. Analisis kadar alkil ester pada biodiesel dilakukan dengan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)*. Analisis kuantitatif tersebut dilakukan di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu Universitas Gadjah Mada. Konversi dihitung dengan persamaan (1).

$$\text{Konversi (\%)} = \frac{\text{mol trigliserida yang bereaksi}}{\text{mol minyak jelantah mula-mula}} \times 100\% \quad (1)$$

Sedangkan pengujian produk biodiesel untuk beberapa parameter dilakukan di Laboratorium Teknik Pengolahan Migas dan Petrokimia SMKN 2 Depok. Parameter yang diuji antara lain massa jenis, viskositas kinematik, titik nyala, titik kabut, korosi lempeng tembaga, angka asam, kadar gliserol, dan kadar ester.

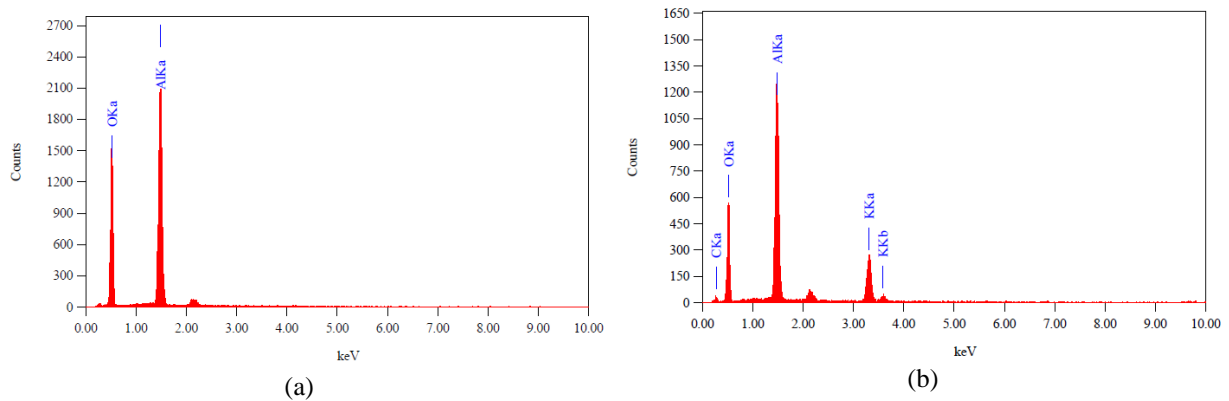
Hasil dan Pembahasan

Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah katalis heterogen untuk mempercepat reaksi transesterifikasi. Katalis dibuat dengan metode impregnasi dengan K_2CO_3 yang diimbangkan dalam $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Setelah impregnasi, katalis dikalsinasi di *furnace* pada suhu 900°C. Katalis dilakukan karakterisasi dengan metode adsorpsi BET dan SEM-EDX-Morfologi. Karakterisasi dengan metode adsorpsi BET (Brunauer–Emmett–Teller) didapatkan luas permukaan 9,852 m²/g, total volume pori 6,917e-02 cc/g, dan jari-jari rerata 19,875 Å. Sedangkan karakterisasi katalis dengan metode SEM (*Scanning Electron Microscope*) disajikan pada Gambar 3 dan metode EDX (*Energy Dispersive X-Ray*) disajikan pada Gambar 4.



Gambar 3. Karakterisasi katalis dengan metode SEM (a) $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (b) $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

Gambar 3a adalah permukaan molekul $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ sebelum dilakukan impregnasi masih terlihat amorf dan kristal masih belum teratur. Sedangkan Gambar 3b adalah permukaan molekul $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ setelah diimpregnasi dengan K_2CO_3 yang terlihat masih amorf tetapi strukturnya lebih teratur. Impregnasi ini bertujuan untuk meningkatkan sisi aktif dengan mengembankan logam aktif pada permukaan *support* katalis.



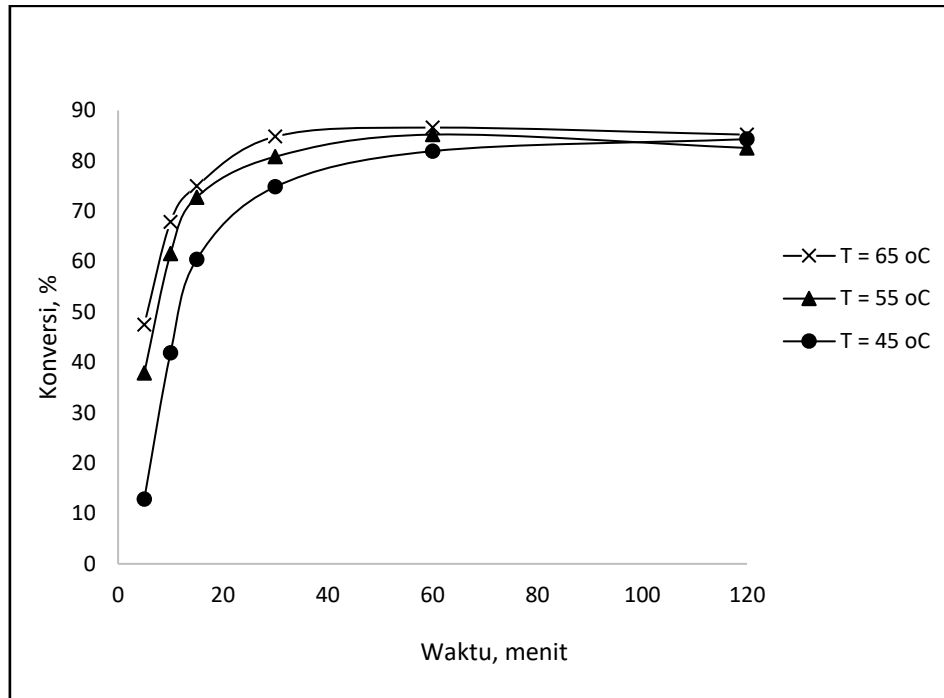
Gambar 4. Karakterisasi katalis dengan EDX (a) $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (b) $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

Gambar 4 menunjukkan spektrum EDX katalis sebelum dilakukan impregnasi (a) dan setelah impregnasi (b). Terlihat bahwa setelah impregnasi terdapat elemen K sedangkan sebelum impregnasi tidak ada. Berdasarkan analisis metode EDX terdapat elemen K sebesar 13,95% massa. Elemen K ini yang akan menjadi gugus aktif dalam reaksi transesterifikasi.

Pengaruh suhu dan waktu reaksi terhadap konversi dipelajari pada variasi suhu 45, 55, dan 65 °C untuk waktu reaksi 5, 10, 15, 30, 60, dan 120 menit. Kondisi reaksi dipilih pada penelitian ini, yaitu rasio mol minyak jelantah terhadap etanol adalah 1:9 dan konsentrasi katalis 3% berat. Data konversi terhadap waktu pada berbagai suhu dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 5.

Tabel 1. Pengaruh Suhu Reaksi terhadap Konversi
 (Rasio Minyak Jelantah/Etanol = 1:9, Konsentrasi Katalis = 3%)

Waktu, menit	Konversi, %		
	T = 45 °C	T = 55 °C	T = 65 °C
5	12,8641	37,8488	47,4813
10	41,8871	61,5709	67,8461
15	60,4279	72,7550	75,0022
30	74,8353	80,8211	84,8024
60	81,9201	85,2009	86,5926
120	84,2961	82,5528	85,1804



Gambar 5. Pengaruh suhu reaksi terhadap konversi

Laju reaksi transesterifikasi dipengaruhi suhu reaksi karena dengan meningkatnya suhu, energi aktivasi akan cepat tercapai. Dari Tabel 1 dan Gambar 5 dapat dilihat bahwa semakin tinggi suhu reaksi, maka dalam skala molekuler, laju pergerakan setiap molekul akan semakin cepat sehingga frekuensi tumbukan antar molekul akan meningkat dan reaksi semakin cepat. Hal ini ditunjukkan dengan konversi yang dihasilkan semakin besar dengan meningkatnya suhu reaksi. Seperti yang dilakukan Hamed *et al.* (2017) yang menyatakan bahwa hasil produksi biodiesel meningkat secara teratur dengan peningkatan reaksi suhu kemudian cenderung menurun setelah nilai maksimum. Dapat dilihat juga terjadi peningkatan konversi yang besar pada awal reaksi karena beda konsentrasi yang menjadi *driving forcenya* besar. Akan tetapi setelah waktu 60 menit, konversi cenderung konstan bahkan sedikit turun karena menurunnya aktivitas katalis dan dapat dikaitkan dengan reversibilitas proses. Untuk alasan ini, suhu 65°C dan waktu reaksi 60 menit ditetapkan sebagai suhu dan waktu optimum untuk mencapai kinerja maksimum.

Produk biodiesel dilakukan beberapa pengujian untuk mengetahui kesesuaiannya dengan SNI biodiesel (SNI 7182:2015). Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan di Laboratorium Teknik Pengolahan Migas dan Petrokimia SMKN 2 Depok, didapatkan hasil pengujian seperti yang tertera pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Biodiesel dari Minyak Jelantah dan Bioetanol dengan Katalis $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$

No	Parameter	Satuan, min/maks	Hasil Pengujian	SNI Biodiesel
1.	Massa jenis pada 40 °C	kg/m ³	871,7	850 – 890
2.	Viskositas kinematik pada 40 °C	mm ² /s	4,82	2,3 – 6,0
3.	Titik nyala	°C, min	176	100
4.	Titik kabut	°C, maks	9	18
5.	Korosi lempeng tembaga (3 jam pada 50 °C)		Nomor 1	Nomor 1
6.	Angka asam	mg-KOH/g, maks	0,39	0,5
7.	Gliserol total	%-massa, maks	0,16	0,24
8.	Kadar ester	%-massa, min	98,3	96,5

Berdasarkan Tabel 2 terlihat bahwa kedelapan hasil uji biodiesel menunjukkan nilai yang memenuhi SNI biodiesel, sehingga biodiesel dari minyak jelantah berpotensi untuk mensubstitusi kebutuhan biodiesel di Indonesia. Hal ini dikarenakan harga minyak jelantah lebih murah dibandingkan minyak kelapa sawit yang saat ini menjadi bahan baku yang paling banyak digunakan untuk pembuatan biodiesel.



Kesimpulan

Biodiesel dapat disintesis dari minyak jelantah dan bioetanol melalui reaksi transesterifikasi menggunakan katalis $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ 3% pada suhu reaksi 45, 55, dan 65 °C dengan rasio mol minyak jelantah dan bioetanol 1:9, selama 120 menit. Peningkatan suhu dan waktu akan meningkatkan konversi minyak jelantah menjadi biodiesel. Kondisi terbaik dicapai pada suhu 65°C dan waktu 60 menit dengan konversi minyak jelantah menjadi biodiesel 86,39%. Produk biodiesel yang dihasilkan memenuhi SNI 7182:2015 pada beberapa parameter yaitu massa jenis 871,7 kg/m³, viskositas kinematik 4,82 mm²/s, titik nyala 176 °C, titik kabut 9°C, korosi lempeng tembaga nomor 1, angka asam 0,39 mg-KOH/g, gliserol total 0,16%, dan kadar ester 98,3%.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada SMK Negeri 2 Depok Sleman yang telah menyediakan fasilitas alat dan bahan untuk menjalankan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Budiawan, R., Zulfansyah, Fatra, W., & Helwani, Z., Off-grade palm oil as a renewable raw material for biodiesel production by two-step processes, *Chemical Engineering on Science and Application* 2013; 21.
- Budiman, A. Kusumaningtyas, R.D., Pradana, Y.S., dan Lestari, N.A. *Biodiesel Bahan Baku, Proses, dan Teknologi*, Yogyakarta : Gadjah Mada University Press; 2017, hal. 39-41.
- Erchamo, Y.S., Mamo, T.T., Adam, G., and Mekonnen, Y.S. Improved biodiesel production from waste cooking oil with mixed methanol-ethanol using enhanced eggshell-derived CaO nano-catalyst. *Sci. Rep.* 2021; 11:6708.
- Fangfang, F., Alagumalai, A., and Mahian, O. Sustainable biodiesel production from waste cooking oil : ANN modeling and environmental factor assesment. *Sustain. Energy Technol. and Assess* 2021; 46:101265.
- Galadima, A. and Muraza, O. Waste materials for production of biodiesel catalysts: Technological status and prospects. *J. Clean. Prod.* 2020; 263: 121358.
- Gonzaga, V.E., Romero, R., Gomez-Espinosa, R.M., Romero, A., Matinez, S.L., and Natividad, R. Biodiesel production from waste cooking oil catalyzed by a bifunctional catalyst. *ACS Omega* 2021; 6: 24092-24105.
- Guo, M., Jiang, W., Chen, C., Qu, S., Lu, J. and Ding, J., Process optimization of biodiesel production from waste cooing oil by esterification of fatty acids using $La^{3+}/ZnO-TiO_2$ photocatalyst, *Energy Convers. Manag.*, 2021; 229: 113745.
- Gutiérrez-Zapata, C.A., Martínez, D. B., Collazos, C. A., Acuña, H.E.C., Cuervo, J. A. and Fernandez, C.P. Productions of sunflower oil biodiesel and used cooking oil through heterogeneous catalysts compared to conventional homogeneous catalysts. *J. Phys. Conf.* 2017; 786 (1): 012025.
- Hamed, H.H., Mohammed, A.E., Habeeb, O.A., Ali, O.M, Aljaf, O.S, and Abdulqader, M.A. Biodiesel production from waste cooking oil using homogeneous catalyst. *Egypt. J. Chem.* 2021; 64 (6): 2827-2832.
- Kawentar, W.A. and Budiman, A. Synthesis of biodiesel from second-used cooking oil. *Energy Procedia* 2013; 32: 190-199.
- Komintarachat, C. and Chuepeng, S. Catalytic enhancement of calcium oxide from green mussel shell by potassium chloride impregnation for waste cooking oil-based biodiesel production. *Bioresour. Technol. Rep.* 2020; 12: 100589.
- Naeem, A., Khan, I.W., Farooq, M., Mahmood, T., Din, I.U., Ghazi, Z.A., and Saeed, T. Kinetic and optimization study of sustainable biodiesel production from waste cooking oil using novel heterogeneous solid base catalyst. *Bioresour. Technol.* 2021; 328: 124831.

