

OPTIMASI PROSES SINTESIS GLISEROL TERT-BUTIL ETER (GTBE) SEBAGAI ADITIF BODIESEL

OPTIMIZATION OF GLYSEROL TERT-BUTIL ETER PROCESS SYNTHESIS AS A BODIESEL ADDITIVE

Dwi Setyaningsih^{1)*}, Sri Yuliani²⁾, Amri Solechan¹⁾

¹⁾Surfactant and Bioenergy Research Center, Bogor Agricultural University,
IPB Baranangsiang, Jl Padjajaran No. 1, Bogor 16144
Email: dwisetya.sbrc@gmail.com

²⁾Post Harvest Development Research Center, Ministry of Agriculture, Bogor, Indonesia

ABSTRACT

Methyl esters of fatty acids, also known as biodiesel, made from transesterification of vegetable oil with methanol, have shown a lot of promise as alternative diesel fuels. However, biodiesel has some weaknesses that is poor of cold flow properties which can be a problem in temperate climate. Glycerol, as a by product of biodiesel process, can be synthesized become glycerol tert-butyl ether (GTBE) that can improve biodiesel cold flow properties. Etherification of glycerol with tert-butyl alcohol (TBA) catalyzed by bentonite was studied by influence of reaction time, temperature, and amount of catalyst. Central composite rotatable design (CCRD) was used to determine limitations, levels for each factor, and the experimental design. Minimum level for reaction time was 6 hours and the maximum level was 10 hours. Minimum level for temperature was 60°C and the maximum level was 80°C. Minimum level for amount of catalyst was 2.5% and the maximum level was 7.5%. Total GTBE yields was in the range of 8,958.99 ppm to 265,488.83 ppm. Optimal condition for syntheses GTBE was predicted at 4.9 hours of reaction time, 66.2°C of reaction temperature, and 9.7% of catalyst with the yield after verification was 962,092.20. GTBE that has been synthesized could reduce cloud point and pour point biodiesel by 3°C.

Keywords: biodiesel, etherification, glycerol tert-butyl ether (GTBE), optimization

ABSTRAK

Metil ester dari asam lemak, dikenal sebagai biodiesel, dihasilkan dari transesterifikasi minyak nabati dengan metanol, merupakan salah satu alternatif minyak diesel yang menjanjikan. Namun biodiesel memiliki kelemahan yaitu kurangnya ketahanan pada suhu rendah sehingga menjadi masalah untuk daerah subtropis. Gliserol, sebagai produk samping proses biodiesel, dapat disintesis menjadi gliserol tert-butyl eter (GTBE) yang dapat memperbaiki ketahanan biodiesel pada suhu rendah. Pada penelitian ini dipelajari pengaruh waktu reaksi, suhu dan jumlah katalis pada proses eterifikasi gliserol dengan tert-butyl alkohol (TBA), menggunakan katalis bentonit. *Central composite rotatable design (CCRD)* digunakan untuk menentukan batasan level setiap faktor dan desain eksperimen. Level minimum waktu reaksi adalah 6 jam dan maksimum 10 jam. Level minimum suhu 60°C dan maksimum 80°C dan level minimum jumlah katalis 2,5% dan maksimum 7,5%. Perolehan GTBE total adalah 8.958,99 - 265.488,83 ppm. Prediksi kondisi optimum sintesis GTBE adalah pada waktu reaksi 4,9 jam, suhu 66,2°C dan katalis 9,7% dengan hasil verifikasi diperoleh total GTBE sebesar 962.092,20 ppm. GTBE yang disintesis ini dapat menurunkan titik kabut dan titik tuang sebesar 3°C.

Kata kunci: biodiesel, eterifikasi, glycerol tert-butyl ether (GTBE), optimisasi

PENDAHULUAN

Biodiesel adalah salah satu bahan bakar yang saat ini banyak dikembangkan di berbagai negara karena dapat diperbarui dan aman bagi lingkungan. Biodiesel digunakan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil terutama solar. Namun biodiesel masih memiliki kelemahan yaitu tingginya *cloud point* (titik kabut) dan *pour point* (titik tuang) dibandingkan solar. Hal ini dapat menimbulkan masalah pada penggunaan biodiesel terutama di

negara-negara yang memiliki musim dingin. Untuk mengatasi hal ini biasanya ditambahkan aditif tertentu pada biodiesel untuk mencegah aglomerasi kristal-kristal yang terbentuk dalam biodiesel pada suhu rendah (Fukuda *et al.*, 2001).

Peningkatan produksi biodiesel, mengakibatkan peningkatan produk-produk hasil sampingnya seperti gliserol. Gliserol mempunyai karakteristik sebagai zat anti beku, tetapi gliserol tidak dapat ditambahkan langsung ke dalam biodiesel karena perbedaan polaritas, terdekomposisi

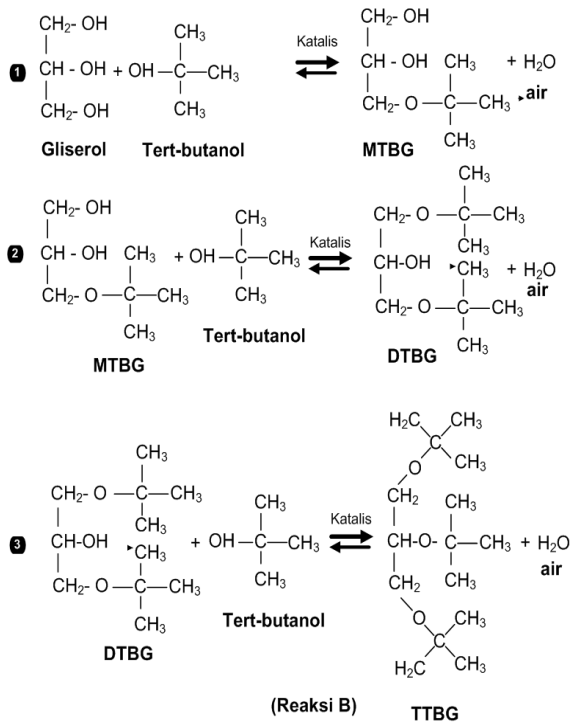
*Penulis untuk korespondensi

dan terpolimerisasi selama pembakaran sehingga menyebabkan masalah pada mesin. Gliserol harus dimodifikasi agar dapat ditambahkan ke dalam bahan bakar. Modifikasi gliserol dapat dianalogikan dengan formulasi ulang gasoline (Karinen dan Krause, 2006).

Gliserol dapat dieterifikasi dengan isobutilen sehingga terbentuk gliserol eter bercabang yang ditambahkan ke dalam biodiesel agar menghasilkan bahan bakar berviskositas rendah dan menurunkan titik awan. Selain dengan isobutilen, eterifikasi gliserol juga dapat dilakukan dengan tert-butyl alkohol (TBA). Konsentrasi gliserol tert butil eter (GTBE) yang terbentuk dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain suhu, waktu, jenis dan jumlah katalis serta rasio molar gliserol dengan TBA atau isobutilen (Noureddini *et al.*, 1998).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu, suhu dan konsentrasi katalis terhadap pembentukan GTBE, sehingga didapatkan kondisi reaksi GTBE yang optimum. GTBE selanjutnya diuji efektivitasnya dalam menurunkan titik awan dan titik tuang biodiesel.

Eterifikasi gliserol akan menghasilkan formasi mono-, di-, dan tri-tert-butyl eter gliserol (Gambar 1). Struktur gliserol eter sebagai bahan aditif dapat berupa 1,3 di-tert-butyl eter gliserol atau perpaduan 2,3 di-tert-butyl eter gliserol dengan 1,2 di-tert-butyl eter gliserol dan 1,2,3 tri-tert-butyl eter gliserol. Klepacova *et al.* (2005) menyebutkan bahwa proses eterifikasi pada gliserol cenderung terjadi pada gugus hidroksil primer (formasi 1-tert-butyl gliserol dan 1,3-di-tert-butyl gliserol).



Gambar 1. Reaksi eterifikasi gliserol dengan TBA

Proses eterifikasi gliserol dapat dilakukan menggunakan katalis homogen ataupun katalis heterogen. Katalis heterogen, terutama katalis resin asam kuat penukar ion (Amberlist) cenderung lebih disenangi karena lebih ramah lingkungan daripada katalis homogen (*p-toluensulfonic*). Namun karena harganya yang mahal, maka dalam penelitian ini digunakan katalis bentonit alam yang terlebih dahulu diaktivasi menggunakan asam (Onal *et al.*, 2002).

Sintesis GTBE menggunakan katalis bentonit, silika, alumina, dan Amberlist IR120 telah dilakukan (Setyaningsih *et al.*, 2008). Hasil GTBE dengan katalis bentonit paling mendekati katalis Amberlist IR120. Perbandingan molar gliserol dan TBA sebesar 1:6 lebih baik dibandingkan 1:4.

Reaksi eterifikasi gliserol dengan TBA akan menghasilkan air, yang mengganggu reaksi. Hal ini dikarenakan reaksi bersifat bolak balik sehingga GTBE yang terbentuk dapat terhidrolisis kembali. Selain itu, air juga menyebabkan terhambatnya kerja katalis karena pori-pori katalis tertutup oleh air. Untuk mengatasi hal tersebut maka pada penelitian ini digunakan zeolit 3Å guna menyerap air. Jika zeolit tidak ditambahkan, air akan lebih cepat diserap oleh bentonit, karena daya serap bentonit terhadap air lebih besar dari pada terhadap gliserol.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah biodiesel dari minyak sawit kasar (CPO), biodiesel jarak pagar, gliserol pa, *tert-butyl* alkohol (TBA), bentonit alam, HCl, zeolit, dan bahan kimia lainnya. Peralatan yang dibutuhkan adalah hot plate, termometer, magnetic stirrer-heater, labu leher tiga, erlenmeyer, peralatan analisis seperti buret, *Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)* Agilent 19091S-433. Kolom kapiler HP-5MS 0,25 mm id, panjang 30 m. Suhu awal 70°C dengan kenaikan 5°C/menit sampai 200°C selama 26 menit.

Metode

Penelitian ini terbagi atas tiga tahap, yaitu, sintesis GTBE, optimasi sintesis GTBE, dan uji efektivitas GTBE. Pada tahap sintesis GTBE, mula-mula dilakukan aktivasi asam pada bentonit. Aktivasi bentonit dilakukan dengan mencampurkan 200 g bentonit ke dalam 400 ml HCl yang kemudian dipanaskan selama 3 jam pada suhu 80°C. Kemudian bentonit disaring dan dicuci dengan akuades sampai pH 3,5 – 4 dan dikeringkan dalam oven dengan suhu 110°C selama 2 jam (dimodifikasi dari Onal *et al.*, 2002 dan Zhangsheng *et al.*, 2006).

Sintesis GTBE dilakukan dengan mereaksikan gliserol dan tert-butyl alkohol (TBA) dengan perbandingan molar 1:6, bentonit teraktivasi dan zeolit 3Å dalam labu leher tiga yang dihubungkan dengan kondensor. Kondisi reaksi diatur pada suhu 60-80°C selama 6-8 jam dengan

pengadukan 400 rpm. Hasil GTBE dikarakterisasi menggunakan GC-MS dengan gliserol murni sebagai standar eksternal.

Pada tahap optimasi digunakan *central composite rotatable design* (CCRD) tiga faktor (Tabel 1). Variabel yang dipilih dalam penelitian ini adalah waktu reaksi, suhu reaksi dan konsentrasi katalis. Parameter uji untuk optimasi ini adalah konsentrasi GTBE yang dihasilkan. Titik optimum model kemudian diverifikasi di laboratorium.

Tabel 1. Batasan dan level variabel

Variabel (X)	Batasan dan Level				
	$-\alpha = 1,68$	-1	0	+1	$+\alpha = 1,68$
Waktu (jam)	4,6	6	8	10	11,5
Suhu (°C)	53,2	60	70	80	86,8
Konsentrasi bentonit (% b/w)	0,8	2,5	5,0	7,5	9,2

Uji efektivitas GTBE dilakukan dengan mencampurkan GTBE ke dalam biodiesel dari CPO dan jarak pagar dengan perbandingan volume 1:10. Campuran tersebut kemudian dianalisis titik kabut (ASTM D5573) dan titik tuangnya (ASTM D97).

Rancangan Percobaan

Metode RSM yang digunakan adalah CCRD tiga faktor untuk menentukan batasan dan level masing-masing variabel, serta rancangan percobaan. Variabel yang dipilih dalam penelitian ini adalah waktu reaksi (X_1), suhu reaksi (X_2), dan perbandingan konsentrasi katalis (X_3).

Model orde kedua yang bisa digunakan adalah sebagai berikut:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

Dimana :

- Y : *Response*
- β_{ij} : *Interaction term*
- β_0 : *Offset term*
- x_i : *Coded level* untuk faktor i
- β_i : *Linear term*
- x_j : *Coded level* untuk faktor j
- β_{ii} : *Squared term*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis GTBE

Tabel 2 menunjukkan data hasil sintesis GTBE. GTBE yang dominan terbentuk adalah mono-tert-butyl eter gliserol (MTBG). Hal ini terjadi karena pori-pori bentonit berukuran relatif kecil sehingga molekul-molekul di-tert-butyl eter gliserol (DTBG) dan tri-tert-butyl eter gliserol (TTBG) yang ukurannya lebih besar dari MTBG sulit terbentuk. Adanya air dalam reaksi eterifikasi juga menghambat terbentuknya DTBG dan TTBG. Klepacova *et al.* (2005) menerangkan bahwa adanya air dapat menghalangi gliserol memasuki daerah permukaan inti katalis atau menghalangi reaksi pembentukan molekul gliserol eter yang lebih besar sehingga reaksi berjalan sangat lambat atau reaksi terjadi di daerah permukaan katalis.

Tabel 2. Konsentrasi GTBE (ppm)

Waktu (jam)	Faktor			GTBE (ppm)			total
	Suhu (°C)	Katalis (% b/b)	MTBG	DTBG	TTBG		
6	60	2,5	9.314,11	157,92	0	9.472,03	
10	60	2,5	14.154,87	1.747,91	0	15.902,78	
6	80	2,5	160.581,59	14.797,32	4.731,74	180.110,65	
10	80	2,5	113.569,07	10.894,18	2.603,72	127.066,97	
6	60	7,5	210.406,12	10.824,29	44.258,42	265.488,83	
10	60	7,5	54.038,41	5.451,16	0	59.489,57	
6	80	7,5	111.031,55	7.751,96	3.254,48	122.037,99	
10	80	7,5	178.205,20	9.037,98	20.919,36	208.162,54	
4,64	70	5	168.445,35	13.665,92	5.401,80	187.513,07	
11,36	70	5	8.243,98	715,01	0	8.958,99	
8	53,18	5	13.236,53	475,00	0	13.711,53	
8	86,82	5	164.244,64	9.298,46	14.448,60	187.991,70	
8	70	0,80	60.028,43	6.030,42	888,80	66.947,65	
8	70	9,20	185.206,52	10.630,96	15.656,98	211.494,46	
8	70	5	74.819,06	6.530,71	1.533,75	82.883,52	
8	70	5	103.555,58	8.082,43	2.704,77	114.342,78	
8	70	5	150.282,93	10.793,54	7.094,32	168.170,79	

Analisis ragam (ANOVA) data transformasi konsentrasi GTBE didapatkan bahwa waktu reaksi tidak berpengaruh secara signifikan terhadap konsentrasi GTBE. Sedangkan, suhu reaksi dan konsentrasi katalis berpengaruh secara signifikan terhadap konsentrasi GTBE yang terbentuk. Dari analisis ragam juga terlihat bahwa interaksi antar faktor tidak berpengaruh secara signifikan terhadap konsentrasi GTBE.

Model persamaan kuadrat yang dihasilkan adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Sqrt(Y) = & 343.8021909 - 56.5773333 X_1 + \\ & 83.1901288 X_2 + 65.8086841 X_3 + \\ & 35.1935542 X_1 X_2 - 15.6617795 X_1 \\ & X_3 - 63.8752049 X_2 X_3 - 23.40694681 \\ & X_1^2 - 19.34168316 X_2^2 + \\ & 10.34820481 X_3^2 \end{aligned}$$

Dengan \sqrt{Y} adalah nilai akar kuadrat dari GTBE; X_1 adalah waktu reaksi; X_2 adalah suhu reaksi; dan X_3 adalah konsentrasi katalis.

Gambar 2 memperlihatkan hubungan antara waktu dan suhu terhadap konsentrasi GTBE yang dihasilkan. Terlihat bahwa konsentrasi GTBE meningkat dengan kenaikan suhu dan berkurang dengan penambahan waktu reaksi. Penurunan konsentrasi GTBE dikarenakan reaksi eterifikasi adalah reaksi bolak-balik sehingga kemungkinan GTBE yang terbentuk terhidrolisis kembali oleh air yang tidak terikat oleh zeolit sehingga konsentrasi GTBE menurun. Sedangkan kenaikan konsentrasi

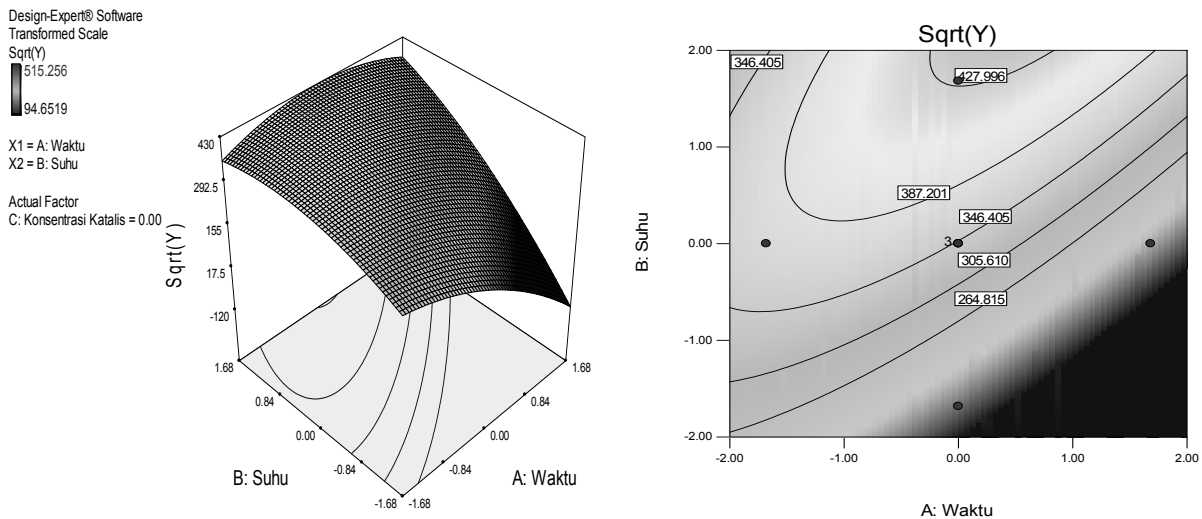
GTBE disebabkan laju reaksi eterifikasi gliserol berbanding lurus dengan suhu reaksi (Klepacova *et al.*, 2003).

Dari kontur (Gambar 2) terlihat bahwa pada selang yang diujikan belum tercapai titik optimum. Kondisi optimum diperkirakan tercapai pada selang waktu 4,6 – 6,0 jam. Hal ini terlihat dari nilai \sqrt{Y} GTBE tertinggi tercapai pada rentang waktu reaksi tersebut.

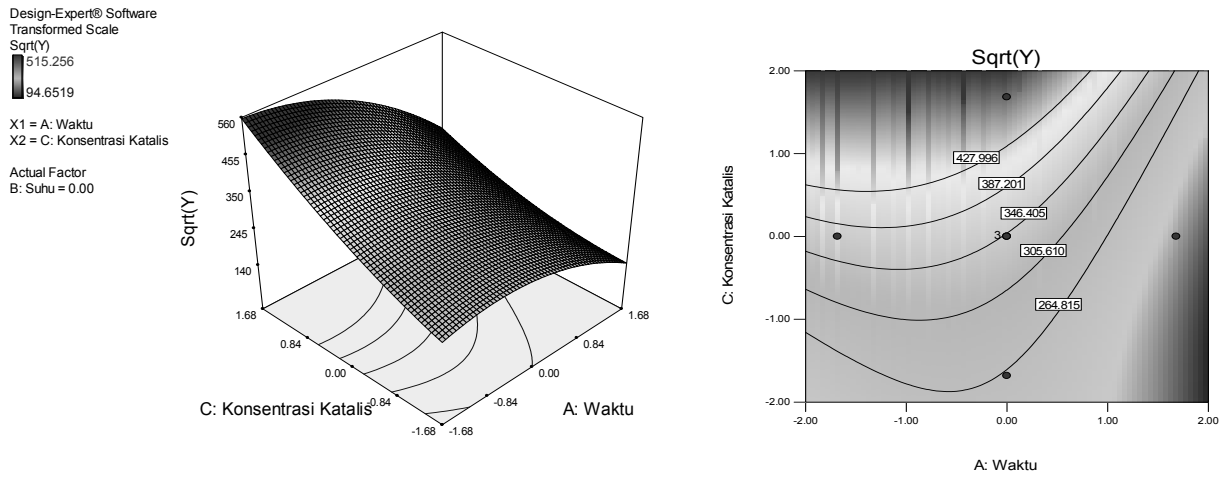
Gambar 3 memperlihatkan hubungan antara waktu reaksi dan konsentrasi katalis terhadap konsentrasi GTBE. Terlihat bahwa konsentrasi GTBE naik secara tajam dengan penambahan konsentrasi katalis. Semakin banyak katalis, maka luas permukaan katalisis semakin besar dan kontak antara gliserol dan TBA semakin banyak terjadi sehingga pembentukan GTBE semakin besar.

Dari kontur (Gambar 3) terlihat bahwa kondisi optimum belum tercapai pada selang waktu dan konsentrasi yang diuji. Titik optimum diperkirakan tercapai pada selang konsentrasi 9,2 – 10,0%. Hal ini terlihat dari nilai \sqrt{Y} GTBE yang semakin tinggi pada daerah pojok kiri atas dari grafik.

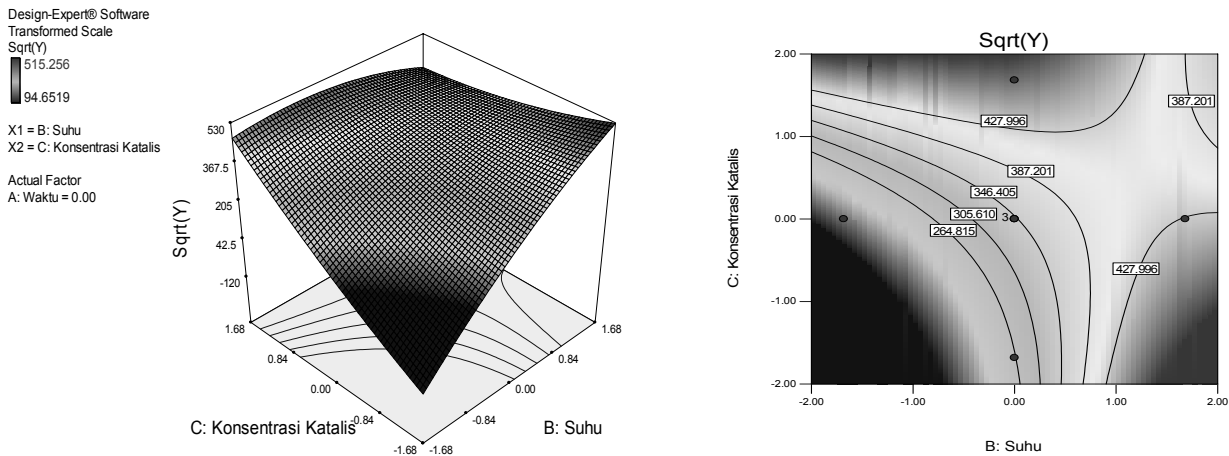
Gambar 4 menunjukkan hubungan antara suhu reaksi dan konsentrasi katalis terhadap konsentrasi GTBE. Terlihat bahwa kondisi optimum belum tercapai. Kondisi optimum diperkirakan tercapai pada selang suhu 53,2°C – 60,0°C. Hal ini ditandai dengan nilai \sqrt{Y} GTBE yang tinggi pada rentang suhu tersebut.



Gambar 2. Grafik permukaan respon dan kontur \sqrt{Y} GBTE sebagai fungsi dari faktor waktu dan suhu reaksi



Gambar 3. Grafik permukaan respon dan kontur *sqrt* GBTE sebagai fungsi dari faktor waktu dan konsentrasi katalis



Gambar 4. Grafik permukaan respon dan kontur *sqrt* GBTE sebagai fungsi dari faktor suhu dan konsentrasi katalis

Secara keseluruhan, model permukaan respon memperlihatkan bahwa solusi optimasi berbentuk *saddle point*, sehingga model tersebut tidak dapat memberikan informasi kondisi perlakuan optimal yang diharapkan akan menghasilkan konsentrasi GTBE tertinggi secara langsung. Titik optimum diperkirakan menggunakan analisa yang disediakan oleh *software Design Expert 7.0.1 (free trial)*. Dari analisis tersebut didapatkan perkiraan *sqrt* GTBE optimal sebesar 613.10 dicapai pada kondisi reaksi selama 4,9 jam, suhu reaksi 66,2°C, dan konsentrasi katalis sebesar 9,7%. Dari hasil verifikasi didapatkan nilai *sqrt* GTBE sebesar 980,86. Hasil verifikasi berbeda dengan nilai *sqrt* GTBE hasil perkiraan menggunakan *software Design Expert*. Hal ini menunjukkan bahwa model yang diperoleh kurang valid untuk menentukan kondisi optimum reaksi GTBE. Kemungkinan dikarenakan model yang masih *saddle point* sehingga nilai optimum tidak dapat diprediksi secara tepat.

Efektivitas GTBE dalam Menurunkan Titik Kabut dan Titik Tuang

Penambahan GTBE ke dalam biodiesel dapat menurunkan titik kabut biodiesel sebesar 5°C (Noureddini *et al.*, 1998). Nilai titik tuang dan titik kabut berkorelasi dengan ketidakjenuhan biodiesel. Biodiesel yang memiliki ikatan tidak jenuh semakin tinggi akan memiliki *cold properties* yang lebih baik. Biodiesel CPO banyak mengandung asam lemak jenuh, sehingga memiliki nilai titik kabut dan titik tuang yang cukup tinggi. Dari pengujian didapatkan titik kabut dan titik tuang biodiesel CPO masing-masing sebesar 18°C dan 15°C. Sementara biodiesel jarak pagar adalah 9°C dan 0°C. Biodiesel CPO memiliki titik kabut dan titik tuang yang lebih tinggi dibandingkan jarak pagar, karena kandungan asam lemak tak jenuhnya lebih rendah.

GTBE dapat menurunkan titik kabut dan titik tuang biodiesel karena gliserol merupakan salah satu zat krioprotektan (*cryoprotectant*), yaitu pelindung zat dari kebekuan. Namun karena gliserol tidak dapat larut dalam biodiesel maka biodiesel harus

dimodifikasi, salah satunya adalah dengan eterifikasi. GTBE akan bercampur dengan biodiesel sehingga GTBE dapat menyusup di antara asam lemak penyusun biodiesel. Karena gliserol mempunyai titik beku yang lebih rendah dari biodiesel, maka keberadaan GTBE dalam biodiesel akan menghambat pembekuan biodiesel sehingga *cold properties* biodiesel menjadi lebih baik.

Tabel 3 menunjukkan data titik kabut dan titik tuang dari biodiesel CPO dan jarak yang dicampur dengan 10% GTBE. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa GTBE yang disintesis dapat menurunkan titik kabut dan titik tuang biodiesel CPO dan jarak rata-rata sebesar 3°C. Penurunan nilai titik kabut dan titik tuang ini relatif cukup kecil bila dibandingkan dengan hasil penelitian dari Nouredini *et al.* (1998) yang menyebutkan penambahan gliserol tert-butyl eter ke dalam biodiesel dapat menurunkan titik kabut biodiesel sebesar 5°C. Penurunan yang kecil ini kemungkinan disebabkan karena GTBE yang terbentuk sebagian besar adalah mono-tert-butyl eter gliserol. Menurut Klepacova *et al.* (2005), gliserol eter yang bagus digunakan sebagai aditif bahan bakar diesel adalah di- dan tri-tert-butyl eter gliserol, karena kelarutannya dalam bahan bakar diesel yang lebih baik daripada mono-tert-butyl eter gliserol.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Waktu reaksi, suhu reaksi dan konsentrasi katalis berpengaruh terhadap pembentukan gliserol *tert-butyl* eter (GTBE). Waktu reaksi tidak berpengaruh secara nyata terhadap konsentrasi GTBE. Semakin bertambah konsentrasi katalis, semakin tinggi konsentrasi GTBE.

Hasil analisis statistika menunjukkan model yang berbentuk *saddle point*, prediksi kondisi optimum diperkirakan pada waktu reaksi 4,9 jam, suhu 66,2°C, dan konsentrasi katalis sebesar 9,7%. Hasil verifikasi menunjukkan nilai GTBE total 962,092 ppm, yang lebih tinggi dibanding model.

Gliserol tert-butyl eter dapat digunakan untuk memperbaiki *cold properties* biodiesel CPO dan jarak. Penambahan GTBE ke dalam biodiesel CPO dan jarak sebanyak 10% dapat menurunkan nilai titik kabut dan titik tuang biodiesel sebesar 3°C.

Saran

GTBE hasil sintesis masih kurang efektif dalam menurunkan titik kabut dan titik tuang biodiesel karena sebagian besar berupa mono-tert-butyl eter gliserol yang kurang larut. Oleh karena itu disarankan penggunaan katalis yang lebih reaktif.

Tabel 3. Titik kabut dan titik tuang campuran biodiesel dengan GTBE total

Waktu (jam)	Faktor		Titik kabut (°C)		Titik tuang (°C)	
	Suhu (°C)	Katalis (% b/b)	CPO	Jarak	CPO	Jarak
6	60	2,5	15	6	12	-3
10	60	2,5	15	6	12	-
6	80	2,5	15	6	12	-3
10	80	2,5	15	6	12	-6
6	60	7,5	15	-	9	-
10	60	7,5	15	-	9	-
6	80	7,5	15	-	12	-
10	80	7,5	15	-	12	-
4,64	70	5	15	-	12	-
11,36	70	5	15	6	9	-3
8	53,18	5	15	6	12	-3
8	86,82	5	15	6	12	-6
8	70	0,80	15	-	12	-
8	70	9,20	15	-	12	-
8	70	5	15	-	12	-
8	70	5	15	6	12	-3
8	70	5	15	-	12	-
Kontrol			18	9	15	0

DAFTAR PUSTAKA

- Fukuda H, Kondo A, Noda H. 2001. Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils. *Journal of Bioscience and Engineering*. 5:405-416.
- Karinen RS dan Krause AOI. 2006. New Biocomponents from Glycerol. *Journal of Applied Catalysis A: General* 306: 128–133.
- Klepáčová K, Mravec D, Bajus M. 2005. tert-Butylation of Glycerol Catalysed by Ion-Exchange Resins. *Journal Applied Catalysis A: General* 294: 141–147.
- Klepáčová K, Mravec D, Hájeková E, Bajus M. 2003. Etherification of Glycerol. *Journal of Petroleum and Coal* 45 (1-2): 54-57.
- Noureddini HS, Bailey WR, Hunt BA. 1998. Production of Glycerol Ether from Crude Glycerol- The by-Product of Biodiesel Production. *Papers in Biomaterial 1998*. Chemical and Biomolecular Engineering Research and Publication.
- Onal MUS, Sarikaya YU, Alemdaroglu TU. 2002. The Effect of Acid Activation on Some Physicochemical Properties of A Bentonite. *Turk J Chem* 26: 409 – 416.
- Setyaningsih D, Hambali E, Sumangat D, Yuliani S. 2008. Peningkatan Kualitas Biodiesel Jarak Pagar Melalui Sintesis Gliserol Eter Sebagai Aditif Penurun Titik Awan dan Titik Tuang. *Laporan Penelitian*. Surfactant and Bioenergy Research Center, IPB, Bogor.