

ANALISIS ENERGI DAN EKSERGI TERHADAP RESIRKULASI PANAS PADA PRODUKSI BIODIESEL SECARA NON-KATALITIK

Energy and Exergy Analysis on Heat Recirculation in Non-Catalytic Reaction of Biodiesel Production

Armansyah H. Tambunan¹⁾, Furqon¹⁾, Joelianingsih²⁾, Tetsuya Araki³⁾, Hiroshi Nabetani^{3,4)}

¹⁾ Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, FATETA-IPB, Bogor, email: ahtambun@ipb.ac.id

²⁾ Program Studi Teknik Kimia, FT-ITI, Tangerang

³⁾ Graduate School of Agriculture and Life Sciences, The University of Tokyo, Japan

⁴⁾ National Food Research Institute, NARO, Japan

ABSTRAK

Konsumsi energi sistem produksi non-catalytic biodiesel masih amat tinggi. Kebutuhan energi ini perlu diturunkan dengan cara menggunakan energi secara optimum yaitu dengan cara mensirkulasi energi secara berulang dengan menggunakan sistem perpindahan panas. Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk menampilkan analisa energi dan exergy pada sistim setelah dilakukan sirkulasi ulang dengan menggunakan alat perpindahan panas. Percobaan ini menggunakan uap metanol *superheated* pada sistem produksi *non-catalytic* biodiesel. Upaya dimulai dengan mencari dan menghitung parameter fisis dan termal dari bahan yang digunakanyaitu: palm olein, metanol, dan methyl ester. Kemudian mendisain alat perpindahan panas, melakukan percobaan produksi, lalu menganalisa energi dan *exergy*-nya. Proses dilakukan dalam pola semi-batch dengan laju aliran metanol: 1.5, 3.0, and 4.5 ml per menit pada temperatur reaksi 290°C. Dalam analisa *exergy*, diasumsikan kondisinya *steady state*, sedang energi kinetik dan potensial diabaikan. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa panas yang disirkulasikan ulang dengan memanfaatkan alat perpindahan panas dapat meningkatkan *energy-ratio* dari 0,84 ke 1.03. Menurut definisi, *energy-ratio* adalah perbandingan antara kandungan energi biodiesel dengan total energi bahan mentah dan energi proses. Bila *energy-ratio* didefinisikan sebagai perbandingan antara 'peningkatan kandungan energi biodiesel dari energi bahan dasarnya' dibandingkan dengan energi proses, maka *energy-ratio* yang diperoleh adalah 7.85, 2.98, and 2.87 untuk laju alir metanol 1.5, 3.0, and 4.5 ml/menit. Analisa *exergy* menunjukkan bahwa nilai tidak dapat kembali terjadi atau *irreversible* yang terbesar ada pada proses *superheater*. Efisiensi *exergy* dari *evaporator* dan *superheater* meningkat dengan meningkatnya laju alir metanol, sedang efisiensi *exergy* reaktor dan alat perpindahan panas menurun.

Kata kunci: *exergy*, alat perpindahan panas, *non-catalytic* biodiesel, uap metanol *superheated*.

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 perform energy and exergy analysis to 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, and 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 and exergy 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/min at reaction temperature of 290°C. Steady state condition was assumed for the exergy analysis, while kinetic and potential energy were neglected. 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 energy 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. The exergy analysis showed that the highest irreversibility was occurred at the superheater. The exergy efficiency of the evaporator and the superheater increased with the increase in methanol flow rate, while the exergy efficiency of the reactor and the heat exchanger decreased.

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

1. PENDAHULUAN

Biodiesel dikenal sebagai produk yang ramah lingkungan, tidak mencemari udara, mudah terbiodegradasi, dan berasal dari bahan baku yang dapat diperbaharui (Demirbas 2005). Katalitik dan non-katalitik merupakan dua jenis teknologi yang dapat digunakan untuk memproduksi biodiesel saat ini. Keduanya memiliki kelebihan dan kelemahan. Metode katalitik membutuhkan katalis untuk mempercepat reaksi dan alur yang cukup panjang untuk memurnikan produk setelah produksi (Saka dan Kusdiana 2001; Joelianingsih et al, 2007).

Metode non-katalitik tidak membutuhkan katalis sehingga alur produksi lebih pendek, lebih ramah lingkungan, lebih sederhana, dan dapat diterapkan pada minyak umpan dengan kandungan asam lemak bebas (*free fatty acid*) yang tinggi. Namun, proses non-katalitik umumnya membutuhkan tekanan dan/atau suhu tinggi untuk mengatasi energi aktivasi, serta membutuhkan rasio molar metanol terhadap minyak yang lebih tinggi, dibandingkan dengan proses katalitik. Hal tersebut menyebabkan konsumsi energi yang tinggi untuk produksi biodiesel, baik untuk meningkatkan suhu dan tekanan maupun untuk memisahkan metanol dari produk akhir. Penelitian Sigalingging (2008) menunjukkan bahwa rasio energi untuk produksi biodiesel secara non katalitik adalah sebesar 0.84, lebih rendah dibandingkan dengan produksi secara katalitik, yaitu sebesar 0.98. Lebih jauh dikatakan bahwa rasio energi tersebut dapat ditingkatkan dengan meminimalisasi energi yang tidak termanfaatkan selama proses produksi, salah satunya dengan pendaur-ulangan (resirkulasi) panas dalam sistem melalui alat penukar panas (APP).

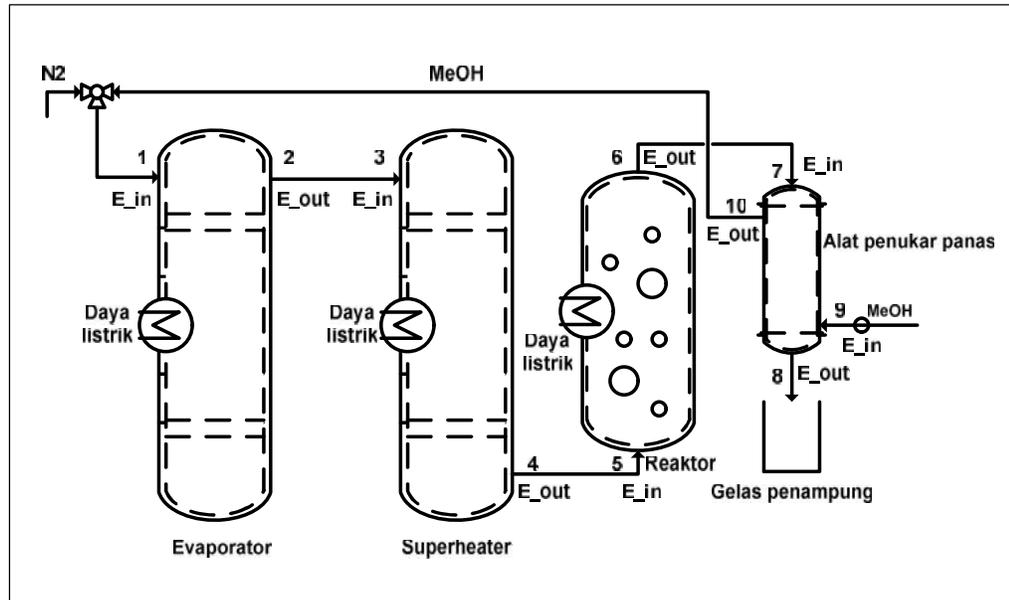
Kajian terhadap konsumsi energi produksi biodiesel secara non-katalitik tersebut perlu dilakukan agar keunggulan teknologi tersebut dapat lebih didayagunakan. Salah satu metoda kajian yang diharapkan dapat mengungkap lebih jauh konsumsi energi produksi biodiesel tersebut adalah analisis eksergi. Analisis eksergi digunakan untuk mencapai penggunaan sumber energi yang lebih efektif karena mampu mengetahui besarnya energi yang dapat dimanfaatkan pada setiap posisi. Analisis ini didasarkan pada hukum termodinamika pertama dan kedua karena memperhitungkan ketidak-mampubalikkan (irreversibilitas) dalam sistem. Informasi tersebut dapat digunakan untuk mendesain sistem baru yang lebih efisien energi ataupun untuk meningkatkan efisiensi pada sistem yang sudah ada, sehingga sangat penting untuk menentukan seberapa tepat energi yang digunakan (Bejan *et al.* 1996).

Eksergi, secara umum, didefinisikan sebagai energi minimum yang diperlukan agar suatu proses dapat berlangsung, atau energi maksimum yang dapat diperoleh dari suatu sumber energi (Bejan *et al* 1996). Dincer dan Cengel (2001) mengatakan eksergi dapat diistilahkan juga sebagai *available energy* karena menyatakan jumlah energi yang dapat dimanfaatkan. Definisi ini didasarkan pada hukum termodinamika kedua yang menjelaskan bahwa setiap proses akan berlangsung secara spontan ke arah kesetimbangan dengan lingkungannya dengan meningkatkan entropi. Oleh sebab itu, kondisi lingkungan dapat dianggap sebagai *dead state* karena segala sesuatu yang telah mencapai keadaan *dead state* tidak dapat berubah lagi secara spontan. Dengan kata lain, energi yang terkandung pada suatu sistem yang berada pada keadaan *dead state* tidak dapat dimanfaatkan lagi. Maka berdasarkan hukum tersebut, beda kandungan energi suatu sistem pada kondisi tertentu dengan kandungan energi pada kondisi *dead state* adalah jumlah energi yang dapat dimanfaatkan (*available energy*), atau eksergi.

Tujuan penelitian ini adalah 1). Menghitung rasio energi produksi biodiesel secara non katalitik. 2). Melakukan analisis eksergi pada sistem produksi biodiesel non katalitik. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat mengungkapkan faktor-faktor yang penting untuk meningkatkan rasio energi pada produksi biodiesel dan mendapatkan efisiensi eksergi produksi biodiesel secara non katalitik.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan *prototype* mesin produksi biodiesel secara non-katalitik sistem *super-heated methanol vapor* (SMV) rancangan NFRI, 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. Pengukuran suhu di berbagai posisi dilakukan dengan *thermocouple* tipe T (CC) dan K (CA).



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

Sistem produksi yang digunakan dalam penelitian ini adalah *semi batch* yaitu dengan mengalirkan metanol secara kontinu ke dalam reaktor yang sudah berisi *palm olein* dalam jumlah tetap 200 mL. Variabel penelitian 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 energi 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 yang terjadi antara minyak dan metanol. Perhitungan berdasarkan jumlah kontribusi atom atau molekul grup dari masing-masing komponen. Penelitian ini menggunakan rasio energi E_1 sebagai dasar pembahasan. Sigalingging (2008)

menggunakan definisi rasio energi E_2 , sehingga pada penelitian ini juga dilakukan perhitungan dengan definisi tersebut untuk keperluan perbandingan.

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

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

Analisis eksergi dilakukan sesuai dengan batas sistem seperti pada Gbr.1, dan dibagi dalam 4 subsistem, yaitu sub-sistem evaporator, *superheater*, reaktor, dan alat penukar panas. Asumsi yang digunakan adalah bahwa sistem berjalan dalam kondisi aliran tunak (*steady flow*), energi kinetik dan energi potensial diabaikan serta tekanan pada setiap subsistem juga diabaikan. Efisiensi eksergi (hukum kedua termodinamika) pada setiap subsistem dapat dituliskan seperti pada persamaan (3).

$$y_{II} = 1 - \frac{I}{X_{in}} = 1 - \frac{T_0 \Delta S_{gen}}{X_{in}} \quad (3)$$

Dimana I adalah irreversibilitas yang dinyatakan sebagai perkalian antara suhu *dead state* (T_0) dengan entropi yang terbentuk akibat berlangsungnya proses (US_{gen}). X_{in} adalah eksergi masuk (kW) ke dalam masing-masing sub-sistem. Setiap sub-sistem dianalisis berdasarkan kesetimbangan massa, kesetimbangan energi, kesetimbangan entropi, dan kesetimbangan ekserginya. Energi listrik yang digunakan untuk menyediakan panas pada subsistem evaporator dan *superheater* diukur menggunakan kWh-meter. Energi reaksi pembentukan diperhitungkan dalam analisis eksergi pada subsistem reaktor sebagai tempat terjadinya reaksi. Eksergi kimia dan eksergi fisik diperhitungkan agar hasil yang didapat lebih rinci.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rasio Energi

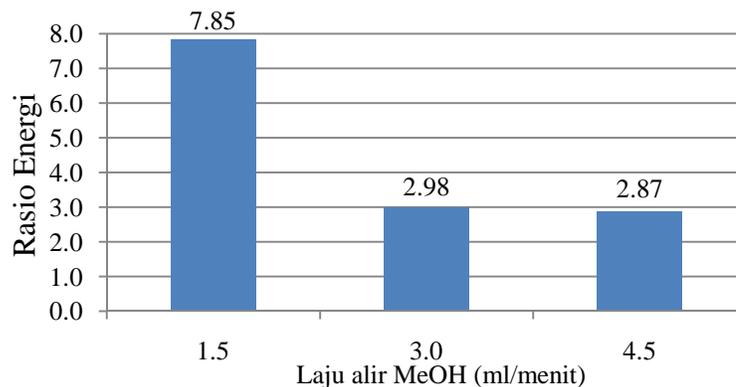
Metode non-katalitik yang digunakan pada penelitian ini adalah *superheated methanol vapor* (SMV) yaitu dengan mengalirkan uap metanol sampai kondisi super panas (290°C) didalam reaktor yang telah diisi *palm olein* dan dikondisikan pada suhu 290°C dengan sistem *semi batch*. Percobaan dilakukan dengan 3 perlakuan laju alir metanol yaitu 1.5, 3.0, dan 4.5 ml/menit. Rata-rata hasil metil ester (biodiesel) yang didapatkan pada 3 perlakuan tersebut secara berturut-turut adalah 3.65 g/jam, 1.64 g/jam, dan 2.14 g/jam. Secara keseluruhan hasil reaksi ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. 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 yang tidak bereaksi	70.89	142.24	213.38	g/jam

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). Kadar metil ester dalam perhitungan rasio energi diasumsikan 97% (Joelianingsih *et al.* 2007; dan 2008) sehingga sudah masuk standar SNI. 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.

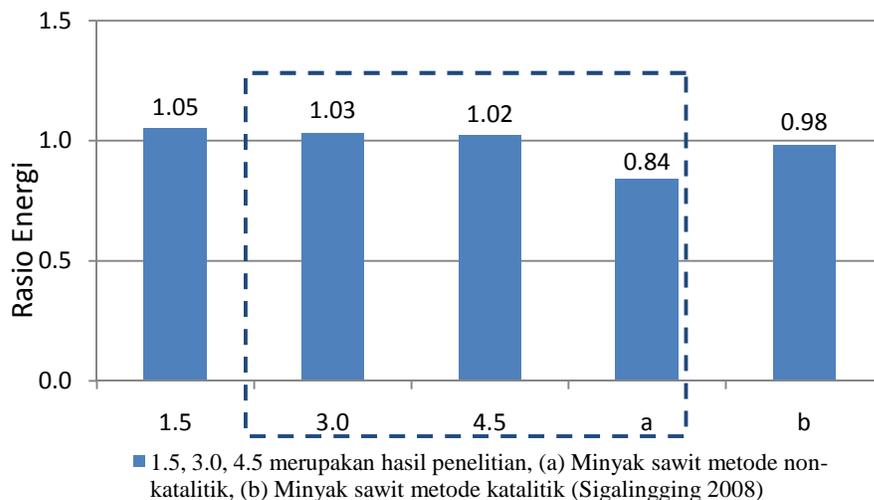
Rasio energi yang dihitung berdasarkan definisi RE_1 pada persamaan (1) ditunjukkan pada Gambar 2, sebagai pengaruh dari laju aliran metanol. Definisi RE_1 menunjukkan peningkatan kandungan energi yang terkandung dalam produk (biodiesel) dari kandungan energi bahan bakunya setelah melalui proses transesterifikasi. Gambar tersebut menunjukkan bahwa rasio energi berkurang secara eksponensial dengan meningkatnya laju aliran metanol yang diumpankan.



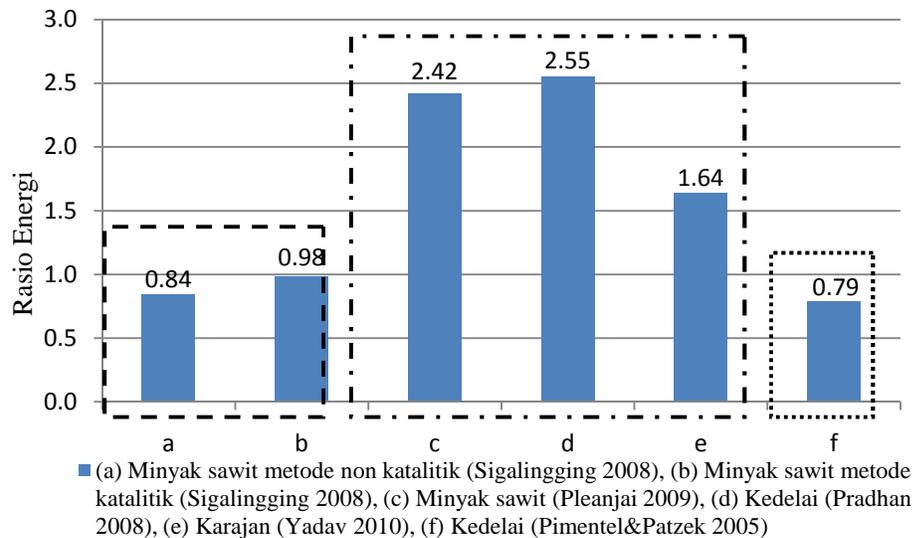
Gambar 2. Rasio energi hasil penelitian berdasarkan definisi RE_1

Sigalingging (2008) melakukan penelitian terhadap rasio energi dengan menggunakan peralatan yang sama, tetapi menggunakan definisi RE_2 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 ER_2 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 Gambar3. 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.

Menurut, 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.



Gambar3. Perbandingan rasio energi hasil penelitian penulis dan Sigalingging (2008) berdasarkan definisi RE_2 pada persamaan (2)



Gambar4. Perbandingan rasio energi dengan definisi yang berbeda dari berbagai literatur

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. Oleh sebab itu, 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. Gambar4 menunjukkan perbandingan rasio energi dari berbagai literatur sebagaimana disebutkan di atas.

Efisiensi Eksergi

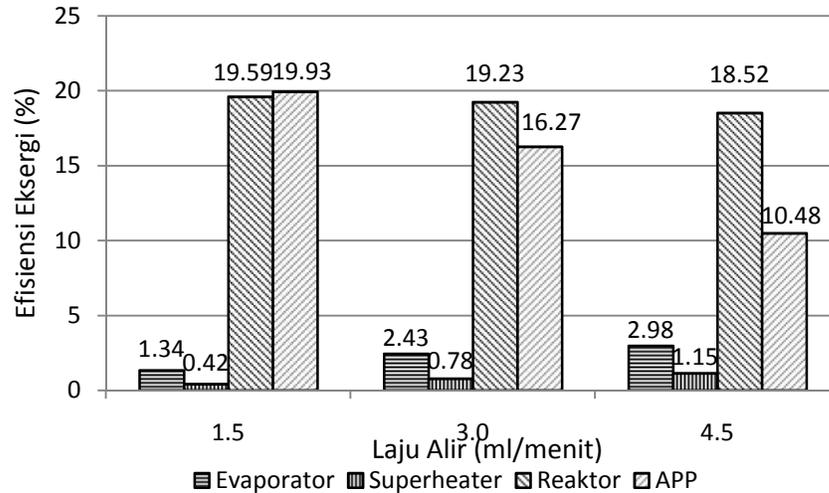
Hasil perhitungan irreversibilitas yang terjadi selama berlangsungnya proses transesterifikasi non-katalitik ditampilkan pada Tabel 2. Irreversibilitas merupakan ukuran untuk mengetahui besarnya kerja yang hilang dalam suatu proses, karena berubah menjadi entropi. Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa reaktor merupakan sub-sistem yang bekerja dengan irreversibilitas tertinggi, sedangkan alat penukar panas (APP) adalah terendah. Semakin besar nilai irreversibilitas dari masukannya maka mengindikasikan semakin rendahnya kualitas energi luaran dari sub-sistem tersebut. Selanjutnya, peningkatan laju alir metanol juga menyebabkan peningkatan irreversibilitas pada masing-masing sub-sistem.

Tabel 2. Irreversibilitassetiap unit subsistem

Laju Alir Metanol (ml/menit)	Irreversibilitas subsistem (kW)			
	Evaporator	Superheater	Reaktor	APP
1.5	2.59E-01	3.36E-01	4.36E-01	6.32E-05
3.0	2.75E-01	3.50E-01	3.60E-01	1.16E-04
4.5	3.28E-01	3.66E-01	3.76E-01	2.31E-04

Sumber irreversibilitas dapat berasal dari gesekan antara fluida dengan dinding pipa, ekspansi, pencampuran, reaksi kimia, serta akibat pindah panas melalui perbedaan suhu. Faktor gesekan pada alat penukar panas tidak dapat diabaikan karena menurut irreversibilitas yang diakibatkan gesekan selama perpindahan panas dalam alat penukar panas sangat mempengaruhi besarnya energi yang dapat dimanfaatkan sehingga menyebabkan besarnya pemusnahan eksergi (*exergy destruction*) yang berakibat pada semakin rendahnya efisiensi eksergi alat penukar panas (Bejan *et al.* 2006; Basri 2010). Oleh sebab itu, diperlukan studi lanjutan untuk melakukan analisis terhadap sumber-sumber irreversibilitas pada sistem produksi biodiesel secara non-katalitik dengan metoda *super-heated methanol vapor* ini.

Efisiensi eksergi (efisiensi hukum termodinamika kedua) yang dihitung berdasarkan persamaan (3) ditampilkan pada Gambar 5. Efisiensi eksergi reaktor dan alat penukar panas satu ordo lebih tinggi dari efisiensi *evaporator* dan *superheater*. Peningkatan laju aliran metanol menyebabkan efisiensi eksergi *evaporator* dan *superheater* meningkat, tetapi menyebabkan efisiensi eksergi reaktor dan alat penukar panas menurun. *Evaporator* berfungsi meningkatkan suhu dan mengubah metanol ke fase uap, yang selanjutnya suhu uap metanol ditingkatkan ke tingkat *superheated* di sub-sistem *superheater*. Pada reaktor terjadi reaksi antara *palm olein* dalam fase cair dengan metanol dalam fase uap *superheated* pada suhu 290°C. Akibat dari sifat reaksi yang eksotermis, reaktor juga mendapat penambahan energi dari panas reaksi kimia pembentukan biodiesel. Perbedaan fungsional tersebut diduga sebagai penyebab terjadinya perbedaan pengaruh laju aliran metanol terhadap efisiensi eksergi di *evaporator*, *superheater*, dan reaktor, serta penukar panas. Secara keseluruhan, efisiensi eksergi pada produksi biodiesel non-katalitik metode *superheated methanol vapor* (SMV) masih rendah sehingga masih perlu ditingkatkan untuk mencapai efisiensi eksergi dan rasio energi optimum.



Gambar5. Efisiensi eksergi setiap subsistem pada produksi biodiesel secara non-katalitik.

Eksergi merupakan ukuran kualitas energi atau ukuran ketersediaan energi untuk melakukan kerja, dan dalam perhitungannya menggunakan parameter lingkungan sebagai acuan. Analisis eksergi pada produksi biodiesel dapat digunakan untuk mengevaluasi penggunaan bahan baku dan komponen proses produksinya seperti besarnya arus listrik dan material alat yang digunakan. Penentuan efisiensi eksergi untuk sistem keseluruhan dan/atau komponen individual yang membentuk sistem merupakan bagian utama analisis eksergi. Analisis yang komprehensif suatu sistem termodinamika melibatkan baik analisis energi maupun analisis eksergi agar diperoleh Gambaran kerja sistem secara lengkap (Basri 2010). Talens *et al.* (2007) mengatakan bahwa efisiensi eksergi dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara eksergi yang dapat dimanfaatkan dalam suatu proses dan total eksergi yang digunakan untuk terbentuknya proses tersebut.

4. KESIMPULAN

1. 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.
2. 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.
3. Analisis eksergi menunjukkan bahwa irreversibilitas tertinggi terjadi pada sub-sistem reaktor. Sementara itu, peningkatan laju alir metanol menyebabkan efisiensi eksergi

evaporator dan superheater meningkat, sedangkan efisiensi eksergi reaktor dan alat penukar panas menurun.

5. 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.

DAFTAR PUSTAKA

- Basri, H., D. Santoso. 2010. Analisis eksergi pada siklus turbin gas sederhana 14 MW instalasi pembangkit tenaga keramasan Palembang. Di dalam: *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9*. Palembang. 13-15 Oktober 2010. 512-521.
- Bejan, A., G. Tsatsaronis, M. Moran. 1996. *Thermal Design and Optimization*. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. Hal. 113-159.
- 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.
- Dincer, I., Y.A. Cengel. 2001. Energy, Entropy, and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering. *Entropy* 3:116-149.
- Hill, J., E. Nelson, D. Tilman, S. Polasky, dan D. Tiffany. 2006. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *PNAS* 103(30): 11206-11210.
- Hong, S.T. *et al.* 2009. Transesterification of palm oil using supercritical methanol with co-solvent HCFC-141b. *Res Chem Intermed*. 35: 197-207.
- Joelianingsih, H. Nabetani, S. Hagiwara, Y. Sagara, T. H. Soerawidjaya, A. H. Tambunan, K. Abdullah. 2007. Performance of a Bubble Column Reactor for the Non-catalytic Methyl Esterification of Free Fatty Acids at Atmospheric Pressure, *Journal of Chemical Engineering Japan*, Vol.40(9), pp. 780-785
- Joelianingsih, H. Maeda, S. Hagiwara, H. Nabetani, Y. Sagara, T.H. Soerawidjaya A.H. Tambunan, K. Abdullah. 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, pp.1629–1636
- Morris, D. 2005. The carbohydrate economy, biofuels and the net energy debate. Minneapolis, Minn.: Institute for Local Self-Reliance.
- Pimentel, D., T.W. Patzek. 2005. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Natural Resources Res.* 14(1): 65-76.

- Pleanjai, S., S.H. Gheewala. 2009. Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand. *Applied energi*. 86: S209-S214.
- Pradhan, A., D.S. Shrestha, J.V. Garpen, J. Duffield. 2008. The energy balanced of soybean oil biodiesel production: a review of past studies. *Transactions of the ASABE*. 51(1): 185-194.
- 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: Sekolah Pascasarjana. Institut Pertanian Bogor.
- Talens, L., G. Villalba, X. Gabarrell. 2007. Exergy analysis applied to biodiesel production. *Resources, Conservation, and Recycling*. 51: 397–407.
- Van Gerpen, J., D. Shrestha. 2005. Biodiesel energy balance. Moscow, Idaho: University of Idaho, Department of Biological and Agricultural Engineering.
- Warabi, Y., D. Kusdiana, S. Saka. 2004. Reactivity of triglycerides and fatty acids of rapeseed oil in supercritical alcohols. *Bioresource Technology* 91: 283-287.
- Yadav, A., O. Singh, N. Kumar. 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* 8:11-19.