

Sintesis *Fly Ash* yang Diimpregnasi dengan Na_2O sebagai Katalis Pada Proses Transesterifikasi Minyak Sawit *Off-grade* Menjadi Biodiesel

Prasetyo Arva S¹, Zuchra Helwani², Edy Saputra²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Kimia S1, ²Dosen Jurusan Teknik Kimia,
Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Binawidya Jl. HR Subrantas Km 12,5 Pekanbaru 28293
prasetyoarva@gmail.com

ABSTRACT

Biodiesel is one of renewable energy in Indonesia that have to be development. Biodiesel formed as liquid fuel and has same property with petrodiesel. Biodiesel can be synthesized from off-grade palm oil using Na_2O fly ash as catalyst in transesterification process. Employing fly ash as support in Na_2O has a good impact due to provide wide surface of catalyst. In this study aims to see the influence of reaction temperature, molar ratio of methanol and oil and concentration of Na_2O fly ash towards biodiesel yield. The process was conducted through reaction of esterification and followed by transesterification reaction. Processing of the data in this study was conducted by response surface methodology (RSM) using Design Expert 7.0 program which is experimental design determined by central composite design (CCD) which consists of three variables. The highest result of biodiesel yield was 81,2% at 60°C reaction temperature, molar ratio of methanol : oil 8 : 1 and catalyst concentration of Na_2O fly ash 4%-wt. Biodiesel characteristics such as density, kinematic viscosity, acid value and flash point has been appropriate by Indonesian biodiesel standard. The most significant condition of process affecting the yield of biodiesel was catalyst concentration.

Keywords : *biodiesel, catalyst, fly ash, off-grade palm oil, transesterification*

1. Pendahuluan

Biodiesel dapat dibuat dari minyak jarak pagar, bunga matahari, kedelai, sawit dan sebagainya [Hambali, 2007]. Sawit dijadikan bahan baku pembuatan biodiesel karena banyaknya ketersediaan di Indonesia. Luas areal perkebunan sawit di Indonesia mengalami peningkatan dari 4,5 juta hektare pada tahun 2008 menjadi 5,6 juta hektare pada tahun 2013 dan diperkirakan akan terus mengalami peningkatan [BPS, 2013].

Dalam pembuatan biodiesel, tidak semua buah sawit digunakan sebagai bahan baku. Buah sawit yang segar lebih banyak dimanfaatkan daripada buah sawit *off-*

grade. Hal ini dikarenakan buah sawit segar memiliki kadar Asam Lemak Bebas (ALB) yang lebih rendah dibandingkan sawit *off-grade* sehingga akan mempengaruhi produk yang didapatkan. Dengan menggunakan sawit *off-grade* sebagai alternatif bahan baku pembuatan biodiesel dapat mengurangi biaya produksi karena 60% - 70% biaya produksi biodiesel berasal dari biaya bahan baku walaupun memiliki kadar ALB tinggi [Helwani dkk., 2009; Hayyan dkk., 2010]. Penggunaan sawit *off-grade* juga dapat mengurangi biaya karena selama ini sawit sortiran dijual ke pihak lain dengan harga 30% - 40% lebih murah dari TBS biasa,

sehingga hal ini dapat merugikan petani maupun pihak pabrik sawit [Arifin, 2009].

Sintesis biodiesel menggunakan katalis heterogen sebagai pengganti katalis homogen berpotensi terhadap biaya produksi yang lebih murah [Helwani dkk, 2009]. Katalis heterogen memiliki batasan yaitu laju reaksi yang lebih lama dibandingkan katalis homogen dan bagian katalis yang telah aktif mudah terkontaminasi CO_2 dan H_2O pada kondisi lingkungan [Granados dkk., 2009]. Katalis heterogen yang dikembangkan saat ini diantaranya $\text{NaOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [Taufiq dkk., 2011], Zeolit Alam-KOH [Ulfayana dan Helwani, 2014], $\text{Na}_2\text{O}/\text{NaX}$ [Martinez dkk., 2014] dan sebagainya.

Menurut Martinez dkk [2014], Na_2O (Natrium oksida) merupakan sumber sisi basa yang kuat pada katalis $\text{Na}_2\text{O}/\text{NaX}$ zeolite dan dengan demikian meningkatkan reaktivitas katalis tersebut. Na_2O digunakan sebagai *support* pada NaX zeolite pada proses transesterifikasi. Penambahan Na_2O pada katalis meningkatkan *yield* dan kebasaaan pada biodiesel namun berbanding terbalik dengan *surface area* dari katalis $\text{Na}_2\text{O}/\text{NaX}$ yang menurun dikarenakan volume mikropori zeolite yang menurun akibat *loading* Na_2O .

Pada proses transesterifikasi, Na_2O dapat digunakan sebagai katalis dengan cara impregnasi dengan penyokongnya. Na_2O mudah bereaksi dengan ALB membentuk sabun sehingga dapat mengurangi *yield*. Untuk mengatasi masalah tersebut maka Na_2O harus diimpregnasi dengan penyokongnya.

Salah satu penyokong katalis Na_2O adalah *fly ash*. *Fly ash* terdiri dari berbagai komponen logam dan alkali yang terdiri dari SiO_2 , Al_2O_3 dan Fe_2O_3 sebagai komponen utama serta senyawa lain seperti Na_2O , CaO , MgO , TiO_2 , BaO , K_2O , dan lainnya (Khatri dan Rani 2008).

2. Metode Penelitian

Bahan yang digunakan

Bahan yang digunakan yaitu minyak dari sawit *off-grade* yang diperoleh dari hasil ekstraksi, aquades, *fly ash*, NaNO_3 , metanol p.a, H_2SO_4 pekat, etanol teknis, asam oksalat, kertas saring, indikator PP dan KOH.

Alat yang dipakai

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah labu leher tiga 500 ml, *magnetic stirrer*, *hot plate*, *oven*, *furnace*, *heating mantel*, ayakan 100 dan 200 mesh, timbangan analitik, reaktor biodiesel, kondenser, *spindle press*, piknometer 10 ml, viskometer Oswald, gelas piala 250 ml, buret, erlenmeyer, pipet tetes, gelas ukur 50 ml, *magnetic stirrer*, *hot plate*, *Cleveland Flash Point Tester*, statif, GC-MS (Kromatografi Gas-Spektrometer Massa), XRD (*X-Ray Diffraction*).

Prosedur Penelitian

Penelitian ini melalui beberapa tahapan dalam pengerjaannya, yaitu:

1. Pembuatan Katalis $\text{Na}_2\text{O}/\text{Fly Ash}$

Fly Ash diayak dengan ukuran ayakan -100+200 mesh dimana partikel *fly Ash* yang diambil merupakan partikel-partikel yang lolos pada pengayak 100 mesh dan tertahan pada pengayak 200 mesh. *fly ash* dikeringkan pada suhu 105°C untuk menghilangkan kadar air. Selanjutnya *fly ash* dan NaNO_3 ditimbang dengan persentase berat 55%-b *fly ash* dan 45%-b NaNO_3 . NaNO_3 yang telah ditimbang kemudian dimasukkan ke dalam gelas kimia dan ditambahkan aquades. Kondisi proses dilakukan pada temperatur 80°C selama 1 jam dengan kecepatan pengadukan 400 rpm. Kemudian, *fly ash* ditambahkan secara perlahan. Setelah 4 jam, proses dihentikan. Hasil dari pencampuran ini akan terbentuk *slurry*. *Slurry* dikeringkan pada suhu 105°C untuk menghilangkan H_2O dan HNO_3 yang masih bersisa. Setelah itu *slurry* (NaOH dan

fly ash) dikalsinasi selama 4 jam pada suhu 650°C [Benjapornkulaphong dkk., 2009]. Katalis yang dihasilkan kemudian dianalisa kebiasaannya menggunakan indikator Hammet (fenolftalein).

2. Reaksi Esterifikasi

Proses esterifikasi dilakukan karena minyak sawit *off-grade* memiliki kadar ALB lebih dari 2 %. Minyak hasil ekstraksi buah sawit *off-grade* ditimbang sebanyak 100 gram dan dimasukkan ke dalam reaktor esterifikasi. Proses dilakukan pada reaktor berpengaduk secara *batch* dan ditempatkan di atas pemanas untuk menjaga suhu reaksi. Setelah suhu reaksi tercapai (60°C), pereaksi metanol dengan rasio mol metanol : minyak = 12:1 dan katalis H₂SO₄ 1%-b ditambahkan. Kondensor dipasang, pengaduk mulai dijalankan dengan kecepatan 400 rpm dan reaksi berlangsung selama 1 jam. Kemudian campuran dipisahkan dalam corong pisah. Lapisan atas berupa katalis H₂SO₄ dan metanol sisa dipisahkan dari lapisan bawah yang akan dilanjutkan ke tahap reaksi transesterifikasi. Sebelum dilanjutkan ke tahap transesterifikasi lapisan bawah ini diperiksa kadar ALB-nya [Budiawan dkk., 2013].

3. Reaksi Transesterifikasi

Proses transesterifikasi dilakukan untuk mendapatkan biodiesel dengan mengkonversi trigliserida yang terdapat di dalam minyak sawit *off-grade*. Lapisan bawah pada pemisahan produk hasil reaksi esterifikasi dimasukkan ke dalam reaktor transesterifikasi sebanyak 100 ml, kemudian dipanaskan hingga mencapai suhu reaksi. Setelah suhu reaksi yang telah ditentukan tercapai, tambahkan pereaksi metanol dan

katalis Na₂O/*fly ash*. Kondensor dipasang dan pengaduk mulai dijalankan pada kecepatan pengadukan 400 rpm. Setelah reaksi berlangsung selama 3 jam, kemudian campuran didinginkan dan disaring dengan kertas saring *wathman* secara vakum. Endapan berupa katalis dipisahkan dari filtratnya. Filtrat yang didapat dilanjutkan ke proses pemisahan dan pemurnian biodiesel [Kusuma dkk., 2011].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Ekstraksi Sawit *Off-grade*

Sawit *off-grade* yang telah diekstraksi digunakan untuk mensintesis biodiesel. Berondolan sawit *off-grade* dikukus terlebih dahulu dengan tujuan untuk melunakkan *mesocarp* buah dan deaktivasi enzim lipase sehingga dapat mencegah peningkatan kadar ALB pada minyak yang dihasilkan [Budiawan dkk., 2013].

Analisis densitas, viskositas, kadar air dan kadar asam lemak bebas untuk mengetahui karakteristik minyak sawit *off-grade*. Analisis karakteristik diperlukan untuk mengetahui perlakuan awal yang dibutuhkan pada proses pembuatan biodiesel. Karakteristik minyak sawit *off-grade* ditampilkan pada Tabel 3.1.

Sawit *off-grade* yang digunakan pada proses pembuatan biodiesel memiliki kadar air dan kadar asam lemak bebas (ALB) yang tinggi. Kadar air yang tinggi dalam minyak menyebabkan terjadinya hidrolisis yang merupakan salah satu penyebab terbentuknya ALB. Selain itu, air juga dapat bereaksi dengan katalis sehingga akan menyebabkan jumlah katalis pada reaksi berkurang [Ulfayana dan Helwani, 2015].

Tabel 3.1. Karakteristik Minyak Sawit *Off-grade*

No	Karakteristik	Satuan	Hasil Penelitian	Standar CPO SNI 01-2901-2006
1	Warna		Jingga kemerahan	Jingga kemerahan
2	Densitas (40°C)	kg/m ³	892,11	-
3	Viskositas (40°C)	mm ² /s	29,47	-
4	Kadar air	%	3,5	Maks 0,5
5	Kadar asam lemak bebas	%	6,19	Maks 0,5

3.2 Katalis Na₂O/*Fly Ash*

Penggunaan katalis Na₂O/*fly ash* pada proses transesterifikasi minyak menjadi biodiesel akan mempengaruhi kualitas/jumlah produk dan kondisi proses. Sifat dari Na₂O yang mudah bereaksi dengan ALB akan mengakibatkan pembentukan sabun yang juga berpengaruh terhadap produk yang dihasilkan sehingga akan menyulitkan proses pemisahan [Benjapornkulaphong dkk., 2009].

Proses kalsinasi Na₂O/*fly ash* dilakukan pada temperatur 650°C selama 4 jam. Katalis Na₂O/*fly ash* kemudian diuji kebasaaan dan komposisi kimianya menggunakan metode XRD. Berdasarkan indikator Hammett (fenolftalein), terjadi perubahan warna dari tidak berwarna menjadi ungu. Hal ini menandakan bahwa katalis memiliki kebasaaan $H_+ > 9,3$ [Helwani dkk., 2016].

3.3 Yield dan Karakteristik Biodiesel

3.3.1 Yield Biodiesel

Yield biodiesel yang didapatkan dengan menggunakan katalis Na₂O/*fly ash* bervariasi mulai dari 20% hingga 81,2%. *Yield* biodiesel terendah diperoleh sebanyak 20% pada kondisi proses temperatur reaksi 45°C, rasio molar 8 : 1 dan konsentrasi katalis 4%. Sedangkan *yield* biodiesel tertinggi diperoleh sebanyak 81,2% pada kondisi proses temperatur reaksi 60°C, rasio molar 8 : 1 dan konsentrasi katalis 4%. Hasil

yang didapat lebih rendah dibandingkan martinez dkk. (2014).

Berdasarkan perhitungan awal dengan perbandingan berat molekul, kadar Na₂O yang ada dalam katalis hanya 12,29%. Sementara Benjapornkulaphong, dkk (2009) menggunakan katalis dengan kadar Na₂O sebesar 14,91%. Hal ini menunjukkan bahwa Na₂O yang berperan besar sebagai katalis. Peningkatan kadar Na₂O pada katalis dapat meningkatkan perolehan *yield* biodiesel.

3.3.2 Karakteristik Biodiesel

Karakterisasi biodiesel dibutuhkan untuk membandingkan karakteristik biodiesel yang dihasilkan dengan standar mutu biodiesel Indonesia sehingga dapat digunakan sesuai kebutuhannya. Karakteristik yang dianalisis diantaranya adalah densitas, viskositas kinematik, titik nyala dan angka asam yang ditampilkan pada Tabel 3.2.

Pada Tabel 3.2 dapat dilihat bahwa semua karakteristik biodiesel telah sesuai dengan standar SNI 04-7182-2006. Densitas dan viskositas biodiesel akan mempengaruhi sistem pembakaran dan injeksi pada mesin. Titik nyala yang sesuai standar menandakan biodiesel aman dalam proses transportasi dan penyimpanannya. Angka asam yang sesuai standar menandakan biodiesel tidak bersifat korosif [Budiawan dkk.,2013].

Tabel 3.2 Karakteristik Biodiesel Hasil Penelitian

No	Karakteristik	Satuan	Biodiesel Hasil Penelitian	Standar SNI 04-7182-2006
1	Densitas	kg/m ³	862,33	850 – 890
2	Viskositas Kinematik	mm ² /s	3,43	2,3 – 6,0
3	Titik nyala	°C	130	Min. 100
4	Angka asam	mg-KOH/g-biodiesel	0,495	Maks. 0,8
5	Kadar alkil ester	%-massa	100	Min. 96,5

3.3.3 Desain dan Analisis Model *Yield* Biodiesel

Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan untuk melihat pengaruh variasi kondisi proses terhadap *yield* biodiesel. Data hasil percobaan dianalisis dengan rancangan percobaan (*design experiment*) metode statistik *Central Composite Design* (CCD) dan diolah menggunakan program *Design Expert 7.0*. Program akan mengeluarkan model dan grafik yang menunjukkan pengaruh variasi kondisi proses terhadap *yield* biodiesel. Pengujian model dilakukan dengan *coded variable* yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh koefisien – koefisien model yaitu temperatur reaksi, rasio mol dan konsentrasi katalis terhadap respon berupa *yield* biodiesel.

Metode *Response Surface Methodology* (RSM) merupakan metode yang digunakan untuk melakukan proses optimasi. Model yang sering digunakan untuk RSM adalah model polynomial orde 1 dan orde 2. Pada model orde I, perlu dilakukan uji kecocokan model untuk melihat tepat atau tidaknya dugaan model yang dilakukan. Apabila model tidak linier atau terdapat pola lengkung (*curvature*), maka model orde 1 tidak cocok digunakan dan digunakan model orde 2 [Montgomery, 2009].

Data *yield* biodiesel selanjutnya diolah dengan menggunakan program *Design Expert 7.0* sehingga diperoleh persamaan orde dua seperti ditampilkan persamaan 3.1.

$$Y = 80.59 + 13.08 X_1 + 2.54 X_2 + 10.76 X_3 - 7.38 X_1X_2 + 7.0 X_1X_3 + 0.86 X_2X_3 - 15.87 X_1^2 - 1.97 X_2^2 - 11.41 X_3^2 \dots(3.1)$$

Yang mana, Y = *Yield* biodiesel (%)

X₁ = Temperatur reaksi (°C)

X₂ = Rasio mol (mol)

X₃ = Konsentrasi katalis (%-b)

3.3.4 Pengaruh Kondisi Proses dan Interaksinya terhadap *Yield* Biodiesel

a. Pengaruh Kondisi Proses

Kondisi proses pada pembuatan biodiesel antara lain temperatur reaksi (X₁), rasio molar metanol : minyak (X₂), dan konsentrasi katalis Na₂O/*fly ash* (X₃). Dari hasil pengujian P-value, tidak semua kondisi proses memberikan pengaruh yang signifikan terhadap *yield* biodiesel. Kondisi operasi yang paling memberikan pengaruh adalah konsentrasi katalis Na₂O/*fly ash* (X₃).

Konsentrasi katalis Na₂O/*fly ash* dipengaruhi oleh komposisi kimianya. Komposisi Na₂O berperan penting sebagai katalis pada proses transesterifikasi. Semakin tinggi konsentrasi katalis Na₂O/*fly ash* akan meningkatkan konsentrasi Na₂O sehingga *yield* biodiesel juga akan semakin meningkat. Namun peningkatan konsentrasi katalis akan meningkatkan pengaruh perpindahan massa [Liu dkk., 2008]. Pada reaksi dengan viskositas yang tinggi akan menghasilkan difusi massa yang rendah

Antara metanol-minyak-katalis heterogen [Kotwal dkk., 2009].

Reaksi transesterifikasi dapat dilangsungkan pada rentang temperatur kamar hingga mendekati titik didih metanol. Semakin tinggi temperatur reaksi maka *yield* biodiesel yang dihasilkan akan semakin tinggi. Pada reaksi dengan temperatur reaksi di atas titik didih metanol akan meningkatkan tumbukan antara partikel metanol dan minyak.

Rasio mol metanol : minyak berpengaruh terhadap *yield* biodiesel. Pada stoikiometri reaksi transesterifikasi, satu mol minyak membutuhkan tiga mol alkohol untuk memproduksi tiga mol metil ester dan satu mol gliserol. Penambahan jumlah mol metanol bertujuan agar reaksi bergerak kearah produk karena reaksi yang terjadi merupakan reaksi kesetimbangan. Namun peningkatan rasio mol metanol : minyak tidak terlalu berpengaruh terhadap *yield* biodiesel. Hal ini dikarenakan semakin tinggi rasio mol metanol : minyak maka akan terbentuk emulsi antara katalis dengan metanol dan gliserol. Sementara itu, peningkatan konsentrasi metanol akan menurunkan *yield* dikarenakan terjadinya peningkatan kelarutan metanol-gliserol yang akan mengganggu pemisahan gliserol [Ho dkk., 2014].

b. Pengaruh Interaksi Kondisi Proses terhadap Yield Biodiesel

Berdasarkan pengujian *P-value* tidak semua interaksi kondisi proses memberikan pengaruh yang signifikan terhadap *yield* biodiesel. Interaksi antara temperatur dan rasio mol metanol : minyak memberikan pengaruh paling besar dibandingkan dengan interaksi lainnya.

Yield biodiesel tertinggi didapatkan pada kondisi rasio molar metanol : minyak 8 : 1 dan temperatur 60°C. Semakin tinggi temperatur maka *yield* biodiesel akan

meningkat. Rasio molar metanol : minyak reaksi tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada interaksi antara rasio molar metanol : minyak dan temperatur reaksi. Peningkatan rasio molar metanol : minyak akan meningkatkan kelarutan antara gliserol dan metanol sehingga *yield* yang dihasilkan berkurang [Kapilakarn dkk., 2007].

Pada Interaksi antara temperatur dan konsentrasi katalis memberikan sedikit pengaruh terhadap *yield* biodiesel. Konsentrasi katalis yang memberikan pengaruh paling signifikan terhadap *yield* biodiesel. Karena jika konsentrasi katalis ditingkatkan pada temperatur 50°C maka *yield* biodiesel akan semakin meningkat. Berbanding lurus dengan konsentrasi katalis, semakin tinggi temperatur maka *yield* biodiesel juga meningkat namun jika melebihi temperatur optimum *yield* biodiesel cenderung menurun. Interaksi antara temperatur reaksi dan konsentrasi katalis mendapatkan *yield* terbaik pada nilai tengahnya. Peningkatan temperatur reaksi hanya akan meningkatkan konsumsi energi pada proses pembuatan biodiesel dan tidak memberikan pengaruh signifikan [Ho dkk., 2014].

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, maka dapat disimpulkan yaitu biodiesel dapat dihasilkan dari minyak sawit *off-grade* yang berkualitas rendah melalui reaksi esterifikasi dan transesterifikasi dengan menggunakan katalis Na₂O/*fly ash* pada tahap transesterifikasi. Katalis Na₂O/*fly ash* memiliki kebasaaan $\geq 9,3$. *Yield* biodiesel tertinggi didapat sebanyak 81,2% pada kondisi proses suhu reaksi 60°C, rasio mol metanol : minyak 8:1, konsentrasi katalis Na₂O/*fly ash* 4%. dan *yield* biodiesel terendah didapat sebanyak 20% pada kondisi proses suhu 45 °C, rasio mol metanol : minyak 8:1 serta konsentrasi katalis Na₂O/*fly ash* 4%. Kondisi operasi

yang paling memberikan pengaruh signifikan terhadap *yield* biodiesel adalah konsentrasi katalis. Peningkatan konsentrasi katalis akan meningkatkan *yield* biodiesel.

Daftar Pustaka

- Arifin, J.K. 2009. Pemanfaatan Buah Sawit Sisa Sortiran sebagai Sumber Bahan Baku Asam Lemak. *Tesis*. Program S2 Teknik Kimia Universitas Sumatra Utara. Medan.
- Badan Standardisasi Nasional. 2006. Standar Nasional Indonesia : Biodiesel. SNI 04-7182-2006.
- Badan Standardisasi Nasional. 2006. Standar Nasional Indonesia : Minyak Kelapa Sawit Mentah. SNI 01-2901-2006.
- Benjapornkulaphong, S., Ngamcharussrivichai, C dan K. Bunyakiat. 2009. Al₂O₃-supported Alkali and Alkali Earth Metal Oxides for Tranesterification of Palm Kernel Oil and Coconut Oil. *Chemical Engineering Journal*. 145:468-474.
- Budiawan, R.Zulfansyah, W. Fatra dan Z. Helwani. 2013. Off-grade Palm Oil as A Reneweble Raw Material for Biodiesel Production by Two-Step Processes. *ChESA Conference*. Januari. Banda Aceh.7: 40 – 50.
- Hambali, E. 2007. Jarak Pagar Tanaman Penghasil Biodiesel. Penerbit Swadaya. Jakarta.
- Helwani, Z., M. R. Othman, N. Aziz, J. Kim dan W. J. N. Fernando. 2009. Solid Heterogeneous Catalyst for Transesterification of Triglycerides with Methanol : A Review. *Applied Catalysis A : General*. 369: 1 -10.
- Helwani, Z., N. Aziz, M.Z.A. Bakar, H. Mukhtar, J. Kim dan M.R. Othman. 2013. Conversion of Jatropha Curcas Oil into Biodiesel Using Re-Crystallized Hydrotalcite. *Energy Conversion and Management*. 73 : 128 – 134.
- Helwani, Z., N. Aziz, J. Kim dan M. R. Othman. 2016. Improving The Yield of Jatropha Curcas's FAME through Sol-Gel Derived Meso-porous Hydrotalcites. *Renewable Energy*. 86: 68-74.
- Ho, W.W.S., H.K. Ng, S.Gan dan S.H. Tan. 2014. Evaluation of Palm Oil Mill Fly Ash Supported Calcium Oxide as A Heterogenous Base Catalyst in Biodiesel Synthesis from Crude Palm Oil. *Energy Conversion and Management*. 88 : 1167-1178.
- Kapilakarn, K. dan Peugtong A. 2007. A Comparison of Cost of Biodiesel Production from Transesterification. *International Energy Journal*. 8 : 1 - 6.
- Kotwal, M.S., P.S. Niphadkar, S.S. Deshpande, V.V. Bokade dan P.N. Joshi. 2009. Transesterification of Sunflower Oil Catalysed by Fly Ash-Based Solid Catalysts. *Fuel*. 88 : 8-1773.
- Kusuma, R.I., J.P. Hadinoto, A. Ayucitra dan S. Ismadji. 2011. Pemanfaatan Zeolit Alam sebagai Katalis Murah dalam Proses Pembuatan Biodiesel dari Minyak Kelapa Sawit. *Prosiding Seminar Nasional Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia*. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- Liu, C., L.V., Pengmei. Yuan, Z., F. Yan dan W. Luo. 2010. The Nanometer Magnetic Solid Base Catalyst for Production of Biodiesel. *Renewable Energy*.15 : 1531-1536.
- Liu, X., Piao, X., Y. Wang dan S. Zhu. 2008b. Calcium Ethoxide as A Solid Catalyst for The Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel. *Energy & Fuels*. 22 : 1313-1317.
- Montgomery, C.D. 2001. Design and Analysis of Experiments 5th Edition. *John Wiley & Sons, Inc*. New York.

Ulfayana, S. dan Z. Helwani. 2014. Natural Zeolite for Transesterification Step Catalysts in Biodiesel Production from Palm Off Grade. *Abstract Book : Regional Conference on Chemical Engineering*. Desember. Yogyakarta. 7 : 22.