

SIMULASI KINETIKA REAKSI TRANSESTERIFIKASI MINYAK GORENG BEKAS BERBANTUKAN RADIASI ULTRASONIK

Haris Nu'man Aulia, Widayat*, dan Setia Budi Sasongko
Program Magister Teknik Kimia Fakultas Teknik UNDIP
Jl. Prof. Soedarto, SH. Kampus Tembalang – Semarang 50239
*Center – Biomass and Renewable Energy
E-mail: harisnumanaulia@gmail.com, yayat_99@yahoo.com

Abstrak

Biodiesel adalah bahan bakar terbarukan, biodegradable, tak beracun dibuat dari minyak atau lemak melalui transesterifikasi dengan alkohol. Pembuatan biodiesel umumnya memerlukan waktu yang lama, dimana dapat diatasi dengan proses berbantuan gelombang ultrasonik. Adapun untuk keperluan perancangan reaktor data kinetika dibutuhkan. Data-data kinetika yang ada masih terbatas pada proses konvensional. Penelitian ini bertujuan mempelajari model kinetika reaksi transesterifikasi minyak goreng bekas berbantuan radiasi ultrasonik. Penelitian drylab (simulasi dengan menggunakan perangkat lunak berbasis matriks) dilakukan dengan mengambil data sekunder dari penelitian Hingu, et al(2010). Pada penelitian tersebut radiasi ultrasonik dilakukan dengan frekuensi rendah (20 kHz) dengan parameter variasi temperatur, dan daya ultrasonik. Model kinetika reaksi yang digunakan adalah penurunan dari reaksi reversible transesterifikasi orde 4. Hasil validasi menunjukkan bahwa model kinetika reaksi yang digunakan dapat menggambarkan kondisi yang sebenarnya dari proses transesterifikasi berbantuan radiasi ultrasonik dimana nilai coefficient determination $R^2 > 0,9$. Adapun model kinetiknya adalah sebagai berikut :

$$r_A = \frac{dX_A}{dt} = 0,0011e^{\frac{0,0054P^{0,9}+3,0}{RT}} C_{A0}^4 \left[\frac{X_{Ae}^4 (1 - X_A)(M - 3X_A)^3 - X^4 (1 - X_{Ae})(M - 3X_{Ae})^3}{X_{Ae}^4} \right]$$

Dalam persamaan tersebut $r_A, P, R, T, C_{A0}, X, X_{Ae}$ dan M secara berurutan adalah kecepatan reaksi transesterifikasi, daya ultrasonik, konstanta gas ideal, suhu, konsentrasi awal bahan baku, konversi tiap waktu, konversi saat setimbang dan perbandingan molar metanol.

Kata kunci: simulasi kinetika, transesterifikasi ultrasonik

1. Pendahuluan

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif pengganti minyak solar dan terdiri dari campuran *fatty acid methyl esters* (FAMES) yang diperoleh dari sumber dapat diperbarukan seperti minyak nabati dan lemak hewan (Ma and Hanna, 1999). Secara kimia biodiesel diproduksi melalui transesterifikasi, yakni reaksi reversibel tiga tahap yang mengonversi trigliserida menjadi campuran FAMES dan gliserol dengan bantuan katalis (Han *et al.*, 2009).

Proses produksi biodiesel telah dilakukan para peneliti, diantaranya proses transesterifikasi dan esterifikasi berkatalis asam (Cao *et al.*, 2008), transesterifikasi berkatalis basa heterogen (Kawashima *et al.*, 2008), transesterifikasi dengan proses *enzymatic* (Ranganathan *et al.*, 2008), transesterifikasi via-metanol superkritis non katalis (Hawash *et al.*, 2009), transesterifikasi berbantuan microwave (Azcan and Danisman, 2008), dan transesterifikasi berbantuan gelombang ultrasonik (Stavarache *et al.*, 2007). Penelitian tersebut dilakukan secara intensif untuk memperbaiki konversi, waktu reaksi, konsumsi bahan, dan pengaruh lingkungan (Marchetti *et al.*, 2008).

Jika dibandingkan dengan beberapa metode yang telah dilakukan para peneliti, transesterifikasi berbantuan ultrasonik memiliki beberapa keunggulan, antara lain menghasilkan yield yang besar (98-99%) dengan jumlah penggunaan katalis yang rendah. Proses ini sangat menghemat waktu dan energi, sebagai contoh : dalam sistem reaktor batch konvensional yang dikerjakan 1 jam atau lebih bila dikerjakan dengan reaktor berbantuan ultrasonik hanya memerlukan waktu 5 menit. Proses ini juga mengurangi waktu pemisahan yang statis sampai 25 menit, dibandingkan 8 jam pada metode konvensional (Refaat and Sheltawy, 2008).

Untuk perancangan reaktor kimia dibutuhkan data model kinetika kimia dari suatu reaksi yang terjadi. Demikian juga dengan proses perancangan reaktor untuk produksi biodiesel. Beberapa

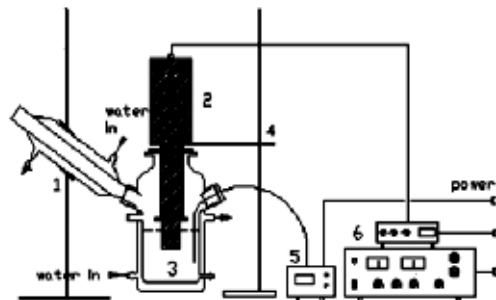
peneliti telah melakukan kajian terhadap kinetika proses produksi biodiesel dengan berbagai bahan baku, katalis, proses, dan suhu. Sebagian besar peneliti mendapatkan model reaksi orde 1 dan 2 yang irreversible, sedangkan dari tinjauan termodinamika reaksi transesterifikasi seharusnya reversible karena nilai konstanta kesetimbangan (K) dalam reaksi tersebut sangat kecil.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan masih terdapat beberapa permasalahan, diantaranya belum mendapatkan proses produksi biodiesel yang sangat menghemat waktu dan energi dengan perolehan yield yang maksimal. Permasalahan waktu dan yield dapat diatasi dengan proses berbantuan gelombang ultrasonik (Amish, 2011). Adapun untuk model kinetika reaksi dengan reaksi reversible untuk proses berbantuan gelombang ultrasonik sampai saat ini belum ada yang mendapatkannya. Tujuan penulisan ini adalah mempelajari model kinetika reaksi transesterifikasi minyak goreng bekas berbantuan radiasi ultrasonik.

2. Metodologi

Alat yang digunakan meliputi software penyelesaian berbasis matriks. Prosedur penelitian yang ditempuh meliputi studi literatur, pemilihan dan penentuan model kinetika, simulasi model, validasi model sampai mendekati data percobaan.

Data diperoleh dari penelitian Hingu *et al.* (2010). Pada penelitian tersebut, pembuatan biodiesel dari minyak goreng bekas berbantuan ultrasonik berfrekuensi rendah (20 kHz) dilakukan dengan parameter variasi temperature, dan disipasi daya ultrasonik. Skema penelitian tersebut dapat dilihat pada gambar berikut ini.

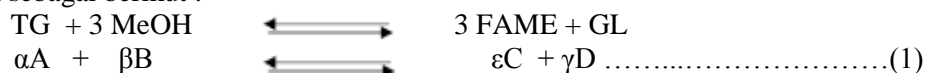


(B) Sonochemical Reactors: 1. Condenser, 2. Transducers, 3. Reactor (500ml), 4. Stand support, 5. Temperature sensor, 6. Ultrasonic generator

Gambar 1. Rangkaian alat penelitian (Hingu *et al.*, 2010)

2.1 Pemodelan kinetika

Penentuan model kinetika reaksi berdasarkan persamaan reaksi transesterifikasi yang dapat disederhanakan sebagai berikut :



Analisa data kinetika dilakukan dengan menggunakan data hasil penelitian reaktor batch. Anggapan-anggapan yang diambil pada analisa kinetik sebagai berikut :

1. Persamaan kinetika reaksi berdasarkan reaksi elementer dan reversibel
2. Persamaan laju reaksi berdasarkan trigliserida sebagai *limiting* reaktan.

Persamaan umum laju reaksi pada pers. (1) dengan anggapan reaksi reversibel :

$$(-r_A) = -\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A^\alpha C_B^\beta - k_2 C_C^\varepsilon C_D^\gamma \dots\dots\dots(2)$$

menerapkan anggapan reaksi elementer, maka pers.(2) menjadi :

$$(-r_A) = -\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A C_B^3 - k_2 C_C^3 C_D \dots\dots\dots(3)$$

Berdasarkan persamaan stoikiometrinya :

$$\begin{array}{l} C_A = C_{A0}(1 - X_A), \text{ dimana } C_{A0} = 1,064 \text{ mol/l} \\ C_B = C_{B0} - C_{A0} \cdot 3X_A = C_{A0} (M - 3X_A); \text{ dimana } M = C_{B0} / C_{A0} = 6 \\ C_C = C_{C0} + C_{A0} \cdot 3X_A; \text{ dimana } C_{C0} = 0, \text{ maka } C_C = C_{A0} \cdot 3X_A \\ C_D = C_{D0} + C_{A0} \cdot X_A; \text{ dimana } C_{D0} = 0, \text{ maka } C_D = C_{A0} \cdot X_A \end{array}$$

Sehingga pers. (3) menjadi :

$$\frac{dX_A}{dt} = k_1 C_{A0}(1 - X_A)C_{A0}^3(M - 3X_A)^3 - k_2 C_{A0}^3(27 \cdot X_A^3) \cdot C_{A0}X_A \dots\dots\dots(4)$$

$$= k_1 C_{A0}^4(1 - X_A)(M - 3X_A)^3 - 27 k_2 C_{A0}^4 X_A^4 \dots\dots\dots(5)$$

Satuan untuk k_1 dan k_2 adalah $ml^3 \cdot mmol^{-3} \cdot min^{-1}$. Saat tercapai kesetimbangan, berlaku persamaan berikut :

$$k_1 C_{Ae} C_{Be}^3 = k_2 C_{Ce}^3 C_{De} \dots\dots\dots(6)$$

$$K_e = \frac{k_1}{k_2} = \frac{C_{Ce}^3 C_{De}}{C_{Ae} C_{Be}^3} = \frac{27 \cdot C_{A0}^3 X_{Ae}^3 C_{A0} X_{Ae}}{C_{A0} (1 - X_{Ae}) C_{A0}^3 (M - 3X_{Ae})^3} \dots\dots\dots(7)$$

$$= \frac{27 X_{Ae}^4}{(1 - X_{Ae})(M - 3X_{Ae})} \dots\dots\dots(8)$$

$$k_2 = \frac{k_1}{K_e} = \dots\dots\dots(9)$$

Substitusi pers. (9) ke pers. (5), diperoleh persamaan berikut :

$$\frac{dX_A}{dt} = k_1 C_{A0}^4(1 - X_A)(M - 3X_A)^3 - 27 C_{A0}^4 X_A^4 \frac{k_1}{K_e} \dots\dots\dots(10)$$

$$= k_1 C_{A0}^4 \left[\frac{X_{Ae}^4 (1 - X_A)(M - 3X_A)^3 - X_A^4 (1 - X_{Ae})(M - 3X_{Ae})^3}{X_{Ae}^4} \right] \dots\dots\dots(11)$$

Persamaan (11) dapat diselesaikan dengan menggunakan program berbasis matrix kombinasi metode fmincon dan ode untuk mendapatkan model yang mendekati data percobaan. Setelah mendapatkan harga k_1 maka nilai k_2 dan K_e dapat ditentukan.

2.2. Analisa Statistika

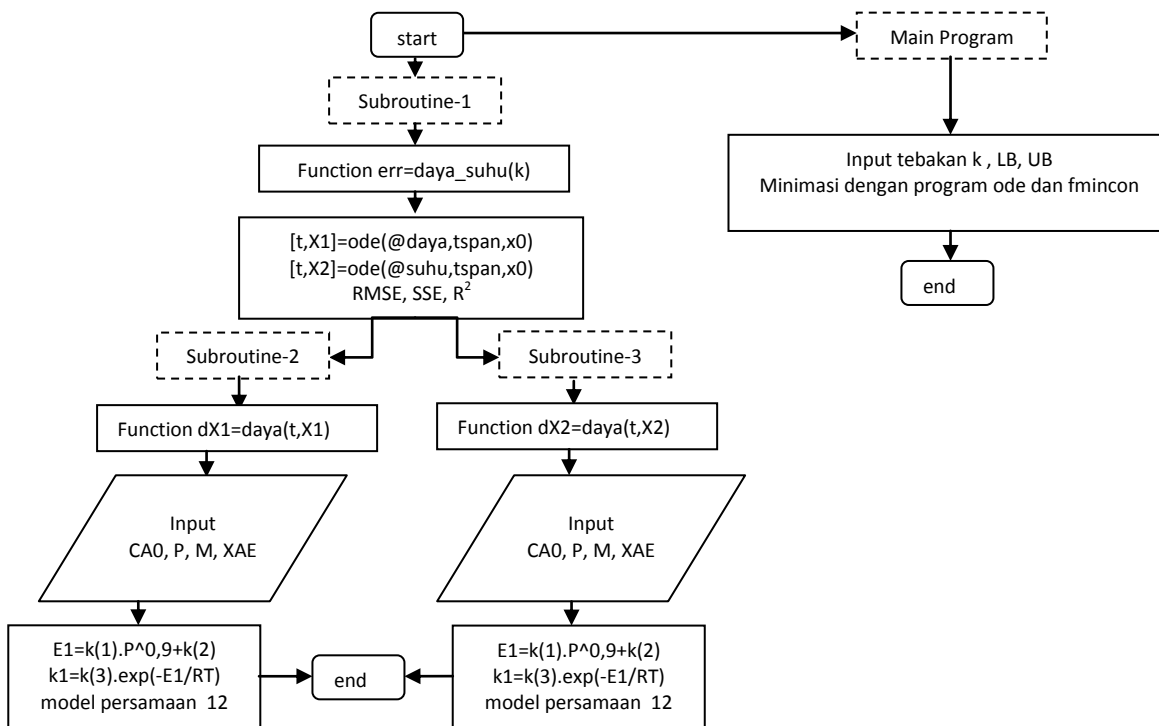
Kualitas model dievaluasi menggunakan uji statistika sebagaimana digunakan Vega-Galvez *et al* (2009): *coefficient of determination* (R^2), *sum of squares error* (SSE), dan *root mean square error* (RMSE) sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan (9) – (11). Kriteria optimum ditentukan oleh nilai terendah SSE dan RMSE yang mendekati nol, dan nilai tertinggi R^2 ($R^2 \sim 1$).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \text{ dimana } SST = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (X_{exp} - \text{mean } X) \dots\dots\dots(12)$$

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (X_{exp} - X_{data})^2 \dots\dots\dots(13)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (X_{data} - X_{exp})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(14)$$

Adapun algoritma penyelesaiannya sebagai berikut :



Gambar 2. Algoritma penyelesaian model kinetika reaksi transesterifikasi

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hipotesa Pengaruh Ultrasonik dalam Model Kinetika

Dalam studi ini, persamaan kinetika transesterifikasi (persamaan 12) digunakan untuk melakukan simulasi kurva distribusi produk. Data eksperimen yang digunakan meliputi parameter temperatur reaksi dan disipasi daya ultrasonik. Penentuan pengaruh ultrasonik pada model kinetika dilakukan dengan meminimasi beberapa koefisien pada persamaan Energi aktivasi (E_a) sebagai fungsi ultrasonik, dan faktor tumbukan (A).

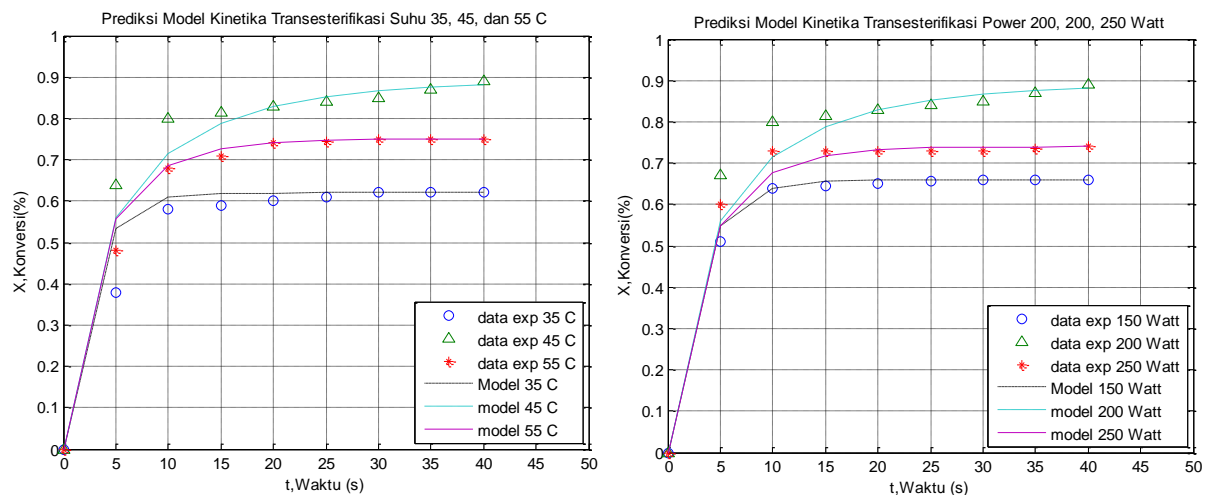
Tabel 1 menunjukkan berbagai persamaan E_a sebagai fungsi ultrasonik yang meliputi persamaan eksponensial, linier, logaritma, polinomial orde 2, dan lainnya. Persamaan E_a yang berkualitas bagus adalah yang menghasilkan nilai rata-rata R^2 paling besar ($\overline{R^2} \sim 1$) dan rata-rata nilai SSE yang lebih kecil ($\overline{SSE} \sim 0$). Jadi persamaan $a \cdot P^{0,9} + b$ digunakan sebagai hipotesa model persamaan E_a sebagai fungsi ultrasonik karena memiliki error terkecil dari pada model yang lainnya. Adapun koefisien a dan b yang didapatkan yakni 0,0054 dan 3 sedangkan faktor tumbukannya (A) yakni 0,0011. Hasil minimasi nilai faktor tumbukan (A) pada beberapa persamaan hipotesa E_a yakni 0,0011 sehingga mengindikasikan bahwa A bukanlah sebagai fungsi dari daya ultrasonik.

Tabel 1. Beberapa hipotesa model persamaan E_a sebagai fungsi daya ultrasonik

| $E_a = f(P)$ | R^2 | \overline{SSE} | $E_a = f(P)$ | $A \neq f(P)$ | R^2 | \overline{SSE} |
|-----------------------------------|--------|------------------|-----------------------|---------------|--------|------------------|
| $a \cdot P \cdot \exp(b)$ | 0,9782 | 0,0097 | $a \cdot P^{0,9} + b$ | 0,0011 | 0,9787 | 0,0096 |
| $a \cdot P^{0,9} \cdot \exp(b)$ | 0,9008 | 0,0476 | $a \cdot P^{1,0} + b$ | 0,0011 | 0,9785 | 0,0097 |
| $a \cdot P^{1,5} \cdot \exp(b)$ | 0,9008 | 0,0476 | $a \cdot P^{1,1} + b$ | 0,0011 | 0,9783 | 0,0097 |
| $a \cdot P^2 + b \cdot P + c$ | 0,9008 | 0,0476 | $a \cdot P^{1,2} + b$ | 0,0011 | 0,9784 | 0,0097 |
| $a \cdot P^{1,5} + b \cdot P + c$ | 0,9009 | 0,0476 | $a \cdot P^{1,3} + b$ | 0,0011 | 0,9784 | 0,0097 |
| $a \cdot \log(P) + b$ | 0,9009 | 0,0476 | $a \cdot P^{1,4} + b$ | 0,0011 | 0,9786 | 0,0096 |

3.2 Perbandingan dengan Data Eksperimen

Grafik 1 menunjukkan perbandingan antara nilai simulasi konversi metil ester dengan data eksperimen pada parameter suhu dan disipasi daya ultrasonik. Simulasi konversi metil ester dengan data eksperimen pada menit ke 5 dan 10 mengalami ketidakcocokan. Hal ini terjadi karena fluktuasi temperatur selama reaksi berlangsung. Akan tetapi simulasi distribusi konversi metil ester secara umum memberikan nilai yang cocok dengan titik data eksperimen.



Grafik 1. Prediksi model kinetika transesterifikasi parameter suhu dan daya ultrasonik

Pengaruh Temperatur

Pada data percobaan mengindikasikan bahwa pada suhu yang lebih rendah menghasilkan konversi yang lebih rendah. Ketika suhu dinaikan konversi juga menjadi meningkat sampai batas tertentu. Peningkatan suhu percobaan dilakukan pada suhu 35 sampai 45°C yang menghasilkan konversi dari 64% sampai 89%. Walaupun suhu reaksi ditingkatkan menjadi 55°C akan tetapi menghasilkan konversi yang menurun (77%). Peningkatan suhu reaksi menjadikan kelarutan metanol tinggi dalam fase lain. Dengan demikian pada awalnya peningkatan kecepatan reaksi terjadi tetapi dampak kavitas menjadi berkurang pada suhu reaksi maksimum tertentu.

Tabel 2 menunjukkan bahwa pada suhu reaksi 35 hingga 45 °C kecepatan reaksi balik semakin rendah dari 0,0072 hingga 0,0003 ml³/mmol.menit dan pada suhu yang lebih tinggi lagi kecepatan reaksi balik meningkat kembali sehingga konversi menjadi menurun.

Tabel 2. Nilai konstanta kecepatan reaksi transesterifikasi

| Suhu (°C) | (ml ³ /mmol ³ .menit) | | Ultrasonik (Watt) | (ml ³ /mmol ³ .menit) | |
|--------------|---|----------------|----------------------|---|----------------|
| | k ₁ | k ₂ | | k ₁ | k ₂ |
| 35 | 0,0011 | 0,0072 | 150 | 0,0011 | 0,0046 |
| 45 | 0,0011 | 0,0003 | 200 | 0,0011 | 0,0003 |
| 55 | 0,0011 | 0,0016 | 250 | 0,0010 | 0,0018 |

Pengaruh Disipasi Daya Ultrasonik

Dari data percobaan didapatkan bahwa pada daya 150 Watt menghasilkan konversi sekitar 66% , sedangkan pada daya 200 Watt konversi meningkat menjadi 89% . Hal ini mengindikasikan kehebatan ultrasonik dalam pencampuran dan emulsifikasi dua larutan yang *immiscible* pada disipasi daya yang maksimum. Peningkatan daya lebih lanjut dari 200 menjadi 250 Watt menghasilkan konversi yang lebih rendah . Hal ini mengindikasikan terjadinya transfer energi ke sistem berkurang dan aktivitas kavitas menjadi lebih rendah.

Tabel 2 menunjukan bahwa pada daya disipasi 150 menjadi 200 Watt kecepatan reaksi balik semakin rendah dari 0,0046 hingga 0,0003 ml³/mmol.menit dan pada daya yang lebih tinggi lagi kecepatan reaksi balik menjadi meningkat kembali sehingga konversi menjadi menurun.

3.3 Analisa Statistika Model

Tabel 3 menunjukkan nilai rata-rata SSE, RMSE, dan R² yang ditentukan pada parameter suhu reaksi dan disipasi daya ultrasonik. Secara umum model distribusi produk yang dihasilkan dan dihubungkan dengan data eksperimen menghasilkan nilai SSE, RMSE mendekati 0 dan R² mendekati 1. Berdasarkan tabel tersebut model yang bagus untuk parameter temperatur yakni temperature reaksi 55°C (SSE=0,0058; RMSE=0,3183; R²=0,9883), diikuti temperatur 45°C (SSE=0,0096; RMSE=0,4131; R²=0,9849) dan temperatur 35°C (SSE=0,0237; RMSE=0,4904;R²=0,9309). Untuk parameter disipasi daya ultrasonik yang bagus yakni daya 150 Watt (SSE= 0,0015; RMSE=0,2538; R²=0,9960), diikuti daya 250 Watt (SSE=0,0039; RMSE=0,3045; R²=0,9917) dan daya 200 Watt (SSE=0,0139; RMSE=0,4480;R²=0,9780).

Tabel 3. Analisa statistika model kinetika parameter temperatur dan daya ultrasonik

| Suhu Reaksi (°C) | SSE | RMSE | R ² | Daya (Watt) | SSE | RMSE | R ² |
|------------------|--------|--------|----------------|-------------|--------|--------|----------------|
| 35 | 0,0237 | 0,4904 | 0,9309 | 150 | 0,0015 | 0,2538 | 0,9960 |
| 45 | 0,0096 | 0,4131 | 0,9849 | 200 | 0,0139 | 0,4480 | 0,9780 |
| 55 | 0,0058 | 0,3183 | 0,9883 | 250 | 0,0039 | 0,3045 | 0,9917 |

4. Kesimpulan

Pemodelan kinetika transesterifikasi berbantuan ultrasonik dari minyak goreng bekas dan metanol dilakukan dengan asumsi reaksi reversibel orde 4. Simulasi dilakukan dengan membandingkan data penelitian Hingu, *et al* (2010). Adapun model kinetiknya adalah sebagai berikut :

$$r_A = \frac{dX_A}{dt} = 0,0011e^{\frac{0,0054P^{0,9}+3,0}{RT}} C_{A0}^4 \left[\frac{X_{Ae}^4 (1 - X_A)(M - 3X_A)^3 - X^4 (1 - X_{Ae})(M - 3X_{Ae})^3}{X_{Ae}^4} \right]$$

Dalam persamaan tersebut r_A,t, P,R,T,C_{A0},X,X_{Ae} dan M secara berurutan adalah kecepatan reaksi transesterifikasi, waktu, daya ultrasonik, konstanta gas ideal, suhu, konsentrasi awal bahan baku, konversi tiap waktu, konversi saat setimbang dan perbandingan molar metanol.

Hasil evaluasi menyatakan bahwa model tersebut dapat menggambarkan kondisi yang sebenarnya dari proses transesterifikasi ultrasonik dengan nilai *coefficient determination* (R^2) > 0,9 dan RMSE < 1 dan hasil simulasi model juga menyatakan bahwa keduanya sesuai dengan teori transesterifikasi berbantuan ultrasonik.

Daftar Notasi

| | |
|------------------|--|
| C_A | : konsentrasi trigliserida, mol/ lt |
| C_{A0}, C_{Af} | : konsentrasi trigliserida mula-mula, mol/ lt |
| C_{Ac} | : konsentrasi trigliserida dalam kesetimbangan, mol/ lt |
| C_B | : konsentrasi metanol, mol/ lt |
| C_{B0} | : konsentrasi metanol mula-mula, mol/ lt |
| C_{Be} | : konsentrasi metanol dalam kesetimbangan, mol/ lt |
| C_C | : konsentrasi metyl ester, mol/ lt |
| C_{C0} | : konsentrasi metyl ester mula-mula, mol/ lt |
| C_{Ce} | : konsentrasi metyl ester dalam kesetimbangan, mol/ lt |
| C_D | : konsentrasi gliserol, mol/ lt |
| C_{D0} | : konsentrasi gliserol mula-mula, mol/ lt |
| C_{De} | : konsentrasi gliserol dalam kesetimbangan, mol/ lt |
| k_1 | : konstanta kecepatan reaksi ke arah produk, $ml^3/ mmol^3 \cdot mnt$ |
| k_2 | : konstanta kecepatan reaksi ke arah reaktan, $ml^3/ mmol^3 \cdot mnt$ |
| k_0 | : faktor frekuensi, menit ⁻¹ |
| K_e | : konstanta kesetimbangan |
| X_A | : konversi trigliserida, % |
| X_{Ac} | : konversi trigliserida dalam kesetimbangan, % |
| $-r_A$ | : kecepatan reaksi trigliserida, mol/ ml mnt |
| T | : temperature, °K |
| t | : waktu, menit |
| E_a | : energy aktivasi, kal/ mol |
| R | : konstanta gas ideal, kal/ mol °K |
| M | : Perbandingan mol metanol : mol trigliserida |

Daftar Pustaka

- Azcan, N., A. Danisman, 2008. *Microwave assisted transesterification of rapeseed oil*, Fuel 87 1781–1788.
- Cao, F. Y. Chen, F. Zhai, J. Li, J. Wang, X. Wang, S. Wang, W. Zhu, 2008. *Biodiesel production from high acid value waste frying oil catalyzed by superacid heteropolyacid*, Biotechnol. Bioeng. 101 93–100.
- Han, M., Yi, W., Wu, Q., Liu, Y., Hong, Y., Wang, D., 2009. *Preparation of biodiesel from waste oils catalyzed by a Brønsted acidic ionic liquid*. Bioresour. Technol. 100, 2308–2310.
- Hawash, S., N. Kamal, F. Zaher, O. Kenawi, G.E. Diwani, 2009. *Biodiesel fuel from Jatropha oil via non-catalytic supercritical methanol transesterification*, Fuel 88 579–582.
- Hingu, S.M., Gogate, P.R., Rathod, V.K., 2010. *Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using sonochemical reactors*. Ultrasonic Sonochemistry 17 : 827 – 832
- Kawashima, A.K. Matsubara, K. Honda, 2008. *Development of heterogeneous base catalysts for biodiesel production*, Bioresour. Technol. 99 3439–3443.
- Ma, F., Hanna, M.A., 1999. *Biodiesel production: a review*. Bioresour. Technol. 70, 1–15.
- Marchetti, J.M., V.U. Miguel, A.F. Errazu, 2008. *Techno-economic study of different alternatives for biodiesel production*, Fuel Process. Technol. 89 740–748.
- Ranganathan, S.V., S.L. Narasimhan, K. Muthukumar, 2008. *An overview of enzymatic production of biodiesel*, Bioresour. Technol. 99 3975–3981.
- Refaat, A.A., El Sheltawy, S.T., 2008. *Comparing three options for biodiesel production from waste vegetable oil*. WIT transactions on Ecology and the Environment, Waste Management and the Environment IV, Vol.109, WIT Press, 133 – 140
- Stavarache, C., Vinatoru, M., Maeda, Y., Bandow, H., 2007. *Ultrasonically driven continuous process for vegetable oil transesterification*. Ultrasonics Sonochem. 14, 413 – 417

Vyas, Amish P., Verma, J.W., Subrahmanyam, N.,2011. *Effects of molar ratio, alkali catalyst concentration and temperature on transesterification of jatropha oil with methanol under ultrasonic irradiation*. *Advances in Chemical Engineering and Science*,1, 45 – 50