

Kinetika Reaksi Hidrogenasi Ester Lemak Menjadi Alkohol Lemak Dengan Katalis Tembaga- Mangan

The Kinetics of Fatty Ester hydrogenation to Fatty Alcohol on Copper-Manganese Catalyst

Melia Laniwati Gunawan*, Subagjo, IGBN Makertihartha, Liana A. Malau, Amsalia Florence

Chemical Engineering Department, Faculty of Industrial Technology, Institut Teknologi Bandung, Kampus ITB, Jl. Ganesa No 10, Bandung 40132
Corresponding Author: melia@che.itb.ac.id

Received: 2019-12-18
Received in revised: 2020-5-1
Accepted: 2020-5-11
Available online: 2020-5-31

Abstract

Fatty alcohol (FAOH) can be produced by hydrogenating of fatty acid methyl ester (FAME) using the copper-based catalyst. Copper-Chrom (Cu-Cr) is the best catalyst for high-pressure reaction condition, which is copper (Cu) as the main active component and chrom (Cr) as a promoter. Since Cr is feared to be toxic, one of the best replacement candidates is manganese (Mn). The research aims is to find the kinetic equation of hydrogenation FAME to FAOH using a Cu-Mn commercial catalyst. FAME with methyl laurate and methyl myristate as the main compounds is used as feedstock. The main products are lauryl alcohol and myristyl alcohol. The reaction was carried out in an isothermal continuous fixed bed reactor under conditions of temperature 220 – 240 °C, pressure 50 bar, and liquid hourly space velocity (LHSV) 5-12.5 hr⁻¹. The kinetic equation is determined using the power law model. The FAME hydrogenation on copper - manganese catalyst is the half order reaction. The activation energy value is 86.32 kJ/mol and the Arrhenius constant value is 5.87x10⁶ M^{0.5}/s.

Keywords: Cu-Mn catalyst, FAME hydrogenation, fatty alcohol, fixed bed reactor, the kinetic equation, power law mode.

Abstrak (Indonesian)

Alkohol lemak (Fatty alcohol/FAOH) dapat diproduksi melalui hidrogenasi ester lemak (Fatty acid methyl ester/FAME) menggunakan katalis berbasis tembaga (Cu). Tembaga-krom (Cu-Cr) adalah katalis terbaik untuk proses yang diselenggarakan pada tekanan tinggi, yang mana Cu sebagai fasa aktif katalis dan Cr sebagai promotor. Karena Cr bersifat toksik, maka salah satu kandidat terbaik untuk pengganti adalah mangan (Mn). Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan persamaan kinetika reaksi hidrogenasi FAME menjadi FAOH pada katalis komersial Cu-Mn menggunakan model hukum pangkat. Umpan berupa FAME dengan komponen utama campuran metil-laurat dan metil miristat. Produk utama adalah campuran lauril-alkohol dan miristil-alkohol. Reaksi diselenggarakan di dalam reaktor unggun tetap secara isothermal pada temperatur 220 – 240 °C, tekanan 50 bar, dan LHSV 5 – 12,5 per jam. Hasil menunjukkan bahwa reaksi berorde setengah, dengan nilai energi aktivasi 86,32 kJ/mol dan konstanta Arrhenius 5,87x10⁶ M^{0.5}/det.

Kata Kunci: Katalis Cu-Mn, hidrogenasi FAME, alkohol lemak, reaktor unggun tetap kinetika reaksi, model hukum pangkat.

PENDAHULUAN

Industri oleokimia yang memproduksi produk turunan minyak/lemak alami semakin berkembang. Salah satu produk tersebut adalah asam lemak yang mana nilai pasarnya terus meningkat dengan nilai

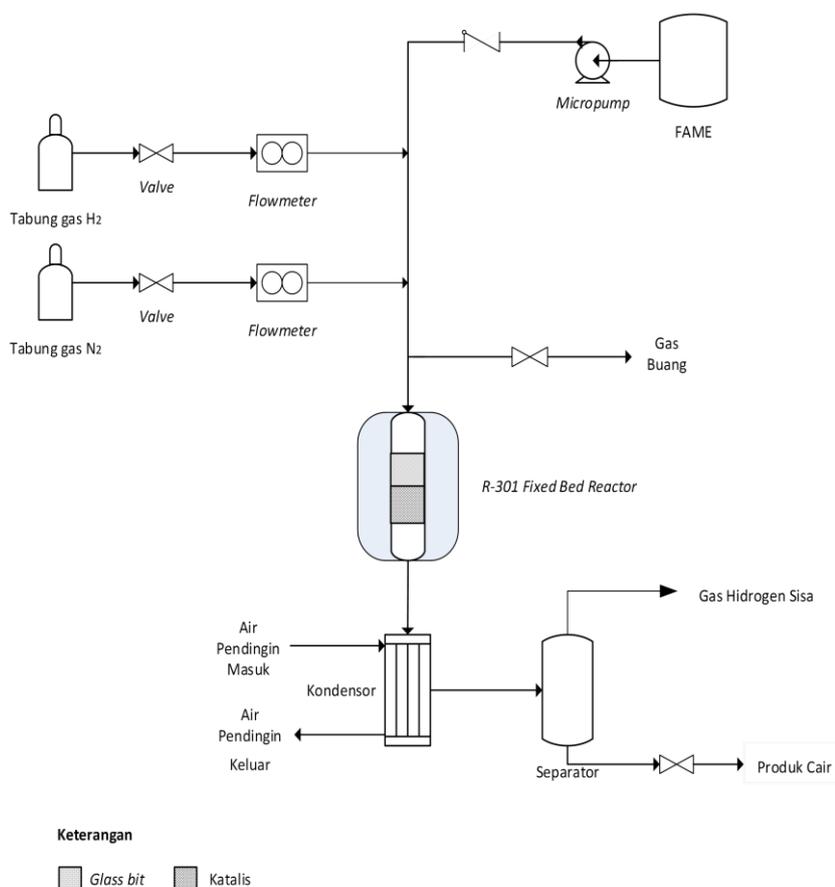
CAGR (Compound Annual Growth Rate) di perkirakan sebesar 5,6% dari tahun 2017 sampai 2022 (MarketWatch, 2019). Industri ini juga mulai menggantikan peran industri petrokimia dalam berbagai aplikasi (Suyenty, 2007). Alkohol lemak

merupakan produk oleokimia dasar yang paling banyak diperdagangkan di dunia setelah asam lemak. Berdasarkan data yang dilansir oleh Kemenperin (2014), konsumsi dunia untuk alkohol lemak meningkat sebesar rata-rata 4% per tahun.

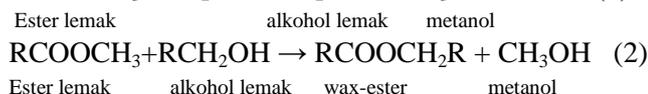
Alkohol lemak adalah alkohol alifatik dengan rantai karbon di antara C_8 dan C_{22} (Noweck, 2011). Dengan panjang rantai dan struktur rantai yang beragam, sifat kimia maupun sifat fisik yang dimiliki setiap jenis senyawa alkohol lemak berbeda-beda. Alkohol lemak pada umumnya tidak memiliki ikatan rangkap, sehingga bersifat jenuh. Gugus hidroksil pada alkohol lemak dapat mengalami berbagai jenis reaksi dan menghasilkan berbagai macam produk turunan. Aplikasi alkohol lemak yang paling banyak (70–75%) adalah surfaktan (Noweck, 2011). Alkohol lemak bersifat amphifilik, sehingga alkohol lemak memiliki kombinasi non-polar (rantai karbon lipofilik) dan polar (gugus fungsi hidroksil yang hidrofilik). Sifat alkohol lemak yang polar juga membuat senyawa ini digunakan sebagai pelumas.

Alkohol lemak dapat diproduksi melalui beberapa rute reaksi. Salah satu rute yang umum adalah hidrogenasi *fatty acid methyl ester* (FAME)

dengan katalis berbasis tembaga (Cu). Tembaga bersifat selektif terhadap ikatan karbon-oksigen (C=O), namun rentan terhadap *sintering*, sehingga dibutuhkan promotor (Peng dkk., 2010; Rachim dkk., 2017; Irdhawati dkk., 2020). Promotor yang paling banyak digunakan adalah krom (Cr). Krom bertindak sebagai donor elektron juga meningkatkan dispersi tembaga dan absorpsi hidrogen, serta mencegah terjadinya *sintering* pada sisi aktif katalis. Karena krom bersifat toksik, dikhawatirkan dapat membahayakan lingkungan apabila terikut dalam produk akhir. Adanya isu ini menyebabkan katalis yang banyak dikembangkan saat ini adalah katalis Cu yang bebas dari krom, salah satunya adalah katalis tembaga mangan (Cu-Mn). Berdasarkan percobaan yang dilakukan oleh Zuzaniuk dan kawan-kawan, diperoleh informasi bahwa penggunaan katalis tembaga mangan aluminium (Cu-Mn-Al) mampu menghasilkan konversi (97,74%) yang hampir sama dengan katalis Cu-Cr (97,92%), untuk kondisi reaksi yang sama (Zuzaniuk dkk., 2007; He dkk., 2014; Thakur dan Kundu, 2016). Reaksi yang terjadi seperti pada persamaan 1-3.



Gambar 1. Skema rangkaian reaktor alat percobaan untuk reaksi hidrogenasi FAME



Hidrogenasi FAME ternyata bukanlah reaksi sederhana, tetapi reaksi kompleks, seri-paralel. Penelitian ini berfokus pada penentuan kinetika reaksi FAME menggunakan katalis komersial Cu-Mn.

METODOLOGI

Alat dan Bahan

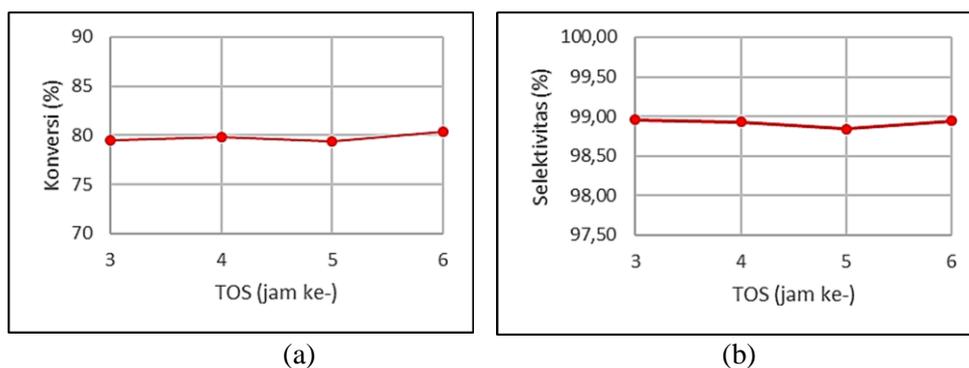
Reaktor yang digunakan untuk melangsungkan reaksi hidrogenasi FAME merupakan reaktor *fixed-bed Reaction Engineering*, Inc R-SCS model R-301, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Rangkaian reaktor tersebut terdiri dari reaktor, tabung gas H₂ dan N₂, sistem perpipaan untuk mengalirkan umpan dan produk, pompa, kondensor, separator, dan *furnace*. Untuk menentukan konversi dan selektivitas reaksi, campuran reaksi dianalisis dengan menggunakan kromatografi gas (GC). Analisa komposisi produk reaksi hidrogenasi FAME ditentukan dengan menggunakan GC-2010 Plus merk Shimadzu dengan kolom kapiler RTX5 (panjang 30 m) dan jenis detektor *Flame Ionization* (FID). Temperatur injektor, kolom, dan detektor berturut-turut adalah 210 °C, 280 °C, dan 290 °C.

umpan/reaktan, katalis *copper mangan* (Cu-Mn) komersial T- 4489A produk Clariant, dan gas nitrogen untuk *purging* reaktor. Selain bahan-bahan utama untuk reaksi, digunakan juga larutan standar yang mengandung campuran senyawa-senyawa FAME, FAOH dan hidrokarbon untuk mengkalibrasi GC. Bahan lainnya yang digunakan ialah argon sebagai gas pembawa, hidrogen dan udara sebagai gas pembakar, serta n-heksana untuk mengencerkan sampel pada saat analisa menggunakan GC.

Prosedur kerja

Sejumlah katalis Cu-Mn ditempatkan di dalam reaktor yang berbentuk silinder/tabung sebagai unggun tetap. Bagian atas unggun katalis diberi *glass beed* agar aliran umpan merata di dalam reaktor. Reaktor dipasang dalam sistem perangkat alat percobaan R-301. Selanjutnya reaktor di-*purge* menggunakan gas nitrogen dengan laju 200 mL/menit selama 30 menit, dilanjutkan gas hidrogen dengan laju alir 100 mL/menit selama 30 menit. Katalis diaktifkan dengan cara direduksi secara *in situ* pada suhu 280 °C menggunakan gas hidrogen 3 bar dengan laju 20 mL/menit selama 5 jam. Setelah direduksi, katalis siap digunakan untuk reaksi hidrogenasi FAME.

Reaksi hidrogenasi FAME diselenggarakan pada tekanan 50 bar dengan laju gas hidrogen 120 mL/menit dan secara isothermal pada suhu 220 – 240 °C. FAME diumpankan ke dalam reaktor dengan laju yang divariasikan untuk mendapatkan LHSV (*liquid hour space velocity*) 2,5 – 12,5 jam⁻¹. Setelah



Gambar 2. (a) Konversi FAME (ester lemak) pada suhu reaksi 230 °C, LHSV 5/jam dan (b) selektivitas FAOH (alkohol lemak) pada suhu reaksi 240 °C, LHSV 2,5/jam sebagai fungsi dari TOS (*time on stream*).

Untuk pengolahan data kinetik digunakan perangkat lunak komputasi MATLAB dan Microsoft excel. Bahan-bahan yang diperlukan untuk penelitian ini adalah FAME yang merupakan campuran metil laurat (C₁₃H₂₆O₂) dan metil miristat (C₁₅H₃₀O₂) dengan perbandingan 3:1 dan gas hidrogen sebagai

kondisi reaksi tercapai, keberlangsungan reaksi diamati dengan cara mengambil sampel produk cair setiap 30 menit dan dianalisa menggunakan GC untuk mendapatkan komposisi campuran reaksi, yang selanjutnya dihitung untuk mendapatkan nilai konversi dan selektivitas. Sebelum alat GC

digunakan, dilakukan pengkondisian dan dikalibrasi menggunakan larutan standar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

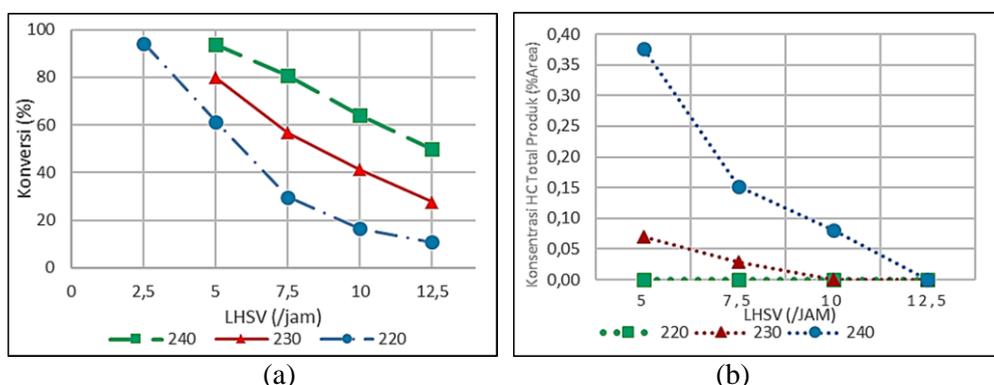
Aktivitas Katalis Cu-Mn

Reaksi dilangsungkan di dalam reaktor unggun tetap kontinyu, sehingga perlu dipelajari saat sistem reaktor mencapai *steady state* (tunak). Hasil pengamatan menunjukkan bahwa data konversi ester lemak (FAME) hampir sama pada *time on stream* (TOS) 3 hingga 6 jam, seperti disajikan pada Gambar 2 (a) untuk uji aktivitas pada suhu 230 °C dan LHSV 5/jam. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa reaksi telah berlangsung secara tunak mulai TOS 3 jam. Oleh karena itu, data konversi yang digunakan dalam penentuan parameter kinetik merupakan konversi rata-rata dari jam ke-3 sampai ke-6. Begitu pula selektivitas alkohol lemak yang dihasilkan pada TOS 3 hingga 6 jam tidak jauh berbeda, seperti ditunjukkan pada Gambar 2 (b) untuk uji aktivitas pada suhu 240 °C dan LHSV 2,5/jam. Selektivitas alkohol lemak tersebut sebesar $98,9\% \pm 0,07$. Selektivitas yang tinggi menunjukkan bahwa produk samping tidak terlalu banyak.

Hampir seluruh FAME yang bereaksi terkonversi menjadi alkohol lemak (FAOH). Nilai LHSV ester lemak berbanding lurus dengan laju alir volumetrik umpan ester lemak. Semakin tinggi laju alir volumetrik, maka waktu tinggal reaktan di dalam reaktor, sehingga kontak reaktan dengan katalis berlangsung lebih cepat. Dengan demikian, konversi yang dihasilkan semakin rendah. Reaksi dilangsungkan pada 3 nilai suhu yang berbeda. Peningkatan suhu mengakibatkan peningkatan laju pembentukan produk (mempercepat kinetik), sehingga konversi ester lemak juga meningkat. Profil konversi ester lemak terhadap LHSV pada berbagai suhu ditampilkan pada Gambar 3 (a).

Hidrogenasi ester lemak dengan nama dagang FAME 24, menghasilkan produk utama berupa : (1) lauril alkohol/dodekanol/ $C_{12}H_{25}OH$ (untuk singkatnya diberi lambang *OH12*), (2) miristil alkohol/tetradekanol/ $C_{14}H_{29}OH$ (disingkat jadi *OH14*), (3) dan cetil alkohol/palmitil alkohol/hexadekanol/ $C_{16}H_{33}OH$ (disingkat jadi *OH16*). Di samping itu terdapat beberapa produk samping berupa hidrokarbon, yaitu dodekana/ $C_{12}H_{26}$ (disingkat jadi *HC12*) dan tetradekana/ $C_{14}H_{30}$ (disingkat jadi *HC14*), alkohol lemak dengan jumlah C ganjil, yaitu undekanol/ $C_{11}H_{23}OH$ (disingkat jadi *OH11*) dan tridekanol/ $C_{13}H_{27}OH$ (disingkat jadi *OH13*), serta senyawa aldehid dengan jumlah atom karbon, C_{14} (disingkat jadi *O14*). Konsentrasi masing-masing produk samping umumnya sangat kecil, tidak lebih dari 0,2%. *HC12* dan *HC14* mungkin terbentuk karena terjadi hidrogenasi lanjut alkohol lemak *OH12* dan *OH14* menjadi hidrokarbon dan air. *O14* dapat terbentuk karena reaksi dehidrogenasi alkohol lemak menjadi aldehid (Schwerin, 2005). *OH11* dapat terbentuk karena reaksi hidrogenasi metil ester undekanoat (*ME11*).

Konsentrasi hidrokarbon total dalam produk pada berbagai suhu dan LHSV disajikan pada Gambar 3 (b). Semakin tinggi suhu reaksi, konsentrasi hidrokarbon (*HC*) total dalam produk semakin meningkat. Selama reaksi hidrogenasi berlangsung, *HC* dapat terbentuk melalui dekomposisi termal ester dan dehidrasi alkohol lemak (Rieke dkk., 1997; Klaewkla dkk., 2014). Peningkatan suhu menyebabkan dekomposisi termal senyawa ester lemak dan dehidrasi alkohol lemak semakin tinggi, sehingga *HC* yang terbentuk semakin banyak. Selain itu, reaksi pembentukan *HC* merupakan reaksi endotermal (Zhilong, 2011). Jadi peningkatan suhu dapat menyebabkan konversi FAME menjadi *HC* semakin besar. Peningkatan nilai LHSV



Gambar 3. (a) Konversi reaktan ester lemak (FAME) dan (b) konsentrasi hidrokarbon (*HC*) dalam produk pada rentang LHSV 2,5-12,5/jam, tekanan 50 bar, dan suhu reaksi 220 - 240 °C

menyebabkan penurunan konsentrasi hidrokarbon dalam produk. Hal ini terjadi karena semakin tinggi LHSV, waktu tinggal semakin kecil, sehingga kecenderungan FAME untuk bereaksi dengan hidrogen membentuk berbagai produk, termasuk *HC* juga semakin kecil. Hal ini juga didukung oleh hasil penelitian Hark (2001).

Penentuan Parameter Kinetika Hidrogenasi Ester Lemak menjadi Alkohol Lemak

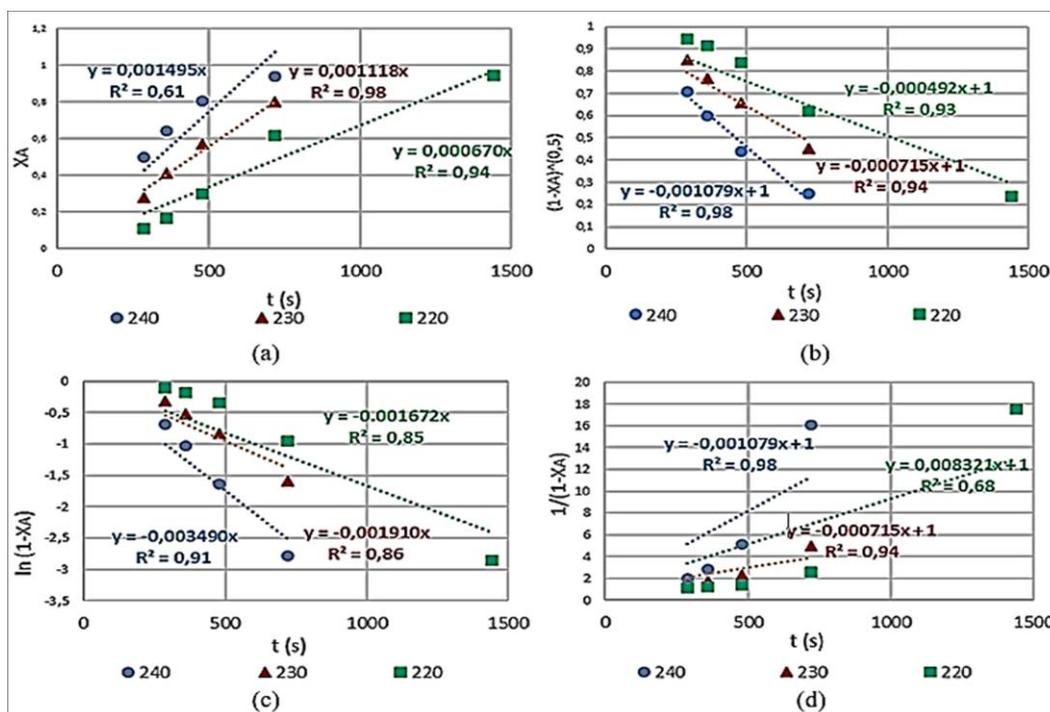
Model persamaan kinetik yang dipilih adalah model hukum pangkat (Power Law). Penentuan nilai parameter kinetika reaksi hidrogenasi ester lemak (FAME) menjadi alkohol lemak (FAOH) dilakukan dengan metode integrasi menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel dan MATLAB. Data kinetik yang diperlukan adalah konversi FAME, LHSV, dan suhu reaksi yang diperoleh berdasarkan percobaan. Gas hidrogen sekalipun sebagai reaktan, dianggap tidak mempengaruhi laju reaksi karena disuplai melebihi kebutuhan reaksi secara stoikiometri, sehingga berorde 0 (nol) semu.

Untuk menentukan parameter kinetik dengan metode integrasi, dicoba beberapa orde reaksi. Kesuaian data dengan model untuk orde 0, 0,5, 1, dan 2 ditunjukkan pada Gambar 4. Tampak bahwa semakin tinggi temperatur, nilai konstanta laju reaksi, *k* semakin besar. Berdasarkan nilai R^2 untuk masing-

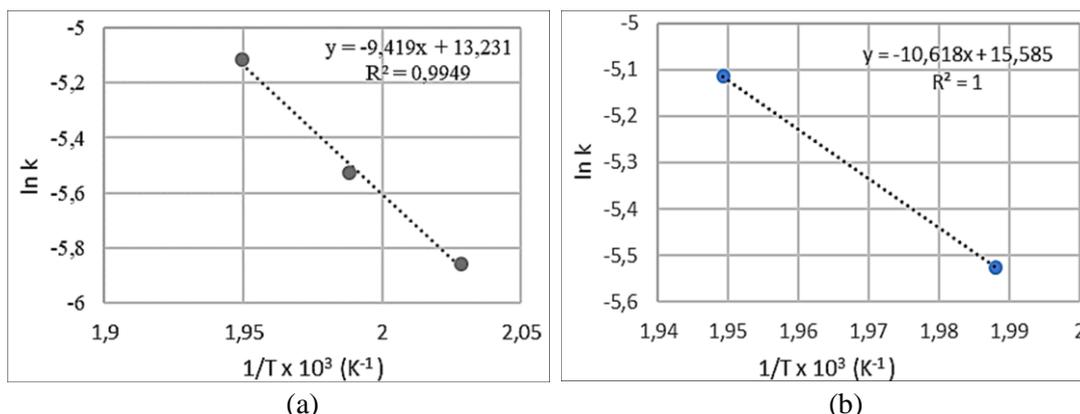
masing orde pada temperatur 220, 230, dan 240 °C, diperoleh hasil bahwa tebakan orde 0,5 memiliki nilai R^2 rata-rata yang paling mendekati nilai satu. Kemudian nilai *k* pada model orde 0,5 ini dihubungkan dengan temperatur berdasarkan pada persamaan Arrhenius, dan disajikan pada Gambar 5. Sekalipun untuk orde 0,5 nilai R^2 untuk semua suhu reaksi sudah baik (0,93 – 0,98), namun kesesuaian data percobaan dan model untuk suhu reaksi 220 °C memberikan galat yang masih besar, yaitu 28,22%. Selanjutnya dicoba jika hanya diwakili oleh data-data untuk suhu 230 dan 240 °C saja, ternyata memberikan rata-rata galat yang dihasilkan jauh lebih kecil, yaitu 7,61%, dan parameter kinetik yang diperoleh disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Energi aktivasi dan tetapan Arrhenius reaksi hidrogenasi ester lemak pada katalis Cu-Mn komersial dan tekanan 50 bar

Parameter kinetik	Untuk percobaan pada suhu reaksi (jika)	
	220, 230, dan 240 °C	230 dan 240 °C (saja)
Energi Aktivasi	76,58 kJ/mol 18,23 kkal/mol	86,32 kJ/mol 18,23 kkal/mol
Tetapan Arrhenius	$5,57 \cdot 10^5 \text{ M}^{0,5}/\text{s}$	$5,87 \cdot 10^6 \text{ M}^{0,5}/\text{s}$



Gambar 4. Kurva linearisasi konversi (X_A) terhadap waktu ruang (t) untuk tebakan (a) orde 0, (b) orde 0,5, (c) orde 1, dan (d) orde 2 pada tekanan 50 bar dan untuk berbagai suhu reaksi.



Gambar 5. Aluran nilai konstanta laju reaksi (k) terhadap temperatur, T (a) untuk data 3 suhu (220, 230, dan 240 °C) dan (b) untuk data 2 suhu (230 dan 240 °C) untuk menentukan parameter kinetik hidrogenasi FAME

Parameter kinetika yang telah diperoleh kemudian divalidasi dengan perangkat lunak MATLAB. Hasil pengolahan data memberikan nilai orde 0,53 dengan nilai energi aktivasi (E_a) sebesar 87,5 kJ/mol dan tetapan Arrhenius (A) sebesar $4,64 \cdot 10^6 \text{ M}^{0,5}/\text{s}$. Nilai parameter kinetik yang diperoleh dari pengolahan data menggunakan perangkat lunak MATLAB mendekati nilai parameter kinetik hasil pengolahan data secara analitik, oleh karena itu dapat disimpulkan parameter kinetik yang diperoleh cukup valid.

Limitasi Difusi Eksternal dan Difusi Internal

Pengumpulan data kinetik dalam percobaan harus pada kondisi rejim kinetik, dimana laju difusi berlangsung cepat, sehingga tidak mengendalikan reaksi (peristiwa kimia). Pada studi ini pengecekan dilakukan dengan cara membandingkan parameter kinetik secara global dengan nilai teoritis, dalam hal ini nilai energi aktivasi (E_a). Untuk reaksi yang dikendalikan oleh proses/peristiwa difusi, nilai energi aktivasi reaksi berkatalis heterogen adalah 4-12 kJ/mol (Satterfield dkk., 1996; OpenStax, 2016; Nurliana dkk., 2020). Sedangkan nilai E_a yang didapat dari pengolahan data kinetik adalah di atas 86,32 kJ/mol, lebih dari 7 kali lipat, sehingga terbukti bahwa reaksi yang diselenggarakan sudah bebas dari rejim difusi dan berada pada rejim kinetik. Oleh karena itu, dapat dipastikan bahwa tahap pengendali reaksi dari uji aktivitas yang dilangsungkan adalah peristiwa kimia.

KESIMPULAN

Reaksi hidrogenasi ester lemak menjadi alkohol lemak pada suhu 230 – 240 °C ($T = 503 - 513 \text{ K}$) dan tekanan 50 bar mengikuti reaksi orde 0,5 terhadap konsentrasi ester lemak [FAME] dengan nilai energi

aktivasi, E_a sebesar 86,32 kJ/mol dan tetapan Arrhenius, A sebesar $5,87 \cdot 10^6 \text{ M}^{0,5}/\text{s}$, sehingga diperoleh persamaan kinetika global:

$$-r_{\text{FAME}} = 5,87 \times 10^6 \exp\left(\frac{-86320}{8,314 \times T}\right) C_{\text{FAME}}^{0,5} \quad (4)$$

dengan $-r_{\text{FAME}}$ = laju konsumsi FAME (M/s); T = temperatur absolut (K); dan C_{FAME} = konsentrasi FAME (M).

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didanai oleh Program Riset Kelompok Keahlian Institut Teknologi Bandung (P3MI – ITB) tahun 2019.

DAFTAR PUSTAKA

- Rachim, G. S. A., Raya, I., and Zakir, M., 2017. Modifikasi Katalis CaO Untuk Produksi Biodiesel Dari Minyak Bekas, *Indo. J. Chem. Res.*, 5(1), 47-52.
- Hark, S.V.D., and Harrod, M., 2001. Hydrogenation of Oleochemicals at Supercritical Single Phase Condition: Influence of Hydrogen and Substrate Concentrations on the Process, *App. Catal A: General*, 210, 207-215.
- He, L., Li, X., Lin, W., Li, W., Cheng, H., Yu, Y., Fujita, S., Arai, M., and Zhao, F., 2014. The Selective Hydrogenation of Ethyl Stearate to Stearyl Alcohol over Cu/Fe Bimetallic Catalysts, *J. Molecular Catal. A: Chemical*, 392, 143-149.
- Irdhawati, I., Sinthadevi, N. N. T., dan Sahara, E., 2020. Serbuk Gergaji Kayu Jati Teraktivasi EDTA Sebagai Penjerap Ion Tembaga (II) dan Krom (III). *Indo. J. Chem. Res.*, 7(2), 114-119.

- Kemenperin, 2014. *Profil Industri Oleokimia Dasar dan Biodiesel*, Kementerian Perindustrian-Republik Indonesia, Jakarta
- Klaewkla, R., Arend, M., and Hoelderich, W. F., 2014. *A Review of Mass Transfer Controlling the Reaction Rate in Heterogenous Catalytic Systems*, Intech Open Access Publisher, London
- MarketWatch, 2019. *Oleochemical Fatty Acids Industry: 2019 Market Research with Market Size & Growth, Manufacturers, Segments and 2023 Forecasts Research Top 20 Countries Data*, URL: <https://www.marketwatch.com/press-release/oleochemical-fatty-acids-industry-2019-market-research-with-market-size-growth-manufacturers-segments-and-2023-forecasts-research-top-20-countries-data-2019-10-09>. [diunduh : 25 Nov. 2019]
- Noweck, K., 2011. Production, Technologies, and Applications of Fatty Alcohols, *4th Workshop on Fats and Oils as Renewable Feedstock for the Chemical Industry Karlsruhe*, Jerman.
- Nurliana, L., Kurniawati, D., Musta, R., Kadir, L. A., dan Dewi, F., 2020. Tinjauan Kinetika Kimia Daya Hambat Minyak Daun Cengkeh (*Syzygium aromaticum*) dan Hasil Mikroenkapsulasinya Terhadap *Eschericia coli*, *Indo. J. Chem. Res.*, 7(2), 151-158.
- OpenStax, 2016. *Chemistry*, Chapter 12 Kinetics, OpenStax CNX. [on-line]. URL: <http://cnx.org/contents/85abf193-2bd2-4908-8563-90b8> [June 20, 2016]
- Peng, Y., Zhongyi, L., Wanqing, Z., Haijie, S., and Shouchang, L., 2010. Cu-Zn/Al₂O₃ Catalyst for the Hydrogenation of Esters to Alcohols, *Chinese J. Catal.*, 31, 769-775.
- Rieke, R. D., Thakur, D. S., Roberts, B. D., and White, G.T., 1997. Fatty Methyl Ester Hydrogenation to Fatty Alcohol Part 1: Correlation between Catalyst Properties and Activity/Selectivity, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 74, 333-339.
- Schwerin, A., Pelzer, G., Friesenhagen, L., and Gutsche, B., 2005. *US Patent 6,897,342 Method for Producing Aldehydes*, United States.
- Satterfield, C.N., 1996. *Heterogenous Catalysis in Industrial Practice*, 2nd Ed., Krieger Publishing Company, Florida.
- Suyenty, E., Sentosa, H., Agustine, M., Anwar, S., Loe, A., and Sutanto, E., 2007, Catalyst in Basic Oleochemicals, *Bull. Chem. React. Eng. Cat.*, 2, 22-31.
- Thakur, D.S., and Kundu, A., 2016. Catalysts for Fatty Alcohol Production from Renewable Resources. *J Am Oil Chem Soc* 93, 1575-1593.
- Zhilong, Y., 2011. *Research on Hydrogenation of FAME to Fatty Alcohols at Supercritical Conditions*, Intech Open Access Publisher, London.
- Zuzaniuk, V., Kochloefl, K., and Maletz, G., 2007. *Catalysts, and Process Development for Production of Oleochemicals from Palm Oil Using High Throughput Experimentation*, Netherland, URL: www.nacatsoc.org/20nam/abstracts/O-S1-10.pdf, [diunduh 30 Des. 2019]