

SINTESIS BIODIESEL DARI MINYAK DEDAK PADI DENGAN KATALIS PADAT DARI LIMBAH PENGOLAHAN BAUKSIT (*RED MUD*)

Arif Hidayat^{1*}, Yosef Budiman^{1,2}, Maharani Fatimah Azzahra¹, Tsabita Yamna Putri R.¹

¹ Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia
Jalan Kaliurang KM 14.5, Ngemplak, Sleman, Yogyakarta, 55584.

² Departemen Teknik Mesin dan Otomotif, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Yogyakarta
Jalan Mandung, Pengasih, Kulonprogo, Yogyakarta, 55652.

*Email: arif.hidayat@uii.ac.id

Abstrak

Red mud, a solid waste from extraction process of bauxite mineral in Alumina Industry, was utilized as a solid catalyst for biodiesel production from rice bran oil. Red mud catalyst was prepared at calcination temperature of 800 °C and calcination time of 4 hours. The performance of this catalyst will be evaluated in terms of molar ratio of oil to methanol to, reaction temperature, and catalyst concentration. The results show that biodiesel yield is increasing by increasing molar ratio of methanol to oil, reaction temperature and catalyst concentration. The optimum reaction conditions were obtained at 65 °C of reaction temperature, 1:12 of oil to methanol molar ratio, and 10% of catalyst amount. The highest biodiesel yield of 85% was obtained. Red mud catalyst has potential as an effective and economic viability as heterogeneous catalyst for biodiesel production, while offering a solution in the sustainable utilization of industrial waste.

Keywords: *biodiesel, heterogeneous catalyst, red mud, rice bran oil*

Abstrak

Lumpur merah yang merupakan limbah padat dari proses ekstraksi Aluminium dari bauksit pada Industri Alumina, digunakan sebagai katalis padat untuk produksi biodiesel dari minyak dedak padi. Katalis lumpur merah dibuat pada suhu kalsinasi 800 °C dan waktu kalsinasi 4 jam. Kinerja katalis ini akan dievaluasi dalam hal rasio molar minyak terhadap metanol, suhu reaksi, dan konsentrasi katalis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa yield biodiesel meningkat dengan meningkatnya rasio molar metanol terhadap minyak, suhu reaksi dan konsentrasi katalis. Kondisi reaksi optimum diperoleh pada suhu reaksi 65 °C, perbandingan molar minyak terhadap metanol 1:12, dan jumlah katalis 10% dengan perolehan biodiesel tertinggi sebesar 85,2%. Katalis lumpur merah memiliki potensi sebagai katalis heterogen yang efektif dan ekonomis untuk produksi biodiesel, sekaligus menawarkan solusi dalam pemanfaatan limbah industri secara berkelanjutan.

Kata kunci: *biodiesel, katalis, lumpur merah, minyak dedak padi*

1. PENDAHULUAN

Bahan bakar fosil masih menjadi sumber daya bahan bakar yang digemari saat ini. Namun, penggunaan bahan bakar dari sumber energi ini dapat menyebabkan kerusakan ekologi yang serius, seperti pemanasan global, hujan asam, serta efek rumah kaca. Selain masalah lingkungan yang serius, sumber energi ini juga perlu dicari alternatifnya sebab juga mampu berdampak pada menurunnya cadangan minyak mentah dan fluktuasi harga. Biodiesel menjadi sumber energi alternatif potensial pengganti bahan bakar solar karena beberapa kelebihan, antara lain terbarukan, *biodegradable*, titik nyala tinggi, efisiensi

pembakaran tinggi, angka setana tinggi, kandungan sulfur rendah, dan tidak terlalu merusak lingkungan. Biodiesel mampu diproduksi dengan sumber lemak hewani ataupun minyak nabati dengan menggunakan reaksi transesterifikasi. Transesterifikasi atau disebut juga alkoholisis adalah reaksi kimia dari pencampuran alkohol dengan bahan minyak dari tumbuhan ataupun lemak hewan yang mampu membentuk alkil ester dan gliserol.

Katalis asam homogen (HCl, H₂SO₄, dan lain-lain) dan katalis alkali homogen (KOH, NaOH, CH₃ONa, dan lain-lain) secara konvensional telah digunakan untuk produksi

biodiesel. Katalis alkali homogen biasanya digunakan untuk mengkatalisis reaksi transesterifikasi karena aktivitas katalitiknya yang tinggi. Namun demikian, reaksi transesterifikasi yang dikatalisis oleh katalis alkali homogen memiliki beberapa kelemahan seperti pemurnian yang kompleks, pembentukan sabun, kesulitan dalam pemulihan katalis serta pembentukan massa air limbah. Oleh karena itu, katalis heterogen padat mendapatkan banyak perhatian dari para peneliti.

Aplikasi katalis heterogen padat telah mendapatkan perhatian dalam produksi biodiesel beberapa tahun terakhir. Katalis heterogen padat tidak dikonsumsi atau dilarutkan dalam campuran reaksi yang membuatnya lebih mudah dilepaskan dari produk. Di samping itu, katalis diregenerasi dan digunakan lagi (*reuse*) pada reaksi yang sama, sehingga mengurangi konsumsi katalis dan biaya yang terkait pembelian katalis. Produksi biodiesel dengan menggunakan katalis padat juga menawarkan beberapa manfaat termasuk non korosif, pemisahan mudah dan umur katalis yang lebih lama.

Penggunaan pengemban (*support*) katalis mampu mengurangi batasan pemindahan massa saat reaksi heterogen guna meningkatkan kinerja reaksi. Beberapa jenis katalis heterogen yang digunakan dalam reaksi transesterifikasi untuk produksi biodiesel, misalnya CaO (Tang dkk., 2013), KF/bentonite (Costa dan Lima, 2021), resin penukar anion (Ren dkk., 2012), WO_3/ZrO_2 (Guldhe dkk., 2017), katalis berbasis Li (Dai dkk., 2017), dan lain-lain. Katalis heterogen memiliki beberapa keunggulan seperti korosi yang rendah pada peralatan, umur katalis yang panjang dan aktivitas katalitik yang tinggi dalam penggunaan (Chen dkk., 2020). Selain itu, katalis heterogen akan lebih mudah dilepas dari sistem reaksinya dan sedikit air limbah dan sabun akan dihasilkan, sehingga meminimalkan dampak pencemaran lingkungan.

Katalis padat berbasis logam antara lain: zeolit, logam karbonat, ion logam alkali, oksida alkali tanah, dan lain-lain banyak digunakan untuk sintesis biodiesel. Joshi dkk. (2015) telah mengevaluasi konversi biodiesel minyak jarak dan karanja yang mengandung asam lemak bebas tinggi melalui transesterifikasi oleh oksida campuran logam berbasis CaO (Joshi dkk., 2015). Martínez dkk. (2014) menggunakan senyawa Na_2O yang diembankan

pada katalis zeolit faujasite (NaX) untuk transesterifikasi minyak bunga matahari dan diperoleh konversi metil ester sebesar 99,3% dengan 10% berat katalis dan rasio alkohol terhadap minyak 6:1. Dai dkk. (2015) menggunakan katalis LiAlO_2 untuk produksi biodiesel dari minyak kedelai. Katalis yang dikalsinasi pada 900°C menunjukkan hasil maksimum 97,5% dengan konsentrasi katalis 8%, waktu reaksi 2 jam dan rasio molar 24:1.

Katalis seperti alumina atau silika menjadi salah satu jenis katalis yang mampu diperoleh secara komersial, hanya saja penggunaannya terhambat sebab harganya yang mahal. Dengan demikian, karbon aktif menjadi alternatif menekan biaya produksi untuk pembuatan biodiesel (Hameed dkk., 2009). Sebelumnya, penelitian mengenai potensi karbon aktif sebagai dukungan katalis dengan impregnasi logam aktif telah beberapa kali dilakukan, hal ini tentu turut membuat peningkatan kinerja katalitiknya.

Vadery dkk. (2014) menyatakan bahwa perlakuan kimia dengan senyawa yang mengandung Kalium atau Kalsium telah meningkatkan kemampuan katalitik katalis dengan secara signifikan. Sejumlah besar situs aktif dalam katalis ditunjukkan oleh porositas permukaan yang menyediakan situs adsorpsi yang cukup membuat reaksi. Dalam studi lain oleh Chakraborty dkk. (2010) menyimpulkan bahwa jumlah yang tinggi dari SiO_2 dan Al_2O_3 dari fly ash dapat dimanfaatkan untuk pembuatan katalis yang murah dibandingkan dengan yang konvensional. Beberapa abu biomassa telah dipelajari sebagai katalis basa padat diantaranya adalah abu polong kulit kakao (Boateng dan Lee, 2013), sabut kelapa abu (Vadery dkk., 2014), dan abu tandan sawit kosong (Riadi dkk., 2014).

Dalam beberapa tahun terakhir, untuk mengurangi biaya produksi biodiesel dan menghindari penumpukan limbah di lingkungan dilakukan peneliti untuk memanfaatkan limbah industri untuk berbagai keperluan. Limbah bauksit (*red mud*) atau lumpur merah hasil pencucian/pengolahan bijih bauksit yang memiliki komposisi utama oksida logam, antara lain SiO_2 , aluminium oksida, titanium oksida, besi oksida, serta lainnya. Lumpur merah memiliki pH basa yang kuat berada dalam kisaran 10-13, terutama disebabkan oleh penggunaan larutan Natrium Hidroksida (NaOH) yang digunakan dalam pengolahan biji alumina. Alkalinitas yang tinggi dalam lumpur

merah dapat digunakan sebagai katalis untuk produksi biodiesel.

Beberapa peneliti telah mengeksplorasi penggunaan lumpur merah sebagai katalis dalam sintesis biodiesel. Araujo dkk. (2021) menyiapkan katalis asam magnetik dari lumpur merah dan biji acai untuk produksi biodiesel. Katalis sintetik dapat dengan mudah dipisahkan setelah reaksi dan ditampilkan dapat digunakan kembali dengan sangat baik setelah tiga siklus. Zhang dkk. (2016) menyiapkan KF/lumpur merah sebagai katalis dasar untuk produksi biodiesel dari minyak jarak, konversi 92,2% dicapai pada kondisi reaksi yang optimal. Di dalamnya, situs aktif dasar dapat terbentuk karena interaksi antara kalium fluorida (KF) dan beberapa komponen lumpur merah, menghasilkan aktivitas katalitik KF/lumpur Merah yang tinggi (Alves dkk., 2014). Untuk mengurangi bahaya lumpur merah dan meningkatkan penggunaan lumpur merah secara efektif sebagai sumber daya material, sangat diinginkan untuk membuat katalis heterogen berbasis lumpur merah untuk produksi biodiesel dengan menggunakan komponen berharga yang terkandung dalam lumpur merah.

Liu dkk. (2013) berusaha untuk menghasilkan katalis padat yang sangat aktif dan murah dengan mengkalsinasi lumpur merah pada suhu 200 °C. Proses kalsinasi akan membantu menghilangkan oksida besi tinggi dari lumpur merah dan mengubah lumpur merah menjadi katalis aktif (Senthil dkk., 2013). Studi tersebut melaporkan bahwa penambahan 4% berat katalis terkalsinasi pada rasio molar minyak kedelai metanol 24:1 pada suhu reaksi tetap 65 °C selama 3 jam dapat menghasilkan hasil lebih dari 94%. Selain kalsinasi sederhana, kalsinasi soda-kapur dan memuat berbagai senyawa kimia dan biologi ke lumpur merah akan meningkatkan aktivitas katalitiknya seperti yang dilaporkan dalam literatur. Wahyudi dkk. (2017) melaporkan bahwa dengan mensintesis katalis melalui proses kalsinasi soda-kapur, rendemen biodiesel dapat mencapai 99%.

Penelitian oleh Zhang dkk. (2016) membuktikan bahwa penambahan potasium fluorida (KF) ke lumpur merah juga akan meningkatkan aktivitas katalitiknya. Dari hasil analisis XRD terlihat bahwa fase kristal baru $KFeF_4$ terbentuk selama penambahan KF ke lumpur merah. Ba dkk. (2022) menggunakan katalis berbasis Lithium yang diimbangkan pada

lumpur merah untuk memproduksi biodiesel minyak jarak. Peneliti lain, Zhang dkk. (2016) menggunakan katalis KF/lumpur merah untuk produksi biodiesel dari minyak jarak pagar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis KF /lumpur merah menghasilkan konversi 92,2% pada kondisi reaksi yang optimal. Lumpur merah memiliki efek yang signifikan ketika dipilih sebagai bahan baku untuk menyiapkan katalis untuk memproduksi biodiesel.

Minyak dedak padi atau *rice bran oil* berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel karena merupakan limbah pertanian dan tidak dapat dimakan sehingga dapat mengurangi biaya produksi biodiesel. Produksi gabah kering giling di Indonesia yang mencapai 53,98 juta ton pada tahun 2023 akan menghasilkan dedak padi dalam jumlah besar. Dedak padi adalah lapisan coklat antara inti padi dan sekam padi bagian luar yang diperoleh selama proses penggilingan, pemutihan, dan pemolesan beras dan merupakan produk samping dari penggilingan gabah. Dedak padi selama ini hanya digunakan sebagai pakan ternak atau dibakar sebagai bahan bakar padat yang murah. Kandungan minyak dedak padi berkisar antara 16-32% tergantung pada jenis beras dan tingkat penggilingan. Minyak dedak padi tidak cocok untuk keperluan makan karena kandungan asam lemak bebas dalam bentuk lipase aktif yang tinggi. Hal ini telah menarik minat untuk mengkonversi minyak dedak padi yang tidak dapat dimakan menjadi biodiesel di daerah-daerah yang menghasilkan dedak padi dalam jumlah besar.

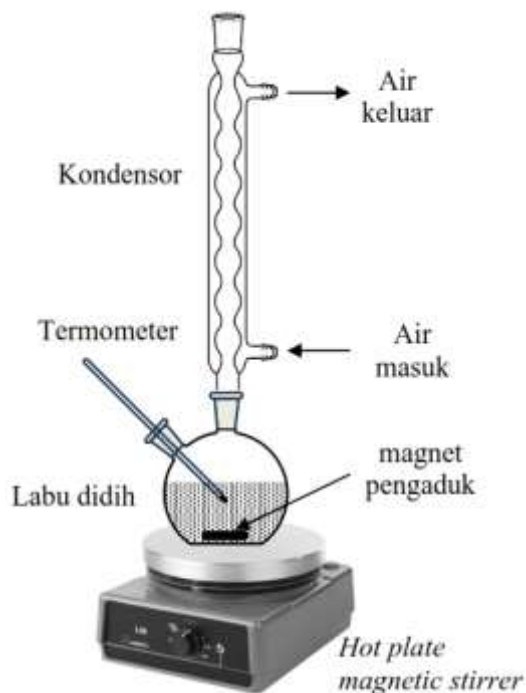
Penelitian terkait pemanfaatan lumpur merah sebagai katalis untuk produksi biodiesel menggunakan minyak dedak padi sebagai bahan baku belum dilakukan. Penggunaan lumpur merah akan menaikkan nilai ekonomi limbah tersebut tersebut, sekaligus memberikan alternatif penggunaan katalis heterogen.

2. METODE PENELITIAN

Bahan dan Alat

Minyak dedak padi yang digunakan dalam penelitian ini dijual secara komersial dan diperoleh dari Supermarket di Kota Yogyakarta, Metanol p.a, dari Merck dan aquadest dibeli dari Toko Bahan Kimia di Kota Yogyakarta. Alat yang digunakan selama proses penelitian ialah: peralatan gelas, oven, furnace, timbangan digital, ayakan, lumpang porselen, kertas saring, kurs, serta pengaduk

magnet. Rangkaian alat penelitian sintesis biodiesel dari minyak dedak padi memanfaatkan katalis padat dari lumpur merah dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Alat Penelitian yang Digunakan

Preparasi dan Sintesis Katalis dari Lumpur Merah

Mulanya, lumpur merah digerus dalam lumpang porselen yang kemudian diayak hingga ukurannya 100 mesh untuk mendapatkan ukuran yang seragam. Selanjutnya lumpur merah dikalsinasi di dalam furnace pada suhu 800 °C dengan kecepatan pemanasan 5 °C / menit. Kalsinasi dilakukan selama 4 jam. Setelah proses kalsinasi selesai, katalis didinginkan sampai suhu ruangan dan disimpan ke dalam wadah tertutup.

Uji Aktivitas Katalis Padat dari Lumpur Merah untuk Sintesis Biodiesel

Uji aktivitas pada katalis lumpur merah dilakukan dengan transesterifikasi pada minyak dedak padi. Minyak dedak padi dengan massa tertentu dicampur dalam sejumlah larutan metanol dalam labu leher tiga, larutan tersebut kemudian ditambahkan dengan katalis lumpur merah dengan massa tertentu. Pelarutan ketiga bahan, minyak dedak padi, katalis lumpur merah, serta metanol diaduk selama 120 menit dengan kecepatan tertentu. Biodiesel yang telah terbentuk dituang dalam corong pisah agar

produk biodiesel dapat terpisah dengan gliserolnya. Cairan kemudian didiamkan hingga terbentuk dua fase yang secara jelas dapat dilihat terpisah, kurang lebih satu hari semalam. Hasil bawah yang berupa gliserol ditampung, sedangkan hasil atas yang merupakan biodiesel diukur volumenya. Perolehan biodiesel dihitung dengan persamaan (1).

$$\text{Perolehan biodiesel} = \frac{m_{\text{biodiesel}}}{m_{\text{minyak}}} \times 100\% \dots (1)$$

Dimana:

$m_{\text{biodiesel}}$: massa biodiesel yang diperoleh setelah reaksi (gram)

m_{minyak} : Massa minyak mula-mula sebelum reaksi (gram)

Variabel yang dipelajari dalam penelitian ini adalah perbandingan massa minyak dedak padi dengan metanol, jumlah katalis, dan suhu reaksi.

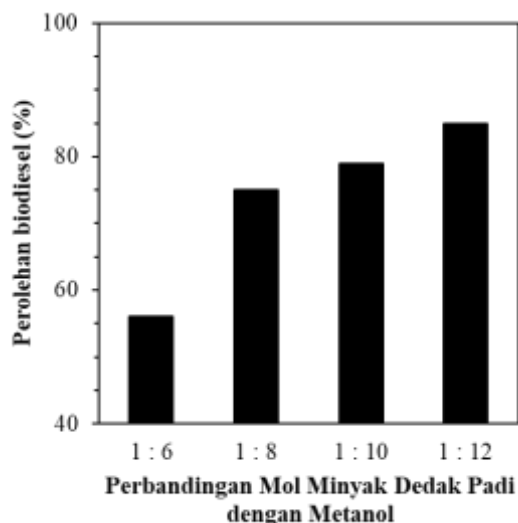
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui kemampuan katalis dari lumpur merah sebelum dan sesudah aktivasi dilakukan serangkaian uji aktivitas untuk reaksi transesterifikasi minyak dedak padi. Pada penelitian ini dipelajari beberapa variabel yang berpengaruh terhadap perolehan biodiesel dari minyak dedak padi yang dihasilkan, yaitu: perbandingan massa minyak dedak padi dengan metanol, jumlah katalis, dan suhu reaksi.

Pengaruh Perbandingan Mol Minyak Dedak Padi dengan Metanol terhadap Perolehan Biodiesel

Perbandingan mol metanol terhadap minyak merupakan parameter penting yang mempengaruhi perolehan biodiesel dalam reaksi transesterifikasi. Reaksi transesterifikasi merupakan reaksi dapat balik (*reversible*) yang dibatasi oleh keadaan kesetimbangan. Untuk dapat menggeser kesetimbangan ke arah pembentukan produk, salah satu usaha yang dapat dilakukan adalah membuat jumlah mol pereaksi berlebihan. Pada penelitian ini jumlah mol metanol dibuat berlebihan. Hasil penelitian pengaruh perbandingan mol minyak dedak padi dengan metanol terhadap konversi perolehan biodiesel dapat dilihat pada Gambar 2. Dari Gambar 2 terlihat bahwa semakin besar perbandingan mol minyak dedak padi dengan metanol, konversi reaksi meningkat, karena peluang terjadinya tumbukan antara zat-zat

pereaksi semakin besar, sehingga dalam waktu yang sama, konsentrasi metanol yang lebih besar akan menghasilkan konversi yang lebih besar. Gambar juga menunjukkan bahwa pada perbandingan mol minyak dedak padi dengan metanol = 1:10 dan 1:12 terjadi kenaikan, tetapi tidak signifikan seperti perbandingan 6 sampai 10. Hal ini disebabkan karena pada perbandingan pereaksi 1:12 sudah mulai mencapai konversi yang maksimum.



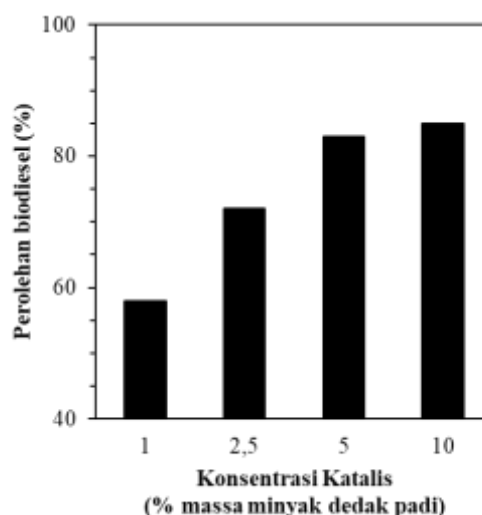
Gambar 2. Perolehan Biodiesel pada Berbagai Variasi Perbandingan Reaktan

Pengaruh Jumlah Katalis dengan Metanol terhadap Perolehan Biodiesel

Konsentrasi atau jumlah katalis yang digunakan selama reaksi adalah parameter penting lainnya yang mempengaruhi transesterifikasi minyak menjadi biodiesel. Katalis digunakan untuk memasok situs aktif untuk menurunkan energi aktivasi, sehingga memfasilitasi reaksi transesterifikasi menjadi lebih cepat. Jumlah katalis yang tidak mencukupi dapat menyebabkan konversi minyak menjadi ester asam lemak (biodiesel) yang tidak sempurna yang dapat disebabkan oleh terbatasnya jumlah situs aktif yang tersedia dalam reaksi. Selama reaksi transesterifikasi ketika konsentrasi katalis meningkat, jumlah situs aktif yang tersedia meningkat, yang mempercepat laju reaksi untuk mencapai kesetimbangan. Pada kesetimbangan, jumlah katalis berada pada titik optimal. Namun, di luar titik kesetimbangan, jumlah katalis yang lebih tinggi akan menghasilkan resistensi perpindahan massa yang lebih besar, pencampuran reaktan yang sulit, dan desorpsi

produk yang lebih rendah karena terbentuknya campuran kental. Hal ini menghalangi interaksi antara reaktan dan situs aktif katalis yang menyebabkan perolehan biodiesel yang lebih rendah. Gambar 3 menunjukkan pengaruh jumlah katalis yang digunakan terhadap perolehan biodiesel pada reaksi transesterifikasi minyak dedak padi dengan katalis lumpur merah.

Pada Gambar 3 terlihat bahwa perolehan biodiesel meningkat dengan naiknya konsentrasi katalis. Dari Gambar 3 juga dapat diamati bahwa perbedaan konversi pada konsentrasi katalis 1 % dan 2,5% lebih signifikan dibanding perbedaan konversi pada konsentrasi 5% dan 10 %. Hal ini disebabkan karena jumlah total situs aktif yang ada pada katalis sudah mulai mendekati jumlah maksimum yang dibutuhkan reaktan. Pada konsentrasi katalis di atas 5% terlihat ada peningkatan perolehan biodiesel dari konsentrasi katalis 5% menjadi 10%.



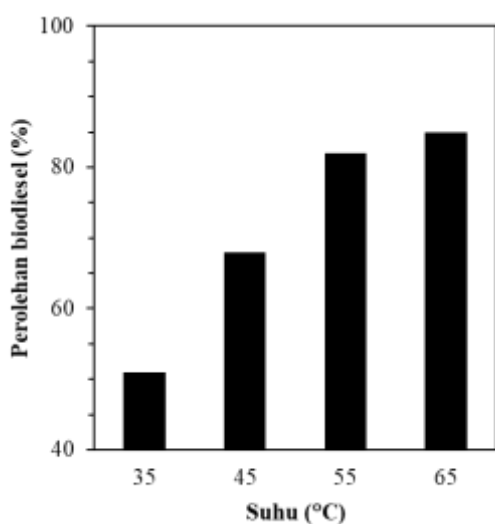
Gambar 3. Perolehan Biodiesel pada Berbagai Variasi Konsentrasi Katalis

Pengaruh Suhu Reaksi terhadap Perolehan Biodiesel

Suhu reaksi merupakan parameter penting dalam proses transesterifikasi karena terkait dengan kinetika yang mempengaruhi transfer energi ke molekul reaktif yang terlibat dalam reaksi. Transesterifikasi adalah reaksi endotermik yang membutuhkan suhu reaksi yang lebih tinggi untuk menyediakan energi yang cukup, mengurangi viskositas, dan mendukung laju reaksi yang lebih tinggi untuk meningkatkan perolehan biodiesel yang lebih tinggi. Selain itu, suhu tinggi meningkatkan

kelarutan reaktan, meningkatkan persentase aktivasi secara molekuler, meningkatkan interaksi antara reaktan dan gugus aktif katalis, dan mempercepat difusi molekul reaktan. Meskipun demikian, suhu yang sangat tinggi akan mengonsumsi banyak energi dan mendorong penguapan metanol sehingga membentuk sistem dua fase yang dapat menurunkan laju reaksi. Selain itu, beberapa penelitian menunjukkan bahwa penyabunan trigliserida terjadi pada suhu yang tinggi, yang menghasilkan sejumlah besar gelembung yang menghambat reaksi dan menghasilkan perolehan biodiesel yang lebih rendah. Suhu yang rendah akan menghalangi reaksi yang sesuai antara katalis, metanol, dan minyak dan mengurangi keceptan transfer massa pereaktan ke permukaan katalis heterogen. Oleh karena itu, suhu reaksi yang optimal diperlukan untuk mendapatkan hasil biodiesel terbaik.

Pengaruh suhu reaksi yang dipelajari pada penelitian ini adalah 35, 45, 55, dan 65 °C, sementara itu variabel lain dijaga tetap. Hubungan konversi tiap interval waktu pada berbagai suhu disajikan pada Gambar 4. Dari Gambar 4 terlihat bahwa perolehan biodiesel relatif meningkat dengan meningkatnya suhu reaksi. Hal ini disebabkan karena meningkatnya suhu akan menurunkan viskositas yang menjadikan *mixing* lebih baik sehingga transfer masa antar reaktan dan katalis lebih baik.



Gambar 4. Perolehan Biodiesel pada Berbagai Variasi Suhu Reaksi.

4. KESIMPULAN

Dari paparan hasil di atas dapat disimpulkan bahwa katalis lumpur merah dapat

dimanfaatkan untuk sintesis biodiesel dari minyak dedak padi. Aktivitas katalis lumpur merah untuk sintesis biodiesel dipengaruhi beberapa variabel, yaitu: perbandingan mol metanol dengan minyak, jumlah katalis, dan suhu reaksi. Peningkatan perbandingan mol metanol dengan minyak dan jumlah katalis akan meningkatkan perolehan biodiesel. Sedangkan kenaikan suhu juga akan meningkatkan perolehan biodiesel. Hasil uji aktivitas katalis dari lumpur merah untuk produksi biodiesel dari minyak dedak padi menunjukkan bahwa peningkatan perolehan biodiesel terjadi dengan kenaikan jumlah katalis dari 1% menjadi 10% massa minyak, yaitu dari 58% menjadi 85%. Untuk variasi perbandingan molar pereaktan, terjadi kenaikan perolehan biodiesel dari 56% menjadi 85% pada perbandingan molar pereaktan 1:6 meningkat menjadi 1:12. Kenaikan suhu reaksi akan menaikkan perolehan biodiesel yang dihasilkan dari 51% menjadi 85% terjadi pada peningkatan suhu dari 40 menjadi 60 °C.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Guldhe, P. Singh, F.A. Ansari, B. Singh, F. Bux, Biodiesel synthesis from microalgal lipids using tungstated zirconia as a heterogeneous acid catalyst and its comparison with homogeneous acid and enzyme catalysts, *Fuel* 187 (2017) 180-188.
- A. Wahyudi, W. Kurniawan, H. Hinode, Utilization of modified red mud as a heterogeneous base catalyst for transesterification of canola oil, *Journal of Chemical Engineering of Japan* 50(7) (2017) 561-567.
- B. Hameed, C. Goh, L. Chin, Process optimization for methyl ester production from waste cooking oil using activated carbon supported potassium fluoride, *Fuel Processing Technology* 90(12) (2009) 1532-1537.
- C. Ofori-Boateng, K.T. Lee, The potential of using cocoa pod husks as green solid base catalysts for the transesterification of soybean oil into biodiesel: Effects of biodiesel on engine performance, *Chemical Engineering Journal* 220 (2013) 395-401.
- G. Joshi, D.S. Rawat, B.Y. Lamba, K.K. Bisht, P. Kumar, N. Kumar, S. Kumar, Transesterification of Jatropha and Karanja oils by using waste egg shell

- derived calcium based mixed metal oxides, *Energy Conversion and Management* 96 (2015) 258-267.
- H. Alves, A. Da Rocha, M. Monteiro, C. Moretti, M. Cabrelon, C. Schwengber, M. Milinsk, Treatment of clay with KF: New solid catalyst for biodiesel production, *Applied Clay Science* 91 (2014) 98-104.
- J. Ba, G. Wei, Z. Li, L. Zhang, R. Pei, J. Xu, Y. Zhou, Castor oil transesterification catalyzed by a new red mud based LiAlO₂-LiFeO₂ composite, *Energy Conversion and Management* 254 (2022) 115214.
- J. Chen, M. Li, M. Li, X. Lin, T. Qiu, Self-solidifying quaternary phosphonium-containing ionic liquids as efficient and reusable catalysts for biodiesel production, *ACS sustainable chemistry & engineering* 8(18) (2020) 6956-6963.
- J.M. da Costa, L.R.P. de Andrade Lima, Transesterification of cotton oil with ethanol for biodiesel using a KF/bentonite solid catalyst, *Fuel* 293 (2021) 120446.
- L. Riadi, E. Purwanto, H. Kurniawan, R. Oktaviana, Effect of bio-based catalyst in biodiesel synthesis, *Procedia Chemistry* 9 (2014) 172-181.
- L. Zhang, Y. Wang, G. Wei, Z. Li, H. Huang, Biodiesel preparation from Jatropha oil catalyzed by KF/Red mud catalyst, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 38(12) (2016) 1713-1720.
- M. Senthil, K. Visagavel, C. Saravanan, K. Rajendran, Investigations of red mud as a catalyst in Mahua oil biodiesel production and its engine performance, *Fuel Processing Technology* 149 (2016) 7-14.
- Q. Liu, R. Xin, C. Li, C. Xu, J. Yang, Application of red mud as a basic catalyst for biodiesel production, *Journal of Environmental Sciences* 25(4) (2013) 823-829.
- R. Chakraborty, S. Bepari, A. Banerjee, Transesterification of soybean oil catalyzed by fly ash and egg shell derived solid catalysts, *Chemical Engineering Journal* 165(3) (2010) 798-805.
- R.O. Araujo, V.O. Santos, F.C. Ribeiro, J.d.S. Chaar, A.M. Pereira, N.P. Falcão, L.K. de Souza, Magnetic acid catalyst produced from acai seeds and red mud for biofuel production, *Energy conversion and management* 228 (2021) 113636.
- S.L. Martínez, R. Romero, R. Natividad, J. González, Optimization of biodiesel production from sunflower oil by transesterification using Na₂O/NaX and methanol, *Catalysis Today* 220 (2014) 12-20.
- V. Vadery, B.N. Narayanan, R.M. Ramakrishnan, S.K. Cherikkallinmel, S. Sugunan, D.P. Narayanan, S. Sasidharan, Room temperature production of jatropha biodiesel over coconut husk ash, *Energy* 70 (2014) 588-594.
- Y. Ren, B. He, F. Yan, H. Wang, Y. Cheng, L. Lin, Y. Feng, J. Li, Continuous biodiesel production in a fixed bed reactor packed with anion-exchange resin as heterogeneous catalyst, *Bioresource technology* 113 (2012) 19-22.
- Y. Tang, J. Xu, J. Zhang, Y. Lu, Biodiesel production from vegetable oil by using modified CaO as solid basic catalysts, *Journal of Cleaner Production* 42 (2013) 198-203.
- Y.-M. Dai, I.-H. Kao, C.-C. Chen, Evaluating the optimum operating parameters of biodiesel production process from soybean oil using the Li₂TiO₃ catalyst, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 70 (2017) 260-266.