

Sintesis polioliol sebagai senyawa *intermediate* pada pembuatan *biolubricant* dari minyak kelapa sawit

Synthesis of polyol as intermediate compounds in the biolubricant production from crude palm oil

Juni Prianto¹, Muhammad Said^{2*}, Muhammad Faizal², R. Arie Hartawan¹, Miratna Juwita¹, Fitri Rosdiana³

¹Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Inderalaya - Indonesia

²Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Inderalaya, - Indonesia

³Magister Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu, Bengkulu - Indonesia

*Email: m.said@unsri.ac.id

Abstrak

Sintesis senyawa polioliol sebagai bahan *intermediate* pada pembuatan pelumas dari minyak kelapa sawit (CPO) telah dilakukan untuk mensubstitusi pelumas dari minyak bumi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu, waktu reaksi dan katalis terhadap konversi senyawa polioliol yang dihasilkan dengan variabel suhu 45, 50, 55, dan 60 °C dan waktu reaksi 30, 60, 90, 120 menit serta katalis bentonit 1 %. Senyawa polioliol mengandung lebih dari satu gugus hidroksil yang terbentuk dari reaksi hidroksilasi senyawa epoksi CPO dan alkohol (metanol). Senyawa epoksida CPO diperoleh dari hasil reaksi epoksidasi antara asam peroksida dengan senyawa asam asetat dengan CPO. Kualitas senyawa polioliol ditentukan dari analisis densitas, bilangan asam, indeks viskositas, bilangan hidroksil, dan bilangan oksiran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konversi senyawa polioliol tertinggi adalah 51,985 % pada 55 °C selama 120 menit. Konstanta kinetika reaksi hidroksilasi pada 55 °C adalah 0,197 mol/L menit. Senyawa polioliol dari hasil sintesis dari minyak kelapa sawit telah berhasil diproduksi dan memenuhi standar SNI untuk digunakan sebagai bahan baku produksi biolubricant.

Kata Kunci: minyak kelapa sawit, reaksi hidroksilasi, senyawa epoksi, senyawa polioliol

Abstract

Synthesis of polyol compounds as intermediate materials in the manufacture of lubricants from palm oil (CPO) has been carried out to substitute lubricants from petroleum. This study aimed to determine the effect of temperature, reaction time and catalyst on the conversion of polyol compounds produced with the varied temperatures of 45, 50, 55, and 60 °C and reaction times of 30, 60, 90, and 120 minutes and 1 % bentonite catalyst. Polyol compounds contain more than one hydroxyl group formed from the hydroxylation reaction of the CPO epoxy compound and alcohol (methanol). CPO epoxide compounds are obtained from the epoxidation reaction between peroxide acid and acetic acid compounds with CPO. The quality of the polyol compound was determined from the analysis of density, acid number, viscosity index, hydroxyl number, and oxirane number. The results showed that the highest conversion of polyol compounds was 51.985 % at 55 °C for 120 minutes. The kinetic constant of the hydroxylation reaction at 55 °C was 0.197 mol/L min. Polyol compounds from the synthesis of palm oil have been successfully produced and meet SNI standards to be used as raw materials for biolubricant production.

Keywords: crude palm oil, hydroxylation reaction, epoxy compound, polyol compound

1. PENDAHULUAN

Pelumas yang beredar di pasar global saat ini adalah *mineral oil*, minyak sintetis, dan *biolubricant*. Sekitar 80 % dari minyak pelumas yang beredar di pasaran, merupakan *mineral oil* yang didapat dari hasil penyulingan minyak bumi, 8% berasal dari minyak sintetis, dan hanya sebagian kecil dari minyak pelumas tersebut yang berasal dari minyak nabati (Nowak, dkk., 2019; Shafi, dkk., 2018). Minyak pelumas terdiri dari 80-90 % *based oil* dan 10-20 % merupakan zat aditif (Parekh, dkk., 2022; Zgheib dan Takache, 2021). Hal ini mengakibatkan pemakaian minyak mineral oil dan sintetis semakin meningkat. Pencemaran terhadap lingkungan akan terus berlanjut sehubungan dengan sifat dari mineral oil dan minyak sintetis bersifat racun pada lingkungan. Disamping itu, sifat pelumas yang berasal dari mineral oil tidak dapat diperbaharui. Untuk itu perlu dilakukan usaha pengurangan pemakaian pelumas berbahan mineral sebagai minyak dasar dan zat aditif. Sebagai bahan pengganti dari pemakaian mineral oil ini dapat menggunakan minyak nabati. Pemanfaatan minyak nabati ini sebagai bahan pelumas lebih menguntungkan diantaranya ramah lingkungan, dapat diperbaharui, memiliki indeks viskositas yang tinggi, dan sifat pelumasan yang baik terutama di daerah *boundary lubrication* dan mudah larut dengan zat aditif (Chan, dkk., 2018; Karmakar, dkk., 2017).

Biolubricant dapat dihasilkan dari bermacam-macam jenis tumbuhan, seperti kelapa sawit (Durango-Giraldo, dkk., 2022), kacang kedelai (Parente, dkk., 2021), bunga matahari (Jabal, dkk., 2019), minyak jarak (Rios, dkk., 2020) dan yang lainnya. Minyak kelapa sawit merupakan minyak kelapa sawit mentah yang diperoleh dari hasil ekstraksi atau proses pengempaan daging buah kelapa sawit dan belum mengalami pemurnian. Pada industri minyak kelapa sawit, selain produk utama juga dihasilkan produk samping yang dapat digunakan dalam industri pembuatan sabun, sebagai bahan pakan ternak dan sebagai bahan baku untuk industri oleokimia (Gonzalez-Diaz, dkk., 2021). Produk samping ini mengandung asam oleat 46,1 %, asam linoleat 8,6 %, asam linolenat 0,3 % dan asam arachidat 0,4 % (Sinaga, dkk., 2019) yang dapat dijadikan sebagai bahan baku pembuatan senyawa epoksida.

Poliol atau polialkohol adalah suatu senyawa yang mempunyai gugus hidroksil lebih dari satu (Park, dkk., 2020). Polioliol merupakan senyawa penting dalam pembuatan polimer seperti poliuretan, pelumas dan kosmetik. Polioliol yang digunakan dalam pembuatan poliuretan selama ini diperoleh dari minyak bumi. Bahan alternatif yang sangat potensial digunakan adalah minyak sawit atau turunan minyak sawit seperti asam oleat. Asam

oleat melalui reaksi epoksidasi dan hidroksilasi dapat menghasilkan polioliol atau 9,10 dihidroksi asam stearat.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis polioliol dari senyawa epoksi minyak kelapa sawit sebagai senyawa intermediate pada pembuatan *biolubricant* dari minyak kelapa sawit dengan variasi suhu dan waktu.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Alat dan Bahan

Minyak kelapa sawit dari PT. Golden Oilindo Nusantara yang telah dirafinasi digunakan sebagai bahan baku untuk proses epoksidasi. Hidrogen peroksida 30 %, asam asetat glacial (CH_3COOH), asam sulfat (H_2SO_4) 2 %, natrium bikarbonat (NaHCO_3) dan aquadest sebagai bahan baku proses dibeli dari Merck. Bahan yang digunakan pada proses hidroksilasi adalah senyawa epoksi dari CPO, metanol (CH_3OH) 96 % dan katalis bentonite dibeli dari Bratachem. Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah labu leher tiga, kondensor, *magnetic stirrer*, *heating mantle*, *thermometer*,

2.2. Prosedur Penelitian

Reaksi epoksidasi dimulai dengan memasukkan minyak kelapa sawit sebanyak 200 ml, asam asetat sebanyak 20 % dari total berat minyak kelapa sawit ke dalam labu leher tiga yang dilengkapi dengan kondensor, *magnetic stirrer*, dan *heating mantle*. Campuran dipanaskan pada suhu 70 °C. Campuran H_2O_2 30 % sebanyak 65 % dari berat minyak kelapa sawit dan asam sulfat 2 % sebanyak 2 % dari campuran ditambahkan tetes demi tetes ke dalam campuran minyak kelapa sawit dan asam asetat selama 120 menit. Setelah reaksi selesai, campuran kemudian didinginkan. NaHCO_3 dilarutkan dengan *aquadest* sebanyak 100 - 200 ml sampai jenuh untuk mengurangi sisa asam. Campuran reaksi dimasukkan ke dalam corong pemisah dan ditambahkan larutan NaHCO_3 jenuh serta ditambahkan *aquadest* sebanyak 200 ml dan diaduk. Netralisasi dan pencucian dilakukan hingga pH dari campuran hasil reaksi menjadi netral. Campuran didiamkan selama 30 menit untuk memisahkan senyawa epoksi, air, dan senyawa lainnya.

Reaksi hidroksilasi dilakukan dengan memasukkan 150 mL senyawa epoksi minyak kelapa sawit, metanol sebanyak 70 % volume senyawa epoksi, dan katalis bentonit 125 mesh sebanyak 1 % berat senyawa epoksi ke dalam labu leher tiga 500 mL yang telah dirangkai dengan kondensor, *hot plate* dan *magnetic stirrer*. Campuran dipanaskan dengan variasi suhu 45, 50, 55, dan 60 °C dan dengan variasi waktu 30, 60, 90,

dan 120 menit. Campuran diendapkan untuk memisahkan katalis bentonit, sisa metanol dan senyawa polioliol. Katalis bentonit yang berada pada campuran senyawa polioliol dan metanol dipisahkan dengan kertas saring. Metanol dipisahkan dari campuran dengan metode penguapan. Analisis bilangan oksiran dan bilangan asam dilakukan menurut ASTM D1652 dan AOAC 1995. Bilangan asam dan densitas ditentukan melalui metode AOAC 1965 dan SNI –06 –4085 –1996. Viskositas kinematik dan indeks viskositas senyawa polioliol dihitung berdasarkan metode ASTM D445 dan ASTM D2270.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Senyawa Epoksida

Senyawa epoksida merupakan senyawa yang dihasilkan dari reaksi minyak yang dioksidasi dengan menggunakan asam peroksida (H_2O_2) dengan katalis asam sulfat (H_2SO_4) pada suhu $70\text{ }^\circ\text{C}$ dengan waktu reaksi selama 120 menit. Analisis yang dilakukan pada senyawa epoksida bertujuan untuk mengetahui perubahan sifat fisik dan sifat kimia yang disebabkan adanya reaksi epoksidasi. Dalam reaksi epoksidasi mengalami reaksi eksotermis sehingga pada saat pencampuran larutan asam peroksida harus ditetes secara perlahan disertai dengan pengadukan pada suhu konstan untuk mengoptimalkan proses epoksidasi dan reaksi eksotermis. Perbandingan karakteristik antara minyak kelapa sawit dan senyawa epoksida ditunjukkan pada Tabel 1.

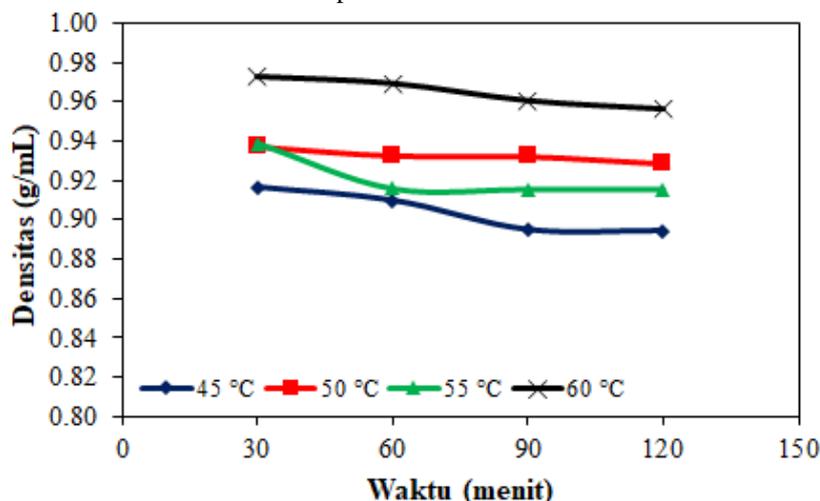
Tabel 1. Perbandingan analisis sifat fisik dan kimia minyak kelapa sawit dan senyawa epoksida

Karakteristik	Satuan	Minyak Kelapa Sawit	Senyawa Epoksidasi
Densitas	gr/ml	0,9479	0,9509
Viskositas Kinematik			
- Pada $40\text{ }^\circ\text{C}$	cSt	37,9778	44,3884
- Pada $100\text{ }^\circ\text{C}$		11,0728	11,6556
Indeks Viskositas		172,9534	166,6799
Bilangan Asam	mg NaOH/g senyawa	8,32	5,44
Bilangan Hidroksil	g/100 g senyawa	154,25	159,04
Bilangan Oksiran	%	0,0992	5,7312

3.2. Analisis Sifat Kimia dan Sifat Fisika Senyawa Polioliol

Senyawa polioliol diperoleh dari hasil reaksi senyawa epoksida dengan metanol dan katalis bentonit. Karakteristik dan kualitas senyawa polioliol dinilai dari viskositas kinematik, bilangan oksiran, bilangan asam, dan bilangan hidroksil. Pengukuran densitas diperlukan untuk mengetahui berat jenis dari senyawa polioliol. Analisis densitas semua sampel

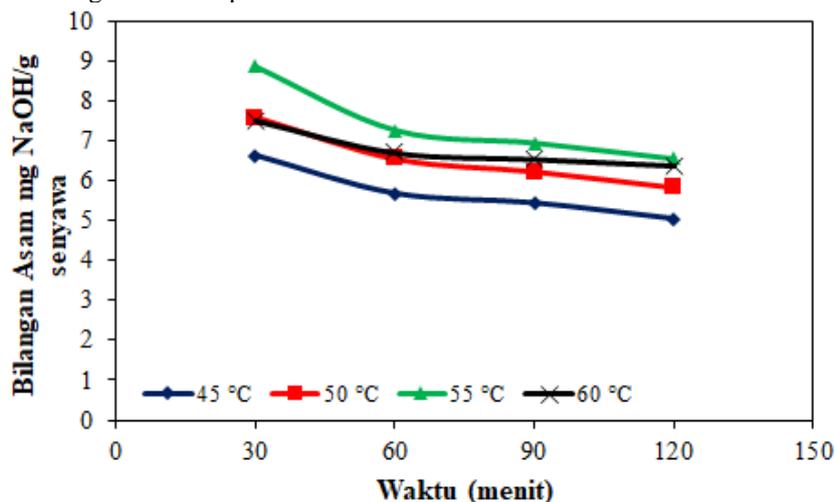
polioliol menunjukkan rentang antara 0,895-0,973 g/mL (Gambar 1). Semakin tinggi suhu dan waktu reaksi densitas senyawa polioliol mengalami penurunan. Penurunan densitas ini disebabkan terjadinya peningkatan volume dengan massa konstan pada suhu yang tinggi. Peningkatan volume disebabkan pecahnya molekul-molekul sebagai akibat dari suhu yang tinggi sehingga molekul akan menempati volume yang lebih besar dibandingkan pada saat suhu rendah (Ma, dkk., 2021).



Gambar 1. Densitas senyawa polioliol

Hasil analisis bilangan asam pada senyawa polioliol menunjukkan jumlah asam lemak bebas yang terkandung dalam senyawa polioliol (Gambar 2). Semakin tingginya nilai bilangan asam pada polioliol maka akan semakin besar terjadinya korosifitas pada mesin (Faujdar dan Singh, 2021a, 2021b). Untuk melihat kualitas senyawa polioliol baik atau tidaknya, dapat dilihat dari nilai bilangan asam. Semakin kecil bilangan asam pada senyawa polioliol maka semakin baik kualitas polioliol sebagai pelumas karena rendahnya bilangan asam menunjukkan kemungkinan terjadinya korosi pada mesin semakin rendah. Penurunan bilangan asam dapat dilakukan

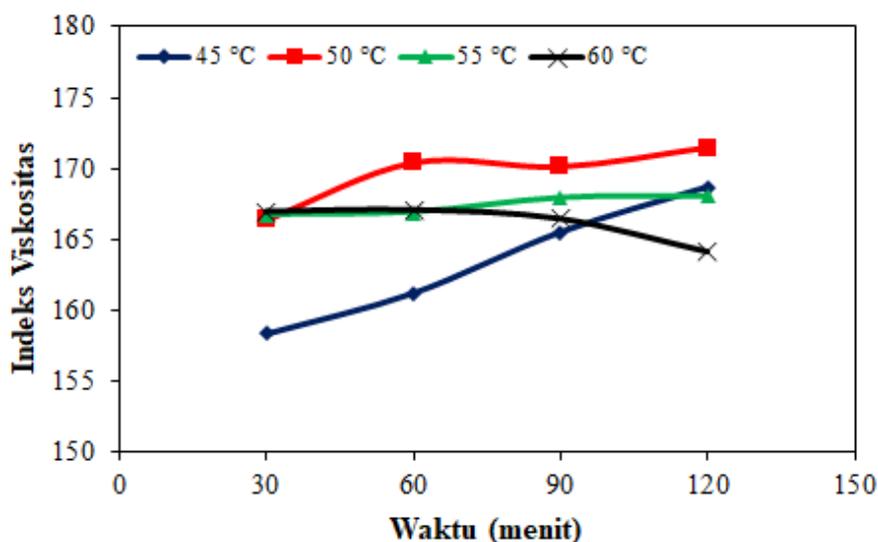
dengan cara menambahkan zat aditif berupa penetral pH. Bilangan asam senyawa polioliol turun dengan meningkatnya suhu dan lamanya waktu reaksi (Gul, dkk., 2020). Hal ini disebabkan oleh tidak banyaknya asam lemak bebas yang terkandung di dalam senyawa polioliol yang berkurang. Penurunan nilai bilangan asam ini menunjukkan hal yang baik karena peluang terjadinya korosi pada mesin akan semakin kecil. Pada penelitian ini bilangan asam terendah pada senyawa polioliol adalah 5,04 yang didapatkan pada 45 °C selama 120 menit.



Gambar 2. Bilangan asam senyawa polioliol

Analisis indeks viskositas telah dilakukan guna mengetahui karakteristik dan ketahanan viskositas senyawa polioliol terhadap perubahan suhu. Nilai indeks viskositas diperoleh dengan melakukan pengukuran viskositas senyawa polioliol pada suhu 40 dan 100 °C. Indeks viskositas senyawa polioliol berkisar antara 158,350–171,443 (Gambar 3). Nilai rentang indeks viskositas tersebut tergolong

sebagai *high viscosity index* (HVI) karena memiliki indeks viskositas lebih besar dari pada 80. Indeks viskositas tinggi menunjukkan semakin kecil perubahan viskositas karena perubahan suhu (Cavalcanti, dkk., 2018; Hemmat Esfe, dkk., 2018; Mousavi, dkk., 2020).

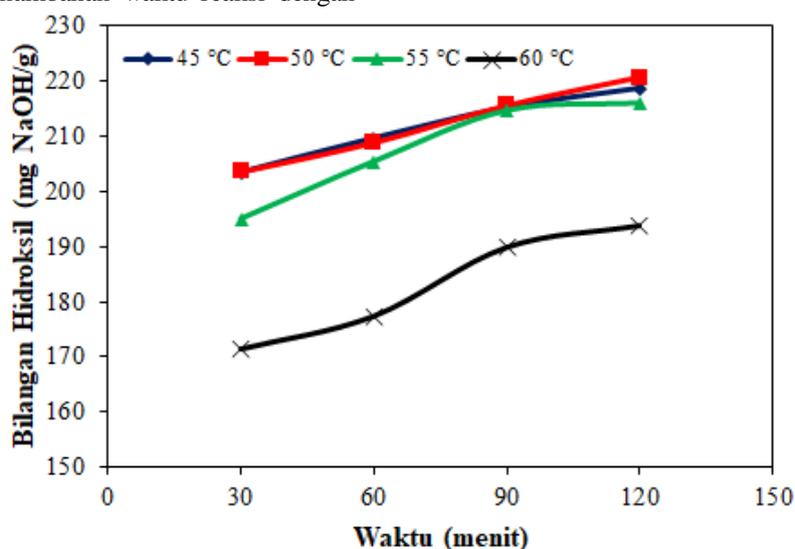


Gambar 3. Hasil analisis indeks viskositas senyawa polioliol

3.3. Pengaruh suhu dan waktu reaksi terhadap bilangan oksiran dan bilangan hidroksil serta konversi senyawa polioliol

Hasil penelitian sintesa senyawa polioliol yang dihasilkan dari reaksi hidroksilasi senyawa epoksida minyak kelapa sawit, menunjukkan bahwa suhu dan waktu reaksi mempengaruhi bilangan hidroksil, bilangan oksiran dan konversi senyawa polioliol. Dari Gambar 4 peningkatan bilangan hidroksil terjadi seiring dengan penambahan waktu reaksi dengan

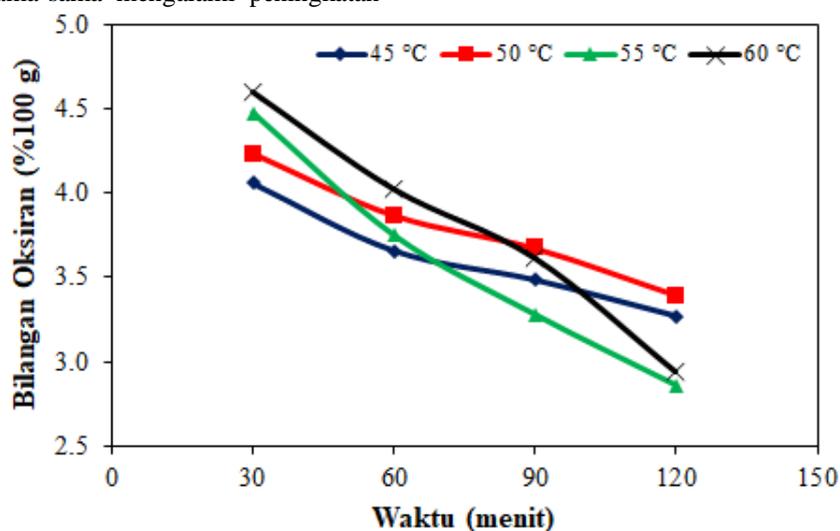
kata lain semakin lama waktu reaksi maka bilangan hidroksil akan meningkat. Hal ini akan memberikan kesempatan untuk terjadinya tumbukan lebih lama pada molekul pereaksi yaitu metanol dengan epoksida sehingga akan semakin banyak terbentuknya gugus hidroksil. Terlihat dari grafik bilangan hidroksil tertinggi didapatkan pada saat suhu 45 °C dengan waktu reaksi 120 menit yaitu sebesar 222,373 mg NaOH/mg sampel.



Gambar 4. Pengaruh waktu reaksi terhadap bilangan hidroksil

Bilangan hidroksil yang dihasilkan pada penelitian ini lebih kecil dibandingkan penelitian yang dilakukan (Said, dkk., 2020) yang menggunakan bahan baku berupa minyak kedelai dengan katalis bentonit dengan bilangan hidroksil yang diperoleh >250 pada suhu 45 °C dengan waktu reaksi 30 menit dan terus meningkat seiring lamanya waktu reaksi. Terjadinya perbedaan bilangan hidroksil ini dapat disebabkan karena perbedaan bahan baku yang digunakan, namun pada kedua penelitian ini sama-sama mengalami peningkatan

bilangan hidroksil seiring dengan lamanya waktu reaksi yang digunakan. Penurunan bilangan hidroksil juga disebabkan oleh terlalu tingginya suhu yang digunakan sehingga dapat menyebabkan gugus hidroksil pada polioliol yang berikatan dengan karbon akan mengalami dekomposisi dan membentuk molekul yang rendah, sehingga pada suhu yang tinggi gugus hidroksil akan berkurang (Polaczek, dkk., 2021).

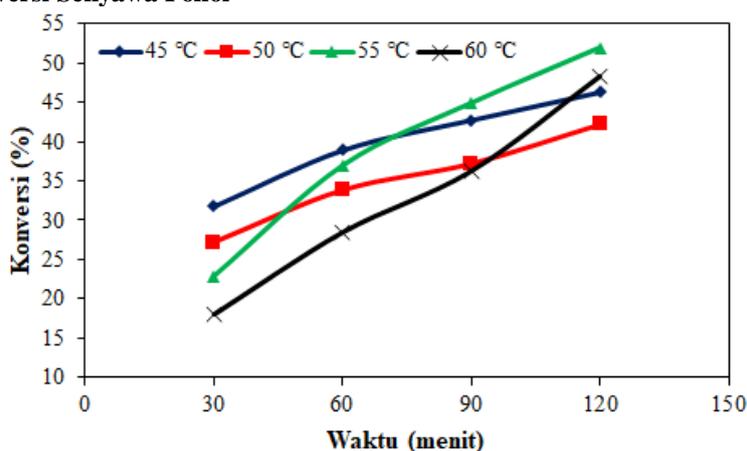


Gambar 5. Pengaruh waktu reaksi terhadap bilangan oksiran senyawa polioliol

Dari Gambar 5 terlihat bahwa bilangan oksiran pada semua kondisi operasi mengalami penurunan. Semakin rendah suhu maka bilangan oksiran akan semakin rendah. Bilangan oksiran yang semakin rendah menandakan bahwa kandungan gugus oksiran pada senyawa polioliol rendah, artinya pembukaan gugus oksiran menjadi gugus hidroksil semakin besar (Prociak, dkk., 2018). Bilangan oksiran paling rendah diperoleh pada suhu 55 °C selama 120 menit, yaitu 2,8576.

Bilangan oksiran akan mempengaruhi konversi senyawa polioliol yang akan diperoleh. Nilai konversi disetiap variasi diperoleh dengan cara membandingkan bilangan oksiran sebelum dan sesudah reaksi hidroksilasi. Seiring dengan lamanya waktu reaksi, bilangan oksiran mengalami penurunan. Hasil Analisis menunjukkan bahwa konversi senyawa polioliol yang dihasilkan pada saat reaksi akan semakin besar apabila bilangan oksiran semakin kecil.

3.4. Pengaruh Suhu dan Waktu Reaksi terhadap Konversi Senyawa Polioliol



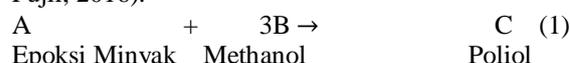
Gambar 6. Pengaruh waktu reaksi terhadap konversi senyawa polioliol

Konversi versus waktu reaksi pada variasi suhu ditampilkan pada Gambar 6. Konversi mengalami peningkatan dengan adanya peningkatan suhu dan waktu reaksi. Waktu dan suhu optimal menyebabkan konversi senyawa polioliol dari reaksi epoksidasi meningkat. Ikatan rangkap dalam minyak diubah menjadi minyak terepoksidasi (Sule, dkk., 2020). Konversi senyawa polioliol terendah yaitu sebesar 17,985 % pada saat suhu 60 °C selama 30 menit. Konversi senyawa polioliol tertinggi yaitu 51,985 % pada saat suhu 55 °C selama 120 menit. Bilangan oksiran akan mempengaruhi konversi senyawa polioliol dimana bilangan oksiran yang terbesar akan memberikan konversi. senyawa polioliol yang kecil begitu pun sebaliknya. Lama waktu reaksi juga dapat mempengaruhi hasil konversi yang diperoleh. Semakin lama waktu reaksi maka kesempatan zat-zat pereaksi untuk saling bertumbukan akan semakin besar dan dihasilkan senyawa polioliol yang jumlahnya lebih banyak.

3.5. Kinetika Reaksi Senyawa Polioliol

Kinetika reaksi dilakukan untuk mengetahui faktor kinetiknya. Kinetika reaksi melalui reaksi antara senyawa epoksida dengan methanol sehingga diperoleh senyawa polioliol menurut persamaan 1-2. Reaksi hidroksilasi pada sintesa senyawa polioliol berlangsung menurut reaksi orde 2 dengan laju

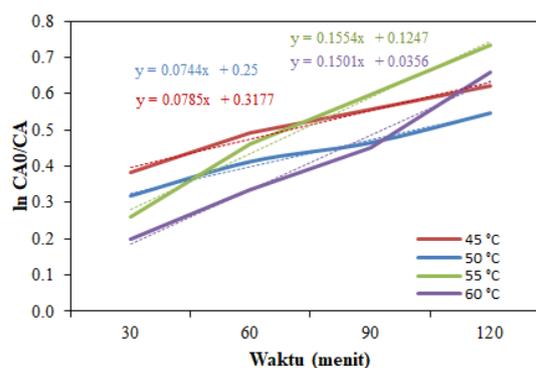
reaksi dipengaruhi oleh kedua reaktan (Asaka dan Fujii, 2016).



$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A C_B^3 \quad (2)$$

Dimana:

- C_A = Konsentrasi epoksida minyak kelapa sawit
- C_B = Konsentrasi metanol
- C_C = Konsentrasi senyawa polioliol
- CA_0 = Konsentrasi epoksida minyak kelapa sawit mula-mula
- CB_0 = Konsentrasi metanol mula-mula



Gambar 7. Grafik ln (CA0/CA) vs t

Dari Gambar 7, dapat dilihat bahwa nilai slope garis lurus dari hasil yang telah diplotkan membentuk persamaan, yaitu untuk 45 °C dengan persamaan $y = 0,1844x$, dapat diketahui bahwa nilai slope (k') didapatkan adalah sebesar 0,1844 mol/ml menit, suhu 50 °C dengan persamaan $y = 0,1577x$ dan slope 0,1577 mol/ml menit dan suhu 55 °C dengan persamaan $y = 0,197x$ dan slope 0,197 mol/ml menit serta suhu 60 °C dengan persamaan $y = 0,162x$ dan slope 0,162 mol/ml menit.

4. KESIMPULAN

Kondisi optimum untuk menghasilkan senyawa polioliol dari senyawa epoksi minyak kelapa sawit pada suhu 55 °C dengan waktu reaksi 120 menit yang terlihat dari konversinya mencapai 51,985 %. Kualitas senyawa polioliol pada kondisi operasi terbaik didapatkan nilai densitas sebesar 0,9157 g/cm³, viskositas kinematik sebesar 47,5937 Cst, bilangan asam sebesar 6,56 mg NaOH/g minyak dan bilangan oksiran sebesar 2,8576 g/cm³. Semakin rendah suhu reaksi yang digunakan maka akan menghasilkan senyawa polioliol yang lebih baik sedangkan, semakin lama waktu reaksi yang digunakan maka akan menghasilkan senyawa polioliol yang baik. Didapatkan nilai konstanta reaksi kimia pada kondisi optimum adalah 0,197.

DAFTAR PUSTAKA

- Asaka, M., Fujii, H. 2016. Participation of Electron Transfer Process in Rate-Limiting Step of Aromatic Hydroxylation Reactions by Compound i Models of Heme Enzymes. *J. Am. Chem. Soc.*, 138(26), 8048–8051. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b03223>
- Cavalcanti, E. D. C., Aguiéiras, É. C. G., da Silva, P. R., Duarte, J. G., Cipolatti, E. P., Fernandez-Lafuente, R., da Silva, J. A. C., Freire, D. M. G. 2018. Improved production of biolubricants from soybean oil and different polyols via esterification reaction catalyzed by immobilized lipase from *Candida rugosa*. *Fuel*, 215, 705–713. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.119>
- Chan, C. H., Tang, S. W., Mohd, N. K., Lim, W. H., Yeong, S. K., & Idris, Z. (2018). Tribological behavior of biolubricant base stocks and additives. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 93, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.024>
- Durango-Giraldo, G., Zapata-Hernandez, C., Santa, J. F., Buitrago-Sierra, R. 2022. Palm oil as a biolubricant: Literature review of processing parameters and tribological performance. *J Ind Eng Chem*, 107, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.12.018>
- Faujdar, E., Singh, R. K. 2021a. Methyl oleate derived multifunctional additive for polyol based lubricants. *Wear*, 466–467, 203550. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203550>
- Faujdar, E., Singh, R. K. 2021b. Study on alkylated Schiff base of a triazole with 3, 5-di-tert-butyl-4-hydroxybenzaldehyde as a novel multifunctional lubricant additive. *Fuel*, 302, 121158. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121158>
- Gonzalez-Diaz, A., Pataquiva-Mateus, A., & García-Núñez, J. A. 2021. Recovery of palm phytonutrients as a potential market for the by-products generated by palm oil mills and refineries—A review. *Food Biosci.*, 41, 100916. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100916>
- Gul, M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Zulkifli, N. W. M., & Mujtaba, M. A. 2020. A Review: Role of Fatty Acids Composition in Characterizing Potential Feedstock for Sustainable Green Lubricants by Advance Transesterification Process and its Global as Well as Pakistani Prospective. *Bioenergy Res.*, 13(1). <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10040-7>
- Hemmat Esfe, M., Abbasian Arani, A. A., & Esfandeh, S. 2018. Improving engine oil lubrication in light-duty vehicles by using of dispersing MWCNT and ZnO nanoparticles in 5W50 as viscosity index improvers (VII). *Appl. Therm. Eng.*, 143, 493–506. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.034>
- Jabal, M. H., Abdulmunem, A. R., Abd, H. S. 2019. Experimental investigation of tribological characteristics and emissions with nonedible sunflower oil as a biolubricant. *J Air Waste Manag Assoc*, 69(1), 109–118. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1523070>
- Karmakar, G., Ghosh, P., Sharma, B. K. 2017. Chemically modifying vegetable oils to prepare green lubricants. *Lubricants*, 5(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/lubricants5040044>
- Ma, X., Zhang, Y., Song, Z., Yu, K., He, C., Zhang, X. 2021. Enzyme-catalyzed synthesis and properties of polyol ester biolubricant produced from *Rhodotorula glutinis* lipid. *Biochem. Eng. J.*, 173, 108101. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108101>
- Mousavi, S. B., Heris, S. Z., Estellé, P. 2020. Experimental comparison between ZnO and MoS₂ nanoparticles as additives on performance of diesel oil-based nano lubricant. *Sci. Rep.*, 10(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62830-1>
- Nowak, P., Kucharska, K., & Kamiński, M. 2019. Ecological and health effects of lubricant oils emitted into the environment. *Int. J. Environ. Health Res.*, 16(16), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ijerph16163002>

- Parekh, K., Shahabuddin, S., Gaur, R., Dave, N. 2022. Prospects of conducting polymer as an adsorbent for used lubricant oil reclamation. *Materials Today: Proceedings*, xxx, 2–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.130>
- Parente, E. J., Marques, J. P. C., Rios, I. C., Cecilia, J. A., Rodríguez-Castellón, E., Luna, F. M. T., Cavalcante, C. L. 2021. Production of biolubricants from soybean oil: Studies for an integrated process with the current biodiesel industry. *Chem Eng Res Des*, 165, 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.11.012>
- Park, C. K., Lee, J. H., Kim, I. S., Kim, S. H. 2020. Castor oil-based polyols with gradually increasing functionalities for biopolyurethane synthesis. *J. Appl. Polym. Sci.*, 137(4), 1–11. <https://doi.org/10.1002/app.48304>
- Polaczek, K., Kurańska, M., Auguścik-Królikowska, M., Prociak, A., Ryszkowska, J. 2021. Open-cell polyurethane foams of very low density modified with various palm oil-based bio-polyols in accordance with cleaner production. *J. Clean. Prod.*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125875>
- Prociak, A., Malewska, E., Kurańska, M., Bąk, S., Budny, P. 2018. Flexible polyurethane foams synthesized with palm oil-based bio-polyols obtained with the use of different oxirane ring opener. *Ind Crops Prod*, 115, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.008>
- Rios, Í. C., Cordeiro, J. P., Arruda, T. B. M. G., Rodrigues, F. E. A., Uchoa, A. F. J., Luna, F. M. T., Cavalcante, C. L., Ricardo, N. M. P. S. 2020. Chemical modification of castor oil fatty acids (*Ricinus communis*) for biolubricant applications: An alternative for Brazil's green market. *Ind Crops Prod*, 145, 112000. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112000>
- Said, M., Bobbie Rizkie Mandhala, H., Defitra, M. A., Sandi, F., Vernando, R. 2020. Synthesis of epoxide and polyol compounds as intermediates for biolubricant from soybean oil. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, 10(1), 374–380. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.1.10463>
- Shafi, W. K., Raina, A., Ul Haq, M. I. 2018. Friction and wear characteristics of vegetable oils using nanoparticles for sustainable lubrication. *Tribol. - Mater. Surf. Interfaces*, 12(1), 27–43. <https://doi.org/10.1080/17515831.2018.1435343>
- Sinaga, M. S., Simanjuntak, J. F., Winda, O. 2019. Effect of Reaction Time and Catalyst Concentration on Making of Epoxy Compounds Using Sulphuric Acid Catalyst Based on Crystallized Palm Fatty Acid Distillate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 505(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/505/1/012117>
- Sule, S., Mahmood, I., Mohammed, F. G. 2020. Synthesis of Polyol from Sponge Gourd (*Luffa aegyptiaca*) Seed Oil and Production of Polyurethane Foam. *United International Journal for Research & Technology*, 02(02), 41–46.
- Zgheib, N., & Takache, H. 2021. Recycling of used lubricating oil by solvent extraction: experimental results, Aspen Plus simulation and feasibility study. *Clean Technol. Environ. Policy*, 23(1), 65–76. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01893-0>