



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGGUNAAN MODEL PREDIKTIF *ANALYTICAL SEMI EMPIRICAL MODEL*  
(ASEM) UNTUK MEREPRESENTASIKAN PRODUK BAHAN BAKAR BIO DARI  
PERENKAHAN MINYAK NABATI**

**SKRIPSI**

**HILMAN HUTAMA**

**0806456612**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JANUARI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGGUNAAN MODEL PREDIKTIF *ANALYTICAL SEMI  
EMPIRICAL MODEL* (ASEM) UNTUK MEREPRESENTASIKAN  
PRODUK BAHAN BAKAR BIO DARI PERENKAHAN  
MINYAK NABATI**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**HILMAN HUTAMA**

**0806456612**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA**

**UNIVERSITAS INDONESIA**

**JANUARI 2012**

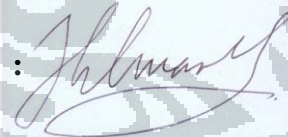
## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar**

**Nama : Hilman Utama**

**NPM : 0806456612**

**Tanda Tangan :**



**Tanggal : 17 Januari 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Hilman Utama  
NPM : 0806 456 612  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Penggunaan Model Prediktif *Analytical Semi Empirical Model* (ASEM) untuk Merepresentasikan Produk Bahan Bakar Bio Dari Perengkahan Minyak Nabati

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Indonesia**

### DEWAN PENGUJI

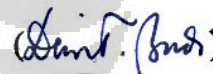
Pembimbing : Bambang Heru Susanto S.T., M.T



Penguji : Prof. Dr. Ir. Slamet, MT



Penguji : Ir. Dewi Tristantini, MT., PhD



Penguji : Ir. Abdul Wahid, MT



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 17 Januari 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi yang jauh dari kesempurnaan ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

(1) Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia

(2) Bapak Bambang Heru Susanto ST. MT. , selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini. Tak lupa dosen lain dan karyawan DTK yang senantiasa banyak membantu saya dalam menimba ilmu di kampus ini

(3) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral

(4) Teman-teman satu kontrakan Bagas, Fazza, Harsono, Afreza, Mada, Ikbal, Arifin, Habib, dan Sigit yang telah banyak memberi bantuan dan semangat. Semoga segera dipertemukan jodohnya

(5) Partner riset satu bimbingan, Fransiska, Lolyta, Cesar, Gerry, dan Rani semoga senantiasa sukses dan dimudahkan segala urusannya

(6) Teman-teman 2008, kakak senior (khususnya Bang Gorby yang membantu saya menggunakan simulasi) , adik junior, dan sahabat lainnya yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT tempat kembali segala urusan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu dan teknologi peradaban manusia.

Depok, Januari 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR  
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hilman Utama

NPM : 0806456612

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

PENGUNAAN MODEL PREDIKTIF *ANALYTICAL SEMI EMPIRICAL MODEL*  
(ASEM) UNTUK MEREPRESENTASIKAN PRODUK BAHAN BAKAR BIO  
DARI PERENKAHAN MINYAK NABATI

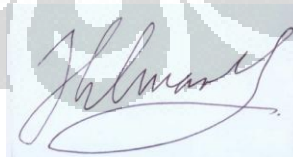
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 17 Januari 2012

Yang menyatakan



(Hilman Utama)

## ABSTRAK

Nama : Hilman Utama  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Penggunaan Model Prediktif *Analytical Semi Empirical Model* (ASEM) untuk Merepresentasikan Produk Bahan Bakar Bio dari Perengkahan Minyak Nabati

Pemanfaatan minyak nabati terus dikembangkan untuk mengatasi masalah energi di dunia. Bahan bakar bio memiliki keunggulan lebih ramah lingkungan dan menjaga ketersediaan minyak bumi. Penelitian ini melakukan studi penggunaan model prediktif *Analytical Semi Empirical Model* (ASEM) dalam merepresentasikan berbagai produk bahan bakar bio dari perengkahan minyak nabati. Penelitian ini bertujuan menentukan kondisi suhu optimum tiap produk melalui simulasi untuk menghasilkan bahan bakar bio yang ekonomis dan kualitas yang lebih baik. Representasi produksi bahan bakar bio menggunakan model prediktif berdasarkan reaksi secara perengkahan. Data eksperimen sekunder disimulasikan dengan MATLAB menggunakan metode *curve fitting*. Hasil simulasi didapatkan bahwa kondisi optimum untuk memproduksi bahan bakar bio adalah sekitar 400-450°C untuk perengkahan termal dan 325-375°C untuk perengkahan katalitik bergantung dari jenis minyak nabati dan produk yang diinginkan.

Kata Kunci :

ASEM, bahan bakar bio, *curve fitting*, perengkahan, simulasi

## ABSTRACT

Name : Hilman Hutama  
Study Program: Chemical Engineering  
Title : Using Predictive Model *Analytical Semi Empirical Model (ASEM)*  
to Representing Biofuel Product from Cracking of Vegetable Oil

Implementation vegetable oil has been developed persistently to solve world energy crisis. Biofuel's advantages are environmental friendly and maintain availability of petroleum. This research studies using the predictive *Analytical Semi Empirical Model (ASEM)* in representing various biofuel's products from cracking of vegetable oil. This research aims determining optimum temperature condition each products through simulation producing biofuel in higher economical and quality aspect. Representing production of biofuel based on cracking reaction. Experimental seconder data of vegetable oils are simulated using MATLAB with *curve fitting* method. Result of the simulation, optimum temperature conditions to produce biofuel are 400-450°C for thermal cracking and 325-375°C for catalytic cracking depend on raw material and desirable product

Key words :

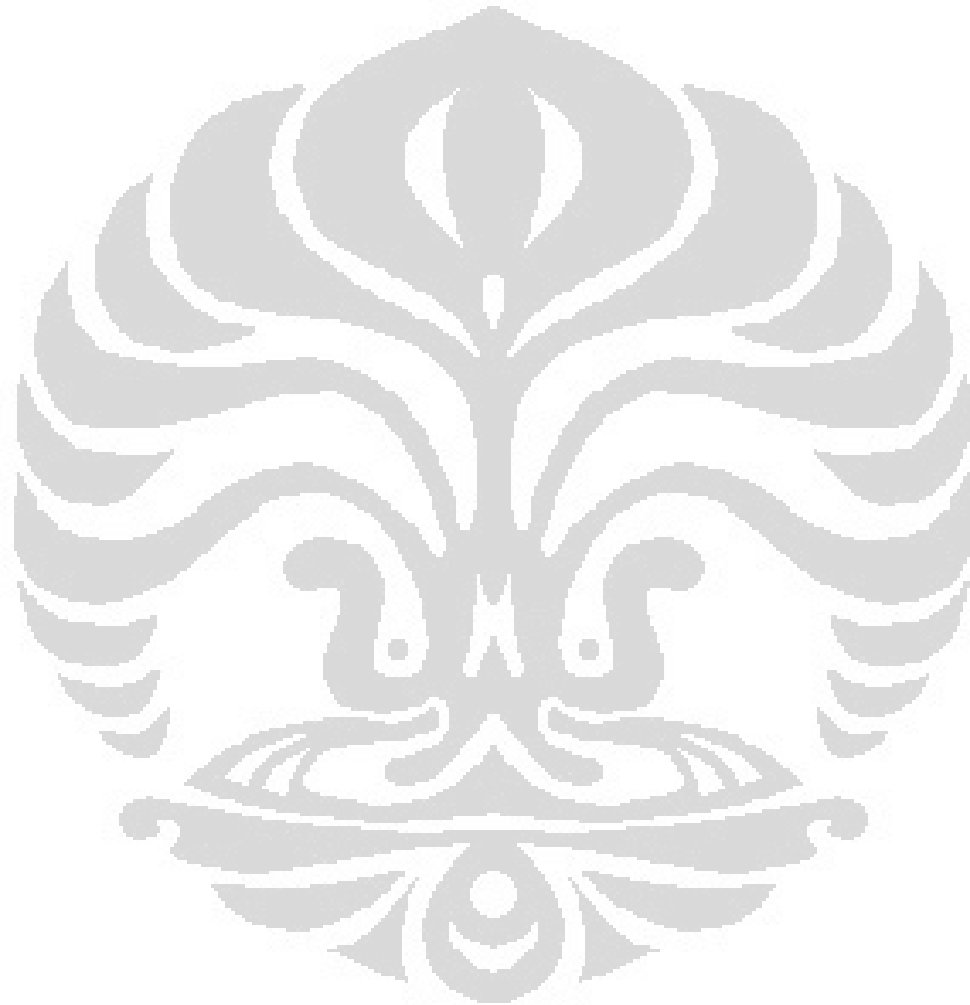
*ASEM*, biofuel, cracking, curve fitting, simulation



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
1.4 Batasan Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Bahan Bakar Nabati sebagai Energi Alternatif.....	5
2.2 Generasi Biodiesel .....	6
2.3 Sintesis Bahan Bakar Nabati Deoksigenat.....	8
2.3.1 Perengkahan Termal dan Pirolisis.....	9
2.3.2 Perengkahan Katalitik.....	11
2.3.3 Deoksigenasi Minyak Nabati.....	13
2.4 Model Prediktif dan Simulasi Model pada MATLAB.....	14
2.4.1 Model Logistik.....	15
2.4.2 Curve Fitting .....	17
2.4.3 Regresi Least-square .....	17
2.4.4 Regresi Linear .....	18
2.5 Teknik Validasi Statistik.....	21
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>23</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	23
3.2 Pengoperasian MATLAB .....	24
3.3 Tahap Uji Model Penelitian .....	27
3.3.1. Penentuan Variabel Operasi.....	27
3.3.2. Teknik Pengolahan Data.....	27
3.3.3. Teknik Penarikan Kesimpulan.....	28
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>29</b>
4.1 Tinjauan penurunan dan modifikasi model.....	29
4.2 Analisis hasil simulasi pada variasi suhu perengkahan termal .....	32
4.3 Analisis hasil simulasi pada variasi suhu perengkahan katalitik .....	37

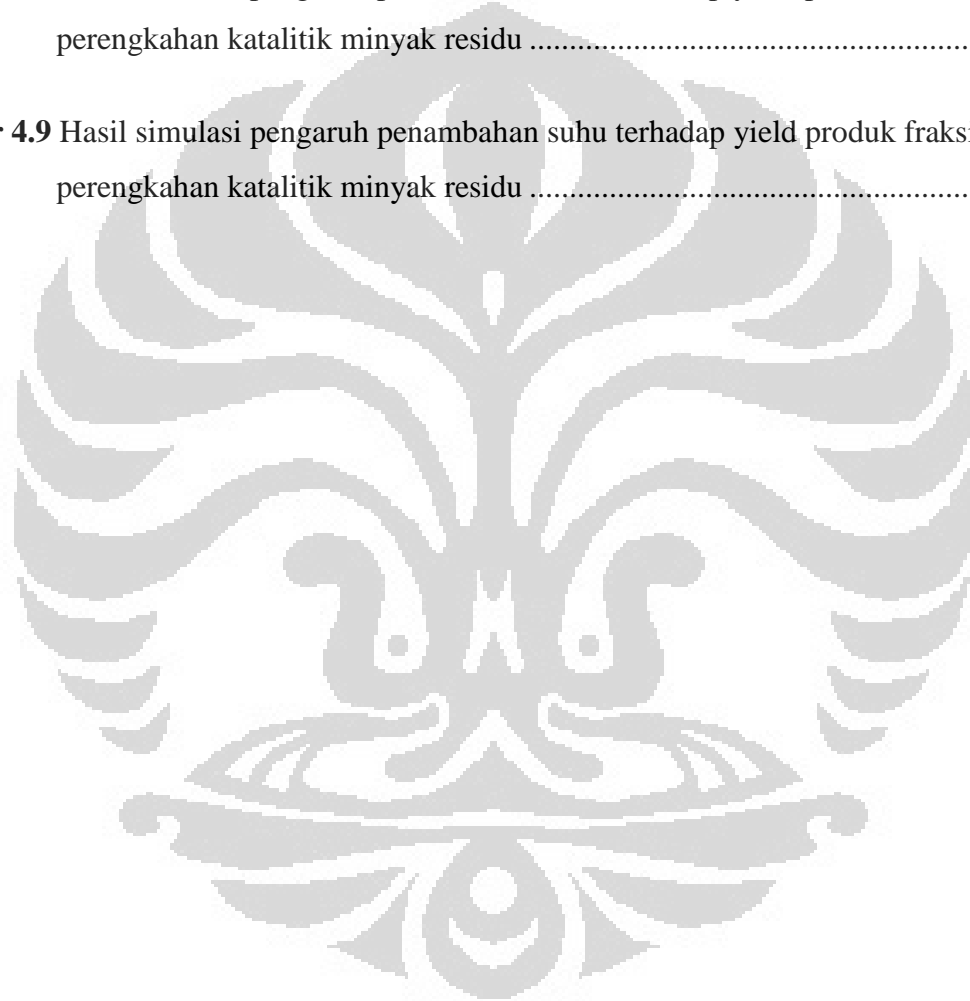
4.4 Hasil kondisi optimum tiap produk perengkahan minyak nabati .....	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	47
5.1 Kesimpulan .....	47
5.2 Saran .....	47
DAFTAR PUSTAKA .....	48
LAMPIRAN.....	51



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b> Potensi energi alternatif dari minyak nabati .....	5
<b>Gambar 2.2</b> Rute Proses untuk Mengkonversi Minyak Nabati menjadi <i>BioFuel</i> .....	8
<b>Gambar 2.3</b> Mekanisme awal perengkahan termal hidrokarbon.....	9
<b>Gambar 2.4</b> Mekanisme sederhana perengkahan katalitik.....	11
<b>Gambar 2.5</b> Grafik untuk fungsi logistik.....	16
<b>Gambar 2.6</b> Contoh curve fitting.....	18
<b>Gambar 2.7</b> Contoh kurva interpolasi linear .....	21
<b>Gambar 3.1.</b> Diagram alir penelitian .....	24
<b>Gambar 3.2</b> Diagram alir pengoperasian MATLAB .....	25
<b>Gambar 4.1</b> Ilustrasi Fungsi Learning dan Forgetting .....	31
<b>Gambar 4.2</b> Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan termal minyak canola .....	34
<b>Gambar 4.3</b> Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan termal minyak nabati.....	36
<b>Gambar 4.4</b> Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan termal minyak nabati.....	37
<b>Gambar 4.5</b> Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan katalitik fraksi olefin .....	39

<b>Gambar 4.6</b> Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan katalitik fraksi paraffin.....	39
<b>Gambar 4.7</b> Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan katalitik fraksi BTX .....	40
<b>Gambar 4.8</b> Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk fraksi olefin perengkahan katalitik minyak residu .....	41
<b>Gambar 4.9</b> Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk fraksi parrafin perengkahan katalitik minyak residu .....	41



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Perbandingan bahan bakar bio dengan bahan bakar lain .....	7
<b>Tabel 2.2.</b> Beberapa metode pirolisis dan variasi operasi serta produknya .....	10
<b>Tabel 4.1</b> Titik didih kandungan asam lemak minyak nabati .....	33
<b>Tabel 4.2</b> Parameter perengkahan termal minyak canola .....	33
<b>Tabel 4.3</b> Parameter perengkahan termal minyak nabati .....	35
<b>Tabel 4.4</b> Parameter perengkahan termal minyak nabati .....	37
<b>Tabel 4.5</b> Parameter perengkahan katalitik minyak canola.....	38
<b>Tabel 4.6</b> Parameter perengkahan katalitik minyak residu .....	41
<b>Tabel 4.7</b> Data termokimia perengkahan termal sekunder.....	45
<b>Tabel 4.8</b> Data simulasi secara keseluruhan.....	45
<b>Tabel 4.9</b> Suhu optimum untuk berbagai produk perengkahan minyak nabati.....	46

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Permintaan kebutuhan energi berupa bahan bakar minyak bumi tidak sebanding dengan jumlah ketersediaan sumber minyak tersebut yang semakin menurun. Pada tahun 2009, produksi minyak mentah Indonesia mencapai 826 ribu barel per hari sedangkan konsumsi BBM sebesar 1,187 juta barel per hari. Indonesia mengekspor rata-rata 250,4 ribu barel per hari sekaligus mengimpor 324,9 ribu barel per hari (OPEC, Annual Statistic Bulletin 2009). Konsumsi BBM yang cukup besar meliputi premium dan solar mendorong kita untuk terus mengembangkan pengganti energi konvensional menuju energi alternatif yang memiliki ketersediaan lebih besar. Salah satu energi alternatif yang masih terus dikembangkan saat ini adalah pemanfaatan minyak nabati dan biomassa. Potensi berbagai jenis minyak nabati cukup besar dimiliki Indonesia untuk dijadikan energi terbarukan berupa bahan bakar bio.

Minyak nabati dan biomassa dapat dijadikan sumber energi berupa bahan bakar karena mengandung senyawa trigliserida yang dapat diproses menjadi sebuah rantai hidrokarbon meyerupai senyawa pada minyak bumi hasil pengilangan. Pemanfaatan trigliserida selama ini diproses secara transesterifikasi oleh methanol dan bantuan katalis akan menghasilkan biodiesel dan gliserol. Namun, ada sejumlah kelemahan pada biodiesel yang dihasilkan saat ini. Kelemahannya antara lain biodiesel masih mengandung atom oksigen yang dapat menimbulkan korosi serta tidak dapat diaplikasikan ke mesin kendaraan standar melainkan perlu adanya modifikasi dan pengolahan limbah produk samping. Untuk mengatasi beberapa kelemahan tersebut, dikembangkan teknologi baru untuk menghasilkan bahan bakar bio yang lebih baik.

Bahan bakar bio selanjutnya didapatkan dengan menggunakan proses perengkahan. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk memproduksi bahan bakar bio dengan beberapa proses yang ada. Proses dan teknologi cukup beragam antara lain perengkahan termal, pirolisis tanpa oksigen, dan perengkahan secara katalitik.

Penelitian dilakukan di Departemen Teknik Kimia UI (Rohmah *et al.*, 2008) mengkonversi jarak pagar menjadi bahan bakar bio setara solar dengan pirolisis, namun produk yang dihasilkan masih bersifat viskos. Penelitian tersebut dilakukan pada variasi suhu 300-375°C dengan yield produk masih didominasi C<sub>16</sub>-C<sub>18</sub> yang mengindikasikan belum terjadi perengkahan secara efektif.

Beberapa tahun ini telah dikembangkan model *Analytical Semi Empirical Model* (ASEM) untuk diterapkan pada pencairan batubara, pirolisis hasil distilat minyak bumi serta perengkahan biomassa (Green *et al.*, 2006). Model ini akan digunakan pada penelitian kali ini untuk diterapkan pada optimalisasi perengkahan minyak nabati secara termal dan katalitik. Optimalisasi dapat dilakukan baik dari bahan baku maupun kondisi proses yang ada. Sehingga untuk mengetahui hal tersebut lebih efisien dan mudah, kita melakukan simulasi dengan optimalisasi model. Hal ini bertujuan untuk mengetahui kondisi suhu optimum proses serta bagaimana produk akhir dalam pembuatan bahan bakar bio dari minyak nabati. Metode empiris yang digunakan adalah berupa *curve fitting* pada data eksperimen beberapa proses yang menghasilkan produk bahan bakar bio, seperti perengkahan termal, pirolisis, dan perengkahan katalitik.

## 1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah

- a) Bagaimana menggunakan model prediktif ASEM menggunakan bantuan *software* MATLAB dari hasil eksperimen yang sudah ada, yang dapat digunakan untuk merepresentasikan produk bahan bakar bio dari minyak nabati dan bersifat umum
- b) Bagaimana untuk mengetahui dan mendapatkan kondisi suhu operasi yang optimum tiap produk dari hasil representasi model tersebut

### 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- a) Membuktikan model prediktif ASEM yang dapat digunakan untuk merepresentasikan berbagai produk bahan bakar bio dari perengkahan minyak nabati
- b) Mendapatkan dan mengetahui kondisi suhu optimum berbagai produk bahan bakar bio dari perengkahan minyak nabati sesuai model prediktif yang digunakan

### 1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat secara umum yakni ke depannya bahan bakar bio dapat diproduksi secara massal, dalam kondisi optimum, dan ekonomis dengan bantuan model yang telah dibuat, sehingga secara global dapat mengurangi emisi gas buang serta menjaga ketersediaan minyak bumi. Dalam lingkup nasional, penelitian ini diharapkan dapat mewujudkan upaya ketahanan energi nasional. Hal ini dikarenakan jika bahan bakar bio mampu diproduksi dan dipasarkan secara efektif dapat memberikan dampak signifikan, mengingat potensi sumber minyak nabati di Indonesia yang cukup besar.

### 1.4 Batasan Penelitian

Penelitian ini dibatasi dengan beberapa hal, yakni:

- a) Data yang digunakan adalah data sekunder yang didapatkan dari beberapa eksperimen dan jurnal mengenai proses dan teknologi yang menghasilkan bahan bakar bio dari minyak nabati.
- b) Proses pembuatan bahan bakar bio yang menjadi studi dalam penelitian ini berupa reaksi pirolisis, perengkahan termal, dan perengkahan katalitik.
- c) Perangkat lunak yang digunakan dalam curve fitting data eksperimen adalah MATLAB.



- d) Variabel proses yang dioptimalkan adalah suhu operasi dalam menghasilkan bahan bakar bio.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan makalah ini adalah sebagai berikut:

### BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang penelitian dan penulisan, rumusan masalah yang dibahas, tujuan dan manfaat dilakukannya penelitian, batasan-batasan masalah, serta sistematika penulisan.

### BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka yang dijadikan dasar penelitian. Meliputi penjelasan mengenai pengertian, sifat, beberapa minyak nabati, bahan bakar bio, dan metode pemodelan empiris berupa *curve fitting*.

### BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Membahas mengenai prosedur penelitian, diagram alir penelitian, variabel-variabel yang terlibat dan digunakan pada penelitian ini, serta penjelasan tahapan uji model penelitian.

### BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

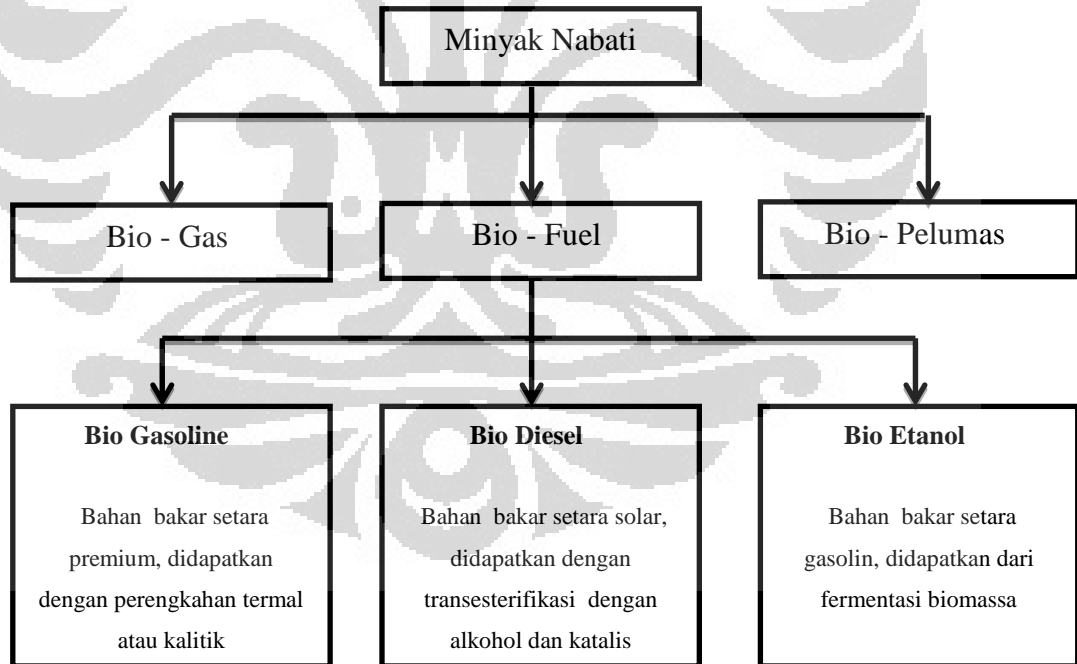
Membahas tentang asal muasal ASEM, hasil penggunaan model, beserta dengan analisis kondisi optimum produk yang akan dicapai

### BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Bahan Bakar Nabati sebagai Energi Alternatif

Bahan bakar nabati merupakan salah satu alternatif bahan bakar yang dapat digunakan di Indonesia sebagai pengganti bahan bakar konvensional (petroleum), yang terbuat dari minyak nabati atau dari biomassa. Jenis bahan bakar nabati yang dapat digunakan juga terdiri dari berbagai macam, diantaranya biodiesel, bioetanol, *bio-gasoline*, dan lain-lain. Selain bahan bakar, minyak nabati juga dapat diolah untuk digunakan sebagai pelumas dan gemuk. Tumbuhan yang biasa digunakan sebagai bahan dasar bahan bakar nabati diantaranya adalah kelapa sawit, jagung, kedelai, jarak pagar, dan sebagainya. Gambar 2.1 memperlihatkan potensi pemanfaatan minyak nabati sebagai alternatif pemenuhan kebutuhan energi beserta klasifikasi dan pemanfaatannya.



**Gambar 2.1.** Potensi energi alternatif dari minyak nabati( Demirbas, 2007)

Dengan mengacu pada Inpres No. 1/2006 tentang Penyediaan dan Pemanfaatan Bahan Bakar Nabati (*bio-fuel*) dan Perpres No. 5/2006 tentang Kebijakan Energi Nasional, maka pengembangan bio-energi diletakkan dalam upaya percepatan mendapatkan alternatif solusi krisis penyediaan bahan bakar yang selama ini bersumberkan dari minyak mineral. Bahan bakar nabati bersifat terbarukan, *biodegradable*, ramah lingkungan, mudah didapat serta ekonomis, karenanya memiliki nilai tambah dan nilai guna yang besar. Saat ini, telah banyak bahan nabati yang telah di konversi untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

## 2.2 Generasi Biodiesel

Bio diesel adalah termasuk salah satu golongan dari bahan bakar bio yang digunakan sebagai pengganti solar. Bahan bakar bio/bio-fuel adalah jenis bahan bakar terbarukan yang berasal dari bahan baku organik seperti minyak nabati, biomassa, atau lemak hewani. Bahan bakar bio memiliki jenis seperti bioetanol (setara dengan gasoline), biodiesel (setara dengan diesel/solar) yang memiliki bentuk cair, atau biogas dan hidrogen yang memiliki bentuk gas (Demirbas, 2008).

Bio-fuel biasa digunakan sebagai pengganti bahan bakar kendaraan, yang dapat digunakan secara murni (100%) atau sebagai campuran bahan bakar konvensional. Perbedaan terbesar antara bahan bakar bio dengan bahan bakar konvensional adalah kandungan oksigennya, dimana biofuel memiliki kandungan oksigen pada kisaran 10-45%, sedangkan bahan bakar konvensional tidak memiliki kandungan oksigen (Maher, 2007). Selain oksigen, kandungan lain yang berbeda dari kedua jenis bahan bakar tersebut adalah kandungan sulfur dan nitrogen yang terdapat pada bahan bakar konvensional. Jenis dari bahan bakar bio cair yang saat ini telah diproduksi dan digunakan diantaranya adalah biogasolin, biodiesel dan bioetanol.

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang digunakan untuk mesin berbahan bakar diesel/solar. Biodiesel dapat diperoleh dari minyak nabati dan lemak hewani. Bahan baku dapat berasal dari kelapa sawit, jarak pagar, kedelai dan kelapa.

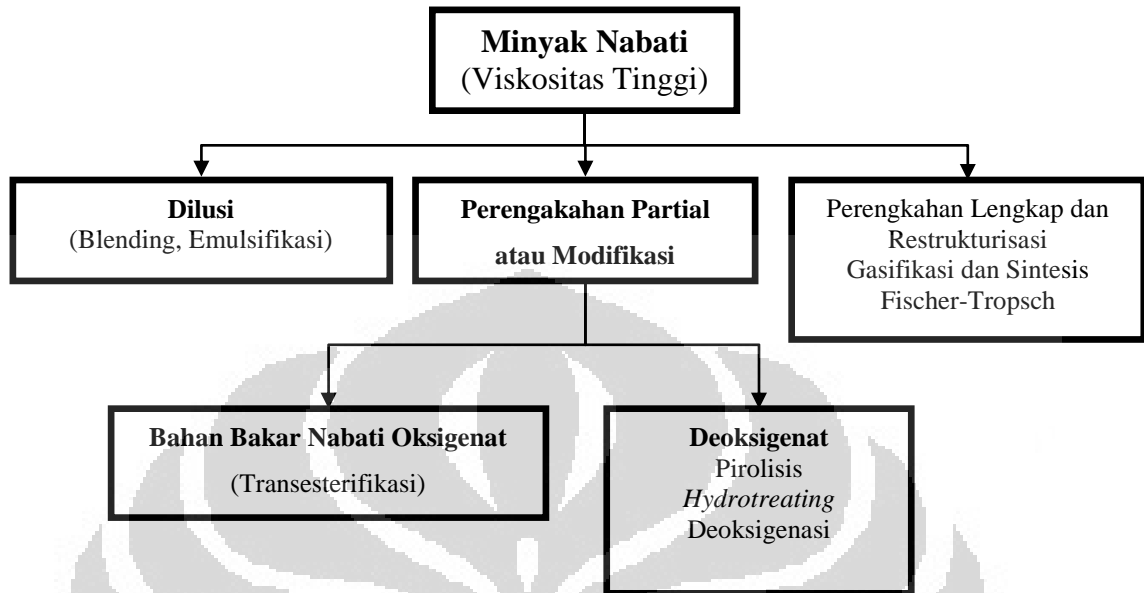
Biodiesel dapat dihasilkan melalui proses transesterifikasi minyak atau biomassa dengan alkohol dan menghasilkan metil ester yang setara dengan bahan bakar diesel (Maher, 2007). Selain transesterifikasi, biodiesel juga dapat dihasilkan melalui perengkahan termal atau katalitik. Dalam pemanfaatannya biodiesel dicampur dengan minyak solar dengan perbandingan tertentu.

Bio diesel yang selama ini masih memiliki kelemahan dalam tingginya kandungan oksigen serta faktor kompatibilitas mesin, mulai digantikan oleh generasi berikutnya yang lebih baik bernama *green diesel*. *Green diesel* disebut juga generasi kedua dari bio diesel. Faktor dasar yang membedakan bio diesel dan *green diesel* adalah kandungan oksigennya. Trigliserida dapat direkayasa dan diproses sehingga menjadi paraffin atau rantai hidrokarbon panjang menyerupai struktur solar dari minyak bumi. Reaksi pada produk juga menghasilkan naptha dan propane sebagai hasil sampingan *bahan bakar bio*. Keunggulan *green diesel* antara lain memiliki angka setan yang tinggi dan propertis yang ideal bagi suatu bahan bakar, selain itu *bahan bakar bio* dapat dicampur langsung dengan kilang diesel konvensional minyak bumi serta mesin diesel yang ada. Secara lebih jelas dipaparkan pada Tabel 2.1. Kualitas *green diesel* yang optimal adalah ketika minyak nabati dideoksigenasi dengan hidrogen.

**Tabel 2.1.** Perbandingan bahan bakar bio dengan bahan bakar lain (Kalnes *et al*, 2007)

	<b>Petroleum</b>	<b>Biodiesel</b>	<b>Green Diesel</b>
% Oxygen	0	11	0
Sulfur, ppm	<10	<1	<1
Cetane	40	50-65	70-90
Cloud Point, °C	-5	-5 to 15	-10 to 20
Distillation, °C	200-350	340-335	265-320
Stability	Good	Marginal	Good

### 2.3 Sintesis Bahan Bakar Nabati Deoksigenat



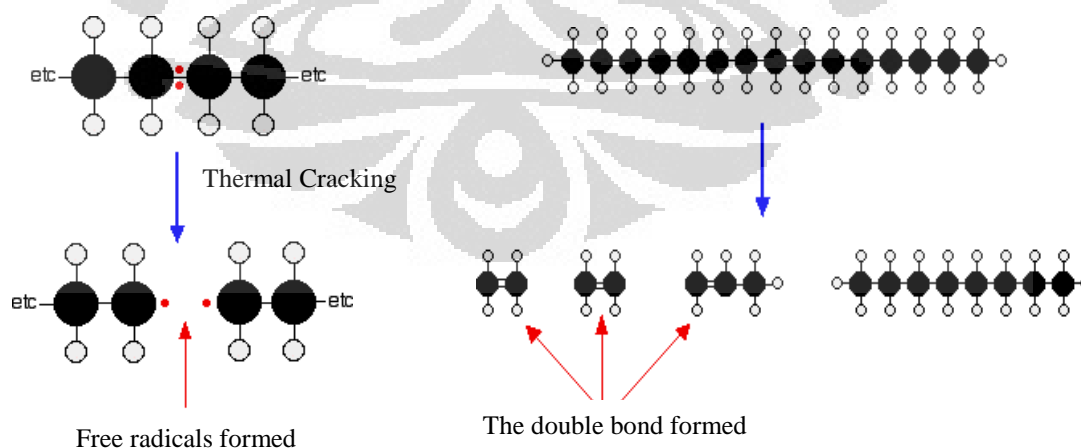
**Gambar 2.2** Rute Proses untuk Mengkonversi Minyak Nabati menjadi Bahan Bakar Nabati

Proses dan teknologi dalam menghasilkan diesel dari minyak nabati yang telah dilakukan secara umum terlihat dari Gambar 2.2, menggunakan rute pemrosesan minyak nabati dengan perengkahan partial atau modifikasi serta digunakan jenis deoksigenat. Tujuan dari rute proses ini adalah pemotongan selektif C-C dari karbon karbonil dan mendekati alfa-karbon didalam molekul trigliserida. Rute ini adalah rute langsung ke rantai hidrokarbon dari komponen lemak dari trigliserida. Oleh karena itu, rute ini sangat ideal dan juga terpendek untuk menghasilkan bahan bakar nabati yang mendekati sifat dari bahan bakar solar mineral. Namun demikian, rute ini masih mengalami kendala dalam proses selektifitasnya dan keekonomiannya. Proses produksi bahan bakar nabati terdeoksigenat dari minyak nabati umumnya melalui perengkahan termal/pirolisis atau katalitik, selain itu proses *hydrotreating* dan deoksigenasi terus mendapatkan perhatian dari para peneliti.

### 2.3.1 Perengkahan Termal dan Pirolisis

Perengkahan merupakan proses pemecahan molekul organik kompleks atau hidrokarbon berantai panjang menjadi molekul yang lebih pendek dengan memutus ikatan karbon-karbon. Reaksi perengkahan tidak terjadi secara selektif, artinya reaksi pemutusan rantai hidrokarbon terjadi secara acak dan menghasilkan campuran berbagai senyawa hidrokarbon yang lebih kecil serta dapat pula membentuk ikatan rangkap karbon. Pirolisis adalah proses penguraian bahan organik dengan menggunakan panas (*pyro*) tanpa adanya kehadiran oksigen. Penguraian tersebut mengakibatkan lepasnya energi yang terkandung dan zat-zat kimia didalamnya, yang memungkinkan ekstraksi energi dan zat-zat kimia pada biomassa. Produk yang dapat dihasilkan dari proses pirolisis dapat berupa arang, gas dan minyak seperti pada Gambar 2.3 (Wampler, 2007),

Pada pirolisis/perengkahan termal, reaksi terjadi secara acak, tidak ada suatu molekul hidrokarbon yang terengkah menurut satu mekanisme reaksi yang pasti. Molekul dapat terengkah di berbagai tempat tergantung pada jenis molekul hidrokarbon dan kondisi operasi. Reaksi perengkahan termal bila dilihat dari disosiasi ikatan, merupakan pemisahan homolitik yaitu setiap atom yang turut dalam ikatan kovalen akan menerima satu elektron dari pasangan, sehingga terbentuk radikal bebas



**Gambar 2.3** Mekanisme awal perengkahan termal hidrokarbon (Clark, 2003)

Pada pirolisis terdapat beberapa tingkatan proses, yaitu pirolisis primer dan pirolisis sekunder. Pirolisis primer adalah pirolisis yang terjadi pada bahan baku (umpan), sedangkan pirolisis sekunder adalah pirolisis yang terjadi atas partikel dan gas/uap hasil pirolisis primer. Penting diingat bahwa pirolisis adalah penguraian karena panas, sehingga keberadaan oksigen ( $O_2$ ) dihindari pada proses tersebut karena akan memicu reaksi pembakaran. Bahan baku untuk proses pirolisis dapat berupa minyak nabati, lemak hewani dan bagian dari tumbuhan seperti kayu, daun dsb. Teknologi pirolisis saat ini telah banyak ditemukan, dengan perlakuan dan produk yang berbeda-beda, seperti yang tertulis pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2.** Beberapa metode pirolisis dan variasi operasi serta produknya (Demirbas, 2005)

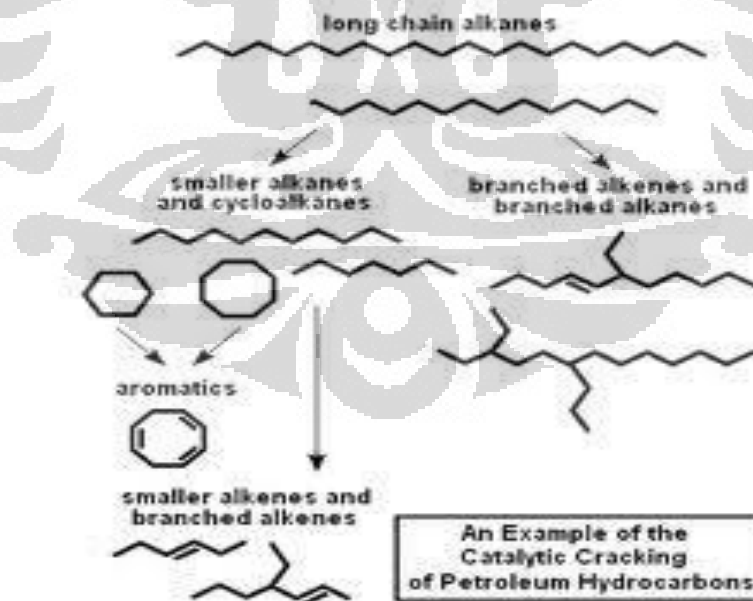
<b>Teknologi</b>	<b>Residence Time</b>	<b>Laju pemanasan</b>	<b>Suhu (<math>^{\circ}C</math>)</b>	<b>Produk</b>
Konvensional	5-30 menit	Rendah	600	Minyak, gas, arang
Pirolisis cepat	0,5-5 detik	Sangat tinggi	650	Minyak bio
<i>Flash-cair</i>	$q < 1$ detik	Tinggi	$< 650$	Minyak bio
<i>Flash-gas</i>	$< 1$ detik	Tinggi	$< 650$	Bahan kimia, gas
Ultra pirolisis	$< 0,5$ detik	Sangat tinggi	1000	Bahan kimia, gas
Vakum pirolisis	2-30 detik	Sedang	400	Minyak bio
Hidro pirolisis	$< 10$ detik	Tinggi	$< 500$	Minyak bio
Metano-pirolisis	$< 10$ detik	Tinggi	$> 700$	Bahan kimia

Penentuan kualitas hasil perengkahan reaktan seperti minyak nabati dapat ditentukan dengan menghitung nilai yield produk perengkahan dan konversi. Yield merupakan perbandingan massa salah satu spesi produk dengan massa reaktan, sedangkan konversi merupakan perbandingan massa produk bersih (tanpa residual atau sisa minyak yang tidak terengkah) dengan massa reaktan.

### 2.3.2 Perengkahan Katalitik

Reaksi katalitik atau disebut juga katalisis merupakan reaksi yang melibatkan katalis didalamnya untuk menurunkan energi aktivasi dan meningkatkan laju reaksi perengkahan. Reaksi perengkahan katalitik berlangsung melalui pembentukan suatu karbokation, hidrokarbon akan terprotonasi oleh hadirnya asam Bronsted/Lewis yang terdapat pada katalis. Struktur karbokation adalah struktur yang tidak stabil, oleh karena itu akan terjadi pemutusan rantai hidrokarbon menjadi rantai yang lebih pendek seperti pada Gambar 2.4.

Reaksi perengkahan katalitik terjadi melalui 3 langkah, yaitu: inisiasi, propagasi dan terminasi. Langkah inisiasi direpresentasikan sebagai tahap penyerangan terhadap sisi aktif katalis oleh molekul reaktan menghasilkan suatu karbokation. Langkah propagasi merupakan suatu tahap terjadinya perpindahan ion hibrida dari molekul reaktan menuju karbokation yang teradsorb. Langkah terminasi terjadi apabila karbokation yang teradsorb berubah membentuk suatu olefin dengan meninggalkan ion  $H^+$  untuk memulihkan sisi aktif katalis (Smith *et al.*, 2007).



**Gambar 2.4** Mekanisme sederhana perengkahan katalitik (Clark, 2003)



Berikut ini adalah kemungkinan posisi terjadinya pemutusan rantai hidrokarbon pada molekul trigliserida yang terdapat dalam minyak nabati, yaitu:

1. pemutusan rantai karbon pada rantai utama trigliserida
2. pemutusan pada ikatan rangkap hidrokarbon
3. pemutusan pada ikatan tunggal hidrokarbon

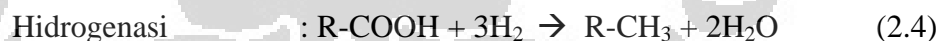
### **2.3.2.1 Katalis**

Katalis adalah suatu bahan kimia yang dapat meningkatkan laju suatu reaksi tanpa bahan tersebut menjadi ikut terpakai, dan setelah reaksi berakhir, bahan tersebut tetap dalam bentuk awal tanpa terjadi perubahan kimia. Penggunaan katalis dapat menurunkan tingkat aktivasi energi yang dibutuhkan, membuat reaksi terjadi lebih cepat atau pada suhu yang lebih rendah. Penggunaan katalis tidak mempengaruhi sifat kimia atau termodinamik dari produk yang dihasilkan. Berdasarkan cara reaksinya, katalis dapat dibagi menjadi dua tipe, homogen dan heterogen. Pada reaksi homogen, katalis memiliki fasa yang sama dengan reaktannya.

Katalis homogen umumnya bereaksi dengan satu atau lebih pereaksi untuk membentuk suatu perantara kimia yang selanjutnya bereaksi membentuk produk akhir reaksi, dalam suatu proses yang memulihkan katalisnya. Dalam reaksi heterogen, katalis memiliki fasa yang berbeda dengan reaktan (bahan yang bereaksi). Pada reaksi heterogen, pertama-tama reaktan akan teradsorp pada permukaan aktif katalis, selanjutnya akan terjadi interaksi baik berupa reaksi sebenarnya pada permukaan katalis, atau terjadi pelemahan ikatan dari molekul yang terjerap. Setelah reaksi terjadi, molekul hasil reaksi (produk) dilepas dari permukaan katalis. Oleh karena itu, katalis yang baik perlu memiliki kemampuan menjerap dan melepaskan yang baik (Satterfield, 1991).

### 2.3.3 Deoksigenasi Minyak Nabati

Khusus untuk proses deoksigenasi trigliserida selektif, dalam rentang beberapa tahun terakhir telah menjadi perhatian para peneliti di dunia. Metode ini menarik secara ekonomi karena tidak memerlukan tambahan masukan seperti alkohol (seperti metanol ataupun etanol) serta pemurnian yang lebih mudah dan sederhana. Proses deoksigenasi ini merupakan reaksi untuk sintesis hidrokarbon rantai lurus. Seperti diperlihatkan pada persamaan reaksi yang ada, asam lemak dapat secara langsung didekarboksilasi atau didekarbonilasi. Dekarboksilasi langsung adalah proses memindahkan gugus karboksil dengan melepaskan karbon dioksida dan hidrokarbon parafin, sedangkan dekarbonilasi langsung membentuk hidrokarbon olefin melalui pembentukan karbon monoksida dan air. Asam lemak juga dapat dideoksigenasi dengan menambahkan hidrogen, melalui hidrogenasi langsung atau dekarboksilasi tidak langsung (Boyas *et al.*, 2008).



Rute ini adalah rute langsung ke rantai hidrokarbon dari komponen lemak dari trigliserida. Oleh karena itu, rute ini sangat ideal dan juga terpendek untuk menghasilkan bahan bakar nabati yang mendekati sifat dari bahan bakar diesel mineral. Untuk menunjang proses deoksigenasi ini diperlukan adanya katalis, seperti katalis heterogen, yang memiliki sifat aktifitas katalitik sebagai berikut:

1. Aktifitas pemotongan C-O tinggi (deoksigenasi)
2. Aktifitas pemotongan C-C rendah, dengan kata lain aktifitas perengkahan adalah menengah untuk mendapatkan selektivitas tinggi pada rentang C<sub>8</sub>-C<sub>16</sub>.

3. Aktifitas aromatisasi menengah mungkin juga dipertimbangkan untuk isomerisasi minyak nabati yang memiliki nilai bilangan iodin tinggi untuk mendapatkan bahan bakar nabati yang cocok untuk mesin jet.

Selain itu untuk dapat memberikan konversi tinggi dan distribusi produk dari trigliserida yang setara dengan rentang produk hidrokarbon solar, maka katalis yang akan dibuat harus memperhatikan fungsi dari jenis katalis (kekristalan, ukuran pori, distribusi, keasaman dan jenis penyangga) dan suhu reaksi. Untuk itu pendekatan teknologi pembuatan katalis dalam skala nano menjadi fokus untuk dapat diterapkan dalam penelitian ini. Adapun pilihan bentuk katalisnya dapat berupa inti aktif nanopartikel yang tersanggakan.

#### **2.4 Model Prediktif dan Simulasi Model pada MATLAB**

Model adalah suatu representasi yang memadai dari suatu sistem. Pengertian sistem sendiri ialah himpunan elemen-elemen yang saling berinteraksi untuk mencapai tujuan tertentu dan meliputi berbagai komponen. Model juga disebut sebagai minatur yang mencerminkan karakteristik yang dipilih dari sistem tersebut. Model juga dibuat untuk membantu melakukan penyederhanaan dari sistem yang akan dipelajari. Klasifikasi model cukup beragam dan yang akan dibahas di sini ialah tentang model prediktif.

Model prediktif adalah klasifikasi model berdasarkan fungsinya. Model prediktif menghubungkan variabel terikat dan bebas untuk meramalkan hasil dari kondisi tertentu. Dengan model prediktif juga dapat memungkinkan melakukan suatu percobaan atau simulasi dengan pertanyaan “jika” dan pilihan lain yang diinginkan. Simulasi sendiri adalah suatu model pengambilan keputusan dengan mencontoh atau mempergunakan gambaran sebenarnya dari suatu sistem kehidupan nyata, tanpa harus mengalami keadaan yang sesungguhnya.

Dalam pembuatan dan modifikasi model prediktif serta pengujian dengan simulasi pada penelitian kali ini menggunakan bantuan komputer dan software

MATLAB. Pemakaian komputer dalam melakukan simulasi agar kita dapat memperkirakan representasi produksi bahan bakar bio yang lebih cepat, ekonomis, dan efisien. Berikut dijelaskan teori-teori dasar yang berkaitan dengan pengujian dan modifikasi model yang sudah ada.

### 2.4.1 Model Logistik

Pengertian Model logistik adalah salah satu model matematis yang dikembangkan untuk pertumbuhan suatu populasi oleh ahli matematika Pierre Verhulst pada tahun 1845. Model laju pertumbuhan suatu populasi juga dikembangkan oleh Malthus dan Leslie. Namun untuk aplikasi dalam memodelkan prediksi suatu produk dari reaksi kimia model logistik Verhulst lebih tepat digunakan, karena asumsi yang dipakai pada model ini adalah laju pertumbuhan (perubahan) populasi sebanding dengan besarnya populasi pada saat itu dan juga populasi akan mencapai batas.

Model logistik ini kontinu terhadap waktu dan digambarkan dengan persamaan diferensial,

$$\frac{dN}{dt} = \frac{r N (k - N)}{K} \quad (2.5)$$

dengan :

$N$  = jumlah populasi

$r$  = parameter *Malthusian* (laju dari perkembangan populasi maksimum)

$K$  = daya dukung (misalnya populasi maksimum yang berkelanjutan)

membagi kedua sisi dengan  $K$  dan mendefinisikan  $x = N / k$ , maka didapatkan persamaan diferensial

$$\frac{dx}{dt} = rx(1 - x)$$

(2.6)

yang dikenal dengan persamaan logistik dan memiliki solusi

$$x(t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{x_0} - 1\right)e^{-rt}}$$

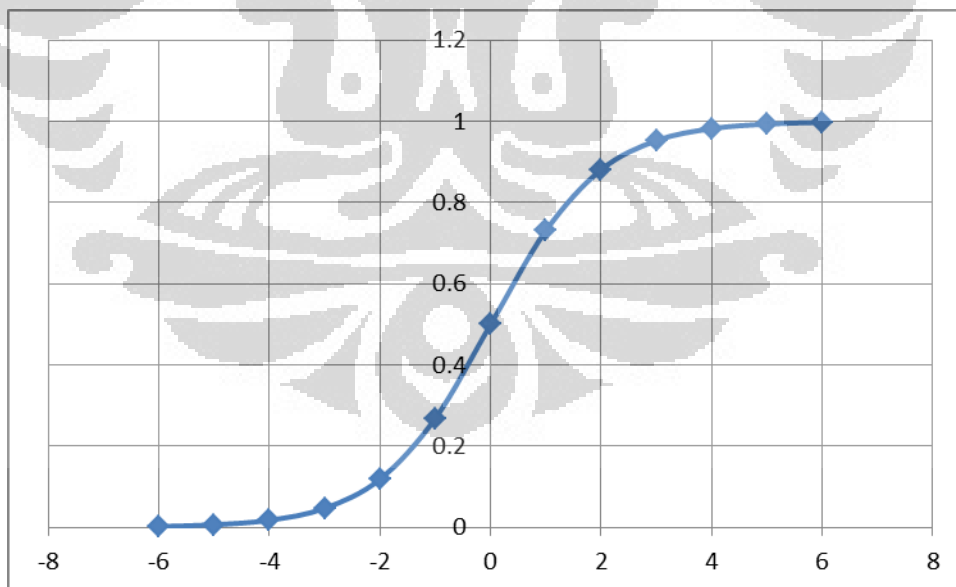
(2.7)

Fungsi  $x(t)$  juga dikenal dengan fungsi *sigmoid*. Fungsi ini juga dengan kurva sigmoidal (Seggern, 2007) atau fungsi logistik yang lebih sederhana, yakni

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

(2.8)

Jika diberikan contoh nilai  $x = -6$  sampai  $x = 6$ , maka representasi grafik fungsi logistik ditunjukkan oleh Gambar 2.5



**Gambar 2.5** Grafik untuk fungsi logistik

Aplikasi fungsi logistik sendiri cukup luas. Di bidang ekologi untuk memodelkan pertumbuhan suatu populasi, hingga bidang kedokteran untuk memprediksi laju pertumbuhan tumor suatu penyakit, dan juga diaplikasikan dalam pemodelan sistem dinamik (Weisstein, 2008).

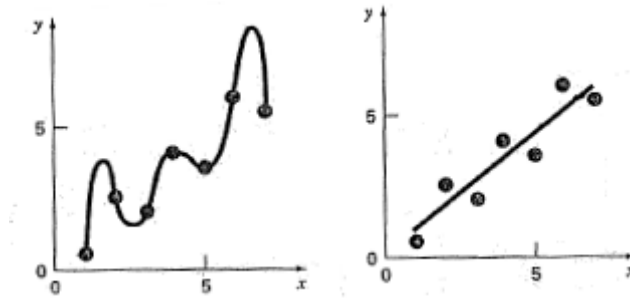
### 2.4.2 Curve Fitting

*Curve fitting* merupakan proses pembentukan suatu kurva atau grafik fungsi matematis yang memiliki kecocokan terhadap sejumlah titik data dan menghasilkan grafik yang mewakili data dengan persamaan beserta batasannya (parameter) (Chapra *et al.*, 2006). *Curve fitting* sangat erat kaitannya dengan interpolasi dan ekstrapolasi, karena dari hasil *curve fitting* dapat diprediksi nilai dari suatu data yang berada di dalam atau di luar rentang data, sesuai persamaan yang dihasilkan. *Curve fitting* sangat banyak digunakan dalam aplikasi keteknikan seperti untuk analisis kecenderungan data atau uji hipotesis terhadap data yang telah diukur, juga dapat digunakan untuk mengukur laju perubahan suatu data.

Terdapat dua pendekatan umum dalam *curve fitting* yang dapat dibedakan dari jumlah error yang dikaitkan dengan data (Chapra *et al.*, 2006). Pendekatan pertama adalah kondisi dimana data menunjukkan tingkat error yang signifikan (*noise*), kemudian dibuat kurva tunggal yang dapat merepresentasikan kecenderungan data tersebut, tetapi tidak perlu memotong seluruh data. Pendekatan ini disebut regresi least-square. Kondisi kedua adalah dimana data yang ada memiliki pola yang teratur sehingga dapat dibuat kurva yang dapat memotong tepat diseluruh titik data. Dari hasil fitting, dapat diestimasi nilai antara dua titik data yang digunakan. Pendekatan yang kedua ini disebut interpolasi.

### 2.4.3 Regresi Least-square

Regresi least-square merupakan metode pembentukan kurva dengan metode kuadrat error residual terkecil yang digunakan dalam pengolahan datanya. Metode least-square merupakan metode termudah dalam fitting dan paling sering digunakan seperti pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.6** Contoh curve fitting, kiri: interpolasi polynomial; kanan: least-square linear (Chapra *et al.*, 2006).

Dalam regresi, tingkat penyimpangan memegang peranan penting dalam pembentukan kurva. Regresi dilakukan pada kumpulan data yang memiliki tingkat error yang cukup signifikan sehingga kurva yang terbentuk tidak dapat memotong seluruh titik data. Dari gambar diatas terlihat bahwa dengan interpolasi polinomial yang memotong setiap titik data, dihasilkan kurva yang fluktuatif dan berada diluar kisaran data. Sedangkan pada regresi least-square, kurva yang dihasilkan tidak memotong setiap titik data dan memiliki penyimpangan, tetapi masih berada dalam kisaran data dan memiliki kecenderungan untuk mewakili data yang digunakan.

Regresi least-square memiliki beberapa jenis metode tergantung bagaimana pola dan tingkat error data yang digunakan. Metode regresi yang sering digunakan diantaranya adalah regresi linear untuk data yang memiliki kecenderungan gradien yang sama disepanjang titik, regresi polinomial, regresi multi-linear dan regresi non-linear.

#### 2.4.4 Regresi Linear

Regresi linear digunakan untuk data yang memiliki kecenderungan gradien yang sama disepanjang titik atau dengan kata lain membentuk sebuah garis lurus. Untuk mendapatkan sebuah kurva linear, diperlukan minimal dua titik data. Fungsi matematis yang digunakan adalah sebagai berikut,

$$y = a_0 + a_1x + e \quad (2.5)$$

dengan  $a_0$  dan  $a_1$  merupakan koefisien yang merepresentasikan *intercept* dan *slope* dan  $e$  merupakan error atau residual antara model dan data observasi, yang dapat direpresentasikan dengan modifikasi persamaan menjadi,

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.6)$$

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (2.7)$$

dengan :

$\bar{y}$  = rata-rata  $y$

$\bar{x}$  = rata-rata  $x$

Perhitungan penyimpangan regresi linear untuk mendapatkan kurva yang baik dilakukan dengan menghitung residual *Sum-Square Estimate* (SSE) dan penyimpangan akibat regresi *Sum-Square Residual* (SSR),

$$\begin{aligned} SSE &= y_{data} - y_{fit} & SSR &= y_{fit} - y_{rata-rata} \\ r^2 &= \frac{SSR}{SSR + SSE} \end{aligned} \quad (2.8)$$

dengan :

$r$  = koefisien korelasi

$r^2$  = koefisien determinasi

Kurva linear yang dibentuk dapat dikatakan baik apabila nilai SSE mendekati 0 dan nilai  $r^2$  mendekati 1. Sebagai tambahan, perhitungan diatas dalam penerapannya sering dilakukan dengan pendekatan matriks sederhana, yang merupakan basis perhitungan dalam perangkat lunak MATLAB (Gautama, 2010).



## 2.4.5 Interpolasi

Interpolasi merupakan salah satu jenis *curve fitting* yang digunakan pada model yang diharapkan tepat memotong titik data yang digunakan. Interpolasi merupakan pembentukan titik data baru yang berada dalam kisaran dari kumpulan data. Salah satu penggunaannya adalah untuk memudahkan evaluasi suatu fungsi, dimana fungsi yang sulit dievaluasi dapat dibuat hubungan antar data yang ada dengan interpolasi sehingga dihasilkan fungsi interpolasi yang lebih sederhana. Terdapat beberapa metode interpolasi yang sering dijumpai salah satunya adalah interpolasi olinomial Newton's Divided Difference

### 2.4.5.1. Interpolasi Polinomial Newton's Divided Difference

Interpolasi jenis ini digunakan pada persamaan polinomial hingga orde- $n$ . Metode ini merupakan metode interpolasi yang paling sering digunakan karena kemudahannya (Chapra *et al.*, 2006). Persamaan umum yang menjadi basis interpolasi ini adalah sebagai berikut,

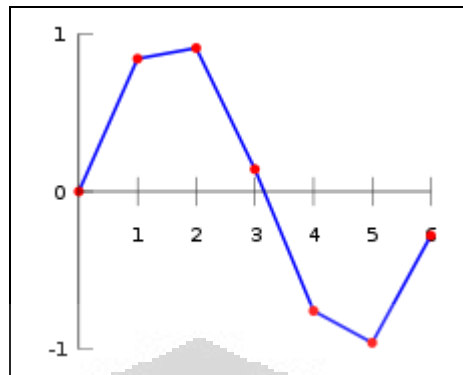
$$f_n(x) = b_0 + b_1(x - x_0) + \dots + b_n(x - x_0)(x - x_1)\dots(x - x_{n-1}) \quad (2.9)$$

dengan :

$x_0$  dan  $x_j$  = titik data yang digunakan

Istilah *divided difference* merupakan pembagian perhitungan data interpolasi berdasarkan jumlah orde  $n$  dan titik data yang digunakan. Data yang dibutuhkan dalam perhitungan interpolasi adalah  $n + 1$ . Dibawah ini dijelaskan mengenai contoh interpolasi dengan orde satu atau interpolasi linear.

Interpolasi ini merupakan bentuk paling sederhana yang hanya membutuhkan dua titik data yang dihubungkan dengan garis lurus atau persamaan polinomial orde satu spserti pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.7** Contoh kurva interpolasi linear

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut,

$$\frac{f_1(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \quad (2.10)$$

yang juga dapat dituliskan dengan persamaan berikut.

$$f_1(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} (x - x_0) \quad (2.11)$$

Interpolasi linear memang mudah dilakukan, tetapi memiliki tingkat akurasi yang sangat rendah sehingga hanya terbatas pada kurva atau fungsi yang linear baik antar variabel maupun antar parameternya.

## 2.5 Teknik Validasi Statistik

Metode analisis statistik banyak digunakan sebagai validasi beberapa metode pengolahan data, salah satunya *curve fitting*. *Curve fitting* sangat erat kaitannya dengan statistik karena proses *curve fitting* berhubungan dengan penggunaan dan pengolahan data, yang menjadi inti ilmu statistik. Statistik sangat berguna dalam analisis dan validasi proses *curve fitting*, karena dapat digunakan untuk analisis tingkat akurasi model yang disimulasikan terhadap data, atau dapat digunakan untuk mengetahui adanya hubungan/korelasi antar variabel, dan sebagainya.

Secara statistik, validasi model merupakan langkah yang paling penting dalam tahapan pembuatan model. Sebagai metode analisis hasil *curve fitting*, parameter statistik yang sering digunakan adalah koefisien korelasi dan koefisien determinasi,  $r^2$  dan  $r$ . Nilai dari koefisien ini menunjukkan fraksi atau persen dari variabilitas total dari respon model, dengan kata lain menjelaskan ketidakpastian data dengan model yang digunakan. Contohnya, nilai  $r^2 = 0,85$  menunjukkan 85% ketidakpastian pada data telah dijelaskan dengan model. Model yang baik memiliki nilai  $r$  dan  $r^2$  mendekati 1.

Namun, selain nilai koefisien determinasi dan korelasi, parameter yang perlu diperhatikan nilai residual, yaitu penyimpangan antara data observasi dengan respon model. Penentuan koefisien determinasi dan korelasi berasal dari perhitungan residual ini, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Parameter residual biasa juga disebut dengan *sum-square estimate* (SSE) residual.

Model yang baik memiliki nilai SSE yang sangat minimal, mendekati 0. Ada kalanya parameter  $r^2$  bernilai tinggi, namun SSE bernilai tinggi, yang berarti masih terdapat penyimpangan yang signifikan dan model yang digunakan tidak cocok terhadap data. Ketiga parameter inilah yang merupakan parameter terpenting dalam validasi model. Selain ketiga parameter diatas, terdapat beberapa parameter lain yang dapat digunakan, seperti standar deviasi, *mean squared error* (MSE) dan sebagainya.

Untuk menentukan hubungan antar variabel pada suatu model, dapat digunakan beberapa metode dan uji tergantung dari jumlah populasi. Untuk satu populasi, dapat dilakukan uji- $t$  atau uji-F. untuk populasi lebih dari satu, dapat dilakukan analisis varians (ANOVA), dan beberapa pengembangannya seperti MANOVA, ANCOVA, dan sebagainya. Selain itu terdapat juga metode lain seperti perhitungan korelasi, kovarians dan sebagainya. Metode statistik juga dapat digunakan untuk memperhitungkan batas prediksi (*prediction bound*) berdasarkan tingkat keyakinan antara model dengan responnya. Selain itu juga dapat digunakan untuk uji hipotesis lebih lanjut dalam pengembangan perancangan eksperimen. (Gautama, 2010).

## **BAB III**

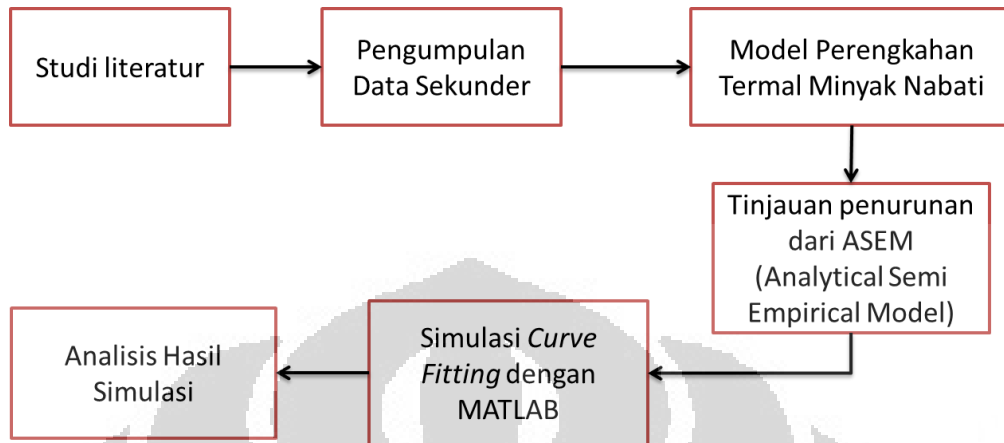
### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Diagram Alir Penelitian**

Penelitian ini secara umum bertujuan untuk memberikan representasi terhadap produk bahan bakar bio dari minyak nabati. Representasi dilakukan dengan penggunaan *Analytical Semi Empirical Model* (ASEM) dan dapat menggambarkan profil dari hasil produk dan parameter-parameter yang berkaitan pada proses tersebut. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi *curve fitting* terhadap data eksperimen. Dari hasil simulasi tersebut, dapat dilihat kecocokan model tersebut terhadap data yang ada. Kemudian dari hasil simulasi juga dapat dianalisis bagaimana pengaruh suhu reaksi dalam memproduksi bahan bakar bio. Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan model prediktif ASEM agar dapat digunakan untuk merepresentasikan/menggambarkan produk bahan bakar bio dari minyak nabati
2. Melakukan estimasi perubahan parameter suhu optimum terhadap variasi produk akhir yang diinginkan.

Data yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari eksperimen yang berkaitan dengan produksi bahan bakar bio dari minyak nabati pada jurnal penelitian atau data sekunder yang menghasilkan bahan bakar bio. Data sekunder dikhususkan pada reaksi pirolisis, perengkahan termal, dan perengkahan katalitik, untuk diagram alir penelitian dapat dilihat di Gambar 3.1.



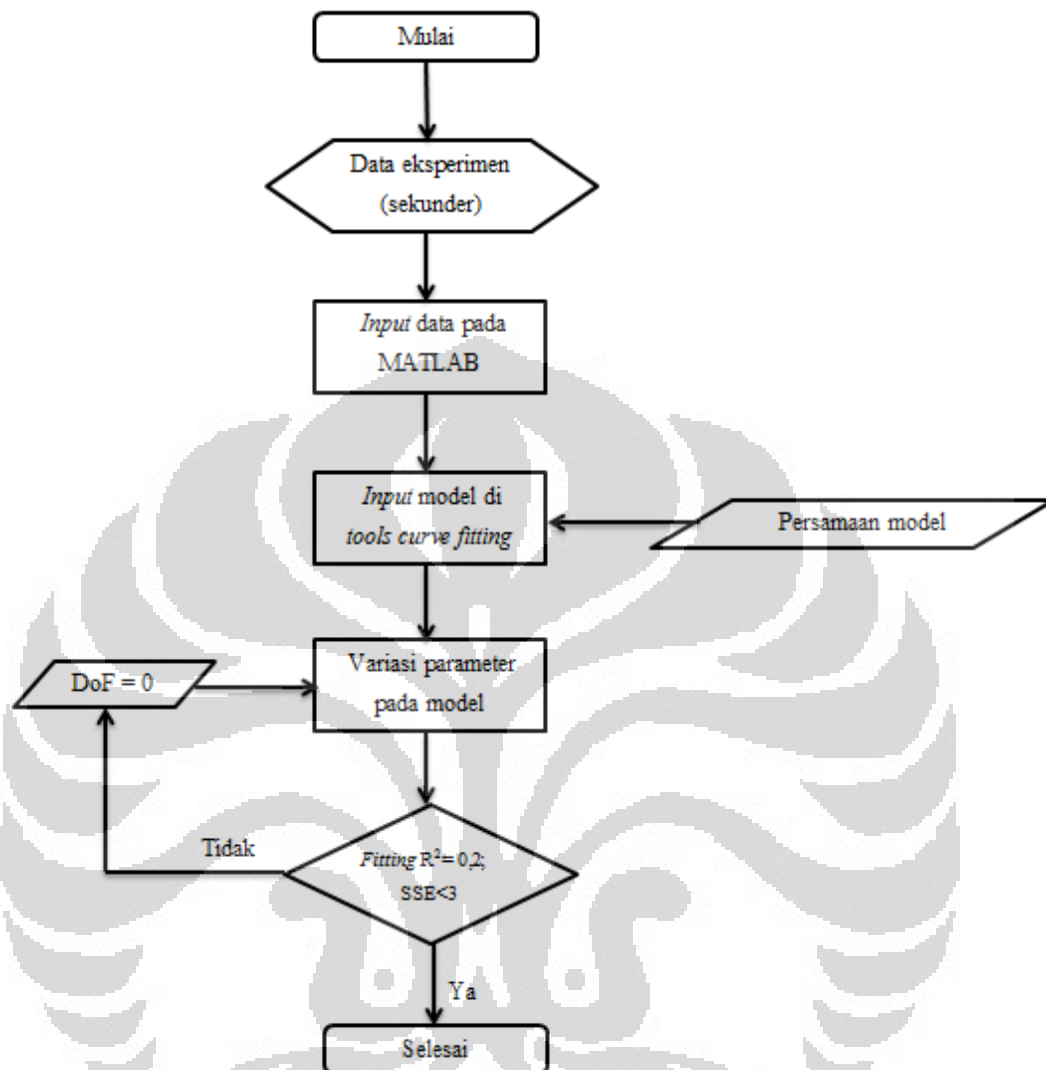
**Gambar 3.1.** Diagram alir penelitian

Penelitian ini dilakukan sepenuhnya secara simultan menggunakan perangkat lunak MATLAB, dengan menggunakan *tools Curve Fitting* seperti dapat dilihat pada Lampiran B (Gautama, 2010).

### 3.2 Pengoperasian MATLAB

#### 1. Simulasi fitting menggunakan model empiris

##### a. *Input* data pada MATLAB



**Gambar 3.2** Diagram alir pengoperasian MATLAB (Gautama, 2010)

Tahap pertama pengerjaan simulasi pada MATLAB adalah memasukkan data variabel bebas yang divariasikan dalam data eksperimen sekunder dan data variabel terikat yang dipengaruhi variabel bebas, dalam penelitian ini *yield*, ke dalam bentuk *array*. Perangkat lunak MATLAB beroperasi dengan matriks sebagai basis bagi segala macam perhitungan yang dilakukan didalamnya sehingga data dimasukkan dalam bentuk *array*.

Data yang dimasukkan harus memiliki ukuran matriks yang sama agar dapat digunakan dalam proses *curve fitting*, agar dari data yang dimasukkan dapat terbentuk

grafik hasil regresi. Data yang digunakan adalah data yield dalam % berat pada beberapa variasi suhu dalam °C, pada beberapa jenis data seperti terlihat di Gambar 3.2.

#### b. *Fitting* pada MATLAB

Tahap kedua yaitu melakukan *fitting* pada data yang telah dimasukkan dalam program *curve fitting*. *Fitting* data dilakukan kemudian dilakukan dengan memasukkan persamaan yang terdapat pada daftar, seperti persamaan linear, kuadratik, sinusoidal, atau persamaan yang dapat dimasukkan sendiri.

Tahap berikutnya yaitu memulai simulasi. Antara persamaan dan data yang dimasukkan harus memiliki nilai *degree of freedom*  $\geq 0$ , agar simulasi dapat berjalan dan didapatkan penyelesaian perhitungan. Sebelum memulai perhitungan, parameter yang tidak konstan harus diberikan titik awal iterasi, batas atas dan batas bawah sebagai jangkauan nilai untuk memulai iterasi hingga didapatkan parameter yang sesuai dengan data.

Kemudian, menentukan toleransi maksimal iterasi dan jumlah iterasi untuk mendapatkan nilai parameter. Dari hasil iterasi ini, didapatkan parameter untuk data yang digunakan beserta grafik hasil dari variabel terikat yang diinginkan. Hasil yang didapatkan kemudian dianalisis untuk melihat bagaimana pengaruh dari perubahan variabel bebas terhadap variabel terikat pada persamaan dan data yang digunakan. Parameter model divariasikan hingga mencapai parameter fitting yang baik ( $R^2 > 0,8$  &  $SSE < 3$ ), sehingga didapatkan nilai masing-masing parameter pada tiap spesi produk. Hasil fitting kemudian akan dianalisis pada rentang suhu yang lebih jauh. Data yang dimasukkan harus memiliki ukuran matriks yang sama agar dapat digunakan dalam proses *curve fitting* (Gautama, 2010).

### 3.3 Tahap Uji Model Penelitian

Hasil simulasi *fitting* kemudian divariasikan dengan merubah rentang suhu dengan menggunakan bantuan fungsi analisis pada *curve toolbox* MATLAB. Grafik yang terbentuk pada spesi produk kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh suhu pada yield produk serta suhu optimum untuk menghasilkan yield maksimum.

#### 3.3.1. Penentuan Variabel Operasi

Variabel yang menjadi parameter penting dari penelitian ini terdiri beberapa variabel sebagai berikut:

##### a. Variabel Bebas

Variabel ini akan divariasikan dalam simulasi dan hasilnya akan dianalisis untuk melihat pengaruhnya terhadap variabel terikat. Variabel bebas pada penelitian ini adalah suhu operasi.

##### b. Variabel Terikat

Variabel ini dipengaruhi oleh variabel bebas dan hasil simulasi akan menunjukkan perubahan variabel terikat akibat perubahan variabel bebas. Variabel terikat pada penelitian ini adalah yield produk bahan bakar bio yang dihasilkan dari proses simulasi.

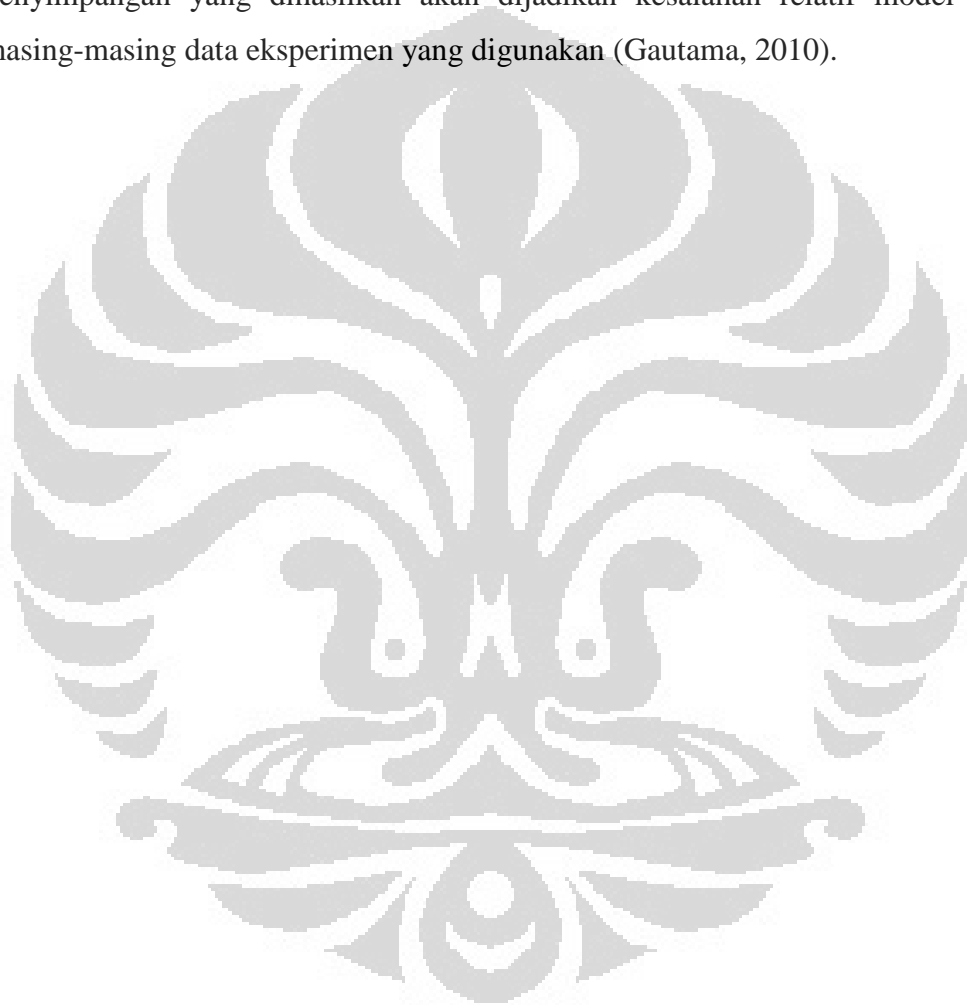
#### 3.3.2. Teknik Pengolahan Data

Data yang didapatkan, baik dari data literatur maupun data percobaan akan diolah dengan perangkat lunak untuk disimulasikan menggunakan persamaan model yang telah dibuat. Dari hasil perhitungan pada perangkat lunak tersebut, akan dibuat grafik yang menunjukkan perubahan variabel terikat terhadap perubahan kondisi operasi. Pengolahan data pada program *curve fitting* pada perangkat lunak MATLAB dilakukan berdasarkan metode statistik, khususnya tentang regresi non-linear. Data yang memiliki penyimpangan yang jauh saat regresi dapat dihiraukan dengan *smoothing* sehingga didapatkan hasil regresi yang baik.



### 3.3.3. Teknik Penarikan Kesimpulan

Kesimpulan penelitian ini dilakukan dengan tinjauan silang hasil simulasi dari model terhadap data sekunder yang digunakan dalam simulasi, yang salah satunya dilakukan melalui tinjauan statistik, yang dilihat melalui penyimpangan relatif melalui grafik yang terbentuk dan nilai penyimpangan ( $R^2$  dan SSE) yang dihitung. Penyimpangan yang dihasilkan akan dijadikan kesalahan relatif model terhadap masing-masing data eksperimen yang digunakan (Gautama, 2010).



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Tinjauan penurunan dan modifikasi model

*Analytical Semi-Empirical Model* (ASEM) adalah model yang memodifikasi fungsi logistik (metode analitis) pembentukan produk pirolisis dengan data-data eksperimen secara empiris yang dikembangkan oleh *Clean Combustion Technology Laboratory* (CCTL) dari Universitas Florida. Fungsi logistik pada model ini juga digunakan sebagai *learning curve*. Istilah *learning curve* secara umum digunakan dalam ranah ilmu psikologi dan manajemen industrial, yakni misalnya istilah yang menandai suatu gejala yang terjadi bila orang mengerjakan pekerjaan yang sama berulang kali. Semakin banyak unit pekerjaan yang dikerjakan atau dipelajari, semakin cepat waktu rata-rata per unit untuk mengerjakan/memahami pekerjaan tersebut. Sedangkan kebalikan *learning curve*, dikenal *forgetting curve* berasal dari ilmu neurologi bahwa kemampuan belajar atau memori seseorang menurun karena bertambahnya waktu untuk mengingat hal yang telah dipahaminya. Pendekatan inilah yang diterapkan pada model dalam sistem reaksi pirolisis, *learning curve* merepresentasikan peningkatan produk pirolisis dan penurunan produk akibat adanya *coke* direpresentasikan dari *forgetting curve* (Thomassen, n.d.).

Model perengkahan termal yang akan dimodifikasi untuk reaksi lainnya adalah

$$Y(T) = W[L(T)]^p[F(T)]^q \quad (4.1)$$

dengan  $L(T)$  adalah *Learning Curve* yang didefinisikan

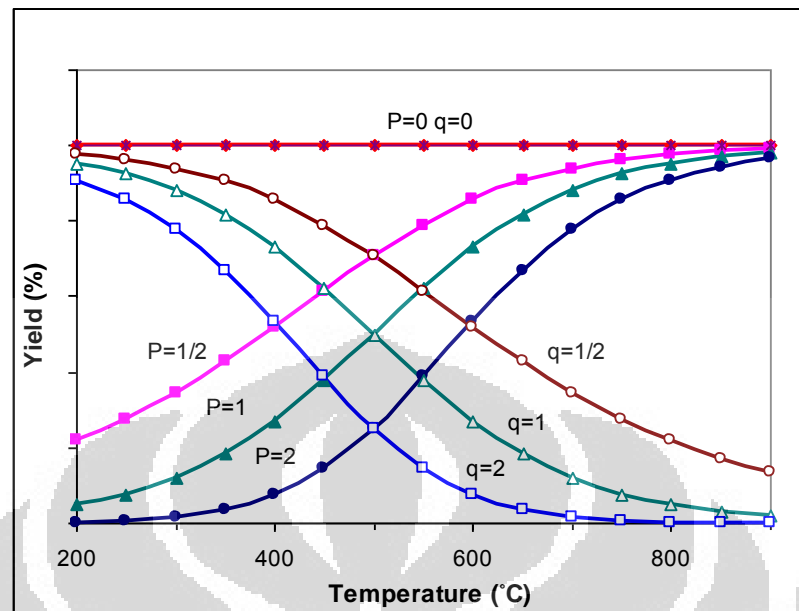
$$L(T) = \frac{1}{[1+\exp Z]} \quad Z = \frac{(T_0-T)}{D} \quad (4.2)$$

dan  $F(T)$  adalah *Forgetting Curve* yang didefinisikan

$$F(T) = 1 - L(T) = \frac{1}{[1+\exp X]} \quad X = -Z = \frac{(T-T_0)}{D} \quad (4.3)$$

model yield yang didapatkan karena pengaruh suhu ini memerlukan 5 parameter untuk merepresentasikan yield vs suhu, yakni  $W$ ,  $T_0$ ,  $D$ ,  $p$ ,  $q$ . Parameter pada fungsi logistik ini memiliki peran masing-masing untuk merepresentasikan prediksi produk yang dihasilkan. Parameter  $W$  adalah nilai estimasi yield maksimum pirolisis,  $T_0$  adalah parameter untuk estimasi suhu optimum pirolisis,  $D$  adalah parameter untuk estimasi *slope* yang sesuai pada kurva, sedangkan  $p$  dan  $q$  adalah parameter untuk estimasi kecenderungan kenaikan dan penurunan produk. Semakin besar nilai  $p$  maka produk yang dihasilkan semakin cepat sesuai fungsi suhu, sedangkan nilai  $q$  apabila semakin besar maka penurunan produk semakin cepat juga sesuai fungsi suhu.

Nilai  $Z$  sendiri berbentuk  $(T_0-T)/D$  dihasilkan dari pendekatan matematis hubungan fungsi populasi Verhulst yang dikenal dengan *learning curve* dan kemudian dikenal juga *forgetting curve*. Rentang nilai parameter-parameter tersebut secara empiric dapat kita tentukan sesuai definisi parameter yang kita asumsikan. Representasi kurva karena pengaruh nilai  $p$  dan  $q$  dapat dilihat pada Gambar 4.1,



**Gambar 4.1** Ilustrasi Fungsi Learning dan Forgetting untuk representasi parameter  $p$  dan  $q$   
(Green *et al.*, 2006)

dalam reaksi pirolisis yang dilakukan, nilai  $p$  didefinisikan sebagai

$$p = \frac{p_1}{C^\alpha} \quad (4.4)$$

dan nilai  $q$  didefinisikan sebagai

$$q = q_1 C^\beta \quad (4.5)$$

Dengan  $C$  adalah pembentukan *coke*, maka parameter  $p$  berbanding terbalik dengan  $C$  sedangkan parameter  $q$  berbanding lurus dengan nilai  $C$  seiring terbentuknya *coke* yang menandakan penurunan produk yang diinginkan. Sedangkan nilai  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $p_1$ , dan  $q_1$  adalah parameter yang disesuaikan dengan data percobaan (Green *et al.*, 2006)

Maka dihasilkan model *Analytical Semi Empirical Model* (ASEM) untuk perengkahan termal oleh Sadrameli adalah

$$Y(T) = W \left\{ \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{T_0 - T}{D}\right)} \right\}^p \left\{ \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{T - T_0}{D}\right)} \right\}^q \quad (4.6)$$

dengan :

- $w$  = parameter logistik yang menunjukkan maksimal yield yang dapat dicapai suatu produk perengkahan (% berat)
- $T_0$  = parameter logistik untuk estimasi suhu optimum
- $D$  = parameter logistik untuk estimasi perbaikan *slope*
- $p$  = parameter logistik untuk estimasi kecenderungan peningkatan produk perengkahan
- $q$  = parameter logistik untuk estimasi kecenderungan penurunan produk perengkahan

#### 4.2 Analisis hasil simulasi pada variasi suhu perengkahan termal

Model ini secara umum dapat diaplikasikan dalam reaksi perengkahan termal dan perengkahan katalitik. Penelitian dilakukan dengan perengkahan termal minyak canola yang memiliki komposisi yang terdiri dari 60% asam oleat (C18:1), 20% asam linoleat (C18:2), 10% asam linolenat (C18:3), dan asam tak jenuh lain, yang membentuk trigliserida tak jenuh dengan rumus molekul  $C_{59}H_{94}O_5$ . Sebagai dasar awal untuk memperkirakan terjadinya perengkahan reaktan menjadi produk, maka nilai titik didih kandungan reaktan harus kita ketahui perkiraannya seperti tertulis pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Titik didih kandungan asam lemak minyak nabati (Perry *et al.*, 1999)

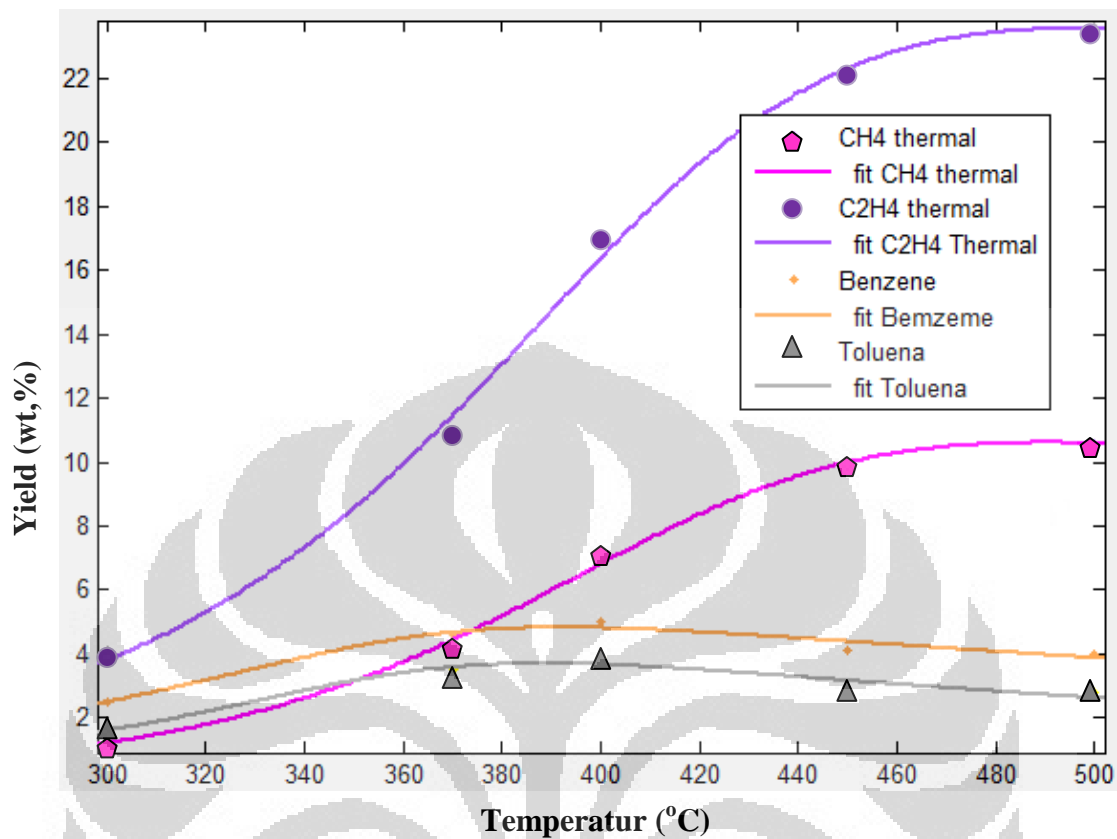
Asam Lemak	Struktur	Titik didih (°C)
Palmitic	C16:0	271.5
Stearic	C18:0	291
Oleic	C18:1	285.6
Linoleic	C18:2	229

Untuk itulah agar perengkahan terjadi secara menyeluruh eksperimen dilakukan di atas suhu titik didih tertinggi asam lemak yang ada. Variasi suhu kali ini adalah 300°C, 370°C, 400°C, 450°C dan 500°C. Produk hasil perengkahan termal ini sebagian besar berupa gas yang pada rentang suhu 400°C-500°C, (Idem *et al.*,1996) sedangkan pada suhu rendah terdapat banyak minyak residu yang tidak mengalami perengkahan. Data percobaan dapat dilihat pada lampiran Tabel A.1.

Sebagian data untuk fraksi paraffin, olefin, dan produk cair (benzene dan toluene) kemudian disimulasikan dengan model ASEM. Hasil data parameter dan hasil simulasi perengkahan termal minyak canola ditampilkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.2.

**Tabel 4.2** Parameter perengkahan termal minyak canola

Produk	Parameter					Goodness of fit	
	w	T <sub>0</sub>	D	p	q	SSE	R <sup>2</sup>
CH <sub>4</sub>	10,54	418,1	20	0,3091	0,0002	0,1342	0,9978
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	26,71	412,1	30	0,5166	0,03213	1,0250	0,9961
Benzena	5,54	359	20	0,2646	0,0509	0,1385	0,9617
Toluena	4,52	358,1	20	0,3503	0,0771	0,2264	0,9262



**Gambar 4.2** Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan termal minyak canola

Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa tiap data produk memiliki keakuratan yang cukup tinggi terhadap model yang digunakan pada model yang digunakan berdasarkan nilai  $R^2$  dan SSE. Kecenderungan tingginya produk fraksi gas dapat dilihat pada nilai  $w$ , hal ini dikarenakan produk karbon rantai panjang yang mulai terengkah pada suhu rendah akan mengalami perengkahan lanjutan seiring dengan peningkatan suhu, hingga hampir sebagian besar terengkah dan membentuk karbon-karbon dengan rantai yang lebih pendek. Suhu optimum perengkahan fraksi gas juga lebih besar daripada fraksi cairan dilihat dari nilai  $T_0$ .

Grafik hasil simulasi menunjukkan bahwa kondisi optimum fraksi paraffin dan olefin pada suhu sekitar  $450^\circ\text{C}$ . Pada suhu yang lebih tinggi dari  $500^\circ\text{C}$  semua produk mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan perengkahan lebih lanjut mengakibatkan rantai C akan terus terputus hingga menjadikan bertambahnya

karbon/*coke* bukan lagi produk yang diinginkan. Selain itu, pada fraksi olefin terutama produk etilena memiliki yield paling besar karena ikatan rangkap pada etilena membutuhkan energi lebih tinggi dibanding ikatan tunggal antar karbon pada asam lemak, sehingga seiring meningkatnya suhu perengkahan secara keseluruhan etilena memiliki yield paling besar.

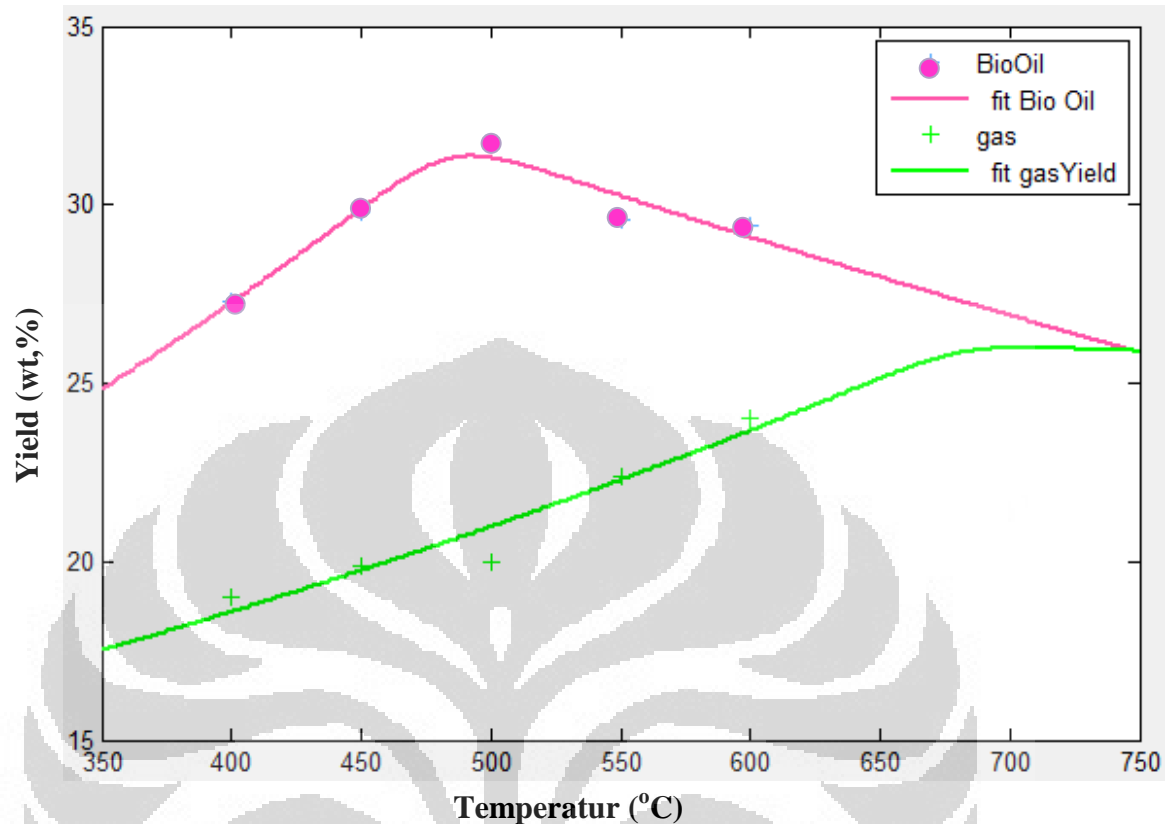
Penelitian berikutnya adalah perengkahan termal dari tanaman *Safflower* untuk menghasilkan minyak nabati fraksi cair dan gas (Sensoz *et al.*, 2008). Percobaan dilakukan dengan variasi suhu 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, dan 600°C. Data percobaan dapat dilihat di lampiran Tabel A.2. Parameter hasil simulasi disajikan pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.3,

**Tabel 4.3** Parameter perengkahan termal minyak nabati

Produk	Parameter					Goodness of fit	
	$w$	$T_0$	$D$	$p$	$q$	SSE	$R^2$
<b>Bio Oil</b>	31,86	483,5	10	0,01865	0,0078	0,6815	0,9303
<b>Gas Yield</b>	26,08	680	0,018	0,012	0,001	1,268	0,9261

Dari hasil simulasi terdapat data dengan keakuratan yang tidak terlalu baik, yaitu produk gas. Hal ini disebabkan data yang dihasilkan adalah fraksi gas yang beragam dan tidak lebih spesifik dibanding produk-produk gas yang ada seperti pada hasil penelitian sebelumnya. Selain itu, fraksi cair minyak produk yang dihasilkan juga merupakan kandungan beberapa rantai karbon panjang yang agak sulit secara spesifik kita ketahui suhu optimum produk-produknya, sehingga perlu karakterisasi produk fraksi cair sebelumnya.





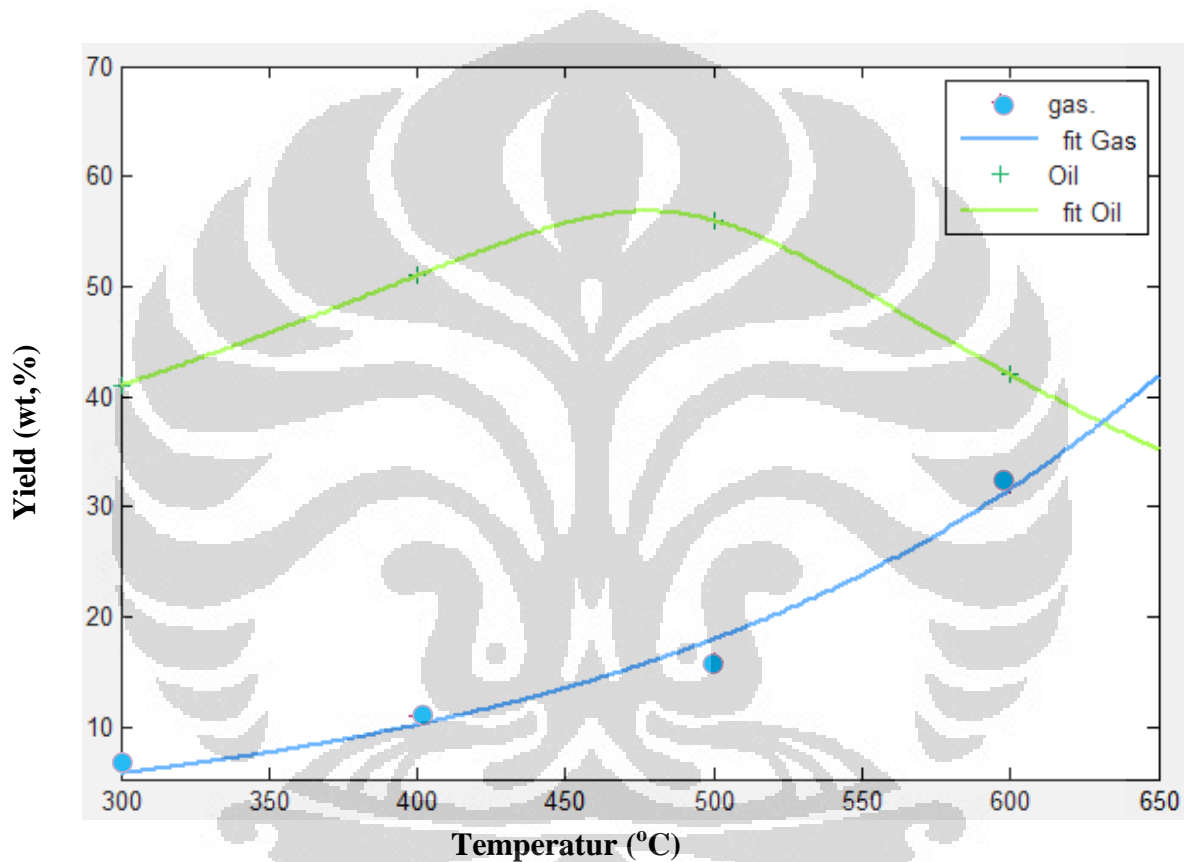
**Gambar 4.3** Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan termal minyak nabati

Hasil simulasi menunjukkan seiring peningkatan suhu, fraksi bio-oil yang berupa cairan semakin berkurang diikuti dengan naiknya fraksi gas. Hal ini dikarenakan terjadi perengkahan sekunder setelah suhu optimum bio oil di sekitar 500°C yang memutuskan ikatan gugus fungsional atau pemutusan ikatan 2 karbon diujung lain, sehingga menghasilkan fraksi gas lebih banyak. Pada suhu lebih dari 700°C terlihat produk fraksi gas lebih mendominasi karena perengkahan lanjutan terjadi dengan spontan pada suhu tinggi secara termodinamik.

Penelitian berikutnya juga membahas tentang pirolisis minyak nabati untuk melakukan perancangan reaktor pirolisis dengan produk fraksi gas dan fraksi cair (Rahul, 2008). Variasi percobaan dilakukan dengan suhu 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C seperti dapat dilihat pada lampiran Tabel A.3, hasil simulasi disajikan pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.4

Tabel 4.4 Parameter perengkahan termal minyak nabati

Produk	Parameter					Goodness of fit	
	$w$	$T_0$	$D$	$p$	$q$	SSE	$R^2$
Gas	53,87	694,2	10	0,056	0,0001	6,215	0,9888
Oil	62,35	489,1	24,18	0,053	0,0858	1,39E-26	0,9999



Gambar 4.4 Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan termal minyak nabati

Seperti hasil simulasi sebelumnya pada sekitar suhu 300°C, terjadi perengkahan trigliserida karena mencapai titik didihnya yang menghasilkan minyak bahan bakar bio hingga mencapai kondisi optimum antara 450-500°C. Mulai di atas suhu tersebut, fraksi minyak yang didominasi karbon rantai panjang berfasa cairan mulai mengalami perengkahan lanjutan dan sifat fisika dan kimianya berubah menjadi fasa gas yang berarti merepresentasikan meningkatnya produk rantai karbon pendek.

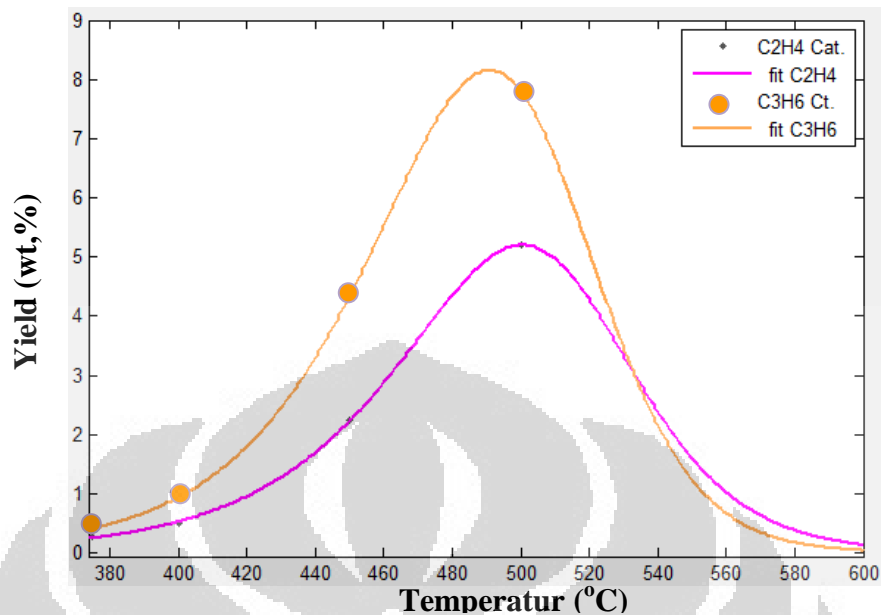
### 4.3 Analisis hasil simulasi pada variasi suhu perengkahan katalitik

Selanjutnya model ini diaplikasikan untuk memprediksi yield dari perengkahan katalitik minyak nabati yang dilakukan pada suhu antara 375-500°C dan tekanan atmosfer dengan katalis HZSM-5 (Katikaneni *et al.*, 1995). Data produk disimulasikan lebih dari satu untuk meninjau selektifitas katalis yang digunakan. Parameter dan hasil simulasi perengkahan katalitik dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.5 sampai Gambar 4.7,

**Tabel 4.5** Parameter perengkahan katalitik minyak canola

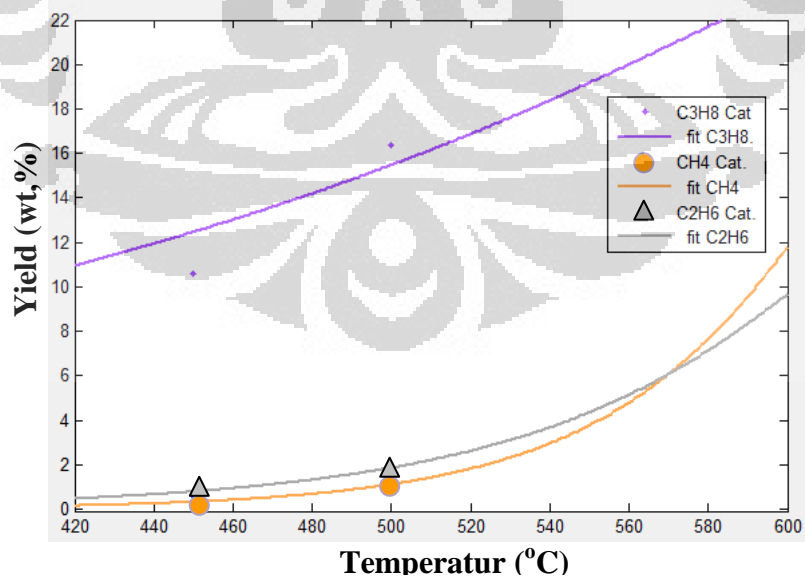
Produk	Parameter					Goodness of fit	
	w	T <sub>0</sub>	D	p	q	SSE	R <sup>2</sup>
<b>Olefin</b>							
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	17,84	511,7	25	0,7822	1	0,0027	0,9998
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	28,08	509,1	25	0,725	1,2	0,0841	0,9976
<b>Parafin</b>							
CH <sub>4</sub>	18,81	642,6	20	0,4011	0,1	0,0484	0,921
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	17,35	630	20	0,3433	0,2	0,0697	0,9573
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	23,96	600	20	0,0869	0,3	5,745	0,8007
Benzena	9,47	450	50	0,1534	0,5605	0,0092	0,9971
Toluena	30,73	435,9	50	0,2958	0,4273	0	1
Xylena	40	325,2	50	2,704	0,267	0,3401	0,9675

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa sebagian besar data perengkahan katalitik cukup representatif dihasilkan oleh model ASEM. Nilai SSE dan R<sup>2</sup> cukup baik, kecuali pada C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> yang menjadi keterbatasan model.



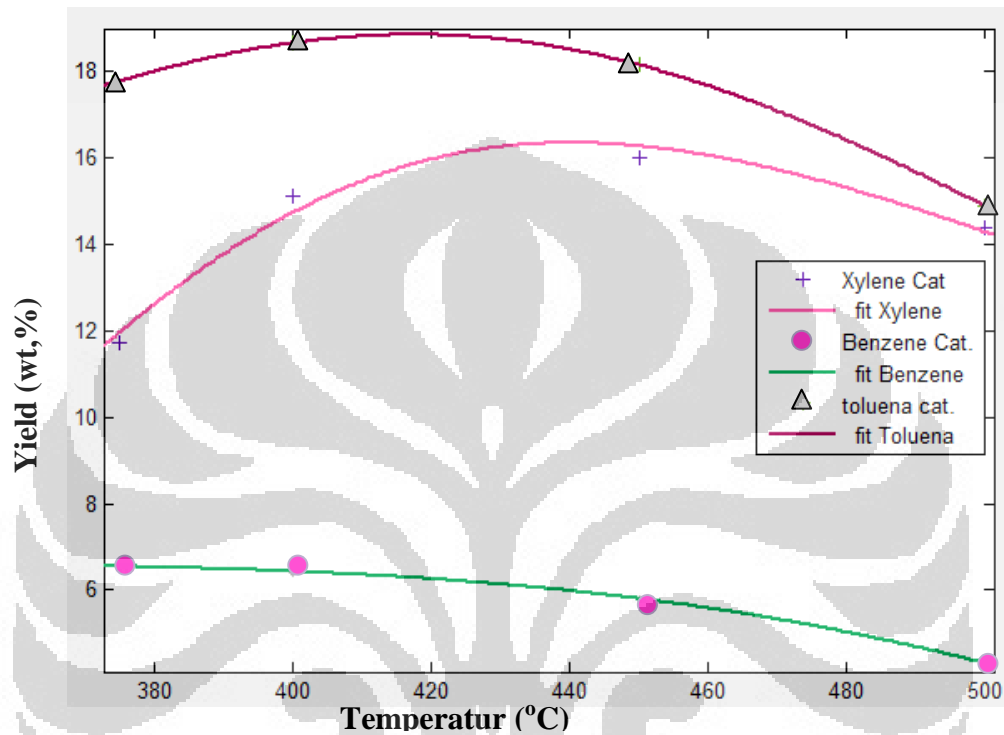
**Gambar 4.5** Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan katalitik fraksi olefin

Pada fraksi olefin dapat dilihat bahwa selektifitas katalis lebih kepada propena dibanding etilena, hal ini juga dapat dilihat dari parameter  $w$  sebagai estimasi yield maksimum yang diharapkan. Pada suhu  $500^{\circ}\text{C}$  ke atas terjadi pergeseran selektifitas reaksi pada katalis sehingga menurunkan produk perengkahan.



**Gambar 4.6** Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan katalitik fraksi paraffin

Fraksi paraffin seperti pada pembahasan sebelumnya akan terus bertambah pada penambahan suhu, karena perengkahan lanjutan terus terjadi dan menghasilkan fraksi karbon yang lebih pendek.



**Gambar 4.7** Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk perengkahan katalitik fraksi BTX

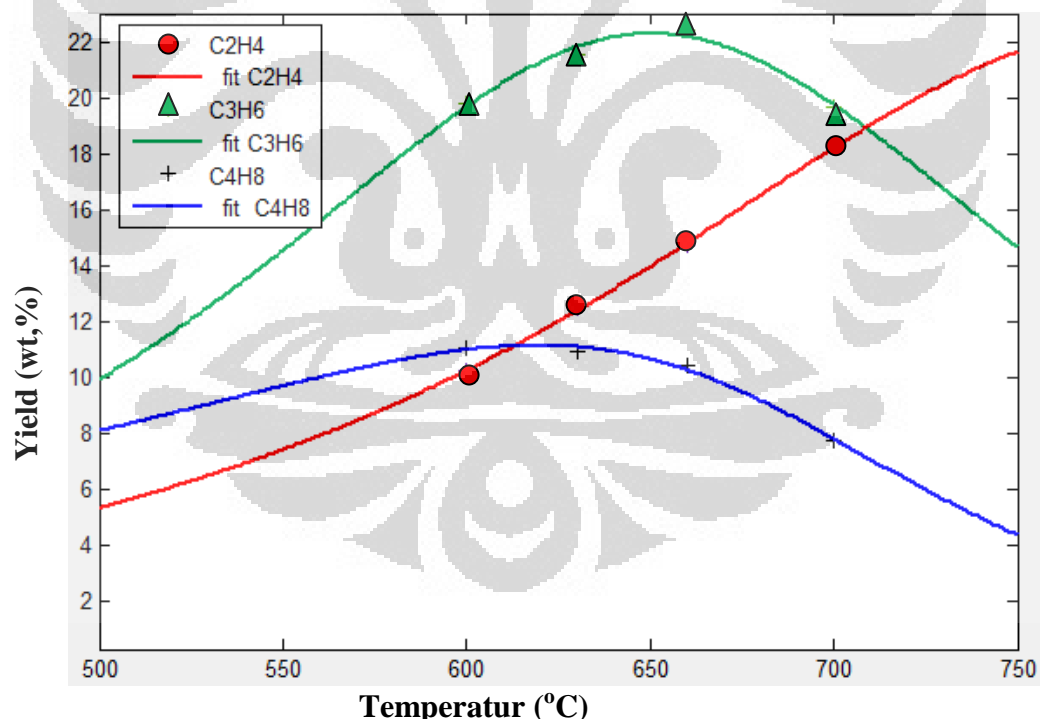
Nilai parameter  $p$  yang menunjukkan kecenderungan kenaikan produk paling besar dilihat dimiliki produk Xylena, yang menunjukkan selektifitas utama reaksi tersebut. Walaupun toluene secara grafik juga memiliki nilai konversi yang tinggi namun tidak dapat dianalisis dari parameter yang ada. Hal ini menjadi kelemahan model ASEM dalam pendekatan yang dominan secara empirik bukan secara peristiwa reaksi kimia.

Penelitian berikutnya sebagai perbandingan untuk analisis perengkahan katalitik minyak nabati, adalah perengkahan katalitik minyak residu pengolahan minyak bumi di Cina dengan katalis komersil untuk pirolisis CPP (Meng *et al.*, 2008). Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan fraksi olefin dan fraksi paraffin. Penelitian ini dilakukan dengan variasi suhu 600-700°C yang dapat dilihat di

lampiran. Berikut parameter dan hasil simulasi yang didapatkan pada Tabel 4.6 , Gambar 4.8, dan Gambar 4.9,

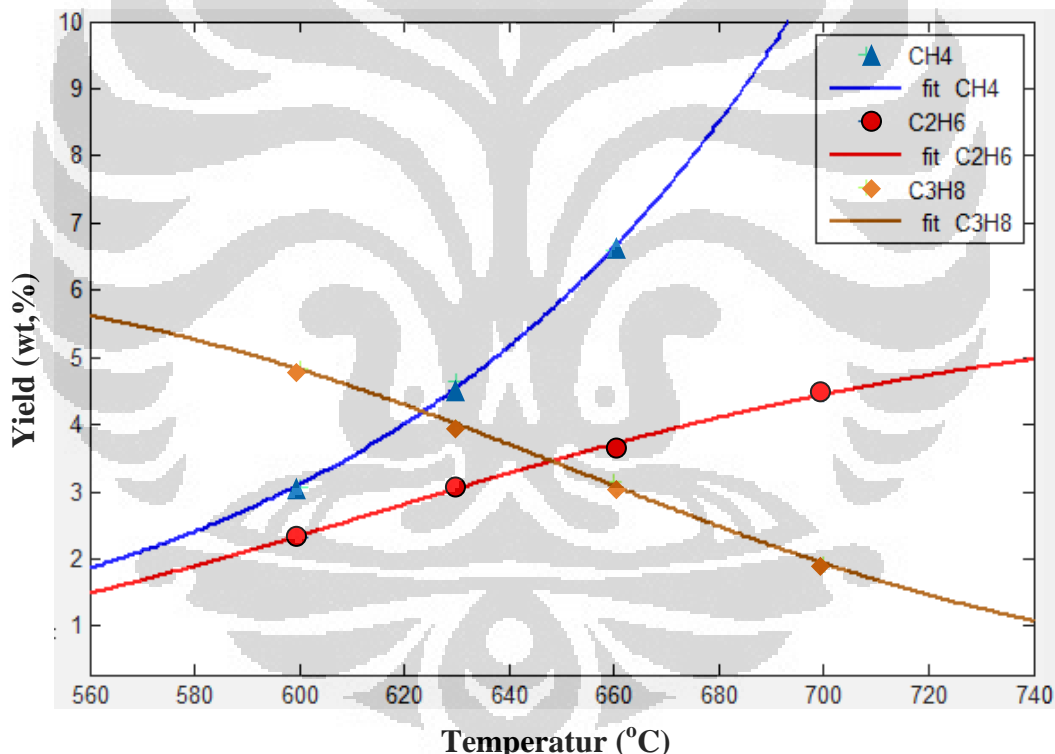
**Tabel 4.6** Parameter perengkahan katalitik minyak residu

Produk	Parameter					Goodness of fit	
	$w$	$T_0$	$D$	$p$	$q$	SSE	$R^2$
<b>Fraksi Olefin</b>							
Etena	26,41	741,5	40	0,2649	0,05264	0,01883	0,9996
Propena	35,32	649,8	39,96	0,3343	0,3305	0,1443	0,9782
Butena	16,45	672	38,67	0,1579	0,611	0,06518	0,9943
<b>Fraksi Parrafin</b>							
Metana	66,6	836,3	53,52	0,6922	0,001	0,0115	0,9998
Etana	8,39	655	69,97	1,036	0,186	0,0077	0,9907
Propana	6,452	636,5	47,3	0,000135	0,7629	0,0104	0,9984



**Gambar 4.8** Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk fraksi olefin perengkahan katalitik minyak residu

Dari hasil simulasi yang dilakukan dapat dilihat bahwa katalis ini selektif pada produk propena dengan aktivasi katalis mulai dari suhu  $500^{\circ}\text{C}$ . Selektifitas katalis selanjutnya juga terjadi pada butena, namun seiring dengan deaktivasi katalis sekitar suhu  $650^{\circ}\text{C}$  terjadi perengkahan lanjutan kedua produk tersebut menjadi etena yang terus mendominasi produk di atas suhu  $700^{\circ}\text{C}$ . Hal ini menunjukkan bahwa etena memiliki ikatan rangkap yang cukup kuat sehingga diperlukan suhu tinggi untuk merengkahkannya. Peran katalis pada suhu tinggi berkurang karena terjadi perubahan selektifitas reaksi, dan juga apabila ada penurunan konversi secara keseluruhan kemungkinan terjadi deaktivasi katalis berupa teracuni kontaminan, *sintering*, dan sedikitnya luas permukaan untuk terjadi reaksi yang diinginkan.



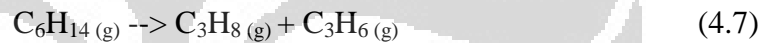
**Gambar 4.9** Hasil simulasi pengaruh penambahan suhu terhadap yield produk fraksi paraffin perengkahan katalitik minyak residu

Hasil simulasi menunjukkan selektifitas katalis yang digunakan juga ada pada propena yang sebelum suhu sekitar  $500^{\circ}\text{C}$  sudah mendominasi produk. Perubahan selektifitas katalis disertai perengkahan sekunder terjadi pada suhu sekitar  $600^{\circ}\text{C}$  yang mengakibatkan produk paraffin dengan rantai karbon lebih pendek mulai

meningkat. Fraksi metana akan terus meningkat sebagai produk perengkahan sekunder dengan Energi Gibbs yang lebih kecil dari perengkahan etana, maka reaksi yang terjadi berjalan lebih spontan secara termodinamik.

#### 4.4 Hasil kondisi optimum tiap produk perengkahan minyak nabati

Dari hasil simulasi sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa model ASEM yang selama ini digunakan untuk pirolisis biomassa dan perengkahan senyawa organik dari minyak bumi dapat digunakan untuk merepresentasikan sebagian besar data produk perengkahan minyak nabati, baik secara termal maupun katalitik. Analisis termodinamik kemungkinan reaksi juga dilakukan untuk membantu validasi model. Berikut salah satu analisis perengkahan termal lanjutan atau sekunder misalnya pada heksana yang menjadi propana dan propena,



dengan data termokimia pada Tabel 4.7,

**Tabel 4.7** Data termokimia perengkahan termal sekunder

	$\Delta H^\circ$ kcal/mol	$S^\circ$ cal/molK
n-heksana	-167	389
propana	-104	270
propena	21	267

maka perhitungan entalpi untuk reaksi di atas adalah,

$$\Delta H^\circ (\text{propana} + \text{propena}) - \Delta H^\circ \text{n-heksana} = \Delta H \quad (4.8)$$

$$-83 \text{ kcal/mol} - (-167 \text{ kcal/mol}) = \mathbf{84 \text{ kcal/mol}}$$



Entropi untuk reaksi ini juga didapat,

$$S^0(\text{propana} + \text{propena}) - S^0 \text{n-heksana} = \Delta S \quad (4.9)$$

$$537 \text{ cal/mol K} - 389 \text{ cal/mol K} = \mathbf{148 \text{ cal/mol K}}$$

Energi bebasnya adalah,

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (4.10)$$

pada suhu perengkahan optimum reaksi tersebut sekitar  $510^{\circ}\text{C}$  akan didapatkan,

$$\text{delta } G^0 = 84 \text{ kcal} - (783 \text{ K})(148 \text{ cal/K}) = \mathbf{-32 \text{ kcal}}$$

karena secara termodinamik perengkahan merupakan reaksi endotermik yang memerlukan panas, maka semakin tinggi suhu menjadikan nilai energi bebas Gibbs menunjukkan minus dan reaksi berjalan dengan spontan (Kovarik *et al.*, 2003).

Meskipun pendekatan matematis lebih dominan pada model ini, untuk skala memprediksi pertumbuhan dan optimasi produk masih dapat kita gunakan ASEM ini. Parameter-parameter yang digunakan juga seharusnya digunakan pada data yang homogen atau dari penelitian dengan sistem yang sama sehingga menghasilkan parameter yang tepat dalam menggambarkan representasi berbagai kemungkinan produk perengkahan yang terjadi. Beberapa variabel penting seperti waktu, juga masih diabaikan dalam penggunaan model ini, sehingga selanjutnya untuk menjadikan model yang lebih akurat diperlukan modifikasi model dengan penambahan parameter. Hasil simulasi secara keseluruhan disajikan pada Tabel 4.8,

**Tabel 4.8** Data simulasi secara keseluruhan

<b>Data</b>	<b>Bahan Baku</b>	<b>Variasi Perlakuan</b>	<b>Produk Dominan</b>	<b>Kondisi Optimum</b>
Idem <i>et al.</i> , 1996	Minyak <i>canola</i>	Perengkahan termal, variasi suhu	Fraksi olefin	450°C
Sensoz <i>et al.</i> , 2008	Minyak nabati <i>Safflower</i>	Perengkahan termal, variasi suhu	Fraksi Bio-Oil	480°C
Rahul, 2008	Minyak Nabati	Perengkahan Termal, variasi suhu	Fraksi Bio-Oil	475°C
Katikaneni <i>et al.</i> , 1995	Minyak <i>canola</i>	Perengkahan katalitik, variasi suhu	Fraksi BTX	400°C
Meng <i>et al.</i> , 2008	Minyak residu	Perengkahan katalitik, variasi suhu	Fraksi Olefin	650°C

Kemudian dengan bantuan parameter logistik dalam model ASEM ini kita dapat secara spesifik menentukan kondisi optimum produk perengkahan yang kita inginkan. Parameter yang berpengaruh adalah  $T_0$  sebagai parameter estimasi suhu optimum seperti yang disajikan pada Tabel 4.9.

**Tabel 4.9** Suhu optimum untuk berbagai produk perengkahan minyak nabati

Produk	Jenis Perengkahan	Suhu optimum(°C)
<b>Fraksi Parrafin</b>		
CH <sub>4</sub>	Termal	418,1
	Katalitik	642,6
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Katalitik	630
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Katalitik	636,5
<b>Fraksi Olefin</b>		
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Termal	412,1
	Katalitik	511,7
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Katalitik	509,1
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	Katalitik	672
<b>Karbon rantai panjang</b>		
Fraksi Gas	Termal	675
Fraksi <i>Bio Oil</i>	Termal	480
Benzene	Termal	359
	Katalitik	450
Toluene	Termal	358,1
	Katalitik	430,3
Xylene	Katalitik	325,2

Secara umum suhu yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu produk dari perengkahan katalitik harus lebih rendah dari perengkahan termal. Karena kehadiran katalis membantu menurunkan energi aktivasi sehingga reaksi dapat terjadi secara spontan pada suhu lebih rendah. Pada Tabel 4.9 tidak demikian, karena memang di luar keterbatasan model, data sekunder yang digunakan berasal dari berbagai penelitian dengan variasi perlakuan, jenis reaktan, dan kemungkinan mekanisme reaksi yang berbeda-beda.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini, antara lain :

1. Model Analitis Semi Empirik (ASEM) secara umum dapat merepresentasikan produk sebagaimana besar hasil perengkahan termal dan katalitik minyak nabati dengan baik dilihat dari nilai  $R^2$  dan SSE-nya.
2. Kondisi suhu optimum untuk menghasilkan berbagai produk bahan bakar bio dapat diketahui dari estimasi parameter  $T_0$ . Secara keseluruhan, suhu optimum pada perengkahan termal berkisar  $400-450^\circ\text{C}$ , dan pada perengkahan katalitik sebesar  $325-375^\circ\text{C}$  tergantung dari jenis minyak nabati yang digunakan dan produk yang diinginkan.
3. Model masih memiliki keterbatasan pada analisis secara kinetik dan termodinamik reaksi kimia, karena pendekatannya hanya dilakukan secara analitik.

#### **5.2 Saran**

Saran yang didapatkan dari penelitian ini, antara lain :

1. Penentuan suhu optimum tiap-tiap produk perengkahan masih memiliki keakuratan yang rendah, dikarenakan data-data sekunder yang dipakai cukup beragam dari jenis minyak nabati dan mekanisme reaksi yang terjadi. Dibutuhkan data yang cukup banyak dan homogen dari suatu hasil penelitian.
2. Model perlu modifikasi berupa penambahan parameter untuk menghasilkan model prediktif bahan bakar bio dari rute lain seperti deoksigenasi dan teknologi lainnya yang kondisi operasi selain suhu seperti tekanan dan waktu sangat berpengaruh.

## DAFTAR PUSTAKA

- Boyas, R.S., Liu, Y., and Tomoaki M. 2008. *Production Of Green Diesel by hydrocracking Of Canola Oil on Ni-Mo/ $\gamma$ - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> And Pt-Zeolitic Based Catalysts*. AIChE Annual Meeting Presentation, Philadhelpia. pp. 1-8
- Clark, J. 2003. *Cracking Alkane*. Web Page (<http://www.chemguide.co.uk/organicprops/alkanes/cracking.html>) (accessed January 14<sup>th</sup>, 2012)
- Chapra, S.C., and Raymond P. Canale. 2006. *Numerical Methods for Engineers* 5<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill : New York. pp. 153-189
- Choudhary, T.V., and C.B. Phillips. 2011. *Renewable Fuels via Catalytic Hydrodeoxygenation*. Applied Catalysis A: General Vol. 397 .pp. 1-12
- Demirbas, A. 2005. *Pyrolysis of ground beech wood in irregular heating rate conditions*. Journal of Analytical Appl. Pyrolysis. Vol.73. pp. 39-43.
- Demirbas, A. 2007. *Relationships derived from physical properties of vegetable oil and biodiesel fuels*. Fuel. Vol. 87. p. 1744.
- Demirbas, A. 2008. *Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections*. Energy Conversion and Management, Vol. 49. pp. 2106-2116.
- Fransiska. 2012. *Sintesis Bahan Bakar Bio Non-Ester dari Minyak Jarak melalui Reaksi Deoksigenasi Berkatalis Menggunakan Katalis Nano NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*. Skripsi. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia Depok. pp.12-21
- Gautama, G. 2010. *Modifikasi dan penggunaan model prediktif untuk merepresentasikan produk berbagai proses perengkahan minyak nabati*. Skripsi. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia Depok. pp. 5-34
- Green A. E. S. and J. Feng .2006. *Systematics of Corn Stover Pyrolysis Yields and Comparisons of Analytical and Kinetic Representations*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Vol. 76 .pp. 60-69.
- Idem, R.O., Katikaneni, S. P. R. and N.N. Bakhshi. 1996. *Thermal Cracking of Canola Oil: Reaction Products in the Presence and Absence of Steam*. Energy & Fuels. Vol.10. pp. 1150-1162.

- Kalnes, T., Terry M., and David R. S. 2007. *Green Diesel : A Second Generation Biofuel*, International Journal of Chemical Reactor Engineering: Vol.5. A48.
- Kalnes, T., Marker, T., David, S., and Koers, K. 2008. *Green diesel and Biodiesel, A Technoeconomic and Life Cycle Comparisons*. 1<sup>st</sup> Alternative Fuels Technology Conference. Web page (www.uop.com) (accessed June 23<sup>th</sup>, 2011)
- Katikaneni, S.P.R., J.D. Adjaye, and N.N. Bakhshi. 1995. *Catalytic Conversion of Canola Oil over Potassium-Impregnated HZSM-5 Catalysts: C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> Olefin Production and Model Reaction Studies*. Energy Fuels. Vol.9.pp. 599-609.
- Keenan, C. W., Kleinfelder, D. C., dan Jesse H.W.(pent. Pudjaatamaka, A. H.). 1999. *Kimia untuk Universitas*. Jakarta : Erlangga
- Koh, L.P., and Jaboury, G. 2008. *Biofuel, Biodiversity, and People: Understanding the Conflicts and Finding Opportunities*. Biological Conservation, Vol.141. pp. 2450-2460.
- Kovarik, W. and Hermes, M. E. .2003. *Chemistry of Petroleum Cracking*. Web page (<http://chemcases.com/fuels/fuels-b.htm>) (accessed January 20<sup>th</sup>, 2012)
- Ma, F., and Hanna, M. A. 1999. *Biodiesel Production: A Review*. Bioresource Technology, Vol. 70. pp. 1-15.
- Maher K.D., and D.C. Bressler. 2007. *Pyrolysis of Triglyceride Materials for the Production of Renewable Fuels and Chemicals*. Bioresource Technology, Vol. 98. pp 2351-2368.
- Meng, X., Xu, C., Gao, J., Li, L., and Liu, Z. 2008. *Catalytic and Thermal Pyrolysis of Atmospheric Residue*. Energy Fuels
- Nasikin, M. dan Susanto, B.H..2006. “*Katalisis Heterogen*”. Depok : Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. pp. 26-35
- OPEC. 2009. *Annual Statistical Bulletin*. Austria : Ueberreuter Print und Digimedia
- Perry, R. H. and D. W. Green. 1999. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. New York: McGraw-Hill Companies, Inc. pp. 2.48-61
- Rahul. 2008. *Design and Development of A Pyrolysis Reactor*. Thesis. Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela. p.25

- Sadrameli, S.M., A.E.S. Green., and W. Seames. 2008. *Modeling Representations of Canola Oil Catalytic Cracking for The Production of Renewable Aromatic Hydrocarbons*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Vol. 86 .pp.1-7.
- Satterfield, C.N. 1991. *Heterogeneous Catalysis In Industrial Practice 2<sup>nd</sup> edition*. USA: Mc. Graw Hill, Inc.
- Seggern, V. D. 2007. *CRC Standard Curves and Surfaces with Mathematics, 2nd ed.* Boca Raton, FL: CRC Press.
- Sensoz, S. and Angin, D..2008. *Pyrolysis of Safflower Seed Press Cake: Part 1. The Effect of Pyrolysis Parameters on The Product Yield*. Bioresource Technology, Vol.99. pp. 5492-5497.
- Smith, G.V., and F. Notheisz. 2007. *Heterogeneous Catalysis in Organic Chemistry*. San Diego: Academic Press.
- Tamunaidu, P., and Bathia, S. 2007. *Catalytic cracking of palm oil for the production of biofuels: Optimization studies*. Bioresource Technology, Vol.98. pp. 3593-3601.
- Thomassen, A. *Learning and Forgetting Curves: A Practical Study*. New Zealand : Department of Management Systems University of Waikato
- Wahid, A. 2007. *Prinsip Pemodelan Matematika*. Depok : Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. pp.1-10
- Wampler, T.P. 2007. *Applied Pyrolysis Handbook*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Weisstein, E. W. 2008. *Logistic Equation*. Web page (<http://mathworld.wolfram.com/LogisticEquation.html>) (accessed January 11<sup>st</sup>, 2012)
- Weisstein,E.W. 2008.*Sigmoid Function*. From *MathWorld--A Wolfram Web Resource*. Web Page. (<http://mathworld.wolfram.com/SigmoidFunction.html>) (accessed January 11<sup>st</sup>, 2012)

## LAMPIRAN A

### A. Data yang digunakan dalam simulasi

**Tabel A.1** Produk perengkahan termal minyak canola (Idem *et al.*,1996)

Produk	Suhu (°C)				
	500	450	400	370	300
<b>CH<sub>4</sub></b>	10,6 %	9,9 %	7,1 %	4,1 %	1,4 %
<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	23,6	22,1	17	10,8	4,1
<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	7	6,7	5,4	4,1	1,7
<b>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub></b>	13,5	12,2	10,3	7	2,7
<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	1,1	1,1	0,9	1	0,5
<b>i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>	0,02	0,01	0,01	0,01	0
<b>n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>	6,5	6,3	5,5	4,1	1,6
<b>i-C<sub>4</sub>H<sub>8</sub></b>	1	1	0,8	0,6	0,3
<b>1-C<sub>4</sub>H<sub>8</sub></b>	0,5	0,6	0,4	0,2	0,1
<b>Benzena</b>	4	4,1	5	4,6	2,5
<b>Xylena</b>	0,6	0,7	1,1	1,2	0,5
<b>Toluena</b>	2,8	2,8	3,9	3,5	1,6

**Tabel A.2.** Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi perengkahan termal minyak nabati *Safflower* (Sensoz *et al.*, 2008)

Produk	Suhu (°C)				
	400	450	500	550	600
<b>Bio Oil</b>	27,3 %	29,8 %	31,7 %	29,6 %	29,4 %
<b>Gas Yield</b>	19	19,9	20	22,4	24



**Tabel A.3.** Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi pirolisis minyak nabati ( Rahul, 2008)

Produk	Suhu (°C)			
	300	400	500	600
<b>Gas</b>	7 %	11 %	16 %	32 %
<b>Oil</b>	41	51	56	42

**Tabel A.4.** Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi perengkahan katalitik minyak *canola* (Katikanenei *et al.*, 1995)

Produk	Suhu (°C)			
	374	400	450	500
<b>CH<sub>4</sub></b>	0,072 %	0,325 %	0,272 %	1,1 %
<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	0,288	0,5	2,244	5,2
<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	0,24	0,525	0,612	1,9
<b>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub></b>	0,48	0,9	4,352	7,8
<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	10,176	9,9	10,608	16,4
<b>Benzena</b>	6,555	6,426	5,824	4,305
<b>Xylena</b>	11,742	15,183	16,072	14,391
<b>Toluena</b>	17,727	18,648	18,144	14,883

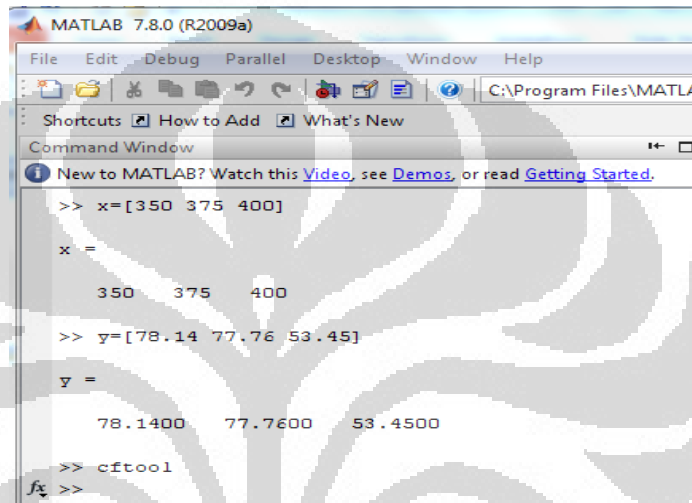
**Tabel A.5.** Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi perengkahan katalitik minyak residu dengan katalis komersil (Meng et al., 2008)

Produk	Suhu (°C)			
	600	630	660	700
ethylene	10,21 %	12,48 %	14,72 %	18,23 %
propylene	19,77	21,56	22,43	19,69
butylene	11,02	10,93	10,45	7,75
total light olefins	41	44,98	47,59	45,67
carbon oxides	1,96	2,46	2,09	2,97
hydrogen	0,25	0,36	0,47	0,76
methane	3,06	4,64	6,6	10,85
ethane	2,32	3,1	3,66	4,45
propane	4,84	3,94	3,15	1,92
butane	4,83	3,09	2,23	0,93

## LAMPIRAN B

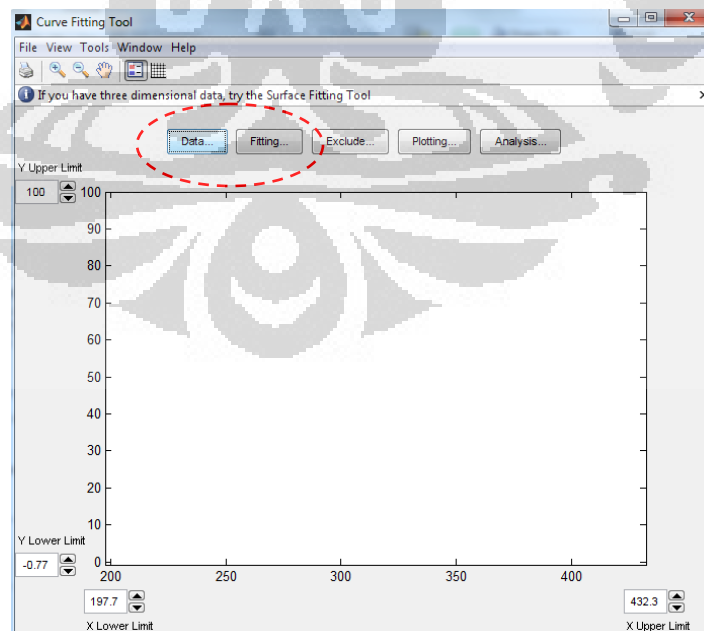
### Tutorial Sederhana Menggunakan *Tools Curve Fitting* pada MATLAB

1. Langkah pertama, masukkan data (x dan y) pada Matlab secara matriks, lalu ketik “cftool” seperti gambar berikut

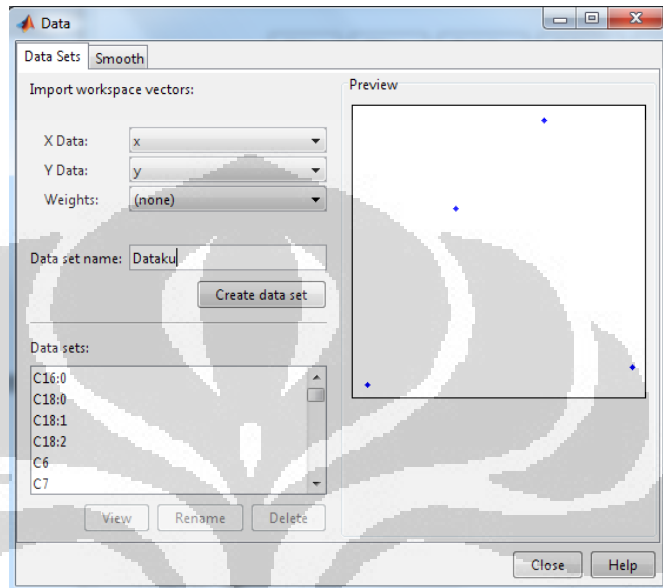


```
MATLAB 7.8.0 (R2009a)
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
C:\Program Files\MATLAB
Shortcuts How to Add What's New
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> x=[350 375 400]
x =
    350    375    400
>> y=[78.14 77.76 53.45]
y =
    78.1400    77.7600    53.4500
>> cftool
fx >>
```

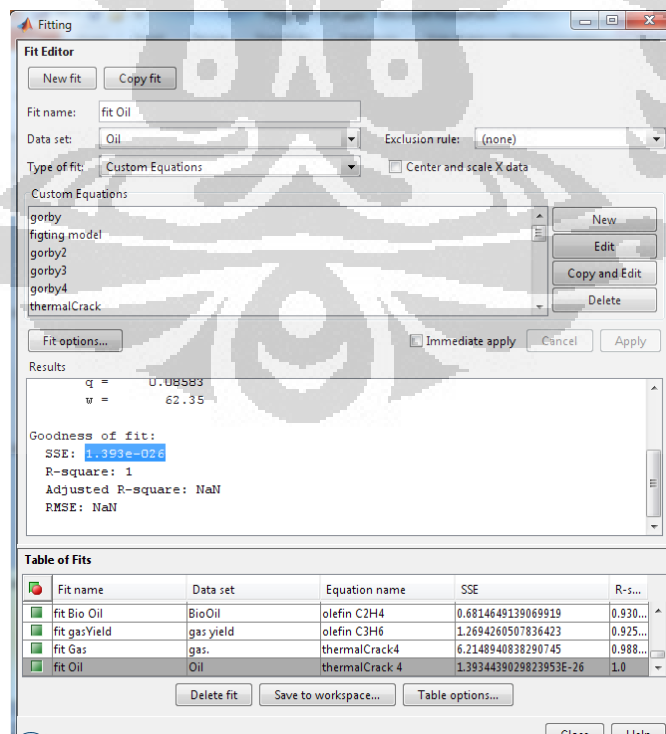
2. Langkah berikutnya tekan enter, maka akan muncul *window*



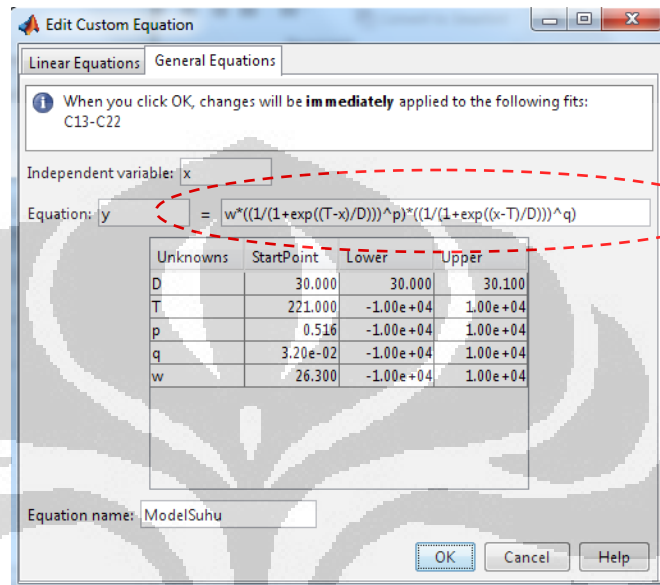
3. Masukkan data dengan mengklik menu data



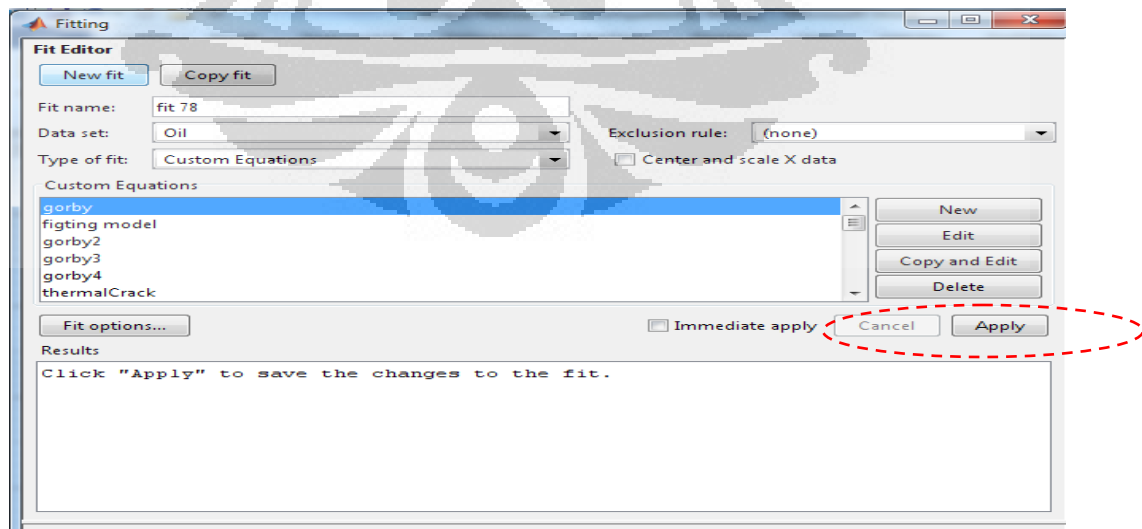
4. Setelah “Create data set” dibuat, tutup jendela dan pilih menu fitting



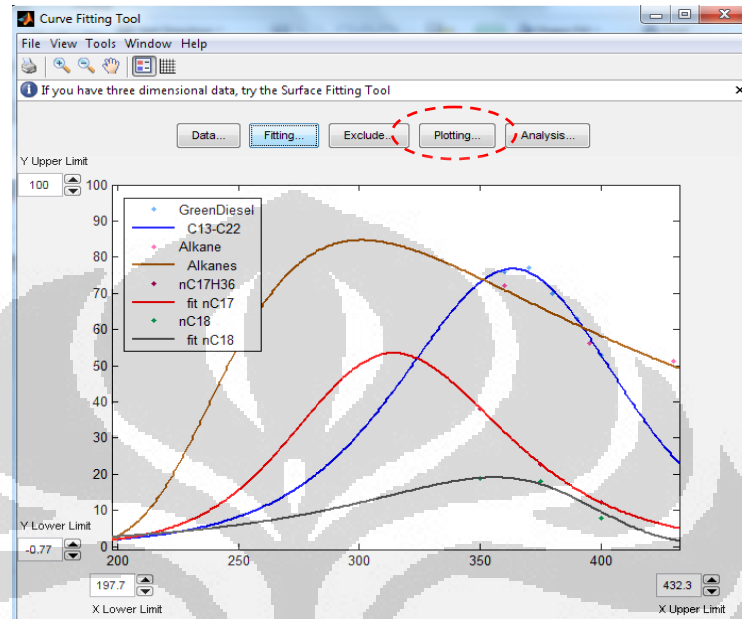
- Pilih *new fit* diberi nama, dan pilih data yang telah kita buat, dan gunakan pilihan *type of fit* “custom equation”, dan klik “new”, masukkan persamaan yang kita gunakan



- Setelah persamaan yang kita masukkan benar, akan muncul parameter-parameter yang harus kita trial dan dibatasi sesuai pemahaman kita terhadap model dan fungsi parameter-parameter tersebut. Klik Ok, kemudian pilih “apply” agar simulasi berjalan



7. Pastikan data set kita sudah benar, kemudian akan muncul hasil simulasi yang dapat kita analisis, atur tampilan data dan fit dengan pilihan “plotting”



8. Ketika hasil SSE dan  $R^2$  masih terlalu jauh, kembali lakukan trial dengan menu edit seperti langkah 5

