

# PENGEMBANGAN PROSES ENZIMATIS UNTUK PRODUKSI BIODIESEL DARI MINYAK JARAK PAGAR DAN UJI PERFORMA PADA MESIN DIESEL

Dini Cahyandari

Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Semarang, Jl. Kasipah 12 Semarang  
cahyandari16@yahoo.com

## Abstract

Oil reserved that belonged to Indonesia is limited. In order that there were some efforts have performed to seek an alternative green and renewable fuel such as biodiesel. Biodiesel production from *Jatropha curcas* is basically methanolysis reaction, the reaction of triglyceride with methanol yield to methyl ester and glycerol. This transesterification is performed enzymatically because it has some advantages: energy save, complete transesterification for high free fatty acid and water, easy drawn for glycerol, and no washing. The objectives of this research is to develop enzymatic process to produce biodiesel from *Jatropha curcas* by using indigeneous enzyme from papain lateks and husk. The achievements are date for design, scale-up and process condition including kinetics reaction, optimum process and data of engine performance. In first year, designing and fabricating of enzymatic reactor was done followed by studied of kinetics reaction and process computing. Model building was performed based on Michaelis-Menten theory. Model was postulated and then broken down to empirical equation that will be examined and validated by experimental data gathered. The result in the first year showed that longer in time more biodiesel got in conversion at alter ratio. Lipase activity increased in increasing temperature. The optimum temperature was 51 °C . Adding n-hexane solvent has been able to increase conversion in transesterification reaction and to increase enzymatic reaction rate.

Key Words: Biodiesel, Enzymatic

## Pendahuluan

Energi fosil khususnya minyak bumi, merupakan sumber energi utama dan sumber devisa negara. Namun demikian, cadangan minyak bumi yang dimiliki Indonesia jumlahnya terbatas. Sementara itu, kebutuhan manusia akan energi semakin meningkat sejalan dengan laju pertumbuhan ekonomi dan penambahan penduduk. Oleh karenanya berbagai upaya telah dilakukan untuk mencari bahan bakar alternatif yang memiliki sifat dapat diperbaharui (*renewable*) dan ramah lingkungan. Potensi energi yang terbarukan antara lain tenaga matahari, panas bumi, angin, arus laut, tanaman penghasil minyak, dan lain-lain. Meskipun demikian, pemanfaatan energi yang bersumber dari tenaga matahari, angin dan arus laut mengalami kesulitan dalam hal penampungan (*storage*) khususnya untuk benda bergerak.

Minyak nabati merupakan salah satu hasil tanaman yang berpotensi sebagai sumber hidrokarbon atau sumber energi di Indonesia. Namun minyak tersebut tidak bisa digunakan secara langsung karena memiliki viskositas yang tinggi, angka setan yang rendah, adanya asam lemak bebas, volatilitas yang rendah, adanya *gum* dan terbentuknya endapan yang tinggi bila digunakan sebagai bahan bakar secara langsung (Fangrui Ma, 1999). Oleh karenanya, harus diubah ke bentuk lain yaitu menjadi alkil ester (biodiesel).

Sejak berabad-abad yang lalu minyak nabati, seperti minyak jarak pagar telah dikenal oleh masyarakat Indonesia. Minyak jarak pagar termasuk golongan setengah mengering (*semi drying oil*) atau minyak mengering (*drying oil*), sehingga tidak dapat digunakan sebagai minyak goreng. Hal ini disebabkan karena minyak tersebut jika kontak dengan udara pada suhu tinggi akan cepat teroksidasi sehingga berbau tengik. Oleh karenanya, minyak jarak pagar lebih baik diubah ke bentuk oleokimia, seperti biodiesel.

Produksi biodiesel dari minyak nabati pada dasarnya adalah reaksi metanolisis, yaitu reaksi trigliserida dengan metanol dihasilkan metil ester asam lemak dan gliserol. Reaksi ini dapat dilakukan secara kimiawi menggunakan katalis dengan energi tinggi, dan dapat secara enzimatik. Pembuatan biodiesel dari minyak nabati telah banyak dikaji bahkan diproduksi secara komersial di luar negeri (Darnoko, dkk.2001., Ananta-Andi-Anggraini, dkk., 1998., Krawczyk, 1996., Knothe, 2001). **Cara kimiawi ini mempunyai kelemahan**, yaitu *energy consuming*, transesterifikasi tidak sempurna jika tinggi kandungan asam lemak bebas dan airnya, sulit memisahkan residu katalis dan gliserolnya serta

butuh pencucian berulang untuk pemurnian (Nelson, dkk., 1996). Hal ini dapat diatasi dengan cara transesterifikasi enzimatis.

Beberapa minyak nabati telah dicoba untuk dikonversi menjadi biodisel secara enzimatis (Yulianto, M.E., dkk., 2005, Watanabe, dkk., 2001., Shimada, dkk., 1999., Selmi dan Thomas., 1998., Nelson, dkk., 1996). Studi awal juga telah dilakukan dalam skala laboratorium dengan menggunakan reaktor enzimatis, dimana menunjukkan bahwa metanolisis trigliserida dengan biokatalis sangat potensial dalam memproduksi biodisel (Yulianto, M.E., dkk., 2005). Jenis reaktor ini mempunyai keuntungan seperti keseragaman waktu tinggalnya, intensitas pengaduk, perpindahan massa dan panas dapat divariasikan, dan mudah dalam mengendalikan suhu, pH serta kecepatan putar pengaduk (Yulianto, M.E., dkk., 2005., Watanabe, dkk., 2001., Shimada, dkk., 1999). Dari berbagai kajian tersebut dapat disimpulkan berbagai faktor yang mempengaruhi reaksi transesterifikasi enzimatis tersebut, antara lain sumber enzim, kadar air, rasio metanol/minyak, suhu jika waktu reaksinya pendek. Disamping itu, secara umum reaksi interesterifikasi dapat dipengaruhi oleh adanya beberapa jenis pelarut organik, sementara pelarut organik lain tidak. Pelarut organik ini dapat memfasilitasi kontak antara enzim dan substrat, serta dapat mengencerkan viskositas campuran.

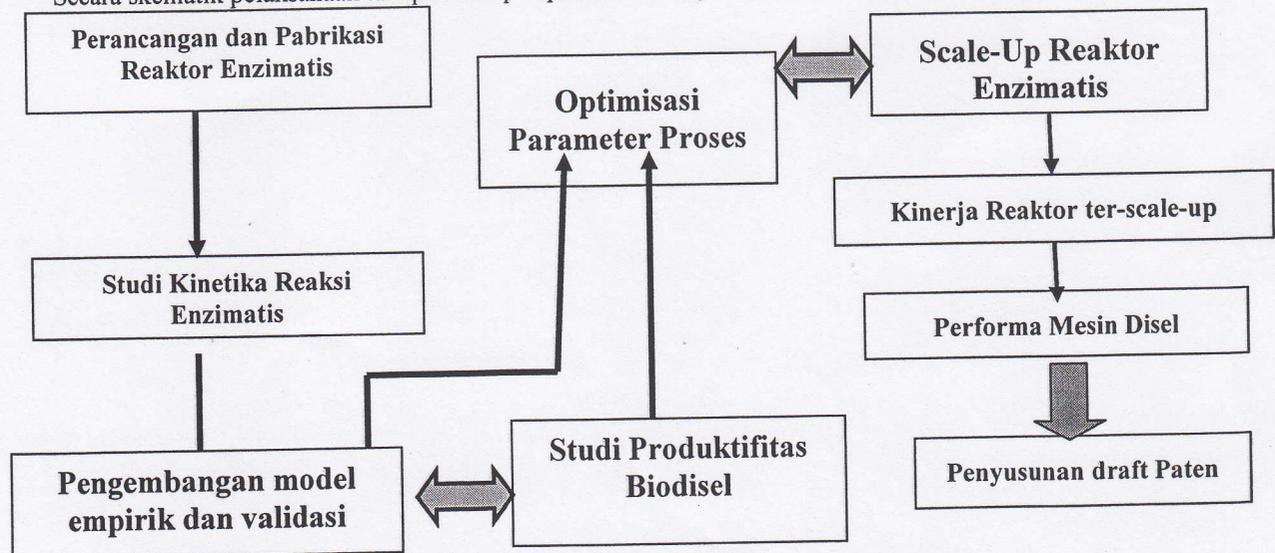
Meskipun demikian, kendala yang dihadapi dalam mengkonversi minyak jarak pagar ke biodisel secara enzimatis, adalah harga enzim yang tersedia secara komersial masih mahal karena masih import. Oleh karena itu perlu diupayakan sumber lipase indigeneous yang murah dan potensial. Aktivitas lipase dalam bekatul dipengaruhi oleh kondisi penyimpanan, suhu dan kadar air (Gingras, 2000). Beberapa penelitian menunjukkan kemampuan lateks pepaya dapat digunakan untuk biokonversi lipida (Caro, dkk., 2000., Gandhi dan Mukherjee, 2001., Lee dan foglia, 2001). Penggunaan kedua sumber lipase tersebut untuk pembuatan metil ester dari minyak jarak pagar belum dipublikasikan sampai saat ini. Dengan demikian belum diketahui bagaimana kondisi optimum untuk proses tersebut. Oleh karenanya, perlu ditelaah pengembangan proses enzimatis untuk produksi biodisel dari minyak jarak pagar dengan menggunakan enzim indigeneous yaitu dari lateks pepaya dan bekatul yang berpotensi dapat dihasilkan dalam negeri.

#### Metode Penelitian

Penelitian tentang pembuatan biodisel dari minyak jarak pagar dengan biokatalis dalam reaktor enzimatis diinvestigasi baik secara eksperimen maupun pemodelan. Rangkaian penelitian akan dilaksanakan secara bertahap meliputi:

- Perancangan dan pabrikasi reaktor enzimatis
- Studi kinetika reaksi enzimatis dan komputasi proses
- Studi produktifitas biodisel
- Optimisasi parameter-parameter proses
- Scale-Up reaktor enzimatis
- Kinerja reaktor ter-scale-up
- Performa mesin disel
- Penyusunan draft paten

Secara skematik pelaksanaan tahapan-tahapan penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skematik tahapan-tahapan penelitian

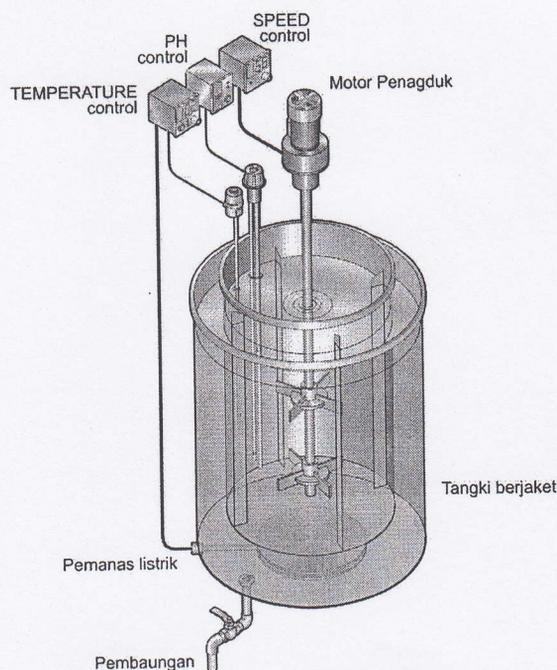
Untuk mendapatkan gambaran metodologi yang runtut dengan hasil/kemajuan yang direncanakan setiap tahunnya, maka penelitian ini dirancang sebagai berikut:

Pada tahun pertama, penelitian dilakukan pada skala laboratorium. Kegiatan yang telah dilakukan antara lain :

1. Perancangan dan pabriaksi reaktor enzimatik
2. Studi kinetika reaksi enzimatik dan komputasi proses

### Perancangan dan Pabriaksi Alat Reaktor Enzimatis

Rangkaian alat bioreaktor yang digunakan untuk proses enzimatik tersaji pada Gambar 2. Rangkaian alat ini terdiri dari reaktor enzimatik, motor pengaduk, pemanas listrik, pengendali temperatur, pengendali pH, jaket pendingin dan pengendali putaran pengaduk.



**Gambar 2. Rangkaian alat reaktor enzimatik**

### Studi Kinetika Reaksi Enzimatis dan Komputasi Proses

Penelitian dilakukan dalam dua tahapan kerja yaitu :

1. Pemodelan
2. Eksperimen

#### Pemodelan

Kegiatan pemodelan diawali dengan menyusun proses kinetika reaksi enzimatik yang mungkin berdasarkan kajian teoritis dan berdasarkan pada banyak penelitian sebelumnya, yang dilakukan di Laboratorium Komputasi Proses Teknik Mesin Fakultas Teknik UNIMUS. Penyusunan model dilakukan berdasarkan teori kinetika Michaelis –Menten. Model yang dipostulasi, kemudian diturunkan untuk memperoleh persamaan dan diuji dengan menggunakan data yang diperoleh dari eksperimental.

#### Eksperimen

Eksperimen dilakukan untuk mendapatkan data-data yang berguna dalam penentuan parameter konstanta kecepatan reaksi yang dimodelkan dalam persamaan empiris. Data-data yang telah diukur digunakan sebagai alat untuk memvalidasi postulasi yang telah ditetapkan. Pengukuran data dilakukan di

laboratorium Konversi Energi Teknik Mesin UNIMUS dan laboratorium Kimia Analisa Teknik Kimia UNDIP. Dengan demikian akan diperoleh model dan persamaan empiris yang tervalidasi.

### Bahan dan alat Penelitian

Bahan utama penelitian ini adalah minyak jarak pagar, petroleum ether, metanol, heksan, enzim lipase murni, enzim lipase lateks pepaya dan lipase dari bekatul. Minyak jarak pagar diperoleh dari sentra industri kecil di Kudus. Bahan-bahan kimia membeli di CV. Jurus Maju Semarang. Lipase murni dari Nuvo, sedangkan enzim lateks pepaya dan lipase bekatul akan diekstrak dari pepaya dan bekatul.

Alat utama penelitian ini berupa reaktor enzimatik. Sementara itu, alat pendukung yang dipakai pada penelitian ini adalah centrifuge, tabung reaksi dan ekstraktor berpengaduk. Beberapa alat lain yang digunakan sebagai pendukung untuk keperluan analisa adalah:

1. Buret, dengan volume 10 ml dan skala 0,02
2. Piknometer, dengan volume 5 ml
3. Viskosimeter
4. Erlenmeyer, dengan volume 250 ml
5. Pipet volum, dengan volume 10 ml
6. Beaker glass, dengan volume 500 ml dan 100 ml
7. Pipet tetes
8. Bomb calorimeter
9. Pipa kapiler.

### Variabel Percobaan

Variabel operasi selama penelitian tentang kinetika reaksi adalah sebagai berikut:

- Variabel tetap :
  - Dimensi peralatan D/H : konstan
  - Tekanan operasi : 1 atm
- Variabel berubah :
  - Rasio enzim-minyak jarak pagar : 2,5/100 - 10/100 v/v
  - Rasio minyak jarak pagar-metanol : 1/1 - 1/3 v/v
  - Suhu reaksi : 30 - 60 °C
  - pH awal : 3,0 - 5,0
  - Waktu reaksi : 1-24 jam

### Penentuan Yield

Sampel yang diambil, kemudian dimasukkan ke dalam corong pisah dan dibiarkan selama semalam dengan tujuan agar pemisahan yang terjadi mendekati sempurna dimana gliserol akan berada pada fase bawah sementara metil ester yang terbentuk akan berada pada fase atas. Setelah itu, kedua lapisan yang terbentuk segera dipisahkan dan metil ester segera diambil untuk ditimbang dan dianalisis bilangan asam serta konsentrasi metil ester dengan Gas Chromatografi. Metil ester dihitung persentasenya terhadap total campuran. Faktor konversi dihitung berdasarkan metil ester yang terbentuk terhadap minyak jarak pagar yang digunakan.

### Pengujian Sifat Produk

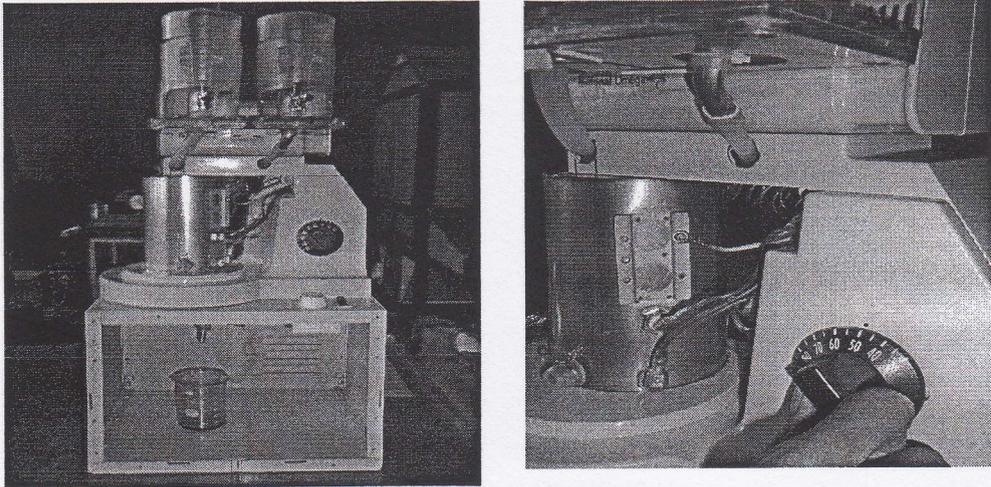
Hasil konversi minyak jarak pagar berupa ester minyak yang diuji sifat-sifatnya dengan metode standar ASTM, yaitu:

- Viskositas diukur dengan Brookfield viskosimeter.
- Specific gravity diukur dengan piknometer.
- Flash point diukur dengan metode AOAC.
- Melting point diukur dengan metode menggunakan pipa kapiler.
- Energy content diukur dengan metode menggunakan bomb calorimeter.
- Cetane number.

### Hasil dan Pembahasan

#### Perancangan dan Pabrikasi Reaktor Enzimatis

Rangkaian alat bioreaktor enzimatik yang digunakan untuk proses enzimatik seperti disajikan pada Gambar 3. Rangkaian alat ini terdiri dari reaktor enzimatik, motor pengaduk, pemanas listrik, setting temperatur dan pengaturan putaran pengaduk serta indikator suhu berbasis komputerisasi.



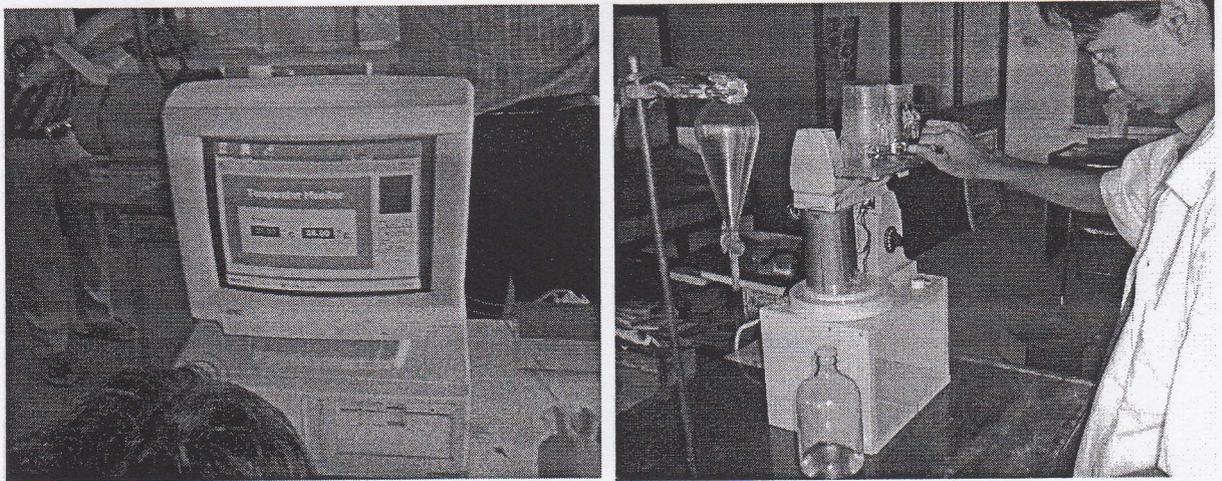
Gambar 3. Rangkaian alat reaktor enzimatis

#### Uji Coba Reaktor Enzimatis

Uji coba alat proses digunakan untuk menstabilkan setting kondisi operasi, konsistensi proses dan stabilitas proses, sehingga dapat digunakan untuk mengukur data percobaan di laboratorium. Uji coba alat reaktor enzimatis ini tersaji pada Gambar 4.

#### Penelitian Pendahuluan

Penelitian awal dilakukan dengan menggunakan enzim yang berasal dari ekstrak bekatul dan getah pepaya pada temperatur 60 °C, perbandingan reaktan 1:1 selama 12 jam. Studi ini bertujuan untuk mengetahui enzim yang lebih berpotensi dalam mengkatalisis minyak jarak pagar menjadi metil ester. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konversi metil ester dengan menggunakan ekstrak bekatul lebih tinggi, yaitu sebesar 41,3%, sedangkan ekstrak getah pepaya sebesar 13,2%. Hal ini terjadi karena isolasi enzim dari getah pepaya lebih kompleks, sehingga dimungkinkan kemurnian enzim relatif rendah. Akibatnya, reaksi transesterifikasi yang dikatalisis oleh enzim dari ekstrak getah pepaya cenderung sulit untuk menurunkan energi aktivasi reaksi. Untuk itu, penelitian lebih lanjut dilakukan dengan menggunakan enzim yang berasal dari ekstrak bekatul. Meskipun demikian, Gandhi dkk (2001) menyatakan bahwa konversi metil ester yang dikatalisis oleh enzim lipase ekstrak getah pepaya sebesar 59% pada rasio 1:2 selama 24 jam.



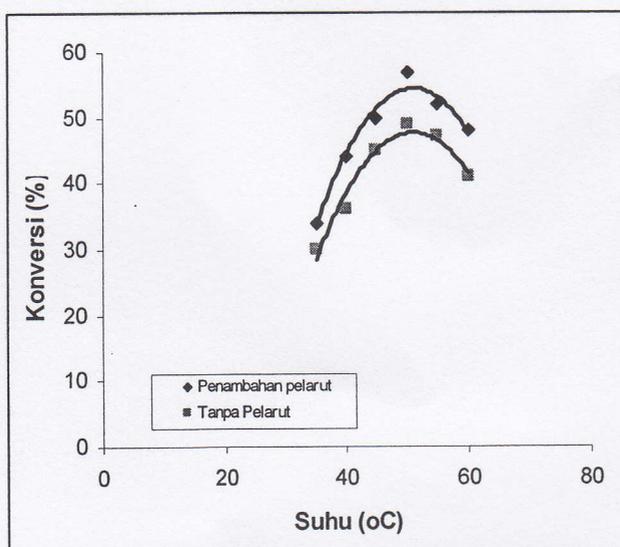
Gambar 4. Uji coba alat reaktor enzimatis

Penelitian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan enzim murni. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menelaah aktivitas lipase murni disamping sebagai pembanding. Reaksi

transesterifikasi minyak jarak pagar dilakukan pada temperatur 60 °C, rasio minyak terhadap metanol 1:3, dan waktu reaksi selama 24 jam. Hasil reaksi menunjukkan bahwa konversi minyak jarak pagar menjadi metil ester sebesar 69%, jika digunakan lipase murni *Candida antarctica*. Hal ini menunjukkan bahwa metanolisis minyak jarak pagar secara enzimatis sangat berpotensi. Ini terjadi karena enzim lipase dapat mengkatalisis di daerah *interface*, yaitu antara fasa minyak dengan fasa metanol. Pernyataan ini juga didukung oleh Hsu dkk, (2004), bahwa konversi trigliserida menjadi biodisel lebih dari 96%, jika menggunakan *Immobilized lipase* dan dapat diproduksi secara kontinyu.

**Penelitian Utama**  
**Studi Produktivitas**

Telaah produktivitas bertujuan untuk meningkatkan konversi metil ester yang dilakukan dengan penambahan pelarut organik berupa n-heksan. Studi ini dilakukan sesuai variabel proses. Hasil penelitian tentang hubungan konversi dengan temperatur tersaji pada Gambar 5. Konversi metil ester dengan penambahan n-heksan, terlihat lebih besar pada berbagai temperatur dibandingkan tanpa penambahan pelarut. Hal ini menunjukkan bahwa pelarut organik n-heksan mampu memfasilitasi kontak antara enzim dengan substrat, sehingga aktivasi enzim meningkat. Selain itu juga dapat mengencerkan viskositas cairan, akibatnya tumbukan antar molekul lebih sering terjadi. Pernyataan ini sesuai yang dilakukan oleh Nelson dkk, (1996), bahwa konversi trigliserida menjadi alkil ester dengan pelarut n-heksan meningkat menjadi 90%.



Gambar 5. Hubungan antara Temperatur dengan konversi

**Pengaruh Waktu Reaksi**

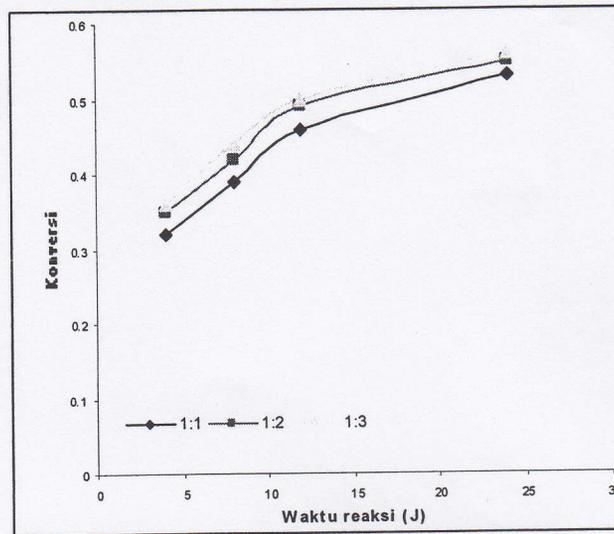
Hubungan antara konversi dengan waktu reaksi disajikan pada Gambar 6. Grafik ini terlihat, semakin lama waktu, konversi minyak jarak pagar menjadi metil ester semakin besar pada berbagai perbandingan. Hal ini terjadi karena semakin lama reaksi transesterifikasi menyebabkan semakin banyak kesempatan tumbukan antar molekul-molekul reaktan dengan enzim, sehingga akan menurunkan energi aktivasi.

**Pengaruh Suhu**

Pada umumnya setiap enzim memiliki aktivitas katalitik optimum pada temperatur tertentu. Temperatur optimum akan memberikan aktivitas katalitik terbesar. Gambar 7. menyajikan hasil yang diperoleh untuk variasi temperatur reaksi transesterifikasi. Kurva ini menunjukkan hubungan antara peningkatan konversi yang terbentuk terhadap temperatur. Seperti terlihat pada Gambar 7, kenaikan temperatur hingga 50 °C akan menyebabkan kenaikan aktivitas katalitik lipase sehingga meningkatkan derajat transesterifikasi. Hal tersebut sesuai dengan persamaan Arrhenius yang menyatakan hubungan aktivitas terhadap temperatur, yaitu :

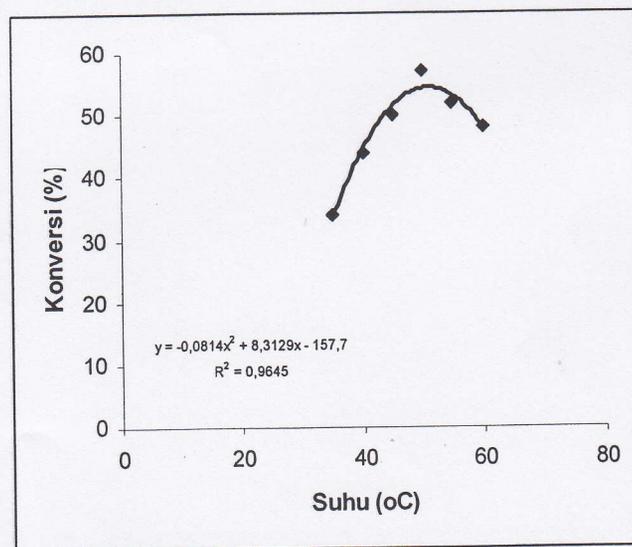
$$A = A_0 e^{-\frac{\Delta E_a}{RT}}$$

Dalam hubungan ini,  $A$  adalah aktivitas lipase pada saat temperatur  $T$ ,  $A_0$  adalah aktivitas lipase saat temperatur acuan,  $\Delta E_h$  adalah energi aktivasi reaksi transesterifikasi,  $R$  adalah temperatur gas, dan  $T$  adalah temperatur proses transesterifikasi.



Gambar 6. Grafik hubungan antar konversi dengan waktu reaksi

Menurut Arrhenius, aktivitas lipase meningkat dengan kenaikan temperatur. Hal ini disebabkan pada temperatur terlalu rendah, minyak jarak pagar yang merupakan reaktan akan berada dalam fasa cair yang lebih kental, akibatnya reaksi transesterifikasi menjadi sulit. Selain itu, lipase memiliki keunikan karena mengkatalisis reaksi pada interface antara fasa minyak dan metanol. Bila fasa minyak berada dalam fasa cair yang lebih kental, luas interface antara fasa minyak dan fasa metanol menjadi kecil dan lipase akan lebih sulit mengkatalisis reaksi. Akan tetapi peningkatan temperatur lebih lanjut akan menyebabkan penurunan aktivitas katalitik lipase. Pada temperatur 55 °C, enzim mulai menunjukkan penurunan aktivitas dan menurun tajam pada temperatur 60 °C. Hal ini membuktikan bahwa persamaan Arrhenius ini dibatasi oleh peristiwa denaturasi enzim. Suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya kerusakan struktur enzim. Akibatnya enzim menjadi terdeaktivasi dan proses transesterifikasi menjadi terhambat.



Gambar 7 Hubungan antara Temperatur dengan konversi

### Pengujian Biodisel

Pengujian metil ester yang dilakukan meliputi density, viskositas, energy content, dan flash point tersaji pada Tabel 1 dan 2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat-sifat fisis maupun kimia metil ester yang terbentuk pada berbagai variabel memenuhi spesifikasi biodisel. Hal ini berarti bahwa metanolisis minyak jarak pagar menggunakan enzimatik berpotensi untuk diproduksi secara komersial. Namun demikian, kelayakannya masih perlu diteliti lebih lanjut, terutama untuk uji performa pada mesin disel dan telaah tentang data-data teknis dalam perancangan reaktor.

**Tabel 1. Sifat-sifat Metil Ester Pada Berbagai Variabel**

No.	Sifat-sifat	Metil Ester
1	Density	0,879 – 0,886
2	Viskositas	4,80 – 5,57
3	Titik Nyala	190 -197
4	Energy Content	9400 - 9600
5	Cetane Number	51 - 59

**Tabel 2. Perbandingan sifat-sifat antara biodisel dengan minyak solar**

No.	Sifat-sifat	Biodisel	Minyak Solar
1.	Kandungan energi (MJ/kg)	39.3	43.4
2.	Viskositas kinetik (mm <sup>2</sup> /sec)	3.8	1.3 - 4.1
3.	Angka setan	49	40 - 55

### Uji Performa Biodisel

Spesifikasi mesin yang digunakan pada uji performa adalah mesin disel KUBOTA model RD-85. Sistem injeksi bahan bakar langsung, mesin 4 langkah, 1 silinder, dan daya keluaran maksimum 4.5 kW pada 3400 rpm. Performa biodisel B10 dengan solar diperbandingkan pada bukaan nosel tetap pada rentang beban dari 1.5 kW sampai dengan 4.5 kW. Hasil pengukuran daya dan konsumsi bahan bakar terlihat pada Tabel 3.

### Pemodelan Teoritis

Kegiatan pemodelan diawali dengan menyusun proses kinetika reaksi enzimatik berdasarkan kajian teoritis dan berdasarkan pada banyak penelitian sebelumnya, yang dilakukan di Laboratorium Komputasi Proses Teknik Mesin Fakultas Teknik UNIMUS. Penyusunan model dilakukan berdasarkan teori kinetika Michaelis –Menten. Model yang dipostulasi, kemudian diturunkan untuk memperoleh persamaan yang nantinya akan diuji dengan menggunakan data yang diperoleh dari eksperimental.

**Tabel 3. Hasil pengukuran daya mesin dan konsumsi bahan bakar**

Beban (kW)	Solar		Biodisel B10	
	RPM	Konsumsi	RPM	Konsumsi
1.5	1500	456	1500	460.5
2	1700	584	1725	592
2.5	1950	695	2000	700
3	2225	801	2250	816
3.5	2400	927.5	2450	938
4	2800	1092	2900	1120
4.5	3400	1408.5	3500	1485

Model persamaan 2 dan 3 merupakan kinetika Michaelis –Menten. Model persamaan diferensial ordiner simultan ini diselesaikan dengan metoda Runge-Kutta menggunakan bahasa pemrograman **MATLAB**. Data -ds/dt diambil dari sampling tiap satuan waktu, dan  $K_m = f(T, n)$  serta  $V_m =$  konsentrasi awal enzim dan substrat.

$$\frac{-dS}{dt} = \frac{((V_m / K_m) + (V_p / K_p)) \cdot S - (V_p / K_p) \cdot S^0}{(1 + (1 / K_m - (1 / K_p)) \cdot S + (1 + K_p) \cdot S^0)} \dots\dots\dots 2$$

dimana  $V_m = k_{+2} \cdot E^0$   
 $V_p = k_{-1} \cdot E^0$

$$K_m = \frac{k_{-1} + k_{+2}}{k_{+1}}$$

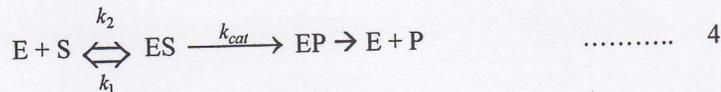
$$K_p = \frac{k_{-1} + k_{+2}}{k_{-2}}$$

pada kasus tertentu dimana  $K_{-2} = 0$ , maka persamaan 7 menjadi

$$\frac{-dS}{dt} = \frac{dP}{dt} = \frac{V_m \cdot S}{(K_m + S)} \dots\dots\dots 3$$

**Konsep Dasar Kinetika Enzim**

Reaksi enzim untuk satu substrat dapat digambarkan dengan persamaan :



Dimana S dan P adalah substrat dan produk, dengan E adalah enzim. Dalam suatu reaksi yang menggunakan bioreaktor tangki berpengaduk dimana *diffusional resistance* bukan sebagai penentu laju reaksi dan hanya ada satu reaktan atau banyak reaktan tetapi satu yang berlebih, maka laju reaksi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$r = \frac{k_2 E}{V} \frac{1}{1 + K/C + C/K_S} \dots\dots\dots 5$$

Dimana C = konsentrasi substrat, mol/L  
 E = jumlah enzim total, mol  
 $k_2$  = konstanta laju reaksi, detik<sup>-1</sup>  
 K,  $K_S$  = konstanta, mol/L  
 V = volume reaksi, L

Jika suku kanan dikalikan dengan C/C, maka akan dihasilkan persamaan sebagai berikut:

$$r = \frac{k_2 E}{V} \frac{C}{C K_S + K + C^2/K_S} \dots\dots\dots 6$$

Yang kemudian dikalikan dengan  $K_S$  dan substitusi dengan  $V_m = k_2 E/V$  dan  $V_m = k_2 E_0$ , maka:

$$r = \frac{k_2 E_0 C K_S}{K K_S + C K_S + C^2} \dots\dots\dots 7$$

Untuk kondisi dimana enzim yang digunakan adalah lipase yang telah diketahui harga K dan  $K_S$ , maka persamaan akhir menjadi :

$$-r = \frac{1,2 k_2 K_S [E_0][C]}{1 + (K_S + K_t)[C] + K_S K_t' [C]^2} \left[ \frac{W_f}{W} \right] \dots\dots\dots 8$$

Pada kondisi tertentu nilai konversi akan bervariasi, mulai dari konstan sepanjang waktu, meningkat, atau bahkan menurun seiring dengan lamanya waktu reaksi. Selain itu, semakin kecil delta pengambilan data maka akan semakin bagus data yang diperoleh.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akamatsu, Y. and Law, J.H., (1969), "The Enzymatic Synthesis of Fatty Acid Methyl Esters by Carboxyl Group Alkylolation," *Journal of Lipid Research (Abstract)*, September 2.
- Andi Nur alam Syah, 2006, *Biodiesel Jarak Pagar Bahan Bakar Alternatif yang Ramah Lingkungan*, Agromedia Pustaka.
- Caro, Y, P. Villeneuve, M. Pina, Max-Reynes dan J. Graille, 2000. *Investigation of Crude Latex from Carica papaya Varieties for Lipid Conversion*. JAOCS 77 (8) : 891 – 901.
- Cahyandari, D., Yulianto, M.E., dan Arifan, F., 2006, Produksi Biodisel Dari Minyak Jarak Pagar Melalui Proses Enzimatis, Laporan Penelitian RUD Balitbang Jateng.
- Cahyandari, D., Ikhsan, D., dan Ariwibowo, D., 2007, "Pengembangan Proses Enzimatis Untuk Produksi Biodisel Dari Minyak Jarak Pagar Dan Uji Performa Pada Mesin Diesel", Laporan Sementara Hibah Bersaing DIKTI.
- Ikhsan, D., Yulianto, M.E., dan Ariwibowo, D., 2006<sup>a</sup>, "Studi Awal Pembuatan Biodisel Secara Kontinyu dalam Bioreaktor *Packed Coloumn* dari Minyak Jarak Pagar", Laporan Penelitian UNDIP.
- Ikhsan, D., Yulianto, M.E., dan Ariwibowo, D., 2006<sup>b</sup>, "Studi Awal Pembuatan Biodisel Secara Kontinyu dalam Bioreaktor *Packed Coloumn* dari Minyak Jarak Pagar", Laporan Penelitian UNDIP.
- Investor Indonesia.Com, 2005, *PLN Akan Ganti Minyak Diesel Dengan Minyak Jarak*, Jakarta.
- Kazunori H., Eiji K., Hiroshi T., Koji T., Daizo M, 2001. *Combustion Characteristics of Diesel Engines with Waste Vegetable Oil Methyl Ester, The Fifth Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines*, July 14, Nagoya.
- Ketaren, S., 1986, *Minyak dan Lemak Pangan*, edisi 1, Penerbit Universitas Indonesia (UI Press).
- Nelson, L.A., T.A. Foglia dan W.N. Marmer, 1996. *Lipase-Catalyzed Production of Biodiesel*. JAOCS 73 (8) : 1191 – 1195.
- Othmer, K., 1992, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4<sup>th</sup> edition, Vol.10, John Wiley and Sons, New York.
- Timms, R.E., 1985, "Physical Properties of Oils and Mixtures of Oils", *Journal of the American Oil Chemical Society*, Vol. 62, no. 2, p.241-248.
- Watanabe, Y, Y. Shimada, A. Sugihara, H. Noda, H. Fukuda dan Y Tominaga, 2000. Continoues Production of Biodiesel Fuel from Vegetable Oil Using Immobilized *Candida antartica* Lipase. JAOCS 77 (3) : 355 – 360.
- Watanabe, Y, Y. Shimada, A. Sugihara dan Y Tominaga, 2001. Enzymatic Conversion of Waste Edible Oil to Biodiesel Fuel in a Fixed-Bed Bioreactor. JAOCS 78 (7) : 701 – 707.
- [www.greenfuels.org](http://www.greenfuels.org), (2002)
- [www.greenfuels.org/bioindex.html](http://www.greenfuels.org/bioindex.html); 05/11/2002
- [www.patentbaristas.com/archives/000376.php](http://www.patentbaristas.com/archives/000376.php)
- [www.iicindia.org/departments/](http://www.iicindia.org/departments/) [www.uidaho.edu/bioenergy/biodieselED/publication/01.pdf](http://www.uidaho.edu/bioenergy/biodieselED/publication/01.pdf)
- Y. Shimada, Y., Y. Watanabe, A. Sugihara, H. Noda, H. Fukuda dan Y. Tominaga, 1999. *Conversion of Vegetable oil Using Immobilized Candida antartica Lipase*. JAOCS 76 (7) : 789 – 793.
- Yulianto, M.E., Arifan, F., Paramita, V., 2005, Produksi Biodisel Dari Minyak Kelapa Secara Enzimatis, Laporan Penelitian P&K Jateng.
- Y. Zhang, M.A. Dube, D.D. McLean, M. Kates, 2003. Biodiesel Production from Waste Cooking Oil : 1. Process Design and Technological Assessment, *Bioresource Technology* 89 (2003) : 1 – 16.
- Y. Zhang, M.A. Dube, D.D. McLean, M. Kates, 2003. Biodiesel Production from Waste Cooking Oil : 2. Economic Assessment and Sensitivity Analysis, *Bioresource Technology* 90 (2003) : 229 – 240.