

## OPTIMASI PROSES PRODUKSI BIODIESEL JARAK PAGAR MELALUI TRANSESTERIFIKASI *IN SITU*

### OPTIMIZATION OF *JATROPHA* BIODIESEL PRODUCTION BY *IN SITU* TRANSESTERIFICATION

Ika Amalia Kartika<sup>1)\*</sup>, Ariska Duti Lina<sup>1)</sup>, Ono Suparno<sup>1)</sup>, Dede Hermawan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor  
Kampus IPB Darmaga, P.O. Box 220, Bogor 16002, Indonesia  
Email: ikatk@yahoo.com

<sup>2)</sup>Departemen Teknologi Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan, IPB

Makalah: Diterima 25 Februari 2015; Diperbaiki 6 Juli 2015; Disetujui 30 Juli 2015

#### ABSTRACT

*Jatropha seed is potential to be utilized as raw material for biodiesel production by in situ transesterification because of its high oil content (30%). The objective of this research was to optimis reaction time and hexane to total solvent ratio in biodiesel production from jatropha seed by in situ transesterification, and to analyze the influence of reaction time and hexane to total solvent ratio on biodiesel yield and quality. The research was designed using Central Composite Design, and the in situ transesterification process was carried out at 400 rpm stirring speed and 50°C reaction temperature with potassium hidroxice (KOH) concentration of 0.075 mol/L in methanol. The process conditions were optimized using Response Surface Method with reaction time (4-10 h) and hexane to total solvent ratio (0.01-0.416) as their process variables, and the responses measured were biodiesel yield, density, viscosity, acid, saponification and ester values. The optimum process conditions to produce biodiesel from jatropha seed by in situ transesterification were obtained at 7.08 h reaction time and 0.32 hexane to total solvent ratio. For these process conditions, the optimum biodiesel yield was 57.4% with acid value of 0.48 mg KOH/g, saponification value of 281.7 mg KOH/g, ester value of 281.3 mg KOH/g, viscosity of 3.60 cSt and density of 0.67 g/cm<sup>3</sup>. The effect of process conditions on biodiesel yield was significant, especially hexane to total solvent ratio. However their effect on biodiesel quality is not important.*

*Keywords: biodiesel, in situ transesterification, jatropha, optimization, response surface method*

#### ABSTRAK

Biji jarak pagar potensial digunakan sebagai bahan baku untuk memproduksi biodiesel melalui transesterifikasi *in situ* dikarenakan kadar minyaknya yang tinggi (30%). Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimasi waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut dalam proses produksi biodiesel dari biji jarak pagar melalui transesterifikasi *in situ*, dan untuk menganalisis pengaruh waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut terhadap rendemen dan mutu biodiesel. Penelitian dirancang menggunakan *Central Composite Design*, dan proses transesterifikasi *in situ* dilakukan pada kecepatan pengadukan 400 rpm dan suhu reaksi 50°C dengan konsentrasi katalis KOH sebesar 0,075 mol/L metanol. Kondisi proses transesterifikasi *in situ* dioptimasi menggunakan *Response Surface Method* dengan variabel proses waktu reaksi (4-10 jam) dan rasio heksan/total pelarut (0,01-0,416), dan responnya adalah rendemen biodiesel, viskositas, densitas, bilangan asam, bilangan penyabunan dan bilangan ester. Kondisi proses optimum untuk memproduksi biodiesel melalui transesterifikasi *in situ* diperoleh pada waktu reaksi 7,08 jam dan rasio heksan/total pelarut 0,32. Pada kondisi proses ini, rendemen biodiesel optimum adalah 57,6% dengan bilangan asam 0,48 mg KOH/g, bilangan penyabunan 281,7 mg KOH/g, bilangan ester 281,3 mg KOH/g, viskositas 3,60 cSt dan densitas 0,67 g/cm<sup>3</sup>. Pengaruh kondisi proses pada rendemen biodiesel adalah signifikan, khususnya pengaruh rasio heksan/total pelarut. Pengaruh kondisi proses pada mutu biodiesel tidak signifikan, sehingga mutunya terjaga baik pada berbagai kondisi proses.

Kata kunci : biodiesel, jarak pagar, optimasi, *response surface method*, transesterifikasi *in situ*

#### PENDAHULUAN

Biodiesel adalah bahan bakar yang diproduksi dari minyak nabati seperti minyak sawit, minyak bunga matahari, minyak kedelai, minyak jarak, dan lain-lain atau minyak hewani melalui proses transesterifikasi dengan pereaksi metanol atau etanol dan katalisator basa atau asam. Biodiesel dari minyak nabati pada umumnya mempunyai karakteristik yang mendekati bahan bakar yang

berasal dari minyak bumi, sehingga dapat dijadikan sebagai energi alternatif bagi bahan bakar minyak bumi yang ketersediaannya semakin menipis (Ma dan Hanna, 1999). Di Indonesia cadangan bahan bakar minyak hanya tinggal sebesar 3,7 milyar barel dan hanya cukup untuk memenuhi kebutuhan selama 10-11 tahun lagi (Dhany, 2013). Saat ini, pengembangan biodiesel dari minyak nabati melonjak pesat sejalan dengan krisis energi yang

melanda dunia tahun-tahun terakhir ini dan penurunan mutu lingkungan hidup akibat polusi.

Di Indonesia, pengembangan biodiesel dari bahan-bahan nabati, khususnya biji jarak pagar, telah mendapat perhatian banyak pihak. Pengembangan pesat biodiesel berbahan baku jarak pagar ini tidak terlepas dari keunggulan-keunggulan yang dimilikinya dibandingkan dengan biodiesel dari bahan nabati lainnya seperti sifat fisikokimianya yang lebih baik. Selain itu, tanaman jarak pagar dapat dibudidayakan dengan mudah, tidak memerlukan lahan yang subur dan biaya yang mahal (Openshaw, 2000; Achten *et al.*, 2008; Kumar dan Sharma, 2008). Menurut Jain dan Sharma (2010), penggunaan biji jarak pagar sebagai bahan baku pembuatan biodiesel tidak akan menjadi kendala untuk sistem ketahanan pangan karena minyak jarak pagar tidak termasuk dalam kategori minyak makan (*edible oil*), akibat kandungan racun seperti *forbol ester* dan *cursin* (Gubitz *et al.*, 1999; Haas dan Mittelbach, 2000).

Proses produksi biodiesel dari biji jarak pagar umumnya dilakukan melalui 2 tahap yaitu tahap ekstraksi minyak dari biji dan tahap transesterifikasi minyak menjadi biodiesel. Kedua tahapan tersebut dilakukan secara terpisah dan diskontinyu, sehingga proses produksi biodiesel menjadi kurang efisien dan mengkonsumsi banyak energi. Selain itu, proses produksi minyak dari biji ini membebani 70% dari total biaya proses produksi biodiesel (Harrington dan D'Arcy-Evans, 1985; Haas *et al.*, 2004; Haas *et al.*, 2006; Silitonga *et al.*, 2011).

Di lain pihak, penelitian-penelitian tentang proses produksi biodiesel melalui transesterifikasi *in situ* berbasis bahan-bahan nabati telah memberikan hasil yang memuaskan dengan faktor konversi relatif sama atau lebih tinggi dibandingkan proses transesterifikasi konvensional (Harrington dan D'Arcy-Evans, 1985; Siler-Marinkovic dan Tomasevic, 1998; Ozgul-Yucel dan Turkay, 2003; Haas *et al.*, 2004; Georgogianni *et al.*, 2008; Qian *et al.*, 2008; Shuit *et al.*, 2010; Kasim and Harvey, 2011; Surya Abadi Ginting *et al.*, 2012; Kartika *et al.*, 2013). Selain itu, proses produksi biodiesel melalui transesterifikasi *in situ* lebih efisien daripada melalui proses transesterifikasi secara konvensional (Hailegiorgis *et al.*, 2013; Abo El-Enin *et al.*, 2013). Transesterifikasi *in situ* merupakan langkah yang lebih sederhana dalam memproduksi biodiesel dengan mengeliminasi proses ekstraksi dan pemurnian minyak sehingga dapat menurunkan biaya produksi biodiesel (Haas *et al.*, 2006). Metode ini memanfaatkan trigliserida yang berasal dari bahan baku sumber minyak tanpa perlu mengekstraksi dan memurnikannya terlebih dahulu (Qian *et al.*, 2008).

Pada proses produksi biodiesel dari biji jarak pagar melalui transesterifikasi *in situ*, Kartika *et al.* (2013) menunjukkan bahwa rendemen

biodiesel tertinggi (87%) dapat diperoleh pada suhu reaksi 50°C dengan rasio heksan/total pelarut sebesar 0,167 dan waktu reaksi 5 jam. Rendemen biodiesel meningkat seiring dengan peningkatan rasio heksan/total pelarut dan waktu reaksi. Berdasarkan hal tersebut, waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut perlu dioptimasi untuk mendapatkan rendemen biodiesel yang optimal.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimasi waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut dalam proses produksi biodiesel dari biji jarak pagar melalui transesterifikasi *in situ*, dan untuk menganalisis pengaruh waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut terhadap rendemen dan mutu biodiesel.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan dan Alat

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah buah jarak pagar, yang diperoleh dari PT. Jedo Indonesia, Tangerang. Mutu buah jarak pagar yang digunakan dalam penelitian ini kurang baik. Hal tersebut terlihat dari banyaknya buah jarak pagar yang telah ditumbuhi jamur. Penyimpanan dalam gudang dalam jangka waktu yang relatif lama (> 1 tahun) telah menyebabkan mutu buah jarak pagar tersebut menurun. Pelarut dan bahan-bahan kimia yang digunakan adalah teknis dan *analytical grade*. Metanol dan heksan teknis diperoleh dari PT. Brataco, sedangkan pelarut dan bahan-bahan kimia untuk analisis diperoleh dari Merck Indonesia. Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah labu leher tiga 2 L yang dilengkapi dengan pendingin tegak dan termometer, *hot plate*, *magnetic stirrer*, *rotary evaporator*, pompa vakum, labu pemisah, viskometer Oswald, dan peralatan untuk analisis.

### Metode

Bahan baku dipersiapkan dengan pengupasan buah jarak pagar dan pengeringan bijinya pada suhu 50°C selama 48 jam. Biji jarak kering kemudian dikarakterisasi dengan menganalisis kadar air (AOAC 1995, 950.46), kadar minyak (SNI 01-2891-1992), kadar abu (AOAC 1995, 923.03), kadar protein (AOAC 1995, 991.20), kadar serat kasar (SNI-01-2891-1992) dan kadar karbohidrat (*by difference*). Pengujian parameter-parameter tersebut dilakukan dengan 2 kali ulangan.

Proses transesterifikasi *in situ* dilakukan dengan menggunakan labu leher tiga 2 L yang dilengkapi dengan pemanas, termometer, pengaduk, dan kondensor. Kondisi proses divariasikan pada waktu reaksi 4-10 jam dan rasio heksan/total pelarut 0,01-0,416. Penetapan batas atas dan batas bawah untuk waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut pada nilai-nilai tersebut didasarkan atas waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut yang menghasilkan rendemen dan mutu biodiesel terbaik dari penelitian-

penelitian sebelumnya (Aprilyanti, 2012; Pujiastuti, 2012). Proses transesterifikasi dilakukan pada kecepatan pengadukan 400 rpm dan suhu 50°C dengan konsentrasi KOH sebesar 0,075 mol/L metanol.

Setelah proses transesterifikasi *in situ* dilakukan sesuai dengan waktu yang ditentukan, campuran dibiarkan beberapa waktu untuk menurunkan suhu dan memisahkan filtrat dari padatan. Filtrat selanjutnya dievaporasi menggunakan evaporator untuk menguapkan heksan dan metanol. Filtrat kemudian dimasukkan ke dalam labu pemisah untuk memisahkan metil ester dan gliserol. Lapisan biodiesel berada di bagian atas dan gliserol yang berwujud semi-padat di bagian bawah. Biodiesel yang diperoleh dicuci menggunakan aquades hingga netral dan dipanaskan pada suhu 105°C selama 1 jam. Rendemen biodiesel dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Rendemen (\%)} = 100 \times \frac{\text{Massa biodiesel (g)}}{\text{Massa minyak yang terkandung dalam biji (g)}}$$

Biodiesel yang diperoleh selanjutnya dikarakterisasi mutunya, yang meliputi bilangan asam, bilangan penyabunan, bilangan ester, viskositas dan densitas. Pengujian parameter-parameter ini dilakukan dengan 2 kali ulangan, dan metode pengujiannya didasarkan atas SNI 04-7182-2006.

**Rancangan Percobaan**

Penelitian dirancang menggunakan *Central Composite Design* (Tabel 1) dan dianalisis menggunakan ANOVA dengan  $\alpha = 0,05$ . Optimasi kondisi proses dilakukan menggunakan *Response Surface Method* (RSM) dengan variabel proses waktu reaksi (4-10 jam) dan rasio heksan/total pelarut (0,01-0,416), dan responnya adalah rendemen, densitas, viskositas, bilangan asam, bilangan penyabunan dan bilangan ester. Analisis regresi dan keragaman (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) dilakukan menggunakan *SAS software*. Berikut adalah model polinomial orde kedua yang digunakan untuk analisis regresi (Montgomery, 2001):

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{ij} X_j^2 + \epsilon$$

dimana Y, respon yang diinginkan (rendemen biodiesel, bilangan asam, bilangan penyabunan, bilangan ester, viskositas dan densitas);  $X_i$  dan  $X_j$  mewakili variabel-variabel yang meliputi rasio heksan/total pelarut dan waktu reaksi;  $\beta_j$ , pengaruh linier variabel terhadap respon;  $\beta_{ij}$ , pengaruh interaksi antar variabel-variabel terhadap respon;  $\beta_{ij}$ , pengaruh kuadrat variabel terhadap respon; dan  $\epsilon$ , galat. Masing-masing perlakuan dilakukan dengan 2 kali ulangan, dan untuk perlakuan waktu reaksi 7 jam dan rasio heksan/total pelarut 0,214 dilakukan dengan 7 kali ulangan.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Karakteristik Biji Jarak Pagar**

Biji jarak pagar yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai kadar minyak dan air cukup tinggi (Tabel 2). Air dan minyak yang terkandung dalam bahan baku merupakan parameter penting dalam proses produksi biodiesel. Apabila kadar minyak pada bahan tinggi maka tingkat konversi minyak menjadi biodiesel juga tinggi, sedangkan keberadaan air pada bahan akan menyebabkan saponifikasi ester sehingga akan mempengaruhi efisiensi proses transesterifikasi (Kartika *et al.*, 2011a). Menurut Shahla *et al.* (2010), tingginya kandungan air pada proses transesterifikasi akan menghambat kerja katalis sehingga rendemen biodiesel yang dihasilkan akan rendah. Oleh karena itu, pada penelitian ini kadar air biji jarak pagar diturunkan menjadi < 2% dengan cara mengeringkan biji jarak pagar pada suhu 60-70°C selama 72 jam. Penetapan kadar air bahan sebesar < 2% tersebut didasarkan atas hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa rendemen biodiesel yang dihasilkan dari bahan dengan kadar air  $\leq 2\%$  nilainya lebih tinggi dan berbeda secara signifikan dibandingkan dengan kadar air bahan 3% dan 4% (Kartika *et al.*, 2011a).

Kadar minyak biji jarak pagar dipengaruhi oleh waktu pemanenan yang tepat sesuai dengan tingkat kematangannya. Menurut Balitbang Deptan (2008), biji jarak pagar yang sudah matang ditandai dengan kulit buah jarak pagar yang mulai terbuka, dan kadar minyak tertinggi diperoleh dari biji yang benar-benar matang. Jika biji jarak pagar dipanen lebih awal (belum matang) akan menyebabkan kadar minyaknya rendah.

Tabel 1. Variabel dan taraf yang digunakan pada proses transesterifikasi *in situ* biji jarak pagar berdasarkan *Central Composite Design*

Peubah	Kode	Satuan	Taraf				
			-1,414	-1	0	1	1,414
Waktu reaksi	X <sub>1</sub>	Jam	4,16	5	7	9	9,83
Rasio heksan/total pelarut	X <sub>2</sub>	v/v	0,01	0,0714	0,214	0,357	0,416

Tabel 2. Karakteristik biji jarak pagar yang digunakan pada proses transesterifikasi *in situ*

Parameter	Jumlah (% bb)
Kadar air	7,57 ± 0,26
Kadar abu	5,15 ± 0,08
Kadar protein	13,04 ± 0,53
Kadar minyak	27,73 ± 0,21
Kadar serat	24,41 ± 0,31
Kadar karbohidrat ( <i>by difference</i> )	22,10 ± 0,19

Parameter penting lainnya selain kadar air dan minyak adalah kandungan asam lemak bebas (ALB) dan ukuran partikel bahan. Kadar asam lemak bebas biji jarak pagar meningkat seiring dengan peningkatan kadar airnya (Kartika *et al.*, 2012). Apabila kadar air biji tinggi maka kadar asam lemak bebasnya pun tinggi. Kadar air yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya hidrolisis trigliserida dalam bahan menjadi asam lemak bebas. Jika kandungan asam lemak bebas dalam bahan tinggi maka katalis basa akan bereaksi dengan asam lemak bebas menjadi sabun, sehingga hal tersebut dapat mengurangi efektifitas katalis basa (Kusdiana dan Saka, 2003) dan menurunkan rendemen biodiesel hingga 30% (Tyson, 2004). Agar proses transesterifikasi dapat berjalan secara efektif, kadar asam lemak bebas dalam bahan harus dikendalikan < 2% (Corro *et al.*, 2010). Pada penelitian ini, kadar asam lemak bebas pada biji jarak pagar adalah sebesar 5,6%, sehingga proses transesterifikasi *in situ* kemungkinan berjalan kurang efektif. Meskipun kadar asam lemak bebasnya cukup tinggi, pada penelitian ini proses produksi biodiesel dapat dilakukan dalam satu tahap saja, yaitu hanya melalui proses transesterifikasi saja tanpa perlu melalui proses esterifikasi sebelumnya. Hal ini dikarenakan selama proses transesterifikasi *in situ* tidak terjadi proses saponifikasi seperti halnya yang sering terjadi pada proses transesterifikasi konvensional. Selain itu, pada penelitian ini penambahan tahapan proses esterifikasi sebelum proses transesterifikasi tidak meningkatkan rendemen biodiesel secara signifikan tetapi justru meningkatkan waktu reaksi.

Pada proses transesterifikasi *in situ* biji jarak pagar, ukuran partikel bahan berpengaruh secara signifikan terhadap rendemen biodiesel (Kartika *et al.*, 2011a). Rendemen biodiesel dapat ditingkatkan dengan memperkecil ukuran partikel bahan. Pengecilan ukuran partikel bahan akan merusak dinding sel, sehingga pelarut akan lebih mudah mengekstrak dan mengkonversi minyak menjadi biodiesel. Shuit *et al.* (2010) menjelaskan bahwa semakin kecil ukuran partikel bahan maka semakin tinggi efisiensi proses ekstraksi dan transesterifikasi, sehingga hal tersebut dapat meningkatkan rendemen biodiesel. Pada penelitian ini, biji jarak pagar diperkecil ukurannya menjadi 20

mesh agar proses transesterifikasi *in situ* dapat berjalan dengan baik. Penetapan ukuran partikel bahan sebesar 20 mesh tersebut didasarkan atas hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa rendemen biodiesel yang dihasilkan dari bahan dengan ukuran partikel sebesar 20 mesh lebih tinggi nilainya dibandingkan dengan ukuran partikel 10 mesh dan tidak berbeda secara signifikan dengan ukuran partikel 35 mesh (Kartika *et al.*, 2011a).

Komponen serat pada biji jarak pagar meliputi selulosa, hemiselulosa dan lignin, yang terkandung utamanya dalam kulit biji. Menurut Kartika *et al.* (2011b), biji jarak pagar terdiri dari 37% kulit biji dan 63% daging biji. Apabila komposisi kulit biji lebih tinggi, maka kadar serat biji pun tinggi. Pada penelitian ini, kadar serat biji jarak pagar adalah sebesar 24,41%, sehingga dapat dikatakan bahwa biji jarak pagar varietas Lampung ini mempunyai kulit biji yang relatif tinggi. Hal ini kemungkinan akan mempengaruhi proses produksi biodiesel, seperti menurunnya rendemen biodiesel akibat adanya sejumlah tertentu biodiesel yang terjebak dalam bahan dengan kadar serat tinggi. Menurut Kartika *et al.* (2013), kadar biodiesel yang terkandung dalam bahan setelah proses transesterifikasi *in situ* dapat mencapai 11-16%.

#### Optimasi Rendemen Biodiesel

Proses produksi biodiesel dari biji jarak pagar melalui transesterifikasi *in situ* menghasilkan rendemen biodiesel sebesar 19,4-63,5%. Rendemen biodiesel tertinggi (63,5%) dengan bilangan asam 0,69 mg KOH/g, bilangan penyabunan 273,4 mg KOH/g, bilangan ester 272,7 mg KOH/g, viskositas 3,46 cSt dan densitas 0,87 g/cm<sup>3</sup> diperoleh pada kondisi proses waktu reaksi 5 jam, rasio heksan/total pelarut 0,357, kecepatan pengadukan 400 rpm, dan suhu reaksi 50°C.

Secara umum, waktu reaksi dan perbandingan heksan dan metanol mempengaruhi rendemen biodiesel. Pada proses transesterifikasi *in situ*, heksan sebagai *co-solvent* berfungsi untuk mengekstraksi minyak dari biji jarak pagar, sedangkan metanol dengan KOH sebagai katalisnya berfungsi untuk mengkonversi minyak jarak pagar menjadi biodiesel. Penggunaan basa kuat (KOH) sebagai katalis dapat mempercepat reaksi, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk reaksi transesterifikasi dapat menjadi relatif lebih pendek. Menurut Leung *et al.* (2010), proses produksi biodiesel dengan katalis basa dapat menghasilkan rendemen lebih tinggi jika dibandingkan dengan katalis asam. Selain itu, pemilihan KOH sebagai katalis karena harganya lebih murah dan efektif jika dibandingkan dengan katalis asam, dan memiliki aktivitas katalitik yang tinggi.

Hasil analisis keragaman (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) untuk respon rendemen biodiesel menunjukkan bahwa hanya variabel rasio heksan/total pelarut ( $X_2$ ) yang berpengaruh secara signifikan, sedangkan

pengaruh waktu reaksi tidak signifikan. Rendemen biodiesel meningkat seiring dengan peningkatan rasio heksan/total pelarut dan relatif konstan dengan peningkatan waktu reaksi. Shiu *et al.* (2010) menjelaskan dalam penelitiannya tentang proses produksi biodiesel dari kulit beras melalui transesterifikasi *in situ* dimana rendemen biodiesel meningkat hanya pada 20 menit pertama dari total waktu reaksinya, dan peningkatan rendemen selanjutnya dipengaruhi oleh peningkatan rasio metanol terhadap bahan (kulit beras). Hal ini diperkuat oleh Kasim dan Harvey (2011) pada kasus proses produksi biodiesel dari biji jarak pagar melalui transesterifikasi *in situ* dimana peningkatan rendemen biodiesel yang progresif terjadi pada 20-30 menit pertama dari total waktu reaksinya.

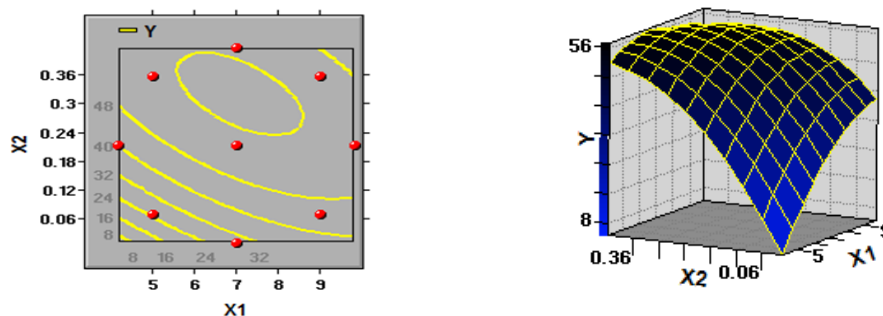
Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa nilai P untuk *lack of fit* sebesar 0,0045 ( $P < 0,05$ ), sehingga model polinomial orde kedua cocok untuk mengoptimasi rendemen biodiesel. Berikut adalah model polinomial orde kedua untuk rendemen biodiesel:  $Y = -62,65 + 19,29X_1 + 322,04X_2 - 0,93X_1^2 - 18,90X_1X_2 - 292,65X_2^2$  ( $R^2 = 66,4\%$ ). Dari model polinomial orde kedua ini, pengaruh linier dan kuadrat dari variabel  $X_2$  lebih signifikan dibandingkan variabel lainnya ( $X_1$ ) dan interaksi antar keduanya ( $X_1X_2$ ).

Koefisien determinasi ( $R^2$ ) menyatakan kontribusi regresi variabel terhadap respon. Jika nilai  $R^2$  semakin besar maka kontribusi pengaruh variabel perlakuan terhadap respon juga semakin besar. Pada penelitian ini nilai  $R^2$  adalah 66,4%, artinya pengaruh perlakuan waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut terhadap rendemen sebesar 0,664 (skala 1), sedangkan sisanya (0,366) dipengaruhi oleh faktor-faktor lain. Adapun faktor-faktor tersebut dapat berupa suhu reaksi, kecepatan pengadukan, konsentrasi katalis, ukuran partikel dan kadar air bahan. Menurut Kartika *et al.* (2011b), suhu reaksi dan kecepatan pengadukan berpengaruh secara signifikan terhadap rendemen biodiesel yang diproduksi dari biji jarak pagar melalui transesterifikasi *in situ*. Rendemen biodiesel dapat ditingkatkan dengan peningkatan suhu reaksi dan kecepatan pengadukan. Demikian halnya dengan kadar air dan ukuran partikel bahan yang

berpengaruh secara signifikan terhadap rendemen biodiesel (Kartika *et al.*, 2011a). Semakin kecil kadar air dan ukuran partikel bahan, rendemen biodiesel semakin meningkat. Berdasarkan hasil penelitian tersebut rendemen biodiesel terbaik ( $> 70\%$ ) diperoleh dari bahan dengan kadar air  $\leq 2\%$  dan ukuran partikel  $\leq 20$  mesh.

Gambar 1 menunjukkan respon permukaan pengaruh waktu reaksi ( $X_1$ ) dan rasio heksan/total pelarut ( $X_2$ ) terhadap rendemen biodiesel ( $Y$ ). Nilai  $Y$  optimum (57,6%) diperoleh pada  $X_1$  dan  $X_2$  sebesar 7,08 jam dan 0,32. Berdasarkan hasil validasi terhadap kondisi proses optimum tersebut, diperoleh rendemen biodiesel sebesar 59,4% dimana perbedaannya dengan hasil prediksi model  $< 2\%$ . Hal tersebut menunjukkan bahwa model polinomial orde kedua valid digunakan untuk memprediksi dan mengoptimasi rendemen biodiesel.

Gambar 1 juga menunjukkan grafik tiga dimensi (*surface plot*) hubungan variabel perlakuan  $X_1$  dan  $X_2$  terhadap respon  $Y$ . Berdasarkan titik stasionernya, model polinomial orde kedua memberikan titik stasioner maksimum. Rendemen biodiesel meningkat jika rasio heksan/total pelarut ditingkatkan hingga 0,32, tetapi jika rasio heksan/total pelarut lebih besar dari 0,32 maka rendemen biodiesel akan menurun. Pada penelitian sebelumnya (Fajarani, 2011), penambahan heksan pada proses transesterifikasi *in situ* berfungsi untuk meningkatkan rendemen biodiesel. Apabila jumlah heksan yang ditambahkan tinggi maka jumlah minyak yang dapat terekstraksi juga tinggi sehingga konversi minyak jarak menjadi biodiesel pun tinggi. Jika rasio heksan/total pelarut lebih besar dari 0,32, maka minyak jarak pagar yang dapat terekstraksi tinggi, tetapi rendemen biodiesel rendah. Hal tersebut diakibatkan karena jumlah metanol yang ditambahkan tidak cukup untuk mengkonversi seluruh minyak menjadi biodiesel. Sebaliknya apabila rasio heksan/total pelarut lebih kecil dari 0,32, maka minyak jarak pagar yang dapat terekstraksi rendah sehingga minyak yang dapat dikonversi oleh metanol menjadi biodiesel juga rendah.



Gambar 1. Respon permukaan pengaruh waktu reaksi ( $X_1$ ) dan rasio heksan/total pelarut ( $X_2$ ) terhadap rendemen biodiesel ( $Y$ )

Jika dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya (87%) (Kartika *et al.*, 2013), rendemen biodiesel yang diperoleh dari penelitian ini (63,5%) lebih rendah, padahal rasio heksan/total pelarut yang digunakan pada penelitian ini lebih tinggi (0,357 vs 0,167). Namun demikian, kecepatan pengadukannya jauh lebih rendah (400 rpm) dari penelitian sebelumnya (800 rpm). Dengan demikian, rendahnya rendemen biodiesel yang diperoleh pada penelitian ini kemungkinan karena kecepatan pengadukan yang diterapkan tidak cukup untuk mencampur bahan dan pelarut dengan baik, selain karena kadar asam lemak bebas biji jarak pagar yang digunakan pada penelitian ini (5,6%) lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian sebelumnya (< 2%). Akibatnya proses transesterifikasi tidak berjalan secara efektif dan rendemen biodiesel yang diperoleh pun rendah.

### Optimasi Mutu Biodiesel

Mutu biodiesel ditentukan oleh kemurnian senyawa metil atau etil ester di dalam biodiesel. Senyawa selain metil ester (kontaminan) yang terdapat di dalam biodiesel dapat menyebabkan permasalahan ketika penggunaan biodiesel pada mesin. Kontaminan dapat menyebabkan timbulnya kerak pada mesin dan penyumbatan pada saluran injeksi. Kontaminan yang terdapat pada biodiesel dapat berupa asam lemak bebas, gliserol, air, mono-, di- dan trigliserida yang masih terdapat pada biodiesel (Knothe, 2006). Gliserol, mono-, di- dan trigliserida dapat menyebabkan terjadinya penyumbatan pada alat injeksi mesin. Sedangkan asam lemak bebas, terutama asam lemak bebas tak jenuh dan air dapat menyebabkan timbulnya kerak pada tangki bahan bakar dan saluran pembakaran. Selain itu, air dapat menyebabkan pertumbuhan mikroba dan pembentukan emulsi, sedangkan asam dapat meningkatkan korosi mesin yang pada akhirnya dapat menyebabkan kerusakan mesin.

Standar Nasional Indonesia (2006) mensyaratkan bilangan asam biodiesel maksimal sebesar 0,8 mg KOH/g. Pada penelitian ini, bilangan asam biodiesel berkisar antara 0,45-0,97 mg KOH/g dan sebagian besar perlakuan menghasilkan biodiesel dengan bilangan asam yang memenuhi Standar Nasional Indonesia. Hasil analisis keragaman (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) menunjukkan bahwa tidak ada faktor perlakuan (waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut) yang berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan asam biodiesel. Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya (Sari, 2007; Fajarani, 2011; Kartika *et al.*, 2011b, 2013) bahwa faktor perlakuan seperti waktu reaksi, rasio heksan/total pelarut, kecepatan pengadukan, dan suhu reaksi tidak berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan asam biodiesel.

Bilangan asam pada biodiesel diharapkan serendah mungkin. Hal tersebut karena dapat mempengaruhi kinerja mesin diesel. Jika bilangan

asam tinggi maka mutu biodiesel rendah. Bilangan asam dapat digunakan sebagai parameter kandungan asam lemak bebas yang terkandung pada biodiesel. Jika kandungan asam lemak bebas tinggi maka akan menyebabkan kerusakan pada injektor mesin diesel dengan munculnya jelaga atau kerak karena korosif (Elviyanti, 2007).

Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa nilai P untuk *lack of fit* sebesar 0,541 ( $P > 0,05$ ), sehingga model polinomial orde kedua tidak cocok untuk mengoptimasi respon. Jika dilihat dari nilai P untuk model linier (0,151), model polinomial orde pertama juga tidak cocok. *Lack of fit* merupakan parameter penyimpangan atau ketidaktepatan model yang diuji terhadap model linier. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan apakah model yang diuji termasuk dalam model linier atau kuadrat. Berikut adalah model polinomial orde kedua untuk bilangan asam biodiesel, yang dapat digunakan untuk memprediksi nilai optimum bilangan asam berdasarkan nilai  $X_1$  dan  $X_2$  yang menghasilkan rendemen biodiesel optimum:  $Y = 0,31 + 0,14X_1 + 0,018X_2 - 0,011X_1^2 - 0,092X_1X_2 - 1,055X_2^2$  ( $R^2 = 30,9\%$ ).

Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) faktor perlakuan waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut terhadap bilangan asam hanya sebesar 30,9%. Nilai  $R^2$  tersebut sesuai dengan hasil analisis keragaman (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) dimana kedua faktor perlakuan tersebut tidak berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan asam. Nilai optimum bilangan asam berdasarkan persamaan di atas adalah 0,48 mg KOH/g yang diperoleh pada  $X_1$  dan  $X_2$  sebesar 7,08 jam dan 0,32.

Pada penelitian ini, bilangan penyabunan biodiesel berkisar antara 203-313,7 mg KOH/g. Semakin tinggi nilai bilangan penyabunan biodiesel maka mutu biodiesel juga semakin baik. Jika bilangan penyabunan rendah maka komponen-komponen senyawa pengotor seperti trigliserida, digliserida, dan monogliserida dalam biodiesel tinggi karena konversi trigliserida menjadi metil ester tidak sempurna. Senyawa pengotor tersebut dapat menyebabkan timbulnya kerak pada mesin dan penyumbatan saluran injeksi, sehingga kinerja biodiesel tidak maksimal (Kartika *et al.*, 2011b, 2013). Komponen senyawa pengotor pada biodiesel mempunyai bobot molekul tinggi yang mengakibatkan rendahnya bilangan penyabunan.

Hasil analisis keragaman (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) menunjukkan tidak ada faktor perlakuan (waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut) yang berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan penyabunan biodiesel. Dengan demikian, proses produksi biodiesel pada berbagai kondisi proses menghasilkan biodiesel dengan bilangan penyabunan > 200 mg KOH/g. Hal ini juga teramati pada hasil penelitian-penelitian sebelumnya (Fajarani, 2011; Kartika *et al.*, 2011b, 2013) bahwa faktor perlakuan waktu reaksi dan kecepatan

pengadukan, serta rasio heksan/total pelarut tidak berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan penyabunan biodiesel.

Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa nilai P untuk *lack of fit* sebesar 0,004 ( $P < 0,05$ ), sehingga model polinomial orde kedua cocok untuk memprediksi nilai optimum bilangan penyabunan biodiesel. Berikut adalah model polinomial orde kedua untuk bilangan penyabunan:  $Y = 149,30 + 40,10X_1 - 164,33X_2 - 2,91X_1^2 + 6,26X_1X_2 + 318,22X_2^2$  ( $R^2 = 22,5\%$ ). Dari model polinomial orde kedua ini, pengaruh linier dan kuadrat dari variabel-variabel  $X_1$  dan  $X_2$  serta interaksi antar keduanya tidak berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan penyabunan biodiesel.

Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) faktor perlakuan waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut terhadap bilangan penyabunan hanya sebesar 22,5%. Nilai tersebut sesuai dengan hasil analisis keragaman (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) dimana kedua faktor perlakuan tersebut tidak berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan penyabunan. Berdasarkan persamaan di atas nilai optimum bilangan penyabunan adalah 281,7 mg KOH/g yang diperoleh pada  $X_1$  dan  $X_2$  sebesar 7,08 jam dan 0,32.

Menurut Ketaren (2008), bilangan ester adalah jumlah asam lemak yang bersenyawa sebagai ester. Bilangan ester dihitung berdasarkan selisih antara bilangan penyabunan dengan bilangan asam. Bilangan ester biodiesel pada penelitian ini berkisar antara 202,5- 313,1 mg KOH/g. Semakin tinggi nilai bilangan ester biodiesel, maka semakin murni biodiesel tersebut. Sama halnya dengan bilangan penyabunan, jika bilangan ester biodiesel rendah maka proses konversi trigliserida menjadi metil ester pun terjadi secara tidak sempurna. Hasil analisis keragaman (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) menunjukkan tidak ada faktor perlakuan yang berpengaruh nyata terhadap bilangan ester. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Fajarani (2011) dan Apriyanti (2012) bahwa bilangan ester biodiesel tidak dipengaruhi oleh waktu reaksi, kecepatan pengadukan, dan rasio heksan/total pelarut.

Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa nilai P untuk *lack of fit* sebesar 0,004 ( $P < 0,05$ ), sehingga model polinomial orde kedua cocok untuk memprediksi nilai optimum bilangan ester. Berikut adalah model polinomial orde kedua untuk bilangan ester:  $Y = 148,97 + 39,96X_1 - 164,35X_2 - 2,90X_1^2 + 6,35X_1X_2 + 317,17X_2^2$  ( $R^2 = 24,6\%$ ). Dari model polinomial orde kedua ini, pengaruh linier dan kuadrat dari variabel-variabel  $X_1$  dan  $X_2$  serta interaksi antar keduanya tidak berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan ester biodiesel.

Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) faktor perlakuan waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut terhadap bilangan ester (24,58%) sesuai dengan hasil analisis keragaman (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) yang menunjukkan tidak ada faktor perlakuan yang berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan

ester biodiesel. Berdasarkan persamaan di atas nilai optimum bilangan ester adalah 281,3 mg KOH/g yang diperoleh pada  $X_1$  dan  $X_2$  sebesar 7,08 jam dan 0,32.

Viskositas digunakan sebagai parameter mutu kinerja biodiesel terhadap mesin diesel. Minyak nabati mempunyai viskositas yang tinggi dibandingkan dengan biodiesel. Proses transesterifikasi berguna untuk menurunkan viskositas minyak nabati sehingga memenuhi SNI 04-7182-2006 (2,6-6 cSt, pada suhu 40°C). Viskositas biodiesel pada penelitian ini sebesar 2,83-3,36 cSt (pada suhu 40°C). Viskositas biodiesel mempengaruhi kinerja biodiesel terhadap mesin diesel. Tingginya viskositas biodiesel akan memperlambat aliran bahan bakar melalui injektor (Knothe, 2004). Dengan demikian jika viskositas biodiesel tinggi maka mutu biodiesel yang dihasilkan rendah.

Hasil analisis keragaman (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) menunjukkan tidak ada faktor perlakuan yang berpengaruh secara signifikan terhadap viskositas biodiesel. Sesuai dengan penelitian Utami (2010) dan Fajarani (2011) bahwa viskositas biodiesel tidak dipengaruhi secara signifikan oleh perlakuan waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut. Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa nilai P untuk *lack of fit* sebesar sebesar 0,15 ( $P > 0,05$ ), sehingga model polinomial orde kedua tidak cocok untuk mengoptimasi viskositas. Jika dilihat dari nilai P untuk model linier (0,489), model polinomial orde pertama juga tidak cocok. Berikut adalah model polinomial orde kedua untuk viskositas:  $Y = 2,82 + 0,15X_1 - 0,43X_2 - 0,010X_1^2 + 0,13X_1X_2 - 0,79X_2^2$  ( $R^2 = 12,1\%$ ).

Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) faktor perlakuan waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut terhadap viskositas (12,1%) sesuai dengan hasil analisis (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) yang menunjukkan tidak ada faktor perlakuan yang berpengaruh nyata terhadap nilai viskositas. Nilai optimum viskositas berdasarkan perhitungan dari persamaan di atas adalah 3,6 cSt yang diperoleh pada  $X_1$  dan  $X_2$  sebesar 7,08 jam dan 0,32.

Densitas juga merupakan parameter mutu untuk biodiesel. Densitas biodiesel pada penelitian ini sebesar 0,86-0,93 g/cm<sup>3</sup>. Nilai tersebut mayoritas memenuhi SNI 04-7182-2006 (0,85-0,89 g/cm<sup>3</sup>). Jika densitas biodiesel lebih besar dari kisaran nilai yang ditetapkan SNI, proses pemisahan metil ester dengan gliserol tidak sempurna sehingga gliserol masih terkandung dalam biodiesel, yang mengakibatkan nilai densitasnya tinggi. Adanya kandungan gliserol pada biodiesel dapat mengakibatkan penyumbatan pada alat injeksi mesin (Kartika *et al.*, 2011a). Hal ini berakibat pada proses penyimpanan biodiesel yang tidak tahan lama karena kemurniannya rendah.

Hasil analisis keragaman (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) menunjukkan tidak ada faktor perlakuan yang

berpengaruh secara signifikan terhadap densitas biodiesel. Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa nilai P untuk *lack of fit* sebesar 0,36 ( $P > 0,05$ ), sehingga model polinomial orde kedua tidak cocok untuk mengoptimasi densitas. Model linier juga tidak cocok untuk mengoptimasi densitas ( $P$  *lack of fit* = 0,158). Berikut adalah persamaan polinomial orde kedua untuk densitas:  $Y = 0,87 - 0,00058X_1 + 0,0065X_2 - 0,0040X_1^2 + 0,0019X_1X_2 + 0,0031X_2^2$  ( $R^2=28,3\%$ ).

Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) faktor perlakuan waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut terhadap densitas (28,3%) sesuai dengan analisis keragaman (ANOVA  $\alpha = 0,05$ ) yang mana tidak ada faktor perlakuan yang berpengaruh secara signifikan terhadap densitas biodiesel. Nilai densitas optimum hasil perhitungan dari persamaan di atas adalah 0,67 g/cm<sup>3</sup> yang diperoleh pada pada  $X_1$  dan  $X_2$  sebesar 7,08 jam dan 0,32.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Rendemen biodiesel dipengaruhi secara signifikan oleh rasio heksan/total pelarut, sedangkan mutu biodiesel (bilangan asam, bilangan penyabunan, bilangan ester, viskositas, dan densitas) tidak dipengaruhi baik oleh waktu reaksi maupun rasio heksan/total pelarut. Hasil optimasi dengan *Response Surface Method*, rendemen biodiesel optimum (57,6%) diperoleh pada kondisi proses waktu reaksi 7,08 jam dan rasio heksan/total pelarut 0,32 dengan mutu: bilangan asam 0,48 mg KOH/g, bilangan penyabunan 281,7 mg KOH/g, bilangan ester 281,3 mg KOH/g, viskositas 3,60 cSt dan densitas 0,67 g/cm<sup>3</sup>. Validasi terhadap kondisi proses optimum tersebut diperoleh rendemen biodiesel sebesar 59,4%. Dengan demikian model polinomial orde kedua adalah valid digunakan untuk mengoptimasi kondisi proses produksi biodiesel dari biji jarak pagar melalui transesterifikasi *in situ*.

### Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, diperlukan pengujian lengkap untuk biodiesel berdasarkan SNI 04-7182-2006. Selain itu, bahan baku berupa biji jarak pagar dengan mutu yang baik juga diperlukan agar rendemen dan mutu biodiesel yang diperoleh juga baik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, KEMENRISTEK DIKTI atas bantuan dana (Hibah Kompetitif Strategis Nasional) untuk pelaksanaan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abo El-Enin SA, Attia KN, El-Ibiari NN, El-Diwani GI, El-Khatib KM. 2013. In-situ transesterification of rapeseed and cost indicators for biodiesel production. *Renew and Sustain Energy Rev.* 18: 471-477.
- Achten WMJ, Verchot L, Franken YJ, Mathijs E, Singh VP, Aerts R, Muys B. 2008. *Jatropha* biodiesel production and use. *Biomass and Bioen.* 32: 1063-1084.
- AOAC. 1995. *Official Method of Analysis of Analytical Chemistry*. Washington DC: Association of Official Analytical Chemist.
- Aprilyanti AF. 2012. Pengaruh waktu reaksi dan rasio heksan/total pelarut terhadap rendemen dan mutu biodiesel pada transesterifikasi *in situ* biji jarak pagar. [Skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Balitbang Deptan. 2008. Teknologi Budidaya Jarak Pagar. [www.lampung.litbang.deptan.go.id](http://www.lampung.litbang.deptan.go.id). [23 Oktober 2013].
- Corro G, Tellez N, Ayala AM. 2010. Two-step biodiesel production from *Jatropha curcas* crude oil using SiO<sub>2</sub>.HF solid catalyst for FFA esterification step. *Fuel* 89: 2815-2821.
- Dhany RR. 2013. Fakta-fakta Soal Cadangan Minyak RI Semakin Menipis. <http://finance.detik.com>. [1 Oktober 2013].
- Elviyanti. 2007. Desain sistem penentuan mutu biodiesel berbasis minyak nabati. [Tesis]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Fajarani AN. 2011. Transformasi biji jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) menjadi biodiesel melalui transesterifikasi *in situ*. [Skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Georgogianni KG, Kontominas MG, Pomonis PJ, Avlonitis D, Gergis V. 2008. Conventional and in situ transesterification of sunflower seed oil for the production of biodiesel. *Fuel Processing Technol.* 89: 503-509.
- Gubitz GM, Mittelbach M, Trabi M. 1999. Exploitation of the tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L. *Biores Technol.* 67: 73-82.
- Haas W dan Mittelbach M. 2000. Detoxification experiments with the seed oil from *Jatropha curcas* L. *Indust Crops and Prod.* 12: 111-118.
- Haas MJ, Karen MS, William NM, Thomas AF. 2004. In situ alkaline transesterification: an effective method of the production of fatty acid esters from vegetable oils. *J Am Oil Chem Soc.* 81: 83-89.
- Hass MJ, McAloon AJ, Yee WC, Foglia TA. 2006. A process model to estimate biodiesel production cost. *Biores Technol.* 97: 671-678.
- Hailegiorgis SM, Mahdzir S, Subbarao D. 2013. Parametric study and optimization of in situ transesterification of *Jatropha curcas* L. assisted by benzyl trimethyl ammonium



- hydroxide as a phase transfer catalyst via response surface methodology. *Biomass and Bioen.* 59: 63-73.
- Harrington KJ dan D'Arcy-Evans C. 1985. Transesterification in situ of sunflower seed oil. *Indust and Eng Chem Product Res Develop.* 24: 314-318.
- Jain S dan Sharma MP. 2010. Kinetics of acid base catalyzed transesterification of *Jatropha curcas* oil. *Biores Technol.* 101: 7701-7706.
- Kartika IA, Yuliani S, Ariono D, Sugiarto. 2011a. Transesterifikasi *in situ* biji jarak pagar: Pengaruh kadar air dan ukuran partikel bahan terhadap rendemen dan mutu biodiesel. *Agritech.* 31: 242-249.
- Kartika IA, Yani M, Hermawan D. 2011b. Transesterifikasi *in situ* biji jarak pagar: Pengaruh jenis pereaksi, kecepatan pengadukan dan suhu reaksi terhadap rendemen dan mutu biodiesel. *J Tek Ind Pert.* 21: 24-33.
- Kartika IA, Yuliani S, Kailaku SI, Rigal L. 2012. Moisture sorption behaviour of *Jatropha seed (Jatropha curcas)* as a source of vegetable oil for biodiesel production. *Biomass and Bioen.* 36: 226-233.
- Kartika IA, Yani M, Ariono D, Evon Ph, Rigal L. 2013. Biodiesel production from *Jatropha* seeds: Solvent extraction and in situ transesterification in a single step. *Fuel.* 100: 111-117.
- Kasim FH dan Harvey AP. 2011. Influence of various parameters on reactive extraction of *Jatropha curcas* L. for biodiesel production. *Chem Eng J.* 171: 1373-1378.
- Ketaren S. 2008. *Pengantar Teknologi Minyak dan Lemak Pangan.* Jakarta: UI Press.
- Knothe G. 2004. *Viscosity of Biodiesel.* Illinois: AOCS Press.
- Knothe G. 2006. Analyzing biodiesel: Standards and other methods. *J Am Oil Chem Soc.* 83: 823-833.
- Kumar A dan Sharma S. 2008. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review. *Indust Crops and Prod.* 28: 1-10.
- Kusdiana D dan Saka S. 2003. Effects of water on biodiesel fuel production supercritical methanol treatment. *Biores Technol.* 91: 289-285.
- Leung DYC, Wu X, dan Leung MKH. 2010. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Appl Energy.* 87: 1083-1095.
- Ma F dan Hanna MA. 1999. Biodiesel Production: A review. *Biores Technol.* 70: 1-15.
- Montgomery DC. 2001. *Design and Analysis of Experimental 5th Edition.* New York: John Wiley & Son.
- Pujiastuti Y. 2012. Pengaruh suhu reaksi dan rasio heksan/total pelarut pada proses produksi biodiesel dari biji jarak pagar melalui transesterifikasi *in situ*. [Skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Openshaw K. 2000. A review of *Jatropha curcas*: An oil plant of unfulfilled promise. *Biomass and Bioen.* 19: 1-15.
- Ozgul-Yucel S dan Turkay S. 2003. FA monoalkylester from rice bran oil by in situ transesterification. *J Am Oil Chem Soc.* 81: 81-84.
- Qian J, Fei W, Sen L, Zhi Y. 2008. In situ alkaline transesterification of cotton seed oil for production of biodiesel and non toxic cotton seed meal. *Biores Technol.* 99: 9009-9012.
- Sari ABT. 2007. Proses pembuatan biodiesel minyak jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) dengan transesterifikasi satu dan dua tahap. [Skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Shahla S, Cheng NG, Yusuf R. 2010. An overview on transesterification of natural oils and fats. *Biotechnol and Bioproc Eng.* 15: 891-904.
- Shiu PJ, Gunawan S, Hsieh WH, Kasim NS, Ju YH. 2010. Biodiesel production from rice bran by two step in situ processes. *Biores Technol.* 101: 984-989.
- Shuit SH, Lee KT, Kamaruddin AH, Yusup S. 2010. Reactive extraction and in situ transesterification of *Jatropha curcas* L. seeds for the production of biodiesel. *Fuel.* 89: 527-530.
- Silitonga AS, Atabani AE, Mahlia TMI, Masjuki HH, Badruddin IA, Mekhilef S. 2011. A review on prospect of *Jatropha curcas* for biodiesel in Indonesia. *Renew and Sustain Energy Rev.* 15: 3733-3756.
- Siler-Marinkovic S dan Tomasevic A. 1998. Transesterification of sunflower oil in situ. *Fuel.* 77: 1389-1391.
- SNI. 1992. *Cara Uji Makanan dan Minuman.* Jakarta: Badan Standarisasi Nasional (BSN).
- SNI. 2006. *Biodiesel.* Jakarta: Badan Standarisasi Nasional (BSN).
- Surya Abadi Ginting M, Tazli Azizan M, Yusup S. 2012. Alkaline in situ ethanolysis of *Jatropha curcas*. *Fuel.* 93: 82-85.
- Tyson KS. 2004. *Energy Efficiency and Renewable Energy.* New York: US Departement of Energy.
- Utami SW. 2010. Kajian proses produksi biodiesel melalui transesterifikasi *in situ* biji jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) pada berbagai kondisi operasi. [Skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.