

OPTIMASI PROSES PEMBUATAN BIODIESEL DARI ASAM LEMAK SAWIT DISTILAT (ALSD) DAN DIMETHYL CARBONATE (DMC) MENGGUNAKAN KATALIS NOVOZYM[®] 435

William¹, Johan Senjaya¹, Taslim¹, Tjahjono Herawan², Meta Rivani²
¹Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara,
Jl. Almamater Kampus USU, Medan 20155, Indonesia
²Pusat Penelitian Kelapa Sawit,
Jl. Brigjen Katamso No. 51, Medan 20158, Indonesia
Email : william_williom@yahoo.co.id

Abstrak

Produksi biodiesel telah berkembang pesat selama ini, dan telah menarik banyak perhatian sebagai bahan bakar pengganti minyak solar yang menjanjikan, karena sifat fisik dan kimia serta kandungan energi biodiesel yang mirip dengan minyak solar. Masalah utama dalam memproduksi biodiesel adalah biaya tinggi yang dapat dikurangi dengan menggunakan bahan baku yang lebih murah. Oleh karena itu, dalam penelitian ini biodiesel disintesis dengan esterifikasi enzimatis dari kualitas bahan baku yang tidak dimurnikan dan jauh lebih murah daripada minyak olahan, seperti asam lemak sawit distilat (ALSD) dengan dialkil karbonat menggunakan amobil lipase (Novozym[®]435). Beberapa keunggulan proses enzimatis dibandingkan dengan proses kimia, penggunaan energi yang rendah, memungkinkan esterifikasi gliserida dengan kadar asam lemak bebas yang tinggi (ALSD, 85-95% FFA) dan tidak ada kerugian aktivitas enzimatis. Metanol digantikan oleh dialkil karbonat (DMC) didasari oleh alasan bahwa transesterifikasi (metanolisis) berada dalam kesetimbangan reaksi sedangkan menggunakan DMC senyawa produk segera terurai menjadi karbon dioksida dan alkohol. Selain itu, DMC disebut zat kimia yang ramah lingkungan, murah, tidak beracun dan mudah didapat. Faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi seperti perbandingan molar DMC terhadap ALS, suhu reaksi, waktu reaksi dan konsentrasi katalis secara sistematis dianalisis dengan metodologi respon permukaan (RSM) dengan desain komposit pusat (CCD). Kondisi optimum dihasilkan dengan menggunakan perbandingan molar DMC/ALSD 6:1, pada suhu 60 °C, untuk 3 jam reaksi dengan berat katalis 10% (berdasarkan berat minyak). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sintesis biodiesel melalui esterifikasi enzimatis menggunakan ALSD cocok digunakan untuk produksi biodiesel.

Kata Kunci : biodiesel, dimetil karbonat, esterifikasi, Novozym[®]435, asam lemak sawit distilat

Abstract

Biodiesel production has rapidly grown over the last decades, and it has attracted much attention in the market as fuel that promising substitute for petroleum diesel, because its physical and chemical properties and energy content are similar to those of petroleum diesel. The main problem in producing biodiesel is its high cost which could be reduced by use of less expensive feedstock. Therefore, in this work biodiesel is synthesized by enzymatic esterification from low quality feedstock which is unrefined and much cheaper than the refined oil, such as palm fatty acid distillate (PFAD) with dialkyl carbonate using immobilized lipase (Novozym[®]435). Enzymatic process has certain advantages over the chemical process, as it is less energy intensive, allowing the esterification of glycerides with high free fatty acid contents (PFAD, 85-95% FFA) and no enzymatic activity loss. Methanol replaced by dialkyl carbonate, especially DMC due to esterification (methanolysis) is close to equilibrium reaction whereas using DMC the intermediate compound immediately decomposes to carbon dioxide and an alcohol, which have been investigated. Moreover, DMC are cheap, eco-friendly chemical, non-toxic properties and widely available. Factors affecting the reaction such as DMC to PFAD molar ratio, reaction temperature, reaction time and catalyst concentration were systematically analyzed by response surface methodology (RSM) with central composite design (CCD). The optimal condition is using 6:1 molar ratio of DMC to PFAD at 60 °C, for a reaction time 3h in the presence 10wt% of catalyst (based on oil weight). The results showed that synthesis of biodiesel through enzymatic esterification using PFAD suitable for biodiesel production.

Keywords : biodiesel, dimethyl carbonate, esterification, Novozym[®]435, palm fatty acid distillate

Pendahuluan

Biodiesel, bahan bakar alternatif untuk mesin diesel, merupakan salah satu energi terbarukan yang paling penting karena meningkatnya permintaan energi. Sifat fisik dan kimia serta kandungan energi biodiesel tergantung pada bahan baku minyak dan alkohol yang digunakan, namun selalu dapat digunakan langsung sebagai pengganti bahan bakar diesel. Biodiesel masih

bersifat unggul karena memiliki angka setana yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar diesel, tidak mengandung sulfur, mengandung sekitar 11 % berat oksigen, emisi gas buang lebih rendah, *biodegradable* dan tidak beracun [3,5,6,11,13,16]. Umumnya, biodiesel dihasilkan dari sintesis minyak nabati dan hewani atau dengan esterifikasi asam lemak dengan alkohol rantai pendek melalui proses enzimatis

atau kimiawi menggunakan bantuan katalis [12,14].

Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa bahan baku yang berkualitas rendah atau bahan baku tanpa olahan jauh lebih murah untuk memproduksi biodiesel daripada minyak olahan seperti minyak goreng bekas, lemak hewan, minyak semir dan ALSD. Akan tetapi, bahan baku dengan kualitas rendah tidak dapat diproses dengan menggunakan katalisis alkali atau katalis asam. Meskipun hasil yang didapat dari transesterifikasi dengan katalis kimia lebih tinggi, namun proses kimia memiliki beberapa kelemahan, yaitu konsumsi energi yang tinggi, kesulitan dalam transesterifikasi trigliserida dengan kandungan asam lemak bebas yang tinggi dan membutuhkan pengolahan air limbah [1,2,6]. Katalis heterogen seperti asam padat [7] dan lipase amobil [17] telah digunakan dalam pembuatan biodiesel dari ALSD dengan metanol sebagai alkohol dalam reaksi.

Namun, penggunaan dimetil karbonat (DMC) sebagai reaktan dalam memproduksi biodiesel dari ALSD belum diteliti. Penggunaan DMC sebagai pengganti metanol tidak menyebabkan transesterifikasi berada dalam kesetimbangan karena produk samping yang terbentuk terurai menjadi karbon dioksida dan alkohol. Selain itu, DMC bersifat ramah lingkungan, murah dan tidak beracun [8,10,15].

Pada penelitian ini, Candida antarctica lipase B terimobilisasi digunakan untuk memproduksi biodiesel dengan ALSD dan DMC. Variabel yang mempengaruhi reaksi transesterifikasi enzimatis seperti molar perbandingan (alkohol/minyak), katalis yang digunakan, temperatur reaksi dan waktu reaksi dianalisis menggunakan metode permukaan respon. Oleh karena itu, percobaan dilakukan sesuai dengan CCD dengan RSM untuk menentukan kondisi optimum untuk produksi biodiesel. CCD 5-tingkat-4-faktor dikerjakan untuk mengoptimalkan tingkat perbandingan molar DMC/ALSD, suhu reaksi, waktu reaksi dan konsentrasi katalis. Hubungan antara keempat variabel dan hasil metil ester dianalisis secara sistematis.

Teori

Response surface methodology (RSM) secara luas digunakan untuk merancang percobaan, membangun model, dan menentukan kondisi optimum serta mengevaluasi beberapa faktor dari eksperimen yaitu peran interaksi dari masing-masing komponen [19].

Pengaruh perbandingan molar DMC/PFAD, suhu reaksi, waktu reaksi, dan jumlah biokatalis pada yield biodiesel dianalisis dengan menggunakan program STATISTICA, *trial*

version (StatSoft, Indonesia). Level dan range untuk empat variabel independen dan kode untuk dua level yaitu rendah (-1) dan tinggi (+1). Desain *Central Composite Design* (CCD) pada eksperimen yang menggunakan empat variabel independen nilai rotabilitasnya = $(4^2)^{1/4} = 2$. Oleh karena itu, nilai ± 2 termasuk nilai aksial yang digunakan untuk pengkodean.

Adapun level dan range untuk empat variabel independen dan kode untuk dua level yaitu rendah (-1) dan tinggi (+1). Desain *Central Composite Design* (CCD) pada eksperimen yang menggunakan empat variabel independen nilai rotabilitasnya = $(4^2)^{1/4} = 2$. Oleh karena itu, nilai ± 2 termasuk nilai aksial yang digunakan untuk pengkodean. Level kode dan kombinasi perlakuan serta desain komposit pusat rancangan percobaan penelitian dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Bentuk umum dari orde kedua polinomial persamaan (1) yang mencakup semua hal interaksi digunakan untuk menghitung respon prediksi:

$$Y_{\text{yield}} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i>j}^k \sum_j b_{ij} X_i X_j \dots (1)$$

dimana Y_{yield} adalah hasil metil ester, b_0 adalah hubungan keseimbangan, b_i adalah efek linear, b_{ii} adalah efek kuadrat, b_{ij} adalah efek interaksi, x_i adalah variabel independen i dan x_j adalah variabel bebas j [19]. Analisis varians (ANOVA) dievaluasi menggunakan program STATISTICA, *trial version* (StatSoft, Indonesia). Nilai-nilai optimal dari variabel-variabel yang dipilih diperoleh dengan plot kontur dan menghasilkan persamaan regresi.

Tabel 1. Level Kode Rancangan Penelitian

Variabel	Satuan	Level dan Range				
		-2	-1	0	1	2
Perbandingan molar DMC/ALSD (mol/mol)	x_1	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0
Suhu reaksi (°C)	x_2	40	50	60	70	80
Waktu reaksi (jam)	x_3	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Jumlah biokatalis (%berat)	x_4	0	5	10	15	20

Metodologi Penelitian

Lipase komersial, Novozym[®]435 digunakan sebagai biokatalis, diperoleh dari Novo Nordisk Bioindustrials, Inc (Bagsværd, Denmark). ALSD dipasok dari Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS), Medan, Indonesia. Komposisi asam lemak dari PFAD diberikan dalam Tabel 3. Asam

Tabel 2 Desain Respon Permukaan Untuk Keempat Variabel

No/ Run	Level Kode				Variabel				% Yield	
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	Perbandingan Molar DMC/ALSD (mol/mol)	Suhu Reaksi (°C)	Waktu Reaksi (jam)	Jumlah Biokatalis (% berat)	Observasi	Prediksi
1	-1	-1	-1	-1	4,5:1	50	1,5	5	49,8784	49,1603
2	1	-1	-1	-1	7,5:1	50	1,5	5	64,1937	59,8140
3	-1	1	-1	-1	4,5:1	70	1,5	5	41,9893	42,7676
4	1	1	-1	-1	7,5:1	70	1,5	5	62,0407	62,2928
5	-1	-1	1	-1	4,5:1	50	2,5	5	59,1495	57,5479
6	1	-1	1	-1	7,5:1	50	2,5	5	64,9283	67,6577
7	-1	1	1	-1	4,5:1	70	2,5	5	44,9652	53,1688
8	1	1	1	-1	7,5:1	70	2,5	5	79,3304	72,1502
9	-1	-1	-1	1	4,5:1	50	1,5	15	54,6406	58,6872
10	1	-1	-1	1	7,5:1	50	1,5	15	66,8529	61,3514
11	-1	1	-1	1	4,5:1	70	1,5	15	50,2005	50,1732
12	1	1	-1	1	7,5:1	70	1,5	15	63,2407	61,7089
13	-1	-1	1	1	4,5:1	50	2,5	15	60,6114	63,0613
14	1	-1	1	1	7,5:1	50	2,5	15	69,0934	65,1817
15	-1	1	1	1	4,5:1	70	2,5	15	55,3147	56,5609
16	1	1	1	1	7,5:1	70	2,5	15	64,1326	67,5528
17	-2	0	0	0	3,0:1	60	2,0	10	38,1460	30,7414
18	2	0	0	0	9,0:1	60	2,0	10	44,5511	52,3870
19	0	-2	0	0	6,0:1	40	2,0	10	61,7335	64,9611
20	0	2	0	0	6,0:1	80	2,0	10	63,7357	60,9395
21	0	0	-2	0	6,0:1	60	1,0	10	75,1570	78,4820
22	0	0	2	0	6,0:1	60	3,0	10	95,6071	92,7135
23	0	0	0	-2	6,0:1	60	2,0	0	43,8898	44,6322
24	0	0	0	2	6,0:1	60	2,0	20	49,8728	49,5617
25	0	0	0	0	6,0:1	60	2,0	10	79,8159	79,7866
26	0	0	0	0	6,0:1	60	2,0	10	81,8601	79,7866
27	0	0	0	0	6,0:1	60	2,0	10	77,6837	79,7866

Tabel 3. Komposisi Asam Lemak ALSD

Komponen	Struktur	Formula	% (b/b)
Asam Laurat	12:0	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	0,3140
Asam Miristat	14:0	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	1,2518
Asam Palmitat	16:0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	48,5401
Asam Palmitoleiat	16:1	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	0,1492
Asam Stearat	18:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	3,9187
Asam Oleat	18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	36,9306
Asam Linoleat	18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	8,2130
Asam Linolenat	18:3	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	0,2427
Asam Arakidat	20:0	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	0,3260
Asam Eikosenoat	20:1	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	0,1140

lemak (FA) komposisi ALSD ditentukan dengan menggunakan kromatografi gas (GC). Dimetil karbonat (C₃H₆O₃) dibeli dari Merck, Medan,

Indonesia. Semua bahan kimia dan reagen lainnya diperoleh secara komersial dan berbasis analisis.

Penelitian ini dilakukan dalam tabung reaksi 5 ml tertutup, dimasukkan 1 g (3,7585 mmol) ALSD, berbagai jumlah dimetil karbonat dan Novozym[®] 435 ditambahkan. Campuran diaduk pada kecepatan yang sama (300 rpm) dan dipanaskan sampai 60 °C selama 2 jam. Sampel ditarik secara berkala. Sampel disaring dengan *syringe filter* (porositas 0,45 m, 4-mm Nylon) untuk mengangkut enzim dan kelebihan sumber alkil. Filtrat diuapkan sebelum dianalisis dengan GC.

Hasil Penelitian

Model Regresi dan Validasi

Persamaan model yang didasarkan pada satuan kode (x_1, x_2, x_3, x_4 berturut-turut sebagai perbandingan molar DMC/ALSD, suhu reaksi, waktu reaksi dan jumlah biokatalis) untuk memproduksi biodiesel diungkapkan dalam persamaan (2). Untuk menguji fit dari model, koefisien determinasi R^2 dievaluasi. Dalam hal ini, nilai-nilai yang diamati terhadap nilai prediksi untuk metil ester hasil dengan nilai $R^2 = 0,9221$, menunjukkan bahwa model ini dapat menjelaskan 92,21% dari variabilitas (Gambar. 2).

$$\begin{aligned} \text{Yield (\%)} = & -233,618 + 48,725X_1 + 3,968X_2 - 17,069X_3 + \\ & 9,821X_4 - 4,247X_1^2 - 0,042X_2^2 + 5,811X_3^2 - \\ & 0,327X_4^2 + 0,148X_1X_2 - 0,181X_1X_3 - 0,266X_1X_4 \\ & + 0,101X_2X_3 - 0,011X_2X_4 - 0,401X_3X_4 \dots(2) \end{aligned}$$

Selanjutnya, hasil dari orde kedua respon model permukaan dalam bentuk ANOVA diberikan dalam Tabel 4. Signifikansi statistik yang dikendalikan oleh F-test dan P-nilai. Nilai-nilai yang ditemukan 5,5457 dan <0,0025, masing-masing. Probabilitas (P) kurang dari 0,05 menunjukkan bahwa istilah model yang signifikan. ANOVA diterapkan untuk menetapkan signifikansi statistik dari parameter model pada tingkat kepercayaan 95% [16], seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 4. Analysis of Variance (ANOVA) terhadap Yield

Sumber Variasi	SS	Df	MS	F
Model	4690,484	14	335,0346	10,1514
Residual	396,044	12	33,0037	
Total	5086,528	26		

$$R^2 = 0.8661, \text{ Adj } R^2 = 0.7099, P\text{-Value} = <0.0025.$$

Optimisasi Proses Esterifikasi

Dalam penelitian ini, tingkat optimal, variabel independen yang dipilih (6: 1 DMC / PFAD perbandingan molar, temperatur reaksi 60 °C, waktu reaksi 2 jam dan 10% (b/b) konsentrasi katalis), diperoleh dengan memecahkan regresi Persamaan. (2).

Hubungan antara parameter yang paling signifikan dan yield metil ester dianalisis dengan plot kontur. Representasi grafis dari regresi, yang disebut plot kontur disajikan pada Gambar. 1.

Plot kontur pada Gambar 1 (a) menunjukkan bahwa perbandingan molar DMC/ALSD lebih menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap %yield biodiesel yang dihasilkan dibandingkan dengan suhu reaksi pada waktu reaksi dan jumlah biokatalis masing-masing 2 jam

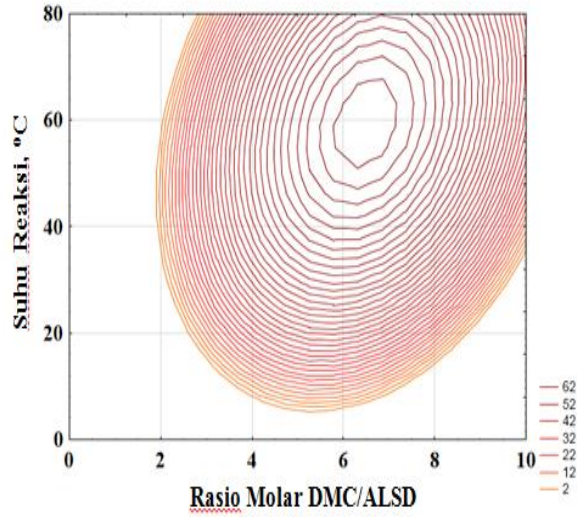
dan 10% dari berat ALSD. Pada penelitian ini, yield optimum didapat pada perbandingan molar DMC/ALSD dan suhu reaksi masing-masing 6:1 dan 60 °C. Dimana semakin tinggi perbandingan molar DMC/ALSD maka yield biodiesel akan semakin meningkat, akan tetapi yield biodiesel menurun kembali saat perbandingan molar DMC/ALSD yang digunakan sekitar 6:1.

Tabel 5. Perkiraan Parameter Model Persamaan Statistik

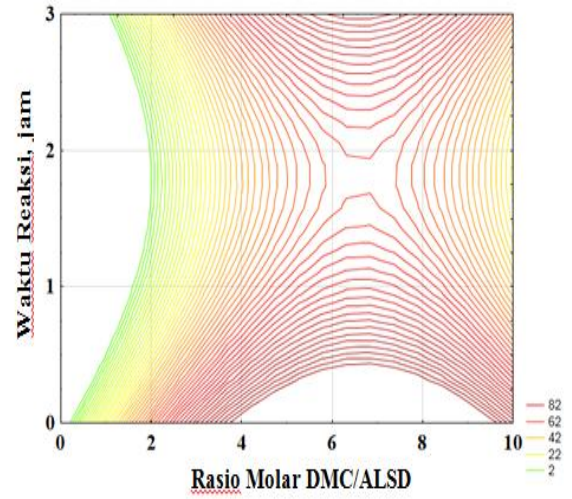
Term	Coef	SE Coef	T	P
Intercept	-233,618	87,9424	-2,6565	0,0209
X_1	48,725	9,7957	4,9741	0,0003
X_2	3,968	1,7273	2,2970	0,0404
X_3	-17,069	29,3870	-0,5808	0,5721
X_4	9,821	2,5799	3,8069	0,0025
X_1^2	-4,247	0,5528	-7,6826	0,0001
X_2^2	-0,042	0,0124	-3,3840	0,0054
X_3^2	5,811	4,9752	1,1680	0,2655
X_4^2	-0,327	0,0498	-6,5705	0,0001
X_1X_2	0,148	0,0958	1,5443	0,1485
X_1X_3	-0,181	1,9150	-0,0947	0,9262
X_1X_4	-0,266	0,1915	-1,3907	0,1896
X_2X_3	0,101	0,2872	0,3505	0,7320
X_2X_4	-0,011	0,0287	-0,3693	0,7184
X_3X_4	-0,401	0,5745	-0,6986	0,4981

Gambar 1 (b) merupakan faktor dari berbagai DMC/ALSD perbandingan molar dan waktu reaksi pada hasil metil ester. Dari gambar dapat dilihat bahwa titik optimum perbandingan molar DMC/ALSD dan waktu reaksi masing-masing 6:1 dan 3 jam. Pada awalnya, hasil metil ester meningkat dengan bertambahnya perbandingan molar DMC/ALSD dan kemudian tren menurun ketika molar perbandingan DMC/ALSD mencapai 6:1.

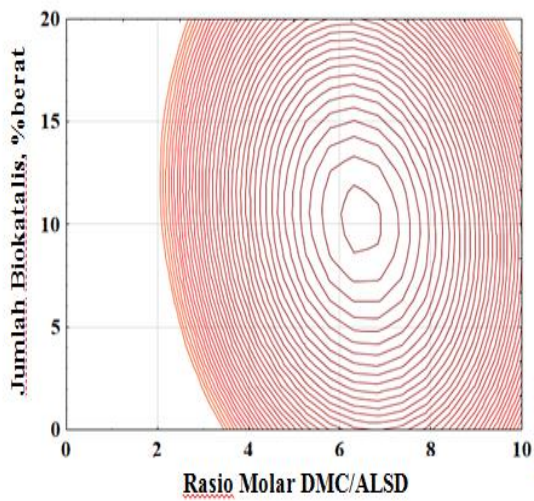
Pengaruh perbandingan molar DMC terhadap ALSD dan konsentrasi katalis pada hasil metil ester disajikan pada Gambar 1 (c). Diamati bahwa titik optimum perbandingan molar DMC/ALSD dan jumlah biokatalis masing-masing 6:1 dan 10%. Pada jumlah biokatalis yang lebih rendah, yield metil ester meningkat dengan peningkatan variasi perbandingan molar DMC/ALSD. Itu juga dapat dilihat bahwa pada molar perbandingan DMC terhadap ALSD yang rendah, meningkatnya jumlah biokatalis kurang berpengaruh pada hasil metil ester. Hal ini sesuai dengan hasil yang diperoleh oleh El-Gendy et al. [17]. Namun, mereka menggunakan limbah minyak bunga matahari sebagai bahan baku untuk produksi biodiesel. Variasi dan ketergantungan dari persentase hasil metil ester pada kedua suhu reaksi dan waktu reaksi, disajikan pada Gambar 1



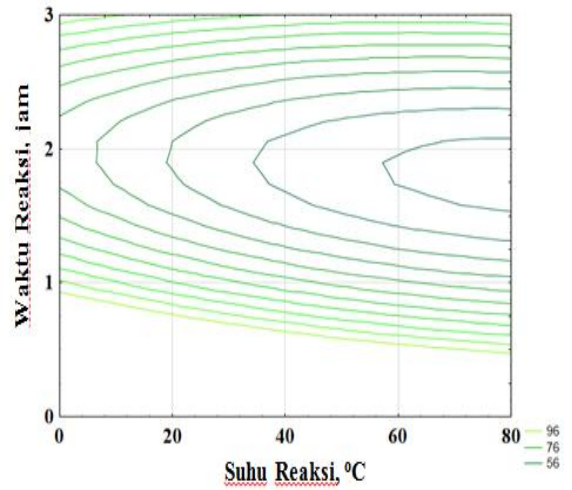
(a)



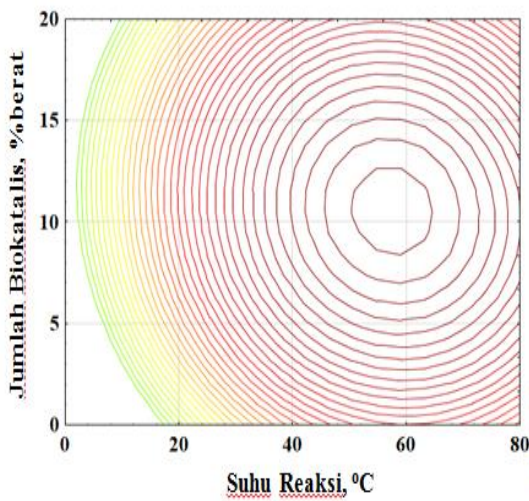
(b)



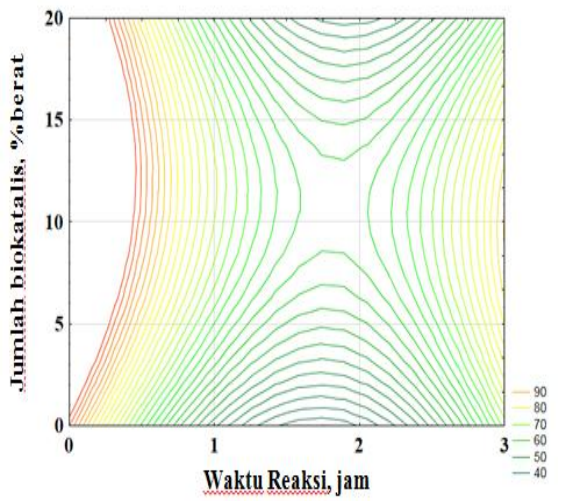
(c)



(d)



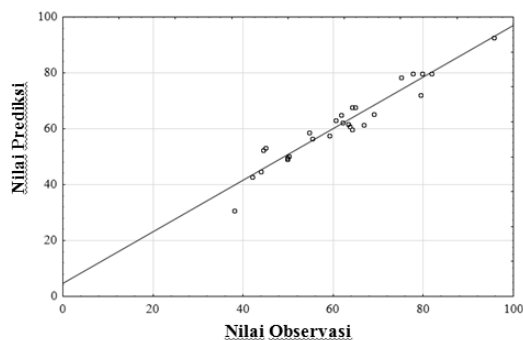
(e)



(f)

Gambar 1. Plot secara kontur hubungan keempat variabel terhadap yield biodiesel.

(d). Pada penelitian ini, yield optimum didapat pada suhu reaksi dan waktu reaksi masing-masing 60 °C dan 3 jam. Hal ini menunjukkan bahwa hasil persen maksimum dicapai pada waktu reaksi 3 jam di berbagai variasi suhu reaksi. Gambar 1 (e) menunjukkan plot kontur hubungan bahwa jumlah katalis enzim lebih menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap %yield biodiesel yang dihasilkan dibandingkan dengan temperatur reaksi pada perbandingan molar DMC/ALSD dan waktu reaksi masing-masing 6:1 dan 2 jam. Dari plot kontur di atas dapat dilihat titik optimum suhu reaksi dan jumlah biokatalis masing-masing 60 °C dan 10%. Semakin besar jumlah katalis enzim yang digunakan maka yield biodiesel akan semakin meningkat seiring dengan kenaikan temperatur reaksi. Namun, yield biodiesel menurun kembali saat jumlah katalis enzim yang digunakan mencapai 10% dari berat minyak. dan Gambar 1 (f) menunjukkan plot kontur yang mewakili metil ester hasil sebagai fungsi dari waktu reaksi dan konsentrasi katalis. Yield optimum dalam penelitian ini didapat pada waktu reaksi dan jumlah biokatalis masing-masing 3 jam dan 10%. Hal ini jelas bahwa persen yield sedikit menurun dengan meningkatnya konten katalis dan waktu reaksi. Hasil metil ester maksimum > 90% terjadi pada konsentrasi katalis sekitar 5-15% berat dan waktu reaksi dari sekitar 3 jam. Brusamarelo et al. [4] yang disintesis kedelai asam lemak etil ester, menunjukkan bahwa konversi tertinggi trigliserida untuk etil ester ketika 10% (b/b) dari enzim amobil digunakan.



Gambar 2. Hubungan Nilai Observasi dengan Nilai Prediksi

Dari Gambar 2 dapat dilihat nilai %yield biodiesel yang didapatkan tidak jauh berbeda dengan %yield biodiesel yang diprediksi. Dalam hal ini dapat dilihat bahwa nilai optimum %yield biodiesel terdapat pada run 22 yaitu sebesar 95,6071% dengan perbandingan molar DMC/ALSD 6:1, suhu reaksi 60 °C, waktu reaksi 3 jam dan jumlah biokatalis 10% dari berat ALSD.

Kesimpulan

Desain respon permukaan metodologi komposit pusat dilakukan untuk mempelajari efek dan optimisasi perbandingan molar DMC/ALSD, suhu reaksi, waktu reaksi dan jumlah biokatalis pada esterifikasi ALSD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa x_1 (perbandingan molar DMC terhadap ALSD), x_4 (konsentrasi katalis), x_1^2 , x_2^2 , x_4^2 merupakan faktor yang signifikan terhadap hasil metil ester untuk esterifikasi enzimatis ALSD. Kondisi optimum reaksi esterifikasi dengan katalis lipase dengan perbandingan molar DMC terhadap ALSD 6:1, suhu reaksi 60 °C, waktu reaksi 3 jam dan katalis konsentrasi 10% b/b. Diperkirakan nilai hasil metil ester itu sesuai dengan nilai eksperimental. Sifat-sifat metil ester yang dihasilkan mendekati standar biodiesel (ASTM D6751). Penelitian ini menunjukkan bahwa asam lemak sawit distilat sangat cocok sebagai bahan baku untuk produksi biodiesel yang ekonomis, tidak hanya mengurangi biaya produksi tetapi juga mengatasi keadaan lingkungan.

Ucapan Terima Kasih

Para penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS) atas menyediakan fasilitas. Para penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Ibu Juwita, Ms. Rahma, Mr Andri dan Mr Warnoto untuk bantuannya dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Al-Zuhair, Sulaiman., Ling, F. W. and Jun, L. S. Proposed Kinetic Mechanism of The Production of Biodiesel from Palm Oil Using Lipase, *Process Biochemistry*, 42(6), 2007, 951-960.
- [2] Bajaj, Akhi., Lohan, P., Jha, P. N. and Mehrotra, R. Biodiesel Production Through Lipase Catalyzed transesterification: An Overview, *Journal of Molecular Catalysis B : Enzymatic*, 62(1), 2010, 9-14.
- [3] Berrios, M., Martin, M. A., Chica, F. A. and Martin, A. Study of Esterification and Transesterification In Biodiesel Production from Used Frying Oils In a Closed System, *Chemical Engineering Journal*, 160(2), 2010, 473-479.
- [4] Brusamarelo, Claiton Z., Rosset, Eline., De Cesaro, Aline., Treichel, Helen., De Oliveira, Debora., Mazutti, Marcio A., Di Luccio, Marco., Oliveira, J. Vladimir. Kinetics of lipase-catalyzed synthesis of soybean fatty acid ethyl esters in pressurized propane, *Journal of Biotechnology*, 147(2), 108-115, 2010.
- [5] Canakci, Mustafa and Gerpen, Jon Van. Biodiesel Production from Oils and Fats with

- High Free Fatty Acids, Transactions of the ASAE, 44 (6), 2001, 1429-1436.
- [6] Cho, Hyun Jun., Kim, Soo Hyun., Wong, Seok Won and Yeo, Yeong-Koo. A Single Step Non-Catalytic Esterification of Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) for Biodiesel Production, Fuel, 93, 2012, 373-380.
- [7] Chongkong, S., Tongurai, C. and Chetpattananondh, P. Continuous Esterification for Biodiesel Production from Palm Fatty Acid Distillate Using Economical Process, Renewable Energy, 34(4), 2009, 1059-1063.
- [8] Dawodu, Folasegun A., Ayodele, Olunmi O., Xin, Jiayu and Zhang, Suojiang. Dimethyl Carbonate Mediated Production of Biodiesel at Different Reaction Temperatures, Renewable Energy, 68, 2014, 581-587.
- [9] El-Gendy, Nour Sh., Deriase, Samiha F., Hamdy, A. and Abdallah, Renee I. Statistical Optimization of Biodiesel Production from Sunflower Waste Cooking Oil Using Basic Heterogeneous Biocatalyst Prepared from Eggshells, Egyptian Journal of Petroleum, 24(1), 2015, 37-48.
- [10] Herawan, Tjahjono and Klaas, M. Rusch Gen. Lipase-Catalyzed Transesterification of Palm Kernel Oil With Dialkyl Carbonate, American Journal of Applied Sciences, 11(8), 2014, 1212-1223.
- [11] Issariyakul, Titipong and Dalai, Ajay K. Biodiesel from Vegetable Oils, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31, 2014, 446-471.
- [12] Jung, Hongsub., Lee, Y., Kim, D., Han, Sung O., Kimc, Seung Wook., Lee, Jinwon., Kim, Yong Hwan and Park, Chulhwan. Enzymatic Production of Glycerol Carbonate from by-Product After Biodiesel Manufacturing Process, Enzyme and Microbial Technology, 51(3), 2012, 143-147.
- [13] Liu, Chien Hung., Huang, Chien Chang., Wang, Yao Wen., Lee, Duu Jong and Chang, Jo Shu. Biodiesel Production by Enzymatic Transesterification Catalyzed by Burkholderia lipase immobilized on Hydrophobic Magnetic Particles, Applied Energy, 100, 2012, 41-46.
- [14] Petchmala, Akaraphol., Laosiripojana, N., Jongsomjit, B., Goto, M., Panpranot, J., Mekasuwandumrong, O., Shotipruk, A. Transesterification of Palm Oil and Esterification of Palm Fatty Acid in Near- and Super-Critical Methanol With $\text{SO}_4\text{-ZrO}_2$ Catalysts, Fuel, 89(9), 2010, 2387-2392.
- [15] Su, Er-Zheng., Zhang, Min-Jie., Zhang, Jian-Guo., Gao, Jian-Feng and Wei, Dong-Zhi. Lipase-Catalyzed Irreversible Transesterification of Vegetable Oils for Fatty Acid Methyl Esters Production With Dimethyl Carbonate as The Acyl Acceptor, Biochemical Engineering Journal, 36(2), 2007, 167-173.
- [16] Su, Erzheng., You, Pengyong and Wei, Dongzhi. In situ Lipase-Catalyzed Reactive Extraction of Oilseeds With Short-Chained Dialkyl Carbonates for Biodiesel Production, Bioresource Technology, 100(23), 2009, 5813-5817.
- [17] Talukder, M. M. Rahman., Wu, J. C., Lau, S. K., Cui, L. C., Shimin, G. and Lim, A. Comparison of Novozym 435 and Amberlyst 15 as Heterogeneous Catalyst for Production of Biodiesel from Palm Fatty Acid Distillate, Energy & Fuels, 23(1), 2009, 1-4.
- [18] Yuan, Xingzhong., Liu, Jia., Zeng, Guangming., Shi, Jingang., Tong, Jingyi and Huang, Guohe. Optimization of Conversion of The Waste Rapeseed Oil with High FFA to Biodiesel Using Response Surface Methodology, Renewable Energy, 33(7), 2008, 1678-1684.
- [19] Yucel, Yasin. Optimization of Biocatalytic Biodiesel Production from Pomace Oil Using Response Surface Methodology, Fuel Processing Technology, 99, 2012, 97-102.