

Analisis Rasio Energi Daur Ulang Panas pada Produksi Biodiesel Secara Non-Katalitik

(Energy Ratio Analysis on Heat Recirculation in Non-Catalytic Biodiesel Production)

Armansyah Halomoan Tambunan^{1*}, Furqon¹, Joelianingsih², Tetsuya Araki³, Hiroshi Nabetani⁴

ABSTRAK

Konsumsi energy pada produksi biodiesel non-katalitik masih tinggi sehingga perlu dilakukan pengurangan sampai tingkat yang optimum. Hal ini dapat dilakukan dengan mensirkulasi panas yang digunakan dalam proses dengan menggunakan alat penukar panas. Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis rasio energy dalam system sebagai akibat dari resirkulasi panas melalui alat penukar panas. Penelitian ini menggunakan metode uap methanol super-panas (super-heated methanol vapor; SMV) untuk produksi biodiesel secara non-katalitik. Kajian diawali dengan penentuan dan perhitungan sifat termal dan fisik bahan yang digunakan (palm olein, methanol, dan methyl ester), dilanjutkan dengan perancangan penukar panas, pengambilan data, dan analisis rasio energy. Proses berlangsung secara *semi-batch* dengan tiga tingkat laju aliran methanol, 1,5, 3,0, dan 4,5 mL/menit, dan suhu reaksi 290 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa resirkulasi panas melalui alat penukar panas dapat meningkatkan rasio energy dari 0,84 menjadi 1,03, sesuai dengan definisi bahwa rasio energy adalah perbandingan antara kandungan energy biodiesel terhadap jumlah kandungan energy minyak umpan dan energi yang diperlukan untuk proses. Jika rasio energy didefinisikan sebagai perbandingan antara peningkatan kandungan energy dari minyak umpan menjadi biodiesel terhadap energy proses, maka diperoleh rasio energy 7,85, 2,98, dan 2,97 untuk masing-masing laju aliran methanol 1,5, 3,0, dan 4,5 mL/menit.

Kata kunci: alat penukar panas, biodiesel, non-katalitik, rasio energy, *superheated methanol vapor*

ABSTRACT

Energy consumption in non-catalytic biodiesel production is still high, and needs to be reduced to the optimum level. It can be accomplished by recirculating the heat being used in the process by using heat exchanger. The objective of this study is to analyze the energy ratio of the system as influenced by the heat recirculation through a heat exchanger. This experiment used a superheated methanol vapor method for non-catalytic biodiesel production. The study was started with the determination and calculation of physical and thermal properties of materials to be used (palm olein, methanol, and methyl ester), continued with the designing of the heat exchanger, the experiment itself, and the energy ratio analysis. The process was occurred in semi-batch mode with 3 levels of methanol flow rate, i.e., 1.5, 3.0, and 4.5 mL/minute, at reaction temperature of 290 °C. The results show that heat recirculation by using heat exchanger can increase the energy ratio from 0.84 to 1.03, according to the definition that energy ratio is the ratio between energy content of the biodiesel to the total energi of the feedstock and the process energy. If the energy ratio is defined as the ratio between the increase in energy content of the biodiesel from its feedstock to the process energy, the energy ratio was found to be 7.85, 2.98, and 2.87 for the respective methanol flow rate of 1.5, 3.0, and 4.5 mL/min.

Keywords: biodiesel, energy ratio, heat exchanger, non-catalytic, superheated methanol vapor

PENDAHULUAN

Biodiesel merupakan salah satu bahan bakar minyak nabati yang diharapkan mampu mensubstitusikan kebutuhan bahan bakar solar yang semakin

meningkat (Demirbas 2005; Lee *et al.* 2007). Produksi biodiesel umumnya dilakukan secara katalitik pada suhu sekitar 60 °C menggunakan katalis asam, basa atau enzim. Alur produksi pada metode ini cukup panjang karena setelah dihasilkan produk harus dicuci untuk menghilangkan kotoran, metanol yang tidak bereaksi, dan katalis (Diasakou *et al.* 1997; Saka & Kusdiana 2001; Demirbas 2005), sementara metode non-katalitik tidak membutuhkan katalis sehingga alur produksi lebih pendek, lebih ramah lingkungan, dan lebih sederhana (Yamazaki *et al.* 2007; Joelianingsih *et al.* 2008; Tambunan 2010). Namun, kekurangan metoda non-katalitik adalah membutuhkan eksekusi methanol yang lebih tinggi (umumnya menggunakan rasio molar antara metanol dan minyak sekitar 24–42), serta suhu reaksi yang sangat tinggi (240–350 °C).

¹ Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680.

² Jurusan Teknik Kimia, Institut Teknologi Indonesia, Jl. Raya Puspitpek Serpong Tangerang Selatan-Indonesia 15320.

³ Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Yayoi 1-1-1, Bunkyo Ward, Tokyo, 113-8657, JAPAN.

⁴ National Food Research Institute, NARO, Tsukuba, Japan.

* Penulis korespondensi: E-mail: ahtambunan@ipb.ac.id

Disamping itu, keunggulan dan kelemahan berbagai metoda produksi biodiesel disarikan pada Tabel 1.

Produksi biodiesel secara non-katalitik sangat dipengaruhi oleh performansi alat produksi. Efektifitas yang tinggi menunjukkan kinerja alat semakin baik sehingga hasil yang diperoleh semakin tinggi. Joelianingsih *et al.* (2007) meneliti produksi biodiesel dari minyak sawit dalam reaktor kolom gelembung secara non-katalitik. Hasil yang didapat menunjukkan kondisi optimum pengoperasian alat produksi biodiesel secara non-katalitik dalam reaktor kolom gelembung adalah suhu 290 °C dengan menggunakan laju aliran metanol sekitar 2,5–3,0 mL/menit. Namun, menurut Sigalingging (2008) rasio energi yang didapat sebesar 0,84, masih lebih rendah dibandingkan dengan produksi secara katalitik, yaitu sebesar 0,98. Hal ini disebabkan oleh penggunaan suhu reaksi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, perlu dilakukan penyempurnaan guna meningkatkan performansi alat sehingga rasio energi yang didapat lebih tinggi.

Metoda *super-heated methanol vapor* (SMV) adalah salah satu metoda produksi biodiesel secara non-katalitik yang berlangsung pada suhu tinggi tetapi pada tekanan atmosfer. Pada metoda SMV, methanol dipanaskan hingga mencapai status uap super-panas (*super-heated*) yang selanjutnya dialirkan ke reaktor yang berisi minyak (*trigliserida*). Reaksi berlangsung dalam dua fase, yaitu fase uap methanol dengan fase cair minyak. Biodiesel (*fatty acid methyl ester*, FAME) yang terbentuk terbawa oleh uap methanol untuk kemudian dikondensasi sehingga diperoleh biodiesel dalam fase cair. Kandungan panas yang produk

sebelum dikondensasi masih sangat tinggi dan dapat didaur-ulangkan untuk memanaskan dan menguapkan methanol yang akan diumpangkan ke reaktor. Pendaurlangan ini dapat dilakukan dengan menambahkan alat penukar panas yang sekaligus berfungsi sebagai kondensor pada sistem keseluruhan. Pendaurlangan panas tersebut diharapkan dapat meningkatkan rasio energi produksi biodiesel dengan metoda SMV.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis eksergi pendaurlangan panas pada proses produksi biodiesel secara non-katalitik dengan metoda *super-heated methanol vapor*. Rasio energi merupakan perbandingan antara kandungan energi (besarnya kalor) pada produk (biodiesel) dengan besarnya energi yang dibutuhkan untuk memproduksi biodiesel termasuk didalamnya memperhitungkan energi listrik dan energi panas yang digunakan dalam proses produksi biodiesel.

METODE PENELITIAN

Penelitian berlangsung dengan menggunakan *prototype* mesin produksi biodiesel secara non-katalitik metoda *super-heated methanol vapor* (SMV) yang dirancang bersama National Food Research Institute (NFRI), Jepang, dan The University of Tokyo, Jepang, dengan modifikasi sistem pertukaran panasnya. Skema mesin produksi biodiesel tersebut setelah dimodifikasi ditunjukkan pada Gambar 1. Minyak umpan yang digunakan adalah *palm olein* komersial dan metanol teknis. Reaktor dan alat

Tabel 1 Keunggulan dan kelemahan berbagai metode produksi biodiesel

Metode	Keunggulan	Kelemahan
Transesterifikasi katalis basa	1 Proses dapat terjadi pada suhu dan tekanan rendah (60–65 °C, 1 atm),	1 Membutuhkan perlakuan khusus pada bahan baku,
	2 Rasio molar metanol terhadap minyak rendah,	2 Pemurnian yang panjang,
	3 Tidak bersifat korosif.	3 Perlu pengadukan kuat,
Katalitik Transesterifikasi katalis asam	1 Cocok untuk bahan yang mengandung FFA tinggi (bisa sekaligus esterifikasi),	1 Laju reaksi rendah,
	2 Cocok untuk memproduksi ester rantai bercabang,	2 Membentuk produk samping yang tidak diharapkan pada suhu reaksi tinggi,
	3 Digunakan sebagai tahap esterifikasi.	3 Konversi ester menurun dengan adanya air.
Katalis biologi	1 Konversi dapat dilakukan pada kondisi suhu, tekanan, dan PH rendah,	1 Membutuhkan waktu reaksi lama, konsentrasi katalis yang tinggi, dan imobilisasi enzim,
	2 Fase pemisahan mudah dan menghasilkan gliserol dengan kualitas tinggi,	2 Enzim dapat mudah tidak aktif karena kandungan campuran pada minyak seperti fosfolipid sehingga terjadi <i>degumming</i> pada minyak.
	3 Dapat digunakan langsung untuk bahan dengan FFA tinggi.	
Non-katalitik Kondisi superkritik metanol	1 Dapat digunakan langsung pada FFA tinggi,	1 Suhu dan tekanan tinggi,
	2 Laju reaksi tinggi,	2 Rasio molar metanol terhadap minyak tinggi.
	3 Penjernihan produk mudah dan ramah lingkungan.	
Non-katalitik Tekanan atmosfer	1 Dapat digunakan langsung pada FFA tinggi,	1 Rasio molar metanol terhadap minyak tinggi,
	2 Penjernihan produk mudah dan ramah lingkungan.	2 Suhu reaksi tinggi,
		3 Laju reaksi rendah.

penukar panas, serta titik-titik pengukuran ditunjukkan pada Gambar 2. Pengukuran suhu di berbagai posisi dilakukan dengan *thermocouple* tipe T (CC) dan K (CA).

Sistem produksi yang digunakan dalam penelitian ini adalah *semi batch* yaitu dengan mengalirkan uap super panas metanol secara kontinu ke dalam reaktor yang sudah berisi *palm olein* dalam jumlah tetap 200 mL. Variabel penelitian yang digunakan adalah laju alir metanol dengan 3 tingkat laju, yaitu 1,5, 3,0, dan 4,5 mL/menit pada suhu reaksi 290 °C. Parameter yang diamati adalah jumlah daya yang digunakan, suhu pada setiap subsistem, suhu masuk dan keluar fluida pada penukar panas. Data pengamatan untuk produk hasil reaksi dilakukan dengan mengukur massa dan volume metanol yang digunakan, serta massa dan volume produk keluar dari alat penukar panas. Pengambilan sampel dilakukan setiap 30 menit selama 10 jam. Hasil yang didapatkan dievaporasikan untuk memisahkan metanol yang tidak bereaksi dan metil ester (biodiesel), dan kadar metil ester dianalisis menggunakan GC-MS.

Analisis energi dilakukan dengan asumsi bahwa minyak umpan mempunyai kandungan energi E_b yang berubah menjadi biodiesel dengan kandungan energi E_p setelah mengalami proses yang membutuhkan panas sebesar Q . Dengan demikian, rasio energi dapat dinyatakan dalam persamaan (1), dan persamaan (2), yang masing-masing memberikan pengertian tersendiri. Analisis energi pada penelitian ini menggunakan definisi rasio energi E_1 seperti pada persamaan (1) dengan pengertian bahwa rasio energi adalah perbandingan antara peningkatan kandungan energi dari bahan baku ke produk (biodiesel) terhadap energi yang digunakan pada proses konversi tersebut. Pada subsistem reaktor diperhitungkan pula panas pembentukan akibat reaksi eksotermis yang terjadi antara minyak dan metanol. Perhitungan panas reaksi didasarkan pada jumlah kontribusi atom atau molekul grup dari masing-masing komponen (Reklaitis 1983; Reid *et al.* 1987; Morad *et al.* 2000; Cheriani 2007; Narvaez *et al.* 2008). Sigalingging (2008) menggunakan definisi rasio energi E_2 , sehingga pada penelitian ini juga dilakukan perhitungan dengan definisi tersebut untuk keperluan perbandingan.

$$RE_1 = \frac{E_p - E_b}{Q} \dots\dots\dots (1)$$

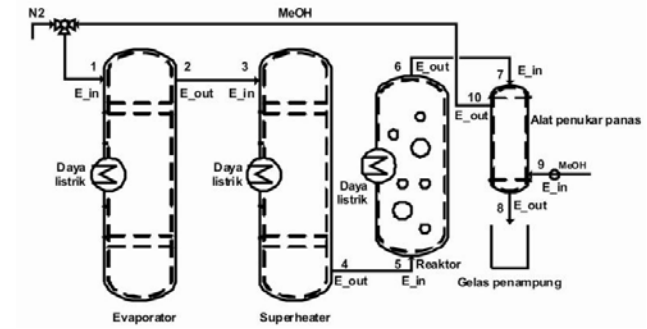
$$RE_2 = \frac{E_p}{E_b + Q} \dots\dots\dots (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

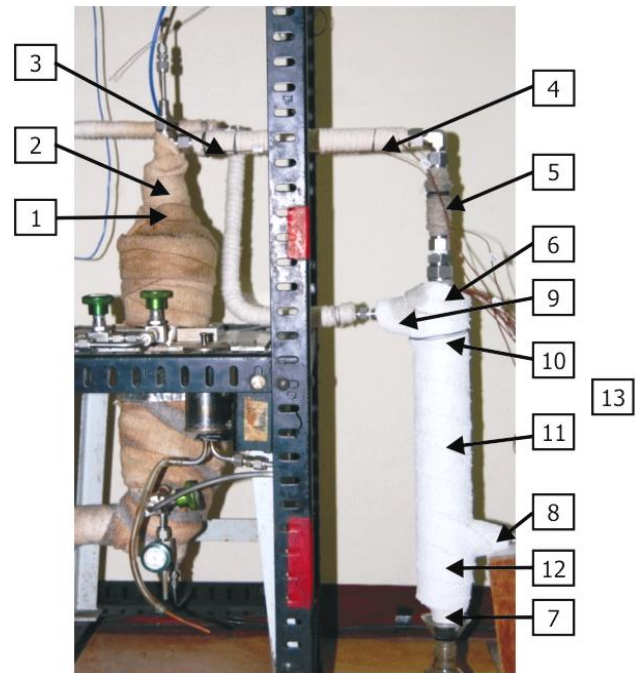
a. Hasil Reaksi Metoda SMV

Gambar 3 menunjukkan profil perubahan suhu disepanjang alat penukar panas pada laju alir metanol 4,5 mL/menit. Penukar panas yang digunakan adalah sistem aliran berlawanan arah (*counter flow*). Berdasarkan profil suhu yang dihasilkan, maka dapat dihitung efektifitas alat penukar panas dari setiap laju

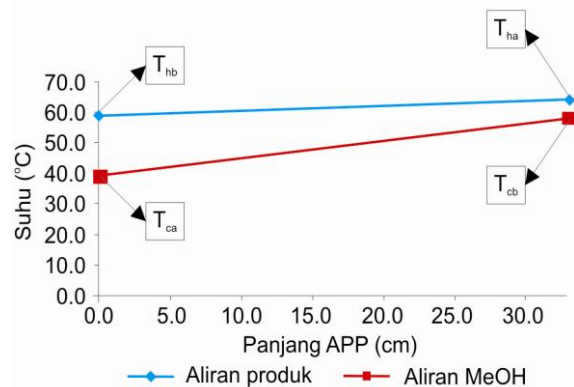
alir metanol, seperti pada Gambar 4. Hasil tersebut



Gambar 1 Skema dan batasan alat produksi biodiesel secara non katalitik dengan sirkulasi panas.



Gambar 2 Letak pengukuran suhu produk dari reaktor sampai alat penukar panas.



Gambar 3 Profil suhu pada alat penukar panas pada laju alir metanol 4,5 mL/menit.

menunjukkan bahwa semakin bertambahnya laju alir metanol maka efektifitas alat penukar panas semakin menurun. Pada laju alir metanol 1,5 mL/menit, alat

penukar panas mampu mendinginkan seluruh uap hasil reaksi karena perlakuan masih dibawah nilai rancangan sehingga nilai efektifitas masih tinggi. Pada laju alir 3,0 dan 4,5 mL/menit alat penukar panas tidak mampu mendinginkan seluruh uap hasil reaksi. Perhitungan efektifitas alat penukar panas berdasarkan penentuan fluida panas yang mempunyai beda suhu maksimum (Holman 1995), karena fluida yang mungkin mengalami beda suhu maksimum ialah fluida yang mempunyai nilai $\dot{m}C$ minimum. Berkurangnya produk yang dihasilkan berdampak pada kesetimbangan massa dan kesetimbangan energi dalam sistem produksi. Hal ini akan dibuktikan dengan perhitungan menggunakan rasio energi dalam sistem.

Dari hasil percobaan diperoleh rata-rata hasil metil ester (biodiesel) sebesar 3,65, 1,64, dan 2,14 g/jam, masing-masing pada laju alir methanol 1,5, 3,0, dan 4,5 mL/menit. Secara keseluruhan hasil reaksi ditampilkan pada Tabel 2. Kadar metil ester dalam perhitungan rasio energi diasumsikan 97% (Joelianingsih *et al.* 2007 & 2008) sehingga sudah masuk standar SNI. Kadar metil ester dan gliserol yang dihasilkan dalam produk masih rendah karena sebagian produk tidak bereaksi dan proses pencucian yang kurang sempurna. Warabi *et al.* (2004) menyatakan bahwa monogliserida merupakan komponen antara dalam reaksi yang paling stabil sehingga dipercaya sebagai tahap penentu laju reaksi dan keberhasilan dari suatu reaksi transesterifikasi.

Berdasarkan data tersebut, rasio molar metanol terhadap *palm olein* yang digunakan adalah sebesar 506, 2229, dan 2563 (mol/mol) pada laju alir metanol 1,5, 3,0, dan 4,5 mL/menit. Tingginya rasio molar disebabkan oleh penggunaan sistem *semi batch* yang terus mengalirkan metanol dalam minyak yang sudah dalam jumlah tetap di dalam reaktor. Penggunaan metanol dalam jumlah banyak merupakan konsekuensi dari metode non-katalitik yang digunakan. Metanol dibutuhkan dalam jumlah yang melebihi keseimbangan rasio stokiometrinya karena selain sebagai reaktan dan fluida pembuat gelembung reaksi, metanol juga berfungsi agar reaksi tetap berjalan ke ruas kanan sehingga reaksi dapat terbentuk (Hong *et al.* 2009).

b. Rasio Energi

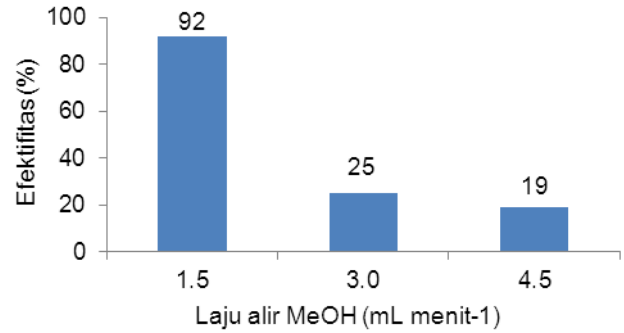
Hasil pengukuran konsumsi energi listrik untuk peningkatan suhu di reactor serta untuk pemanasan

Tabel 2 Hasil reaksi biodiesel non-katalitik dengan berbagai laju alir metanol

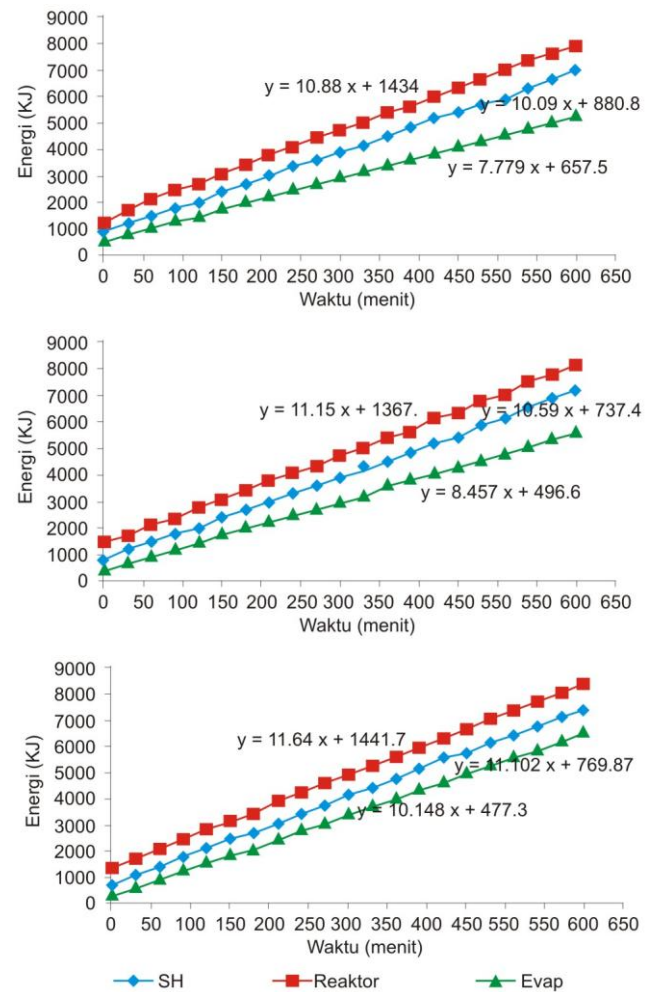
Keterangan	Laju alir metanol (mL/menit)			Satuan
	1,5	3,0	4,5	
Metanol masuk	71,19	142,38	213,57	g/jam
Produk	74,95	144,09	215,80	g/jam
Metil ester	3,65	1,64	2,14	g/jam
Gliserol	0,41	0,21	0,28	g/jam
Metanol tidak bereaksi	70,89	142,24	213,38	g/jam

dan penguapan methanol pada setiap laju alir metanol ditampilkan dalam Gambar 5, 6, dan 7. Tabulasi data penggunaan energi selama proses serta kandungan energi bahan umpan dan produk, sebagaimana digunakan untuk perhitungan rasio energy, ditunjukkan pada Tabel 3.

Rasio energi yang dihitung berdasarkan definisi RE_1 pada persamaan (1) ditunjukkan pada Gambar 5, sebagai pengaruh dari laju aliran metanol. Definisi RE_1 menunjukkan peningkatan kandungan energi yang



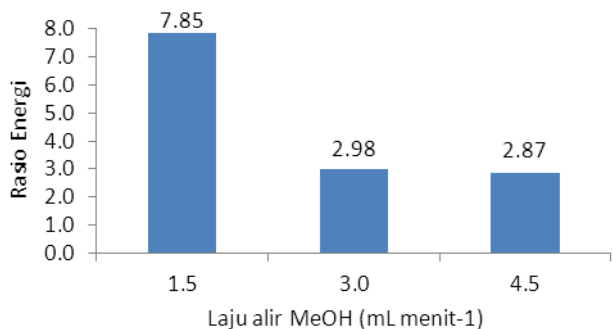
Gambar 4 Efektifitas alat penukar panas.



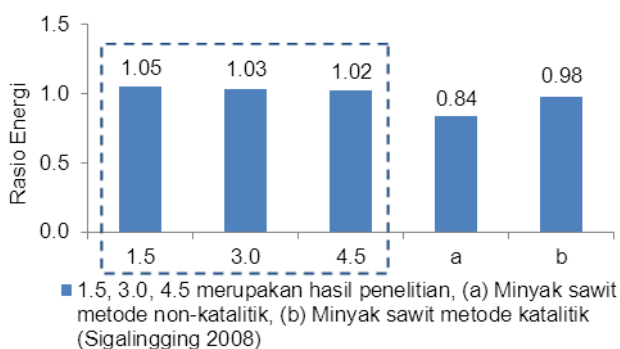
Gambar 5 Konsumsi energi untuk produksi biodiesel dengan metoda SMV pada laju metanol 1,5 mL/menit (atas), 3,0 mL/menit (tengah), dan 4,5 mL/menit (bawah).

Tabel 3 Data penggunaan dan kandungan energi

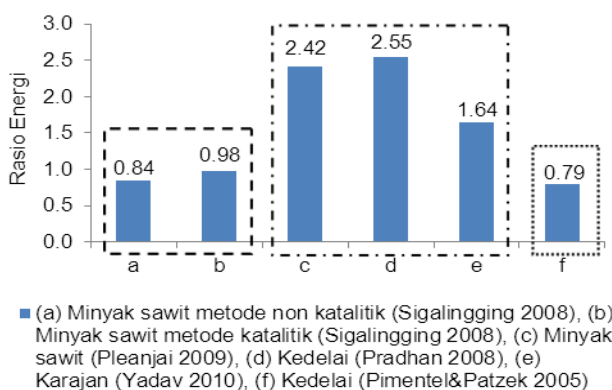
Kandungan energi	Laju alir metanol (mL/menit)			Keterangan
	1,5	3,0	4,5	
Palm olein (MJ)	0,137	0,062	0,081	Input
Metanol (MJ)	0,006	0,003	0,004	Input
Listrik (MJ)	9,58E-04	1,01E-03	1,10E-03	Proses
Kimia (MJ)	5,81E-07	2,60E-07	2,25E-07	Proses
Panas (MJ)	5,52E-05	1,09E-04	1,63E-04	Proses
Biodiesel (MJ)	0,151	0,068	0,088	Output



Gambar 6 Rasio energi hasil penelitian berdasarkan definisi RE₁.



Gambar 7 Perbandingan rasio energi hasil penelitian penulis dan Sigalingging (2008) berdasarkan definisi RE₂ pada persamaan (2).



Gambar 8 Perbandingan rasio energi dengan definisi yang berbeda dari berbagai literatur.

terkandung dalam produk (biodiesel) dari kandungan energi bahan bakunya setelah melalui proses transesterifikasi. Gambar tersebut menunjukkan bahwa

rasio energi berkurang secara eksponensial dengan meningkatnya laju aliran metanol yang diumpungkan.

Sigalingging (2008) melakukan penelitian terhadap rasio energi dengan menggunakan peralatan yang sama, tetapi menggunakan definisi RE₂ pada persamaan (2). Pada penelitian tersebut panas yang terkandung pada produk tidak diresirkulasi, sehingga untuk melihat pengaruh resirkulasi panas yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka dilakukan perhitungan rasio energi dengan definisi yang asama. Rasio energi yang diperoleh dari hasil penelitian ini dengan menggunakan definisi ER₂ adalah sebesar 1,05, 1,03, dan 1,02 untuk laju alir metanol 1,5, 3,0, dan 4,5 mL/menit. Perbandingan rasio energi yang diperoleh dari penelitian ini terhadap yang diperoleh Sigalingging (2008) ditunjukkan pada Gambar 7. Dari perbandingan tersebut diperoleh bahwa resirkulasi panas yang diterapkan pada sistem produksi biodiesel non-katalitik dengan metoda super-heated methanol vapor berhasil meningkatkan rasio energi dari 0,84 menjadi 1,03, pada laju aliran metanol 3,0 mL/menit. Rasio energi yang diperoleh dengan resirkulasi panas ini juga lebih tinggi dari rasio energi yang diperoleh dari sistem katalitik.

Rasio energi berhubungan erat dengan penyediaan bahan baku dan proses produksi (Morris 2005; Hill et al. 2006). Nilai rasio energi yang tinggi pada hasil penelitian disebabkan tidak diperhitungkannya energi dalam penyediaan bahan bakunya, sebagai contoh energi pengolahan lahan, penanaman, dan pemanenan serta proses sampai terbentuknya bahan baku. Nilai *embedded energy* pada peralatan produksi juga tidak diperhitungkan. Hasil penelitian hanya memperhitungkan nilai kandungan energi pada bahan (palm olein) yang akan digunakan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel. Energi proses yang diperhitungkan pun hanya energi yang digunakan untuk mendukung terjadinya proses produksi, tanpa memperhitungkan berapa besar energi yang digunakan untuk menghasilkan energi tersebut.

Beberapa peneliti mendefinisikan rasio energi yang berbeda dari dua definisi yang dijelaskan di atas. Yadav et al. (2010) menyatakan rasio energi merupakan perbandingan antara energi yang dikandung oleh produk (output) dengan energi yang digunakan dalam proses produksi. Rasio energi yang didapatkan oleh Pleanjai dan Gheewala (2009), Pradhan et al. (2008), dan Yadav et al. (2010) lebih besar karena tidak memperhitungkan energi awal yang dikandung oleh

bahan baku. Pimentel dan Patzek (2005) mendefinisikan rasio energi dengan cara menghitung jumlah kandungan energi biodiesel dibagi dengan jumlah total energi proses dikurangi dengan kandungan energi produk samping. Gambar 8 menunjukkan perbandingan rasio energi dari berbagai literatur sebagaimana disebutkan di atas.

KESIMPULAN

Resirkulasi panas dengan menggunakan alat penukar panas dapat meningkatkan rasio energi dari 0,84 menjadi 1,03, berdasarkan asumsi bahwa rasio energi adalah perbandingan antara energi yang dikandung biodiesel dengan penjumlahan energi bahan baku dan energi yang diperlukan untuk proses.

Berdasarkan definisi bahwa rasio energi adalah perbandingan antara peningkatan kandungan energi dari bahan baku ke produk (biodiesel) terhadap energi yang digunakan pada proses konversi tersebut, maka rasio energi yang diperoleh untuk laju alir metanol 1,5, 3,0, dan 4,5 mL/menit masing-masing adalah 7,85, 2,98, dan 2,87.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada NFRI (*National Food Research Institute*) Jepang atas hibah *prototype of bubble column reactor*, dan Dirjen Dikti-Kemendiknas RI atas biaya penelitian melalui hibah kompetitif penelitian kerjasama luar negeri dan publikasi internasional nomor 447/SP2H/DP2M/VI/2010, tanggal 11 Juni 2010, dan nomor 509/SP2H/PL/DitLitabmas/VII/20011, tanggal 28 Juli 2011.

DAFTAR PUSTAKA

- Ceriani R, Goncalves CB, Rabelo J, Caruso M, Cunha ACC, Cavaleri FW, Batista EAC, Meirelles AJA. 2007. Group Contribution Model for Predicting Viscosity of Fatty Compounds. *J. Chem. Eng* 52(3): 965–972.
- Demirbas A. 2002. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol. *Energy Convers and Manage*. 43: 2349–2356.
- Demirbas A. 2005. Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. *Progress in Energy and Combustion Science*. 31: 466–487.
- Diasakou M, Louloudi A, Papayannakos N. 1997. Kinetics of the non-catalytic transesterification of soybean oil. *Elsevier Science*. 77(12): 129–1302.
- Hill J, Nelson E, Tilman D, Polasky S, Tiffany D. 2006. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *PNAS*. 103(30): 11206–11210.
- Holman JP. 1995. *Perpindahan Kalor*. Edisi keenam. Jasjfi E, penerjemah; Jakarta: Penerbit Erlangga. Terjemahan dari: *Heat Transfer*. Hal. 480–522.
- Hong ST, Kim JW, Jang WH, Lim JS, Park HS, Yoo KP, Afel C, Arlt W. 2009. Transesterification of palm oil using supercritical methanol with co-solvent HCFC-141b. *Res Chem Intermed*. 35: 197–207.
- Joelianingsih, Nabetani H, Hagiwara S, Sagara Y, Soerawidjaya TH, Tambunan AH, Abdullah K. 2007. Performance of a bubble column reactor for the non-catalytic metil esterification of free fatty acids at atmospheric pressure. *J Chem Eng Japan*. 40(9): 780–785.
- Joelianingsih, Maeda H, Nabetani H, Sagara Y, Soerawidjaya TH, Tambunan AH, Abdullah K. 2008. Biodiesel fuels from palm oil via the non-catalytic transesterification in a bubble column reactor at atmospheric pressure: a kinetic study. *Renewable Energy*. 33(7): 1629–1636.
- Kusdiana D, Saka S. 2001. Metil esterification of free fatty acids of rapeseed oil as treated in supercritical methanol. *J Chem Eng Japan*. 34(3): 383–387.
- Knothe G, Van Gerpen J, Krahl J. 2005. *The Biodiesel Handbook*. Champaign, Illionis: AOCS Press.
- Lee S, Speight JG, Loyalka SK. 2007. *Handbook of Alternative Fuel Technologies*. New York: CRC Press.
- Morad NA, Kamal AAM, Panau F, Yew TW. 2000. Liquid Specific Heat Capacity Estimation for Fatty Acid, Triacylglycerol, and Vegetable Oils Based on Their Fatty Acid Composition. *J Am Oil Chemists' Soc*. 77(9): 1001–1005.
- Narvaez PC, Rincon SM, Castaneda LZ, Sanchez FJ. 2008. Determination of Some Physical and Transport Properties of Palm Oil and of its Metil Esters. *Latin American Applied Research*. 38: 1–6.
- Pleanjai S, Gheewala SH. 2009. Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand. *Applied energi*. 86: S209–S214.
- Pradhan A, Shrestha DS, Garpen JV, Duffield J. 2008. The energy balanced of soybean oil biodiesel production: a review of past studies. *Transactions of the ASABE*. 51(1): 185–194.
- Reklaitis GV. 1983. *Introduction to Material and Energy Balances*. New York: John Wiley & Sons.
- Reid RC, Prausnitz JM, Poling BE. 1987. *The Properties of Gases and Liquids*. 4th ed. USA: McGraw-Hill Book Co.

- Saka S, Kusdiana D. 2001. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel* 80: 225–231.
- Sigalingging R. 2008. Analisis Energi dan Eksergi pada Produksi Biodiesel Berbahan Baku CPO (*Crude Palm Oil*). [Tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Tambunan AH. 2010. Disain Pilot Plant Biodisel dengan Reaktor Bubble Methanol; Lokakarya Pengembangan dan Perencanaan Teknologi Biodiesel. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. [21 Oktober 2010].
- Van Gerpen J, Shrestha D. 2005. Biodiesel energy balance. Moscow, Idaho: University of Idaho, Department of Biological and Agricultural Engineering.
- Warabi Y, Kusdiana D, Saka S. 2004. Reactivity of triglycerides and fatty acids of rapeseed oil in supercritical alcohols. *Bioresource Technology*. 91: 283–287.
- Yadav A, Singh O, Kumar N. 2010. Evaluation of energy ratios for karanja and neem biodiesel life cycle. *S-JPSET*. 1(1): 55–59.
- Yamazaki R, Iwamoto S, Nabetani H, Osakada K, Miyawaki O, Sagara Y. 2007. Non catalytic alcoholysis of oils for biodiesel fuel production by semi-batch process. *Jpn J Food Eng*. 8(1): 11–19.