

Kinetika Reaksi Esterifikasi *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD) menjadi Biodiesel dengan Katalis Zeolit-Zirkonia Tersulfatasi

Masduki, Sutijan*, Arief Budiman
Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika no.2 Kampus UGM Yogyakarta

Abstract

Energy crisis due to depletion of crude oil resources has been a motivation for alternative energy search. Biodiesel becomes a potential among other alternative energy sources. However, large scale biodiesel production is hampered by the raw materials which become expensive and tend to compete with the source of food needs. Therefore, a search for an alternative inexpensive raw material is necessary. Palm fatty acid distillate (PFAD) is one of alternative raw materials can be utilized. The present work objective was to investigate reaction kinetics of PFAD esterification for biodiesel with zirconium sulphated zeolite as catalyst.

PFAD as a source of fatty acid underwent esterification to produce biodiesel in a three necked flask equipped with heater, stirrer and reflux condenser. In order to study the reaction kinetics, samples were collected consecutively every 10 minutes and the conversion of the fatty acid in each sample was determined. Here, two esterification reaction models were proposed i.e. pseudo-homogeneous first order reaction model and heterogeneous catalytic reaction model.

The results showed that calculated conversion for both proposed models were in a good agreement with the experimental data. The pseudo homogeneous reaction model has an activation energy of 11.60 kJ/mole and a pre-exponential factor of $5.82 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}$. Whereas, the heterogeneous reaction model has an activation energy of 950.46 kJ/mole and pre-exponential factor of $4.11 \cdot 10^{10} \text{ dm}^6 \cdot \text{g cat}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. The maximum conversion of 75.68% was obtained at 80 minute reaction time, at 65°C with the use of 3% catalyst and a PFAD:methanol molar ratio of 1:10.

Keywords: biodiesel, kinetics, esterification, *palm fatty acid distillate*, zirconium sulphated zeolite

Abstrak

Krisis energi karena menipisnya cadangan minyak bumi mendorong manusia untuk berinovasi menciptakan sumber energi alternatif. Salah satu sumber energi alternatif yang potensial untuk dikembangkan adalah biodiesel. Produksi biodiesel skala besar terkendala oleh harga bahan baku yang mahal dan cenderung bersaing dengan kebutuhan pangan. Oleh karena itu perlu dicari bahan baku yang lebih murah dan tidak bersaing dengan kebutuhan pangan. Salah satu bahan yang dapat memenuhi kepentingan tersebut adalah *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD). Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari kinetika reaksi esterifikasi PFAD menjadi biodiesel dengan katalis zeolit zirkonia tersulfatasi.

Palm fatty acid distillate (PFAD) sebagai sumber asam lemak diesterifikasi menjadi biodiesel di dalam labu leher tiga yang dilengkapi dengan pemanas, pengaduk dan sistem refluks. Untuk memperoleh data kinetika, sampel diambil pada interval waktu 10 menit untuk dianalisis konversi asam lemaknya. Model kinetika reaksi esterifikasi PFAD menjadi biodiesel didekati dengan reaksi pseudo-homogen orde satu dan reaksi heterogen katalitik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua model kinetika yang diusulkan cukup sesuai dengan data percobaan. Hasil perhitungan model reaksi pseudo-homogen menghasilkan energi aktivasi sebesar 11,60 kJ/mol dan faktor pre-eksponensial sebesar $5,82 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}$. Sedangkan untuk model reaksi heterogen katalitik diperoleh energi aktivasi sebesar 950,46 kJ/mol dan faktor pre-eksponensial sebesar $4,11 \times 10^{10} \text{ dm}^6 \cdot \text{gkat}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Konversi reaksi maksimum sebesar 75,68% diperoleh pada waktu reaksi 80 menit, suhu reaksi 65°C dengan konsentrasi katalis 3% dan perbandingan mol PFAD:metanol = 1:10.

Kata kunci: biodiesel, kinetika, esterifikasi, *palm fatty acid distillate*, zeolit zirkonia tersulfatasi.

Pendahuluan

Biodiesel merupakan salah satu sumber energi alternatif yang menjanjikan karena bersifat terbarukan dan ramah lingkungan. Namun

produksi biodiesel skala besar terkendala oleh harga bahan baku yang mahal dan cenderung bersaing dengan kebutuhan pangan. Untuk itu perlu dicari bahan baku yang murah dan *non edible*. *Palm fatty acid distillate* (PFAD) merupakan salah satu bahan yang dapat memenuhi kebutuhan tersebut. PFAD adalah

* Alamat korespondensi: masduki_myfriend@yahoo.com

produk samping proses pemurnian *crude palm oil* (CPO) menjadi minyak goreng, yang berjumlah sekitar 5% dari berat CPO. Dengan ketersediaan sebesar itu maka PFAD dinilai sangat layak untuk dijadikan bahan baku dalam produksi biodiesel di Indonesia.

Salah satu kelemahan PFAD sebagai bahan baku biodiesel adalah kandungan asam lemak bebas (FFA) yang sangat tinggi. Apabila bahan ini langsung mengalami transesterifikasi akan dihasilkan sabun dalam jumlah yang besar dan dapat mengganggu proses pemisahan biodiesel. Metode yang tepat untuk produksi biodiesel dari bahan dengan kandungan FFA yang tinggi adalah reaksi dua tahap, yaitu esterifikasi untuk mengkonversi FFA menjadi FAME (*fatty acid methyl ester*), dilanjutkan dengan transesterifikasi untuk mengkonversi trigliserida menjadi FAME.

Zirkonia tersulfatasi merupakan katalis asam padat yang efisien untuk reaksi transesterifikasi dan esterifikasi (Kiss, dkk., 2006; Garcia, dkk., 2008; Swannakarn, dkk., 2009), dan memiliki aktivitas dan selektivitas yang tinggi pada reaksi esterifikasi (Kiss, dkk., 2005). Kelemahan katalis ini adalah luas permukaannya yang relatif kecil. Untuk meningkatkan luas permukaan dari zirkonia tersulfatasi, zeolit digunakan sebagai badan pengemban. Oleh karena itu zeolit-zirkonia tersulfatasi merupakan katalis zirkonia tersulfatasi yang dimodifikasi dengan cara diembankan ke dalam zeolit. Katalis ini merupakan katalis padat yang bersifat super asam, dan memiliki luas permukaan spesifik lebih tinggi dibandingkan dengan zirkonia tersulfatasi. Pada penelitian ini kondisi operasi reaksi divariasikan untuk mengamati pengaruh variabel yang terlibat terhadap konversi asam lemak bebas. Selain itu diajukan beberapa model kinetika esterifikasi PFAD dengan menggunakan katalisator zeolit-zirkonia tersulfatasi. Dalam hal ini reaksi kesetimbangan esterifikasi PFAD menjadi metil ester (biodiesel) dapat dinyatakan seperti persamaan (1).



a. Model reaksi *pseudo*-homogen

Model reaksi *pseudo*-homogen didekati dengan asumsi bahwa transfer massa cairan (reaktan) ke dalam padatan (katalis) berlangsung sangat cepat, sehingga dapat diabaikan terhadap kecepatan reaksi. Secara matematis model *pseudo*-homogen order satu dapat dinyatakan seperti persamaan (2).

$$-\frac{dC_A}{dt} = k C_A \quad (2)$$

dengan C_A adalah konsentrasi FFA pada waktu (t) dan k konstanta laju reaksi. Menurut Arrhenius, konstanta laju reaksi dipengaruhi oleh suhu dan dapat dinyatakan dengan persamaan (3).

$$k = A_r \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

dengan A_r adalah faktor tumbukan (L/mol.det), E_a energi aktivasi (kJ/mol) dan R tetapan gas ideal (L.atm/mol.°C).

b. Model reaksi heterogen katalitik

Kinetika reaksi heterogen katalitik diuraikan menurut langkah sebagai berikut (Sawitri, 2012):

- Laju transfer massa FFA (A) dari cairan ke permukaan luar katalis

$$N_A = k_A a_c m (C_A - C_{As}) \quad (4)$$

- Laju transfer massa metanol (B) dari cairan ke permukaan luar katalis

$$N_B = k_B a_c m (C_B - C_{Bs}) \quad (5)$$

- Laju reaksi gabungan yang melibatkan *effectiveness factor* (η)

$$-r_A = \eta k_r m C_{As} C_{Bs} \quad (6)$$

Persamaan neraca massa dapat dituliskan sebagai berikut :

- Neraca massa FFA pada fasa cair

$$\frac{dX_A}{dt} = k_A a_c m \left(1 - X_A - \frac{C_{As}}{C_{A0}}\right) \quad (7)$$

- Neraca massa FFA pada katalis

$$\frac{dC_{As}}{dt} = k_A a_c m (C_A - C_{As}) - \eta k_r m C_{As} C_{Bs} \quad (8)$$

- Neraca massa metanol pada katalis

$$\frac{dC_{Bs}}{dt} = k_B a_c m (C_B - C_{Bs}) - \eta k_r m C_{As} C_{Bs} \quad (9)$$

Model matematis ini memberikan 3 persamaan; (7), (8) dan (9) dengan 3 variabel yang tidak diketahui (k_A , k_B dan ηk_r) Menurut Fogler (1999), nilai k_A , k_B dan bilangan Sherwood (Sh) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$k_A = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{d_p} \quad (10)$$

$$k_B = \frac{Sh \cdot D_{BA}}{d_p} \quad (11)$$

$$Sh = 2 + 0,6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (12)$$

Nilai D_{AB} dapat dihitung dengan persamaan Wilke-Chang (Perry, 1999).

$$D_{AB} = 7,14 \cdot 10^{-8} \frac{(\varphi \cdot M_B)^{1/2} T}{\mu_B V_T^{0,6}} \quad (13)$$

$$D_{BA} = 7,14 \cdot 10^{-8} \frac{(\varphi \cdot M_A)^{1/2} T}{\mu_A \vartheta_B^{0,6}} \quad (14)$$

Dengan mengambil asumsi bahwa partikel padatan sangat kecil, maka bilangan Reynold (Re) dapat dianggap nol. Nilai ηk_r dinyatakan sebagai k'_r , yang merupakan konstanta laju reaksi semu heterogen katalitik, dan mengikuti persamaan Arrhenius:

$$\eta k_r = k'_r = A_r \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (15)$$

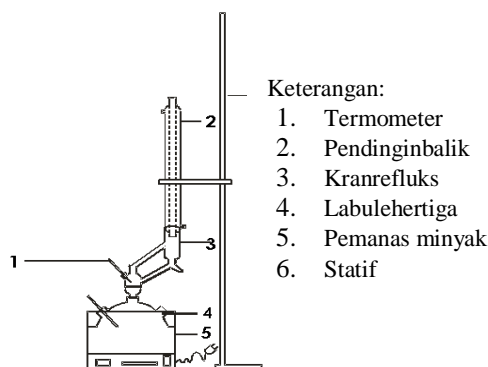
Metode Penelitian

Bahan penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah (1) *palm fatty acid distillate* (PFAD) yang diperoleh dari PT. Sinar Mas Tbk dengan kandungan asam lemak bebas sebesar 82,5 % (w/w) (2) Metanol p.a., E-Mercks dengan kemurnian 99,99% dan densitas 0,79 g/cm³, (3) Zirkonia oksiklorida oktahidrat (ZrOCl₂.8H₂O) p.a, E-Merck, (4) Zeolit alam yang diperoleh dari Wonosari, Yogyakarta, dan (5) Amonium sulfat, (NH₄)₂SO₄ p.a., E-Merck.

Alat penelitian

Penelitian ini menggunakan rangkaian alat labu leher tiga yang dilengkapi dengan alat pengadukan dan pemanas minyak (*oilbath*), yang dioperasikan secara *batch* dan dilengkapi dengan sistem refluks. Gambar rangkaian alat tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Rangkaian Alat Esterifikasi

Cara Penelitian

Penelitian ini dijalankan dalam 3 tahap yang meliputi preparasi katalis, reaksi esterifikasi dan

analisis sampel. Preparasi katalis dilakukan dengan menimbang zeolit alam yang telah diaktivasi sebanyak 50 gram. Selanjutnya ZrOCl₂.8H₂O seberat 5% dari berat zeolit dilarutkan kedalam aquades, dan ditambahkan ke dalam zeolit yang telah disiapkan. Bahan dikeringkan di dalam oven bersuhu 100°C dan dioksidasi pada suhu 400°C selama 4 jam. Setelah proses oksidasi selesai, bahan dicampur dengan (NH₄)₂SO₄ pada perbandingan berat 2:5 dan didiamkan selama 18 jam pada suhu ruangan. Selanjutnya bahan dikalsinasi selama 5 jam pada suhu 400°C dan katalis siap untuk digunakan.

PFAD ditimbang sebanyak 50 gram dan dimasukkan ke dalam labu leher tiga yang telah berisi metanol dengan perbandingan tertentu. Reaksi esterifikasi dijalankan selama 80 menit dengan pengambilan sampel setiap selang 10 menit. Proses yang sama dijalankan untuk variasi perbandingan mol PFAD : metanol (1:5; 1:7,5; 1:10 dan 1:12,5), konsentrasi katalis (1%, 2%, 3% dan 5%), serta suhu reaksi (55°C, 60°C dan 65°C).

Analisis sampel dilakukan dengan titrasi asam-basa menggunakan larutan NaOH 0,1N. Volume NaOH yang dibutuhkan untuk mencapai titik ekuivalen dicatat untuk menghitung *acidity index* menurut persamaan berikut (Tesser, dkk., 2005) :

$$a = \frac{1000 \cdot V \cdot Mw \cdot C}{W} \quad (16)$$

dengan

- a : *acidity index*,
- V : volume NaOH (mL),
- Mw : berat molekul NaOH,
- C : konsentrasi NaOH (gek/mL),
- W : berat sampel yang dititrasi (g).

Untuk menghitung konversi FFA digunakan persamaan Zubir dan Chin (2010).

$$x_A = \frac{a_i - a_t}{a_i} \quad (17)$$

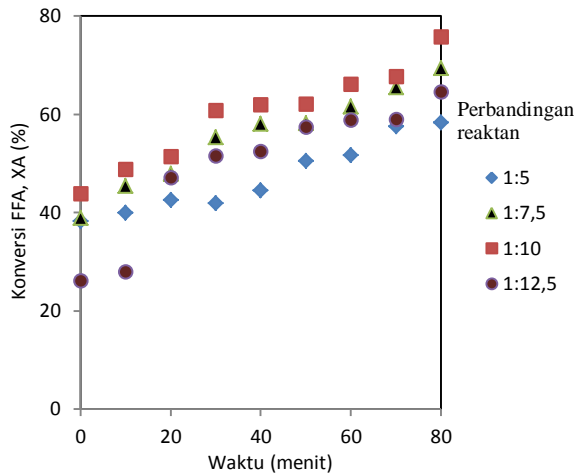
dengan x_A dengan konversi FFA, a_i *acidity index* mula-mula, a_t *acidity index* pada waktu (t) tertentu.

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh perbandingan reaktan

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara konversi asam lemak bebas (FFA) dan waktu reaksi pada berbagai perbandingan pereaksi. Terlihat bahwa untuk setiap nilai perbandingan pereaksi, konversi FFA meningkat seiring dengan waktu. Namun, tingkat konversi yang dihasilkan

terlihat dipengaruhi oleh perbandingan pereaksi yang digunakan.



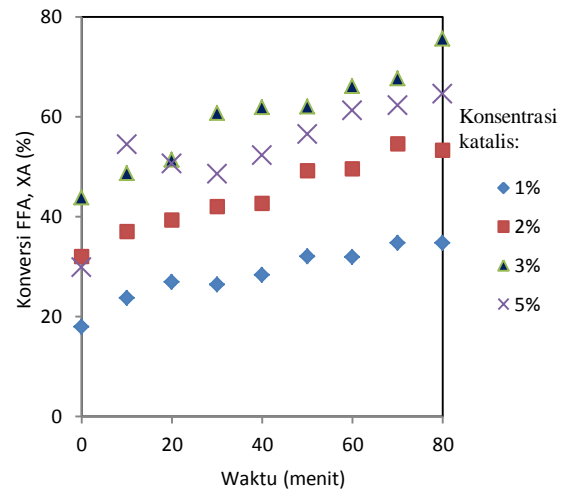
Gambar 2. Konversi FFA terhadap waktu pada berbagai perbandingan pereaksi

Pada Gambar 2 terlihat bahwa pada nilai perbandingan mol pereaksi PFAD : metanol pada kisaran 1:5 – 1:10, konversi reaksi meningkat dengan naiknya perbandingan mol pereaksi. Hal ini terjadi karena semakin banyaknya jumlah metanol dalam pereaksi maka peluang terjadi tumbukan dengan molekul PFAD semakin besar dan konversi semakin tinggi. Namun, penambahan metanol dalam jumlah yang lebih besar tidak kemudian dapat serta merta meningkatkan konversi reaksi. Pada perbandingan PFAD: metanol sebesar 1:12,5 terlihat bahwa konversi reaksi bahkan cenderung turun. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi antara PFAD dan metanol tidak hanya ditentukan oleh kinetika reaksi antar kedua molekul. Reaksi PFAD dan metanol adalah reaksi heterogen yang juga ditentukan oleh transfer massa komponen yang bereaksi di antara fasa yang berbeda.

Pengaruh Konsentrasi Katalis

Pada Gambar 3 terlihat bahwa konversi FFA meningkat dengan semakin meningkatnya konsentrasi katalis dari 1% ke 3%. Semakin tingginya konsentrasi katalis maka semakin besar pula jumlah situs aktif yang diperlukan untuk reaksi. Namun, pada konsentrasi katalis sebesar 5% terlihat bahwa konversi reaksi cenderung lebih rendah bila dibandingkan dengan konversi pada konsentrasi katalis yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa, penambahan situs aktif reaksi sudah tidak lagi meningkatkan laju reaksi. Dengan kata lain, pada konsentrasi katalis yang tinggi ini, reaksi antar molekul pereaksi sudah tidak ditentukan lagi oleh reaksi pada permukaan

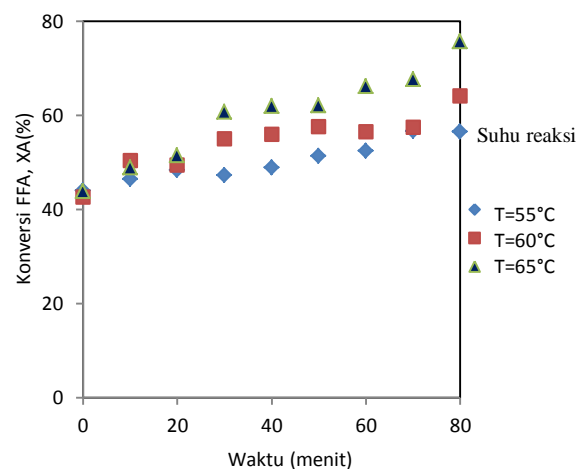
katalis, namun lebih dipengaruhi oleh tahanan transfer massa komponen pereaksi dari badan cairan ke permukaan katalis di mana situs aktif berada.



Gambar 3. Pengaruh konsentrasi katalis terhadap konversi FFA

Pengaruh Suhu Reaksi

Pada penelitian ini dipelajari pengaruh suhu terhadap konversi reaksi. Suhu reaksi divariasikan pada 55, 60 dan 65°C dimana variabel reaksi lain dijaga tetap (perbandingan PFAD : metanol = 1:10 dan konsentrasi katalis 3% berat PFAD). Konversi asam lemak bebas (FFA) pada berbagai waktu dan suhu reaksi dapat dilihat pada Gambar 4. Terlihat bahwa konversi FFA relatif meningkat dengan semakin tingginya suhu reaksi. Hal ini terjadi karena pada suhu yang lebih tinggi maka laju reaksi akan semakin cepat. Pada suhu yang lebih tinggi, energi kinetik yang dimiliki oleh molekul pereaksi semakin besar dan menyebabkan peluang terjadinya reaksi semakin besar.

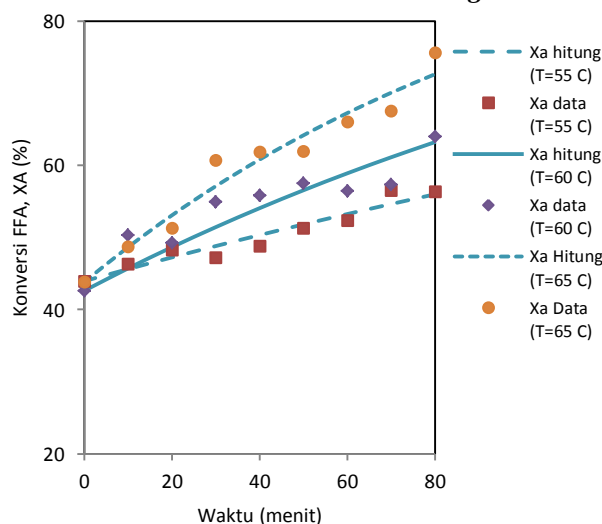


Gambar 4. Pengaruh suhu reaksi terhadap konversi FFA

Fenomena Reaksi Spontan

Pada penelitian ini terlihat bahwa konversi FFA meningkat dengan sangat cepat sesaat katalis ditambahkan ke dalam reaktor. Selanjutnya peningkatan konversi terjadi secara perlahan. Fenomena serupa juga dilaporkan oleh Rattanaphra dkk. (2010), Alenezi dkk. (2010), Park dkk. (2010) dan Fernandes dkk (2012). Pada saat penambahan katalis di dalam reaktor hanya terdapat reaktan (FFA dan metanol) yang sudah siap bereaksi di permukaan katalis. Sehingga pembentukan FAME terjadi dengan sangat cepat. Namun, untuk waktu selanjutnya molekul pereaksi harus mendifusi di dalam padatan katalis untuk mencapai situs aktif yang tersedia. Hambatan transfer massa reaktan ke permukaan aktif katalis yang lebih besar menyebabkan reaksi yang terjadi berlangsung lebih lambat (Park dkk., 2010). Selain itu, konversi FFA akan menghasilkan air yang keberadaannya dapat mendeaktivasi katalis (Liu dkk., 2006).

Model Kinetika Reaksi Pseudo-Homogen



Gambar 5. Hubungan antara konversi FFA eksperimen dan hasil perhitungan pada berbagai suhu reaksi dengan model pseudo homogen (b) heterogen katalitik

Berdasarkan data konversi pada berbagai suhu dapat dihitung konstanta laju reaksi (k_r'). Bila nilai k_r' diketahui maka pers. (2) dapat diselesaikan untuk kemudian ditentukan konversi reaksi FFA. Nilai k_r' dicoba-coba sehingga menghasilkan konversi hasil hitungan yang mendekati data percobaan (metode minimasi *Sum of Squares of Errors*). Nilai konversi data percobaan dan hasil perhitungan disajikan pada Gambar 5. Pada model ini terlihat bahwa kinetika reaksi esterifikasi PFAD dengan katalis zeolit-zirkonia tersulfatasi dapat didekati dengan model

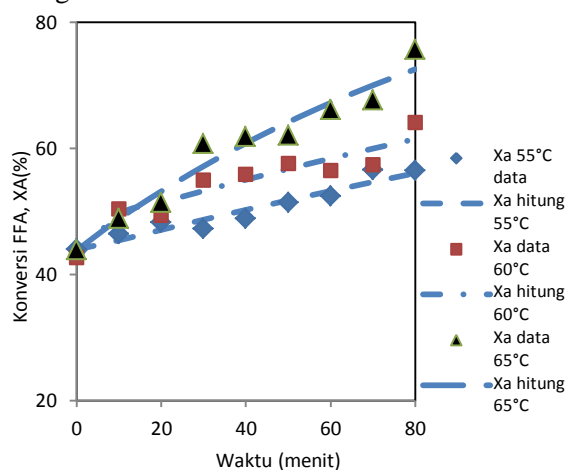
kinetika reaksi heterogen katalitik karena memberikan nilai SSE yang minimum.

Konstanta laju reaksi pada berbagai suhu selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai faktor frekuensi tumbukan (A_r) dan energi aktivasi (E_a) berdasarkan persamaan Arrhenius. Dengan metoda regresi linier diperoleh nilai A_r sebesar $3,2103 \times 10^{13}$ L/mol.det dan E_a sebesar 100,5744 kJ/mol.

Model Kinetika Reaksi Heterogen Katalitik

Data konversi pada berbagai suhu juga digunakan untuk memverifikasi model kinetika reaksi heterogen. Konstanta laju reaksi ditentukan dengan metode *trial and error* untuk dapat menyelesaikan pers. (7), (8) dan (9) dan menentukan konversi reaksi tiap saat. Konversi reaksi hasil hitungan dibandingkan dengan data percobaan untuk mendapatkan nilai *Sum of Squares of Errors* (SSE) minimum. Konversi data percobaan dan hasil hitungan disajikan pada Gambar 6. Terlihat bahwa, kinetika reaksi esterifikasi PFAD dengan katalis zeolit-zirkonia tersulfatasi dapat didekati dengan model kinetika reaksi heterogen.

Berdasarkan nilai konstanta kecepatan reaksi pada berbagai suhu, dapat dihitung nilai energi aktivasi (E_a) dan frekuensi tumbukan (A_r) dengan menggunakan metoda linierisasi persamaan Arrhenius. Nilai energi aktivasi (E_a) yang diperoleh sebesar 950,46 kJ/mol dan nilai frekuensi tumbukan (A_r) sebesar $4,1129 \times 10^{10}$ dm⁶.gkat⁻¹.mol⁻¹.s⁻¹.



Gambar 6. Hubungan antara konversi FFA eksperimen dan hasil perhitungan pada berbagai suhu reaksi dengan model heterogen katalitik

Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Kondisi optimal reaksi esterifikasi PFAD dengan metanol dan katalis zeolit zirkonia tersulfatasi adalah perbandingan pereaksi 1:10, konsentrasi katalis 3% dan suhu 65°C selama 80 menit dengan konversi tertinggi yang dapat dicapai sebesar 75,68%.
2. Reaksi spontan terjadi sesaat setelah katalis ditambahkan kedalam campuran reaktan.
3. Model kinetika reaksi yang dipelajari dapat didekati dengan persamaan kecepatan reaksi order 1 semu, dengan pendekatan pseudo homogen, dengan nilai koefisien pengadukan (A_r) sebesar $4,3771 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ dan energi aktivasi (E_a) sebesar 999,99 kJ/mol.
4. Dengan model reaksi heterogen katalitik diperoleh nilai koefisien pengadukan (A_r) sebesar $4,1129 \times 10^{10} \text{ dm}^6 \cdot \text{gkat}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ dan energi aktivasi (E_a) sebesar 950,46 kJ/mol.

Daftar Pustaka

- Alenezi, R., Leeke G. A., Winterbottom J. M., Santos R. C. D., Khan A. R., 2010. Esterification kinetics of free fatty acids with supercritical methanol for biodiesel production. *Energy Convers. Manage* 51, 1055–1059.
- Fernandes, S. A., Cardoso, A. L., Silva, M. J. D., 2012. A novel kinetic study of H3PW12O40 - catalyzed oleic acid esterification with methanol via ^1H NMR spectroscopy, *Fuel Processing Technol* 96, 98–103.
- Fogler, H. S., 1999. *Element of Chemical Reaction Engineering*, Prentice-Hall Inc, New York.
- Garcia, C. M., Teixeira, S., Marciniuk, L. L., Schuchardt, U., 2008. Transesterification of soybean oil catalyzed by sulfated zirconia *Bioresour. Technol* 99, 6608–6613.
- Kiss, A. A., Dimian, A. C., dan Rothenberg, G., 2006. Solid Acid Catalysts for Biodiesel Production—Towards Sustainable Energy, *Adv. Synth. Catal.*, 348, 75–81.
- Liu, Y., Lotero, E., Goodwin Jr, J. G., 2006. A comparison of the esterification of acetic acid with methanol using heterogeneous versus homogeneous acid catalyst, *J. Catal.* 242, 278–286.
- Park, Y. M., Chung, S. H., Eom, H. J., Lee, J. S., Lee, K. Y., 2010. Tungsten oxide zirconia as solid superacid catalyst for esterification of waste acid oil (dark oil), *Bioresour. Technol.* 101, 6589-6593.
- Rattanaphra, D., Harvey, A. P., Thanapimmetha, A., Srinophakun, P., 2011. Kinetic of myristic acid esterification with methanol in the presence of triglycerides over sulfated zirconia, *Renewable Energy* 36, 2679-2686.
- Sawitri, D. R., Kinetika esterifikasi pada produksi biodiesel dari palm fatty acid distilate (PFAD) dengan katalis zirkonia tersulfatasi. Tesis diajukan pada program pasca sarjana UGM, Yogyakarta.
- Tesser, R., Serio, M. D., Guida, M., Nastasi, M., dan Santacesaria, E., 2005. Kinetics of Oleic Acid Esterification with Methanol in the Presence of Triglycerides. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 7978-7982.
- Zubir, M. I., Chin, S. Y., 2010. Kinetics of Modified Zirconia-Catalyzed Heterogeneous Esterification Reaction for Biodiesel Production, *J. Appl. Sci.* 21, 2584-2589.