

UNIVERSITAS INDONESIA

**MODIFIKASI DAN PENGGUNAAN MODEL PREDIKTIF
UNTUK MEREPRESENTASIKAN PRODUK BERBAGAI
PROSES PERENKAHAN MINYAK NABATI**

SKRIPSI

GORBY GAUTAMA

0606076406



**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
UNIVERSITAS INDONESIA
JULI 2010**

UNIVERSITAS INDONESIA

**MODIFIKASI DAN PENGGUNAAN MODEL PREDIKTIF
UNTUK MEREPRESENTASIKAN PRODUK BERBAGAI
PROSES PERENKAHAN MINYAK NABATI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

GORBY GAUTAMA

0606076406



**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
UNIVERSITAS INDONESIA
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

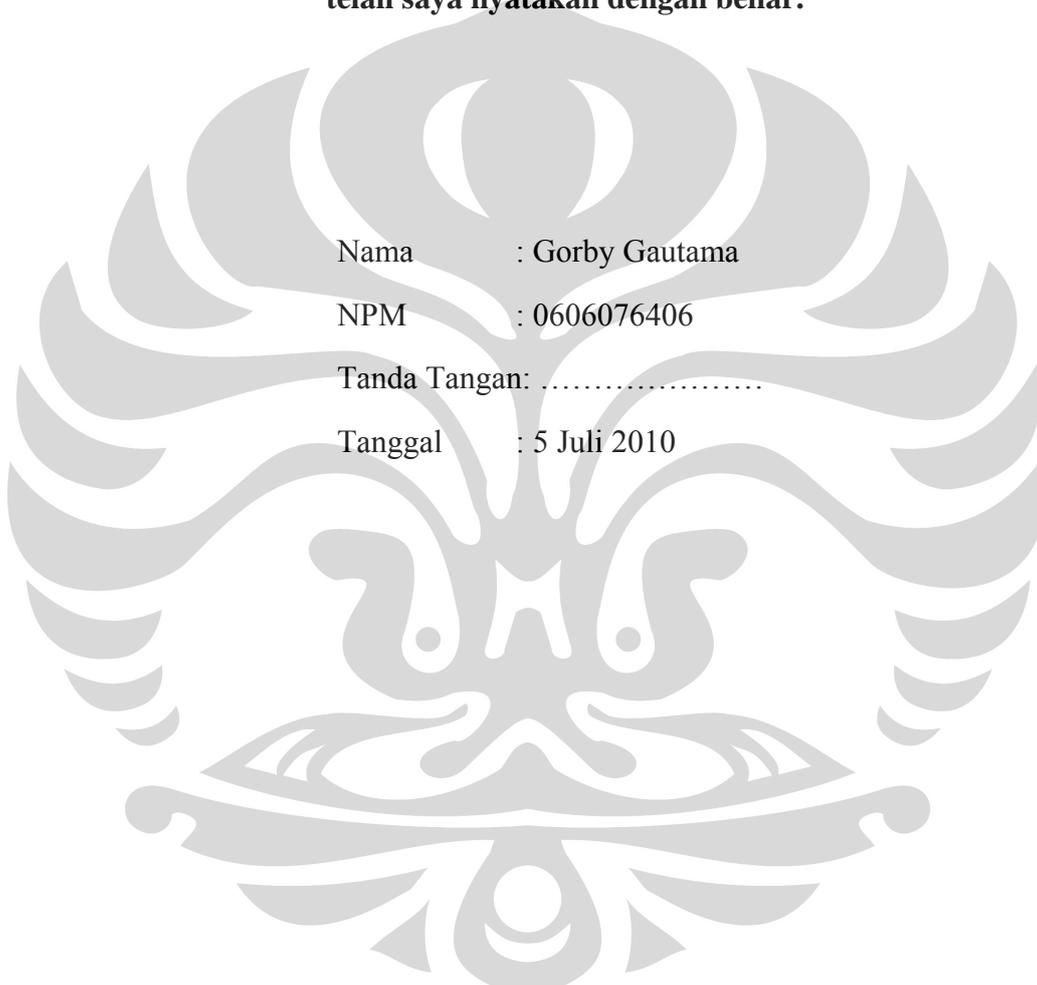
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Gorby Gautama

NPM : 0606076406

Tanda Tangan:

Tanggal : 5 Juli 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Gorby Gautama
NPM : 0606076406
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Modifikasi dan Penggunaan Model Prediktif
Untuk Merepresentasikan Produk Berbagai Proses
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 I : Ir. Bambang Heru Susanto, MT

Penguji I : Ir. Dewi Tristantini, MT, PhD

Penguji II : Ir. Sukirno, M.Eng

(Heru)
(Dewi Tristantini)
(Sukirno)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 5 Juli 2010

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya skripsi ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Skripsi ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Kimia pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Selama proses pembuatan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI
2. Ir. Yuliusman M.Eng selaku kordinator Tugas Akhir Teknik Kimia FTUI
3. Bambang Heru Susanto, ST, MT selaku pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama proses penyusunan skripsi
4. Orangtua dan keluarga yang telah memberikan bantuan berupa dukungan moril dan material
5. Adit, Ka Enti dan Peby sebagai rekan kerja yang sudah membantu dalam pencarian sumber-sumber informasi.
6. Fadli atas bantuan *printernya*, sehingga penulis dapat melengkapi salinan skripsi ini.
7. Teman-teman angkatan 2006, atas persahabatan yang tulus dan kerjasama selama menuntut ilmu dalam 4 tahun ini.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam pembuatan skripsi ini. Untuk ini, saran dan kritik sangat diharapkan untuk memperbaiki penulisan di masa mendatang. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juli 2010

Penulis

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

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

Nama : Gorby Gautama

NPM : 0606076406

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:

MODIFIKASI DAN PENGGUNAAN MODEL PREDIKTIF UNTUK
MEREPRESENTASIKAN PRODUK BERBAGAI PROSES 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 : 5 Juli 2010

Yang menyatakan,

(Gorby Gautama)

ABSTRAK

Nama : Gorby Gautama

Program Studi : Teknik Kimia

Judul : Modifikasi dan Penggunaan Model Prediktif Untuk
Merepresentasikan Produk Berbagai Proses Perengkahan Minyak
Nabati

Perengkahan minyak nabati merupakan salah satu proses pengolahan minyak nabati untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Bahan bakar yang bisa didapatkan dari perengkahan termal atau katalitik dapat berupa biogasolin yang setara dengan bensin dan biodiesel yang setara dengan solar. Komposisi produk perengkahan merupakan faktor penting dalam penentuan jenis bahan bakar yang ingin diperoleh.

Penelitian ini bertujuan untuk merepresentasikan produk-produk perengkahan menggunakan model prediktif dan memberikan gambaran pengaruh variabel suhu dan waktu terhadap proses perengkahan. Data eksperimen beberapa minyak nabati disimulasikan dengan MATLAB menggunakan metode *curve fitting*.

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa model yang digunakan pada variabel suhu telah mampu merepresentasikan produk perengkahan, tetapi untuk model pada variabel waktu masih diperlukan perbaikan. Suhu optimum untuk perengkahan termal berkisar pada suhu 400-450°C dan untuk perengkahan katalitik berkisar pada suhu 320-400°C. Waktu optimum untuk perengkahan berkisar pada 5-25 detik. Uji statistik menunjukkan hubungan signifikan antara suhu dan waktu terhadap yield.

Kata kunci: perengkahan minyak nabati, *curve fitting*, MATLAB

ABSTRACT

Name : Gorby Gautama

Study Program : Chemical Engineering

Title : Modification and Implementation of Predictive Model to Representing Products of Various Processes of Vegetable Oil Cracking

Cracking of vegetable oil is one of process production of fuel that could be made from vegetable oil. Types of fuel that can be obtained from thermal or catalytic cracking are fuel such as bio-gasoline which equivalent with gasoline and bio-diesel which equivalent with diesel fuel. Composition of cracking products is one of the important factors in deciding which fuel that has to produce.

This research objective is to make a representation of cracking products using predictive model and give some view about influence of temperature and residence time in cracking process. Experimental data of vegetable oils cracking are simulated using MATLAB with curve fitting method in its simulation.

Simulation results show that the model can be used in variation of temperature, but not too good in variation of residence time. Optimum temperature for thermal cracking ranged from 400°C to 450°C and for catalytic cracking ranged from 320°C to 400°C. Optimum residence time for both type of cracking ranged from 5 second to 25 second, for vegetable oil cracking. Statistical test show some significant relation between temperature and reaction time with yield.

Key words: cracking of vegetable oil, curve fitting, MATLAB

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR SINGKATAN	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Bahan Bakar Nabati sebagai Alternatif Energi.....	5
2.2. Minyak Nabati.....	6
2.3. Bahan Bakar Bio/Bio-Fuel.....	9
2.4. Pirolisis/Perengkahan Termal	10
2.5. Perengkahan Katalitik	12
2.5.1. Reaksi Katalitik.....	12
2.5.2. Katalitis	13
2.6. <i>Curve Fitting</i>	14
2.6.1. Regresi Least-square	14
2.6.1.1. Regresi Linear	15
2.6.1.2. Regresi Polinomial.....	18

2.6.1.3. Regresi Multi-linear	19
2.6.1.4. Regresi Non-linear	19
2.6.2. Interpolasi.....	22
2.6.2.1. Interpolasi Polinomial Newton's Divided Difference	22
2.6.2.2. Interpolasi Polinomial Lagrange	23
2.6.2.3. Interpolasi Spline	24
2.6.3. Penerapan Curve Fitting dalam Aplikasi MATLAB	25
2.7. Teknik Validasi Statistik	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1. Diagram Alir Penelitian	27
3.2. Pengoperasian MATLAB	29
3.3. Tahap Uji Model Penelitian	33
3.3.1. Penentuan Variabel Operasi.....	33
3.3.2. Teknik Pengolahan Data	33
3.3.3. Teknik Penarikan Kesimpulan	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1. Analisis hasil simulasi pada variasi suhu.....	36
4.1.1. Hasil simulasi pada data perengkahan termal minyak <i>canola</i>	36
4.1.2. Hasil simulasi pada data perengkahan katalitik minyak <i>canola</i>	41
4.1.3. Hasil simulasi pada perengkahan termal minyak jarak pagar.....	46
4.1.4. Hasil simulasi pada perengkahan katalitik minyak sawit	48
4.2. Analisis hasil simulasi pada variasi waktu.....	51
4.2.1. Hasil simulasi pada perengkahan katalitik CPO dengan katalis REY	51
4.2.2. Hasil simulasi pada perengkahan katalitik residu minyak bumi.....	54
4.3. Analisis statistik	56
4.3.1. Uji-t pada simulasi dengan satu variabel	56
4.3.2. Analisis varians (ANOVA) pada simulasi dengan dua variabel.....	57
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	59
DAFTAR REFERENSI	61
LAMPIRAN	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Potensi pemanfaatan minyak nabati sebagai alternatif pemenuhan energi	5
Gambar 2.2. Contoh struktur kimia trigliserida pada minyak nabati	8
Gambar 2.3. Mekanisme awal perengkahan termal hidrokarbon	11
Gambar 2.4. Mekanisme sederhana perengkahan katalitik	13
Gambar 2.5. Contoh <i>curve fitting</i>	15
Gambar 2.6. Contoh kurva polinomial dalam fungsi sinus	18
Gambar 2.7. Contoh kurva interpolasi linear	23
Gambar 2.8. Contoh kurva interpolasi <i>spline</i>	24
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian	28
Gambar 3.2. Diagram alir pengoperasian MATLAB	29
Gambar 4.1. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi olefin pada perengkahan termal minyak <i>canola</i>	38
Gambar 4.2. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi parafin pada perengkahan termal minyak <i>canola</i>	39
Gambar 4.3. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi BTX pada perengkahan termal minyak <i>canola</i>	40
Gambar 4.4. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi BTX pada perengkahan katalitik minyak <i>canola</i>	43
Gambar 4.5. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi olefin pada perengkahan katalitik minyak <i>canola</i>	44
Gambar 4.6. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi parafin pada perengkahan katalitik minyak <i>canola</i>	45
Gambar 4.7. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield produk pada perengkahan termal minyak jarak pagar	47
Gambar 4.8. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield produk pada perengkahan katalitik CPO dengan katalis JRC-ALO-3	49
Gambar 4.9. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield produk pada perengkahan katalitik CPO dengan katalis zeolit REY	50
Gambar 4.10. Hasil simulasi - pengaruh waktu tinggal terhadap yield produk pada perengkahan katalitik CPO dengan katalis zeolit REY	52

Gambar 4.11. Grafik respon perubahan yield terhadap pengaruh suhu dan waktu pada fraksi gasolin hasil perengkahan katalitik minyak sawit dengan katalis REY 53

Gambar 4.12. Hasil simulasi - pengaruh waktu tinggal terhadap yield produk pada perengkahan katalitik residu minyak bumi dengan katalis komersil 55



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sifat beberapa minyak nabati dengan potensi bahan bakar alternatif ..	6
Tabel 2.2. Komposisi asam lemak dalam beberapa jenis minyak nabati	7
Tabel 2.3. Nama beberapa asam lemak penyusun minyak nabati	8
Tabel 2.4. Beberapa metode pirolisis dan variasi operasi serta produknya	11
Tabel 4.1. Parameter hasil simulasi <i>curve fitting</i> pada data perengkahan termal minyak <i>canola</i>	36
Tabel 4.2. Parameter hasil simulasi <i>curve fitting</i> pada data perengkahan termal minyak <i>canola</i>	42
Tabel 4.3. Parameter hasil simulasi <i>curve fitting</i> pada data perengkahan termal minyak jarak pagar	46
Tabel 4.4. Parameter hasil simulasi <i>curve fitting</i> pada data perengkahan katalitik minyak sawit dengan katalis JRC-ALO-3	48
Tabel 4.5. Parameter hasil simulasi <i>curve fitting</i> pada data perengkahan katalitik CPO dengan katalis zeolit REY	50
Tabel 4.6. Parameter hasil simulasi <i>curve fitting</i> pada data perengkahan termal katalitik CPO dengan katalis zeolit REY	51
Tabel 4.7. Parameter hasil simulasi <i>curve fitting</i> pada data perengkahan termal katalitik residu minyak bumi dengan katalis komersil	54
Tabel 4.8. Tabel keseluruhan simulasi yang dilakukan	56
Tabel 4.9. Hasil uji- <i>t</i> pada simulasi dengan variasi suhu	57
Tabel 4.10. Analisis varians (ANOVA) pada variabel suhu dan waktu	58
Tabel A.1. Data hasil eksperimen perengkahan termal minyak <i>canola</i>	64
Tabel A.2. Data hasil eksperimen perengkahan katalitik minyak <i>canola</i>	64
Tabel A.3. Data hasil eksperimen perengkahan termal minyak jarak pagar	65
Tabel A.4. Data hasil eksperimen perengkahan katalitik minyak sawit dengan katalis JRC-ALO-3	65
Tabel A.5. Data hasil eksperimen perengkahan katalitik CPO menggunakan katalis zeolit REY	65
Tabel A.6. Data hasil eksperimen perengkahan katalitik CPO menggunakan katalis zeolit REY	66
Tabel A.7. Data hasil eksperimen perengkahan katalitik residu minyak bumi menggunakan katalis komersil	66

DAFTAR SINGKATAN

ANOVA = Analysis of Variance

MATLAB = Matrix Laboratory[®]

SSE = Sum of Square Estimate of Residual atau Estimate Sum of Square



DAFTAR NOTASI

T	= suhu perengkahan ($^{\circ}\text{C}$)
t	= waktu tinggal perengkahan ($^{\circ}\text{C}$)
w	= parameter logistik yang menunjukkan maksimal yield (%berat)
T_0	= parameter logistik yang menunjukkan suhu ($^{\circ}\text{C}$)
D	= parameter logistik yang berhubungan dengan suhu ($^{\circ}\text{C}$)
p	= konstanta yang berhubungan dengan peningkatan produk perengkahan
q	= konstanta yang berhubungan dengan penurunan produk perengkahan
T_1	= parameter logistik yang menunjukkan suhu ($^{\circ}\text{C}$)
K_0	= konstanta reaksi (s^{-1})
r_1	= parameter logistik yang berhubungan dengan waktu reaksi
r^2	= koefisien determinasi

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Kebutuhan negara di dunia akan energi fosil dari tahun ke tahun terus meningkat. Di Indonesia sendiri kebutuhan akan energi fosil sangat besar mencapai 50% dari kebutuhan energi nasional^[1]. Akan tetapi hal ini berbanding terbalik dengan jumlah cadangan minyak bumi yang telah ditemukan semakin menipis. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi terbarukan sebagai alternatif sangat diperlukan dalam mengantisipasi krisis energi dunia di masa depan dan mengurangi ketergantungan atas bahan bakar fosil khususnya di Indonesia.

Bahan yang dapat digunakan untuk alternatif tersebut salah satunya adalah minyak jarak pagar (*Jatropha curcas L.*) yang dapat disintesis menjadi minyak bio yang memiliki kualitas setara bahan bakar solar^[2,3]. Prospek pemanfaatan minyak jarak pagar sebagai bahan bakar alternatif saat ini sangat menjanjikan karena mendapatkan perhatian dari pemerintah secara serius, terbukti dengan dirintisnya penelitian dan pengembangan oleh berbagai instansi pemerintahan dan pendidikan di Indonesia^[2]. Disamping itu, penggunaan minyak jarak pagar dapat menciptakan lapangan kerja di pedesaan dan pemulihan kembali lahan kritis^[4].

Beberapa upaya yang telah dilakukan untuk menurunkan viskositas minyak jarak pagar (*Jatropha curcas L.*) adalah dilusi dengan hidrokarbon (*blending*), emulsifikasi, alkoholisis (*transesterifikasi*) dan perengkahan (*pirolisis* atau *thermal cracking* dan *catalytic cracking*)^[5]. Goyal dkk. melakukan percobaan dengan pirolisis cepat pada biji minyak jarak pagar di dalam reaktor fixed bed dengan rentang suhu 400-600°C dan dengan penambahan spesi inert nitrogen^[6]. Hasil yang didapatkan menunjukkan yield minyak cair maksimum sebesar 18%.

Di Departemen Teknik Kimia FTUI (DTK-FTUI) sendiri telah dilakukan penelitian untuk memodifikasi konverter minyak jarak pagar menjadi minyak bio setara solar dengan metode proses pirolisis sejak tahun 2007, dimana minyak bio

yang dihasilkan ternyata masih bersifat viskos dan belum stabil secara termal. Salah satunya dilakukan oleh Rohmah yang melakukan perengkahan termal pada minyak jarak pagar yang dilakukan pada reaktor pirolisis^[7]. Pada penelitian tersebut, dilakukan variasi suhu operasi pada 300-375°C dan waktu proses selama 5-30 menit. Produk yang dihasilkan masih belum dapat digunakan secara efektif sebagai bahan bakar. Selain itu, yield produk yang dihasilkan didominasi oleh molekul C₁₆-C₁₈ yang menunjukkan perengkahan hampir tidak terjadi, karena minyak jarak pagar memiliki komposisi trigliserida dengan rantai C₁₆-C₁₈^[7].

Oleh karena itu, perlu dilakukan simulasi proses perengkahan yang bertujuan untuk mengetahui kondisi optimum proses perengkahan minyak jarak atau minyak nabati lain. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah membuat model prediksi produk perengkahan dengan metode empiris berdasarkan data eksperimen dan menggunakan beberapa parameter yang terkait dengan proses perengkahan. Metode empiris yang digunakan adalah berupa *curve fitting* pada data eksperimen perengkahan minyak nabati yang memiliki kemiripan dengan minyak jarak dan menghasilkan produk perengkahan yang diinginkan.

Beberapa jenis minyak nabati yang memiliki kemiripan dengan minyak jarak diantaranya adalah minyak *canola* dan minyak sawit. Kedua jenis minyak tersebut telah banyak digunakan dalam eksperimen mengenai perengkahan minyak nabati dan diantaranya memiliki hasil yang memuaskan. Pada perengkahan termal minyak *canola*^[8], didapatkan yield maksimum produk gas mencapai 75%, dengan sebagian besar berupa gas etena, sedangkan untuk perengkahan katalik pada minyak sawit dengan katalis HZSM-5^[9], didapatkan konversi hingga 96%, dengan yield gas sebesar 47%. Data ini yang nantinya digunakan dalam simulasi untuk menggantikan kekurangan pada data perengkahan minyak jarak.

Hasil yang ingin didapatkan adalah mengetahui hasil perengkahan pada rentang suhu dan waktu tertentu sehingga dapat ditentukan kondisi optimum dari proses perengkahan pada minyak nabati. Selain itu, model ini diharapkan dapat digunakan untuk merepresentasi dan mengorganisir data produk-produk perengkahan sesuai dengan rentang suhu dan waktu yang digunakan. Representasi ini dapat digunakan untuk mendapatkan suatu hubungan antar kelompok data

dengan parameter yang digunakan, sehingga dapat pula digunakan untuk proses perengkahan minyak nabati jenis lain.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana membuat model prediktif yang dapat digunakan untuk merepresentasikan dan memprediksi produk perengkahan minyak nabati, seperti minyak jarak dan minyak sawit, menjadi bahan bakar bio pada rentang suhu dan waktu tertentu yang optimum.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menghasilkan model prediktif yang dapat digunakan untuk merepresentasikan produk perengkahan pada rentang suhu tertentu.
2. Menentukan suhu optimum proses perengkahan sesuai model yang digunakan.
3. Menentukan waktu tinggal optimum pada proses perengkahan sesuai model yang digunakan.

1.4. Batasan Masalah

Dalam makalah ini, pembahasan dilakukan dengan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Data yang digunakan adalah data sekunder yang didapatkan dari eksperimen mengenai perengkahan minyak jarak pagar, minyak *canola*, minyak sawit, dan minyak residual. Data perengkahan pada minyak residual digunakan sebagai perbandingan untuk melihat pengaruh waktu tinggal pada proses perengkahan.
2. Proses perengkahan yang menjadi studi dalam penelitian ini adalah berupa perengkahan termal (pirolisis) dan perengkahan katalitik.

3. Perangkat lunak yang digunakan dalam *curve fitting* data eksperimen adalah MATLAB.
4. Variabel proses yang dioptimalkan adalah suhu operasi dan waktu tinggal proses perengkahan.

1.5. 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 dilakukannya penelitian, batasan-batasan masalah, serta sistematika penulisan.
- BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**
Berisi tinjauan pustaka yang dijadikan dasar penelitian. Meliputi penjelasan mengenai pengertian, sifat, komposisi, dan kegunaan beberapa minyak nabati, proses perengkahan termal pada minyak nabati dari segi kinetis dan termodinamis 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**
Meliputi pembahasan hasil penelitian dari model yang digunakan beserta analisis pada hasil *fitting*.
- BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN**

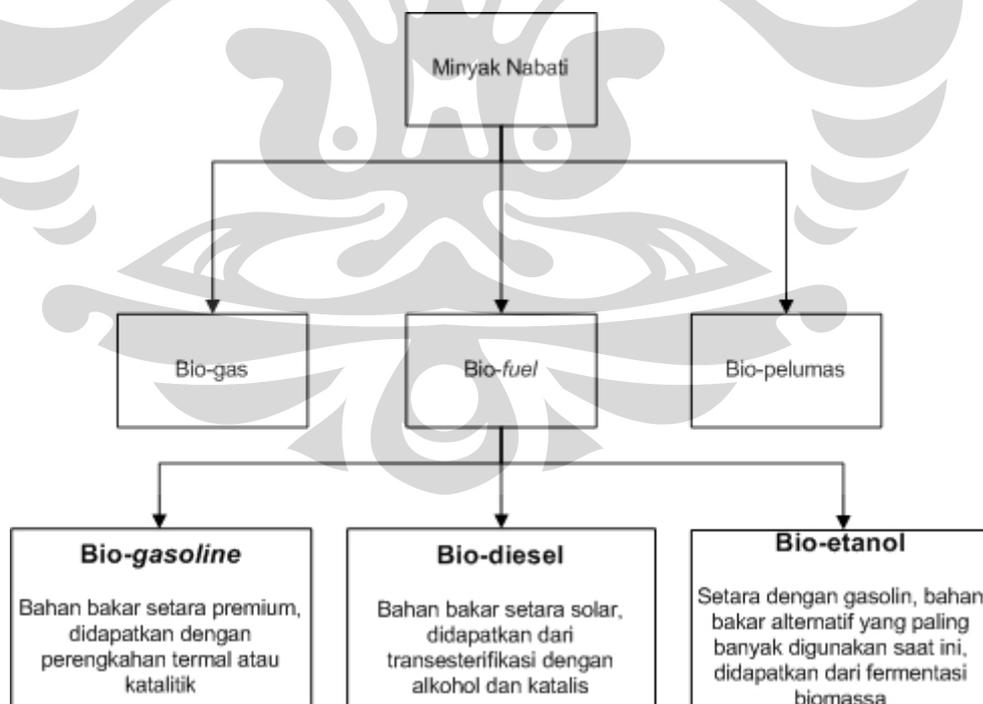
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2. 1. Bahan Bakar Nabati sebagai Alternatif Energi

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 kemanfaatannya.



Gambar 2.1. Potensi pemanfaatan minyak nabati sebagai alternatif pemenuhan energi^[10,11]

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, diantaranya terdapat pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.1. Sifat beberapa minyak nabati dengan potensi bahan bakar alternatif^[10]

Minyak nabati	Viskositas (cSt)	Densitas (g/L)	Titik Flash (K)	HHV (MJ/kg)
Ailanthus	30,2	916	513	39,44
Bay laurel	23,2	921	499	39,30
Beech	34,6	915	515	39,59
Beechnut	38,0	912	533	39,82
Corn	35,4	914	532	39,66
Cottonseed	33,5	915	524	40,38
Hazelnut	24,0	920	503	39,33
Linseed	27,2	921	520	39,50
Mustard oil	33,8	913	518	39,57
Olive	29,8	918	504	39,50
Palm	24,1	923	501	39,74
Peanut	39,6	908	543	39,85
Rapeseed	37,3	912	531	39,52
Safflower seed	31,3	914	531	39,79
H.O. safflower	41,2	906	548	39,51
Sesame	35,5	913	533	39,63
Soybean	32,6	914	528	39,44
Spruce	35,6	914	513	39,57
Sunflower seed	33,9	916	535	39,59

2. 2. Minyak Nabati

Minyak nabati merupakan minyak dari tanaman yang mengandung minyak pada biji dan buahnya, yang diperoleh dari hasil ekstrak tanaman tersebut. Penggunaan minyak nabati dalam kebutuhan sehari-hari telah diketahui sejak dulu. Pada tahun 1930-1940, minyak nabati digunakan sebagai bahan bakar diesel

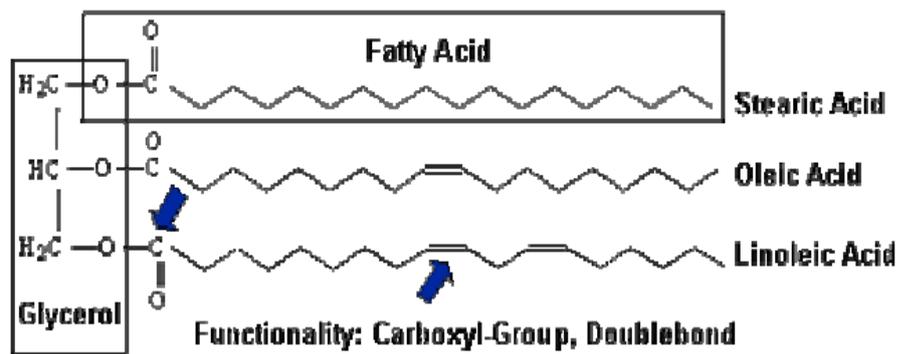
dalam keadaan darurat. Namun, saat ini akibat meningkatnya harga minyak bumi dan isu lingkungan, maka penggunaan minyak nabati sebagai bahan bakar semakin meningkat^[11].

Lemak dan minyak merupakan komponen utama dari minyak nabati yang tersusun dari 1 mol gliserol dan 3 mol asam lemak atau biasa disebut trigliserida. Asam lemak dalam suatu trigliserida minyak nabati bervariasi panjang dan jumlah rantainya, serta berbeda kejenuhannya. Asam lemak yang terdapat dari beberapa minyak nabati dituliskan dalam tabel berikut.

Tabel 2.2. Komposisi asam lemak dalam beberapa jenis minyak nabati^[3,11]

Asam lemak		Jatropha	Palm	Canola	Kedelai	Jagung
Asam Miristat	14:0	0 - 0,1	0,9 - 1,5	-	0 - 0,1	-
Asam Palmitat	16:0	14,1 - 15,3	39,2 - 45,8	4	10,2 - 11,7	11,67
Asam Stearat	18:0	3,7 - 9,8	3,7 - 5,1	2	3,1 - 3,7	1,85
Asam Palmitoleat	16:1	0 - 1,3	0 - 0,4	-	0 - 0,3	-
Asam Oleat	18:1	34,3 - 45,8	37,4 - 44,1	60	22,8 - 23,2	25,16
Asam Linoleat	18:2	29,0 - 44,2	8,7 - 12,5	20	53,7 - 55,5	60,60
Asam Linolenat	18:3	0 - 0,3	0 - 0,6	10	6,3 - 8,6	0,48
Asam Arakhidat	20:0	0 - 0,3	0 - 0,04	-	0 - 0,02	0,24

Komposisi asam lemak sangat mempengaruhi kualitas minyak/lemak yang didapat. Asam lemak penyusun trigliserida berupa campuran dari berbagai macam asam lemak. Untuk menentukan urutan posisi dari asam lemak yang terikat dengan gliserol sangatlah sulit. Oleh karena itu, hanya dapat diketahui komposisinya melalui reaksi pemutusan trigliserida menjadi asam lemaknya dan kemudian diketahui persen berat dari masing-masing asam lemak penyusunnya.



Gambar 2.2 Contoh struktur kimia trigliserida pada minyak nabati^[12]

Asam lemak yang dijumpai di alam hampir selalu mempunyai atom karbon berjumlah genap. Sebagian besar asam lemak alam mempunyai rantai karbon tidak bercabang dan berbeda satu sama lain, dalam hal panjang rantai dan derajat ketidakteraturannya. Asam-asam lemak yang terdapat pada minyak atau lemak umumnya adalah:

Tabel 2.3 Nama beberapa asam lemak penyusun minyak nabati^[12]

Nama IUPAC	Nama Trivial	Rumus Molekul
Asam Butanoat	Asam Butirat	C_3H_7COOH
Asam Heksanoat	Asam Kaproat	$C_5H_{11}COOH$
Asam Oktanoat	Asam Kaprilat	$C_7H_{15}COOH$
Asam Dekanoat	Asam Kaprat	$C_9H_{19}COOH$
Asam Dodekanoat	Asam Laurat	$C_{11}H_{23}COOH$
Asam Tetradekanoat	Asam Miristat	$C_{13}H_{27}COOH$
Asam Heksadekanoat	Asam Palmitat	$C_{15}H_{31}COOH$
Asam Oktadekanoat	Asam Stearat	$C_{17}H_{35}COOH$
Asam 9-oktadekanoat	Asam Oleat	$C_{17}H_{33}COOH$
Asam 9,12-oktadekadienoat	Asam Linoleat	$C_{17}H_{31}COOH$
Asam 9,12,15-oktadekatrienoat	Asam Linolenat	$C_{17}H_{29}COOH$

2. 3. Bahan Bakar Bio/Bio-Fuel

Bahan bakar bio/bio-fuel adalah jenis bahan bakar terbarukan yang berasal dari bahan baku organik seperti minyak nabati, biomassa, atau lemak hewani^[13]. 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^[14].

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^[15]. 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.

Biogasoline merupakan bahan bakar alternatif yang digunakan untuk mesin berbahan bakar bensin/gasoline dan berasal dari minyak nabati sehingga dapat disebut juga sebagai bahan bakar *renewable* (dapat diperbaharui)^[14]. Biogasoline dapat dihasilkan melalui perengkahan termal atau perengkahan katalitik minyak nabati, dimana trigliserida yang terkandung dalam minyak nabati akan terpecah menjadi campuran senyawa penyusun gasoline (C_5-C_{11})^[15]. Hambatan yang terdapat dalam produksi biogasoline adalah kebutuhan energi yang cukup besar dan sulitnya produk biogasoline untuk mencapai viskositas dan bilangan oktan yang sesuai dengan kriteria bensin konvensional^[14].

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang digunakan untuk mesin berbahan bakar diesel/solar^[15]. 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^[15]. Selain transesterifikasi, biodiesel juga dapat dihasilkan

melalui perengkahan termal atau katalitik. Dalam pemanfaatannya dicampur dengan minyak solar dengan perbandingan tertentu.

Bioetanol merupakan *anhydrous* alkohol yang berasal dari fermentasi tetes tebu, singkong, jagung atau sagu^[14]. Bioetanol dimanfaatkan untuk mengurangi konsumsi premium. Bioetanol diproduksi dari fermentasi tanaman seperti jagung, singkong, tebu, dan sebagainya. Bioetanol juga dapat dihasilkan dari bahan-bahan dengan selulosa seperti rumput-rumputan, dan sebagainya.

Proses produksi bahan bakar bio yang dikenal saat ini diantaranya adalah:

1. Transesterifikasi/esterifikasi (alkoholisis)
2. Mikro emulsi
3. Perengkahan (termal, katalitik, pirolisis)

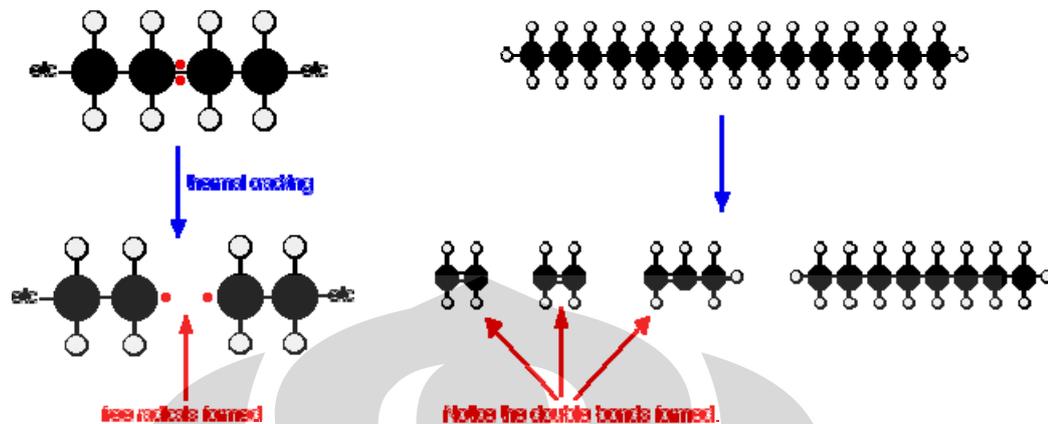
2. 4. Pirolisis/Perengkahan Termal

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^[16].

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, dimana produk minyak hasil pirolisis memiliki potensi tinggi sebagai bahan bakar alternatif^[16].

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^[17].



Gambar 2.3 Mekanisme awal perengkahan termal hidrokarbon^[17]

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^[16]. 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 di bawah ini.

Tabel 2.4. Beberapa metode pirolisis dan variasi operasi serta produknya^[18]

Teknologi Pirolisis	Residence Time	Laju pemanasan	Suhu ($^{\circ}C$)	Produk
Konvensional	5-30 menit	Rendah	600	Minyak, gas, arang
Pirolisis cepat	0,5-5 detik	Sangat tinggi	650	Minyak bio
Flash-cair	$q < 1$ detik	Tinggi	< 650	Minyak bio
Flash-gas	< 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 residua atau sisa minyak yang tidak terengkah) dengan massa reaktan.

$$\text{Konversi} = \frac{\text{massa reaktan} - \text{massa residu}}{\text{massa reaktan}} \times 100\%$$

$$\text{Yield} = \frac{\text{massa fraksi produk}}{\text{massa reaktan}} \times 100\%$$

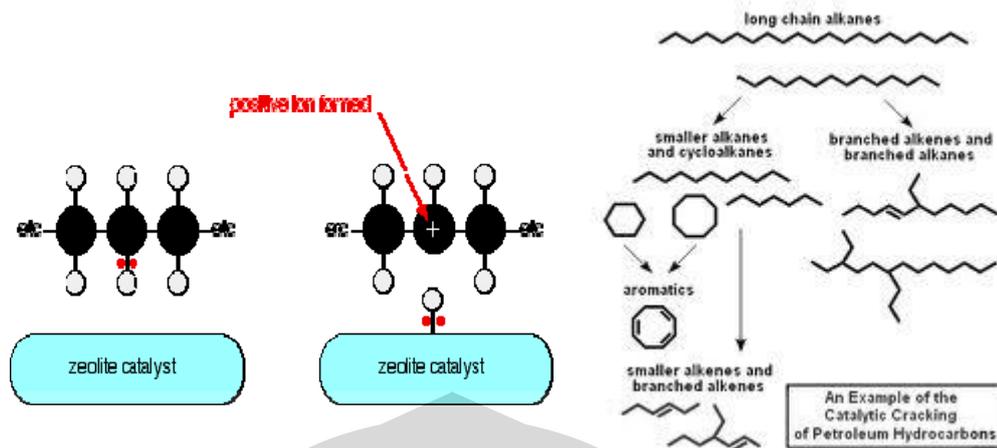
Jenis produk yang didapatkan dari hasil perengkahan biasa dibagi kedalam beberapa fraksi, seperti fraksi parafin (hidrokarbon alkana C_nH_{2n+2}), fraksi olefin (hidrokarbon alkena C_nH_{2n}), fraksi BTX, dan sebagainya.

2.5. Perengkahan Katalitik

2.5.1. Reaksi 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, dimana 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^[20].

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^[20].



Gambar 2.4 Mekanisme sederhana perengkahan katalitik^[17]

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

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

2.5.2. 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^[19].

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 terjerap (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^[19].

2.6. Curve Fitting

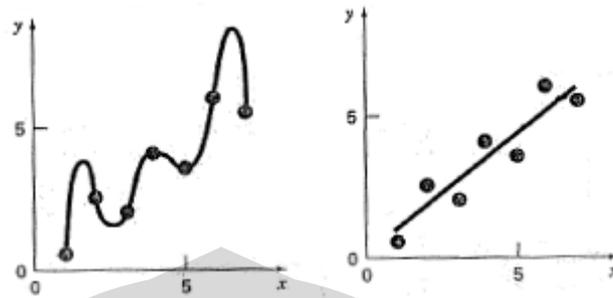
Curve fitting merupakan proses pembentukan suatu kurva atau grafik fungsi matematis yang memiliki kecocokan terhadap sejumlah titik data dan menghasilkan grafik yang mewakili data dengan persamaan beserta batasannya (parameter)^[21]. *Curve fitting* digunakan untuk mengetahui adanya pola dalam suatu kumpulan data yang dapat digambarkan secara grafis dan diwakili oleh persamaan matematis^[22]. *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^[22]. Yang 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.

2.6.1. Regresi Least-square

Regresi least-square merupakan metode pembentukan kurva dengan metode kuadrat error residual terkecil yang digunakan dalam pengolahan datanya^[22].

Metode least-square merupakan metode termudah dalam fitting dan paling sering digunakan.



Gambar 2.5. Contoh *curve fitting*, kiri: interpolasi polynomial; kanan: least-square linear^[22]

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.

2.6.1.1. Regresi Linear^[22]

Regresi linear digunakan untuk data yang memiliki kecenderungan gradien yang sama disepanjang titik atau dengan kata lain membentuk sebuah garis lurus^[22]. Untuk mendapatkan sebuah kurva linear, diperlukan minimal dua titik data. Fungsi matematis yang digunakan adalah sebagai berikut,

$$y = a_0 + a_1x + e \quad (2.1)$$

dimana 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 (2.1).

$$e = y - a_0 - a_1x \quad (2.2)$$

Dari persamaan diatas, dapat dikatakan error atau residual merupakan penyimpangan antara nilai observasi y dengan nilai perkiraan $a_0 + a_1x$, yang diprediksi dengan persamaan linear diatas. Nilai error merupakan salah satu kriteria yang menentukan bagus tidaknya kurva yang dihasilkan. Contohnya untuk beberapa titik data, persamaan diatas berubah menjadi,

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i) \quad (2.3)$$

Persamaan ini belum memenuhi kriteria pembentukan kurva yang baik karena masih memiliki beberapa penyimpangan dalam berbagai kasus. Oleh karena itu, persamaan diatas dimodifikasi untuk memenuhi kriteria dan menjadi,

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i,observasi} - y_{i,fungsi})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i)^2 \quad (2.4)$$

Dimana S_r dapat dikatakan sebagai sistem dari persamaan linear simultan sejumlah n dan merupakan jumlah kuadrat dari residu antara data dan hasil perhitungan. Untuk menentukan nilai a_0 dan a_1 , persamaan di atas diturunkan terhadap koefisien masing-masing. Untuk mendapatkan fit yang baik sesuai dengan metode *least-square*, turunan di atas harus memiliki nilai minimum nol.

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_r}{\partial a_0} &= -2 \sum (y_i - a_0 - a_1x_i) = 0 \\ \frac{\partial S_r}{\partial a_1} &= -2 \sum [(y_i - a_0 - a_1x_i)x_i] = 0 \end{aligned} \quad (2.5 \ \& \ 2.6)$$

Persamaan di atas dijabarkan kembali menjadi,

$$\begin{aligned}\sum y_i - \sum a_0 - \sum a_1 x_i &= 0 \\ \sum y_i x_i - \sum a_0 x_i - \sum a_1 x_i^2 &= 0\end{aligned}\quad (2.7 \& 2.8)$$

dengan $\sum a_0 = na_0$, persamaan diatas dijabarkan menjadi dua persamaan simultan dengan dua variabel tak diketahui.

$$na_0 + (\sum x_i)a_1 = \sum y_i \quad (2.9)$$

$$(\sum x_i)a_0 + (\sum x_i^2)a_1 = \sum x_i y_i \quad (2.10)$$

Persamaan ini disebut persamaan normal, yang dapat diselesaikan secara simultan untuk mendapatkan nilai a_0 dan a_1 menjadi,

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.11)$$

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (2.12)$$

dimana \bar{y} dan \bar{x} merupakan rata-rata dari y dan x .

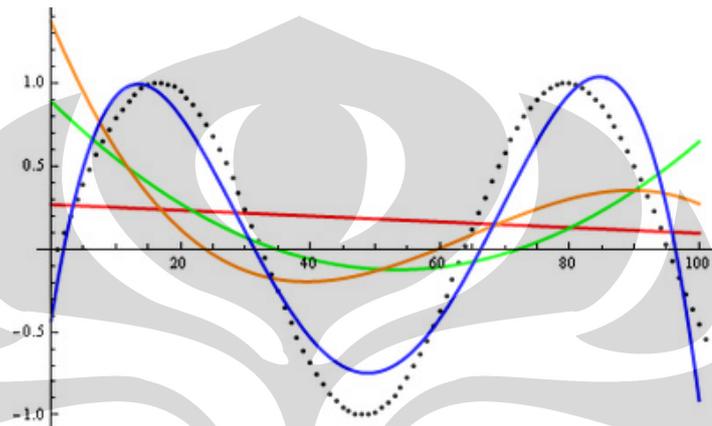
Perhitungan penyimpangan regresi linear untuk mendapatkan kurva yang baik dilakukan dengan menghitung residual SSE, penyimpangan akibat regresi SSR, koefisien korelasi r dan koefisien determinasi r^2 .

$$\begin{aligned}SSE &= y_{data} - y_{fit} & SSR &= y_{fit} - y_{rata-rata} \\ r^2 &= \frac{SSR}{SSR + SSE}\end{aligned}\quad (2.13)$$

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.

2.6.1.2. Regresi Polinomial^[22]

Regresi polinomial merupakan regresi yang dilakukan pada data yang memiliki kecenderungan membentuk “puncak” dan/atau “lembah” secara grafis dan tidak dapat direpresentasikan dengan baik secara linear. Jumlah “puncak” dan “lembah” yang ada tergantung pada orde polinomial tersebut, seperti orde dua (kuadratik) yang memiliki satu “puncak” atau “lembah”.



Gambar 2.6. Contoh kurva polinomial dalam fungsi sinus. Kurva merah: polinomial orde satu (linear), kurva hijau: polinomial orde dua (kuadratik), kurva oranye: polinomial orde tiga, kurva biru: polinomial orde empat^[21]

Persamaan umum yang digunakan dalam regresi polinomial adalah,

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e \quad (2.14)$$

dimana m merupakan jumlah orde.

Perhitungan penyelesaian dari persamaan regresi polinomial serupa dengan penyelesaian pada regresi linear, hanya terdapat tambahan variabel dan parameter. Begitu pula pada perhitungan penyimpangannya, serupa dengan penyimpangan pada regresi linear.

2.6.1.3. Regresi Multi-linear^[22]

Regresi multi-linear merupakan jenis regresi yang memiliki data linear tetapi dengan variabel yang berbeda. Regresi ini merupakan contoh kasus dari regresi linear. Persamaan umum yang digunakan dalam regresi multi-linear adalah,

$$y = a_0 + a_1x + a_2x_2 + \dots + a_mx_m + e \quad (2.15)$$

dimana m merupakan jumlah variabel.

2.6.1.4. Regresi Non-linear^[22]

Regresi non-linear merupakan bentuk analisis regresi dimana data observasi dimodelkan dengan fungsi yang terdiri dari kombinasi parameter model yang non-linear dan bergantung pada satu lebih variabel yang independen. Regresi non-linear dilakukan pada kasus dimana data hanya bisa fit dengan model non-linear. Istilah non-linear pada hal ini adalah parameter yang terdapat dalam model memiliki hubungan yang non-linear. Contoh dari persamaan non-linear diantaranya adalah persamaan eksponensial, rasio polinomial, fungsi pangkat, dan sebagainya.

Seperti dalam regresi linear, regresi non-linear dilakukan berdasarkan penentuan nilai parameter dan meminimalkan jumlah kuadrat residu penyimpangan. Namun, pada regresi non-linear, perhitungan lebih sulit dilakukan karena koefisien model tidak dapat diestimasi dengan teknik matriks sederhana, melainkan dengan menggunakan proses iterasi. Tahapan umum yang dilakukan dalam proses iterasi persamaan non-linear adalah sebagai berikut.

1. Dimulai dengan menentukan perkiraan awal setiap koefisien.
2. Membentuk kurva dengan koefisien yang ada
3. Mengatur nilai koefisien dan melihat apakah kurva lebih fit. Pengaturan dilakukan bergantung pada algoritma yang digunakan.
4. Melakukan iterasi berulang ke langkah 2 hingga dicapai fit yang memenuhi kriteria.

Terdapat beberapa metode iterasi untuk penyelesaian persamaan non-linear, diantaranya metode Gauss-Newton, metode Levenberg-Mardquardt dan metode

trust region. Metode Gauss-Newton merupakan metode paling sederhana dan cepat dalam perhitungan dengan basis ekspansi deret Taylor, tetapi keakuratannya rendah karena mengasumsikan residu penyimpangan mendekati nol. Metode Levenberg-Mardquardt telah digunakan selama bertahun-tahun dan telah terbukti tepat pada kisaran data non-linear yang luas. Metode ini tidak memerlukan koefisien pembatas sehingga dapat memudahkan perhitungan tetapi akurasiya berkurang. Metode *trust-region* merupakan metode terbaru yang membutuhkan koefisien pembatas dalam perhitungannya. Metode ini dapat menyelesaikan masalah non-linear yang sulit lebih efisien dan lebih tepat dibanding metode algoritma lain. Untuk memberikan gambaran proses perhitungan regresi non-linear, berikut ini akan dijelaskan tahapan penyelesaian persamaan non-linear menggunakan metode Gauss-Newton.

Sebagai contoh, terdapat persamaan non-linear umum sebagai berikut,

$$y_i = f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m) + e_i \quad (2.16)$$

dimana y_i = nilai terhitung dari variabel dependen, $f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m)$ = persamaan dengan fungsi dari variabel independen x_i dan parameter fungsi non-linear a_0, a_1, \dots, a_m dan e_i = penyimpangan acak.

Model non-linear dapat diekspansi dalam deret Taylor sesuai nilai parameternya dan diikuti turunan pertamanya. Contohnya, dalam kasus dua parameter berikut,

$$f(x_i)_{j+1} = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 \quad (2.17)$$

dimana j = perkiraan awal, $j+1$ = prediksi, $\Delta a_0 = a_{0,j+1} - a_{0,j}$ dan $a_1 = a_{1,j+1} - a_{1,j}$. Kemudian, mensubstitusi persamaan (2.17) dengan persamaan (2.16) yang telah disederhanakan dengan menghilangkan parameter, sehingga didapatkan,

$$y_i - f(x_i)_j = \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + e_i \quad (2.18)$$

atau dapat dituliskan dalam bentuk matriks menjadi,

$$\{D\} = [Z_j]\{\Delta A\} + \{E\} \quad (2.19)$$

dimana $[Z_j]$ adalah matriks turunan parsial dari fungsi yang dievaluasi dari perkiraan awal j , yang dapat dituliskan dalam persamaan berikut,

$$[Z_j] = \begin{pmatrix} \partial f_1 / \partial a_0 & \partial f_1 / \partial a_1 \\ \partial f_2 / \partial a_0 & \partial f_2 / \partial a_1 \\ \vdots & \vdots \\ \partial f_n / \partial a_0 & \partial f_n / \partial a_1 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

dimana n = jumlah titik data dan $\partial f_n / \partial a_k$ = turunan parsial fungsi terhadap parameter k pada titik data i . Vektor $\{D\}$ berisi selisih antara data observasi dengan hasil perhitungan dalam fungsi,

$$\{D\} = \begin{pmatrix} y_1 - f(x_1) \\ y_2 - f(x_2) \\ \vdots \\ y_n - f(x_n) \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

dan vektor $\{\Delta A\}$ berisi perubahan nilai parameter a_m .

$$\{\Delta A\} = \begin{pmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_1 \\ \vdots \\ \Delta a_m \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Dengan menerapkan teori dan tahap perhitungan least-square pada persamaan (2.19), akan dihasilkan persamaan normal sebagai berikut.

$$[[Z_j]^T [Z_j]] \{\Delta A\} = \{[Z_j]^T \{D\}\} \quad (2.23)$$

Maka, pendekatan yang dilakukan terdiri dari proses pemecahan persamaan (2.23), yang dapat dilakukan untuk menghitung nilai parameter yang diperbaiki, seperti berikut.

$$a_{0,j+1} = a_{0,j} + \Delta a_0 \quad (2.24)$$

$$a_{1,j+1} = a_{1,j} + \Delta a_1 \quad (2.25)$$

Prosedur ini dilakukan secara berulang hingga didapatkan nilai yang konvergen dan memiliki penyimpangan (persamaan 2.26) yang kecil, di bawah kriteria yang telah ditetapkan.

$$|\mathcal{E}_a|_k = \left| \frac{a_{k,j+1} - a_{k,j}}{a_{k,j+1}} \right| \times 100\% \quad (2.26)$$

2.6.2. Interpolasi^[22]

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 dan diantaranya terdapat dalam penjelasan berikut ini.

2.6.2.1. Interpolasi Polinomial Newton's Divided Difference^[22]

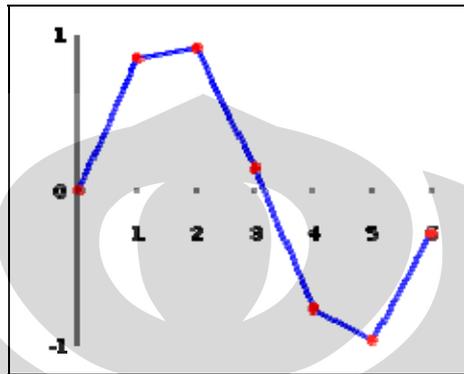
Interpolasi jenis ini digunakan pada persamaan polinomial hingga orde- n . Metode ini merupakan metode interpolasi yang paling sering digunakan karena kemudahannya. Persamaan umum yang menjadi basis interpolasi ini adalah sebagai berikut,

$$f_n(x) = b_0 + b_1(x - x_0) + \dots + b_n(x - x_0)(x - x_1)\dots(x - x_{n-1}) \quad (2.27)$$

dimana x_0 dan x_1 merupakan 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.



Gambar 2.7. Contoh kurva interpolasi linear^[23]

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut,

$$\frac{f_1(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \quad (2.28)$$

yang juga dapat dituliskan dengan persamaan berikut.

$$f_1(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} (x - x_0) \quad (2.29)$$

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.

2.6.2.2. Interpolasi Polinomial Lagrange^[22]

Interpolasi polinomial Lagrange merupakan reformulasi interpolasi polinomial Newton dengan menghiraukan perhitungan dengan *divided differences*. Persamaan yang digunakan adalah,

$$f_n(x) = \sum_{i=0}^n L_i(x) f(x_i) \quad (2.30)$$

dimana,

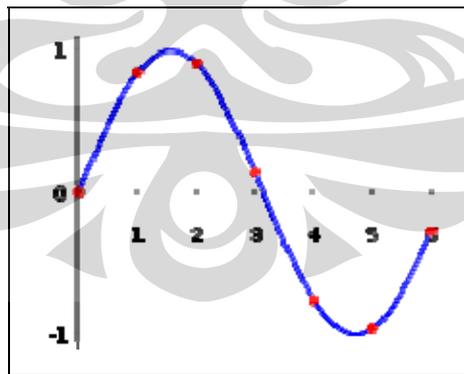
$$L_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (2.31)$$

dimana \prod menunjukkan produk dari n titik. Sebagai contoh, persamaan untuk interpolasi kuadratik atau orde dua adalah sebagai berikut.

$$f_2(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} f(x_0) + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} f(x_1) + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} f(x_2) \quad (2.32)$$

2.6.2.3. Interpolasi Spline^[22]

Interpolasi dilakukan apabila terjadi kasus dimana fungsi polinomial menghasilkan penyimpangan yang besar dengan interpolasi polinomial, sehingga digunakan fungsi *spline*. Interpolasi spline dilakukan dengan menggunakan fungsi polinomial orde rendah pada setiap atau sebagian interval data dan memilih satuan polinomial sehingga didapatkan hasil fitting yang baik. Jenis interpolasi ini memiliki error yang lebih kecil dibanding jenis interpolasi yang dijelaskan sebelumnya dan lebih mudah dievaluasi karena menggunakan polinomial dengan orde rendah.



Gambar 2.8. Contoh kurva interpolasi *spline*^[23]

2.6.3. Penerapan *Curve fitting* dalam Aplikasi MATLAB^[24]

Pada perangkat lunak MATLAB, *curve fitting* merupakan salah satu program dan fungsi yang digunakan untuk pengolahan data yang bertujuan untuk mengoptimalkan model fungsi dari data tersebut. *Curve fitting* dalam MATLAB dapat dilakukan dengan memanggil fungsi untuk melakukan plot kurva, mencari fit berdasarkan persamaan yang terdapat pada *database* dalam MATLAB, dan berbagai fungsi lain. Cara lain dapat dilakukan dengan menggunakan *toolbox curve fitting* yang merupakan bentuk *graphical user interface* (GUI) dari proses *curve fitting*, yang mempermudah proses *curve fitting* dan dapat langsung dilakukan analisis hasil *fitting*. Seluruh perhitungan *curve fitting* pada MATLAB dilakukan menggunakan matriks, yang telah dicontohkan sebelumnya.

2.7. 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^[22]. 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^[22]. 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^[25]. Ketiga parameter inilah yang merupakan parameter terpenting dalam validasi model. Selain ketiga parameter di atas, 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.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

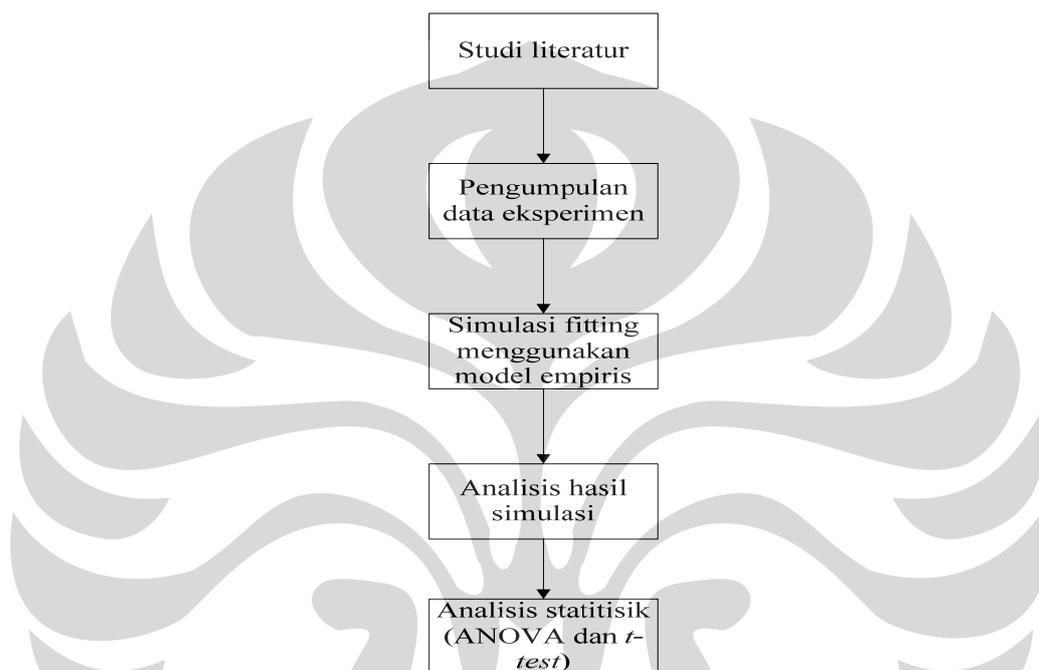
Penelitian ini secara umum bertujuan untuk memberikan representasi terhadap produk-produk hasil perengkahan pada minyak nabati, baik melalui perengkahan termal maupun perengkahan katalitik. Representasi dilakukan dengan penggunaan model empiris yang dapat menggambarkan profil dari hasil perengkahan dan parameter-parameter yang berkaitan pada proses perengkahan 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 dan dari hasil simulasi juga dapat dianalisis bagaimana pengaruh perengkahan pada variabel operasi yang berbeda, seperti suhu, waktu tinggal, dan sebagainya. Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Modifikasi model prediktif yang telah ada agar dapat digunakan untuk merepresentasikan/menggambarkan produk hasil perengkahan pada minyak nabati.
2. Memvariasikan suhu perengkahan dan waktu tinggal dan melihat pengaruhnya terhadap yield produk perengkahan sehingga dapat ditentukan nilai optimum untuk kedua kondisi tersebut pada reaktan yang berbeda-beda.

Data yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari eksperimen yang berkaitan dengan perengkahan minyak nabati pada jurnal penelitian atau data sekunder. Data sekunder ini sendiri dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu data yang telah dipublikasikan dalam jurnal dan data yang diambil dari eksperimen yang telah dilakukan beberapa peneliti di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia yang telah dipublikasikan. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. Perengkahan termal minyak *canola*^[8]
- b. Perengkahan katalitik minyak *canola*^[26]

- c. Perengkahan termal minyak jarak pagar^[27]
 - d. Perengkahan katalitik minyak sawit:
 - Dengan katalis JRC-ALO-3^[28]
 - Dengan katalis REY^[29]
 - e. Perengkahan termal katalitik minyak residu atmosferik^[30]
- Gambar 3.1. menunjukkan diagram alir dalam penelitian ini.



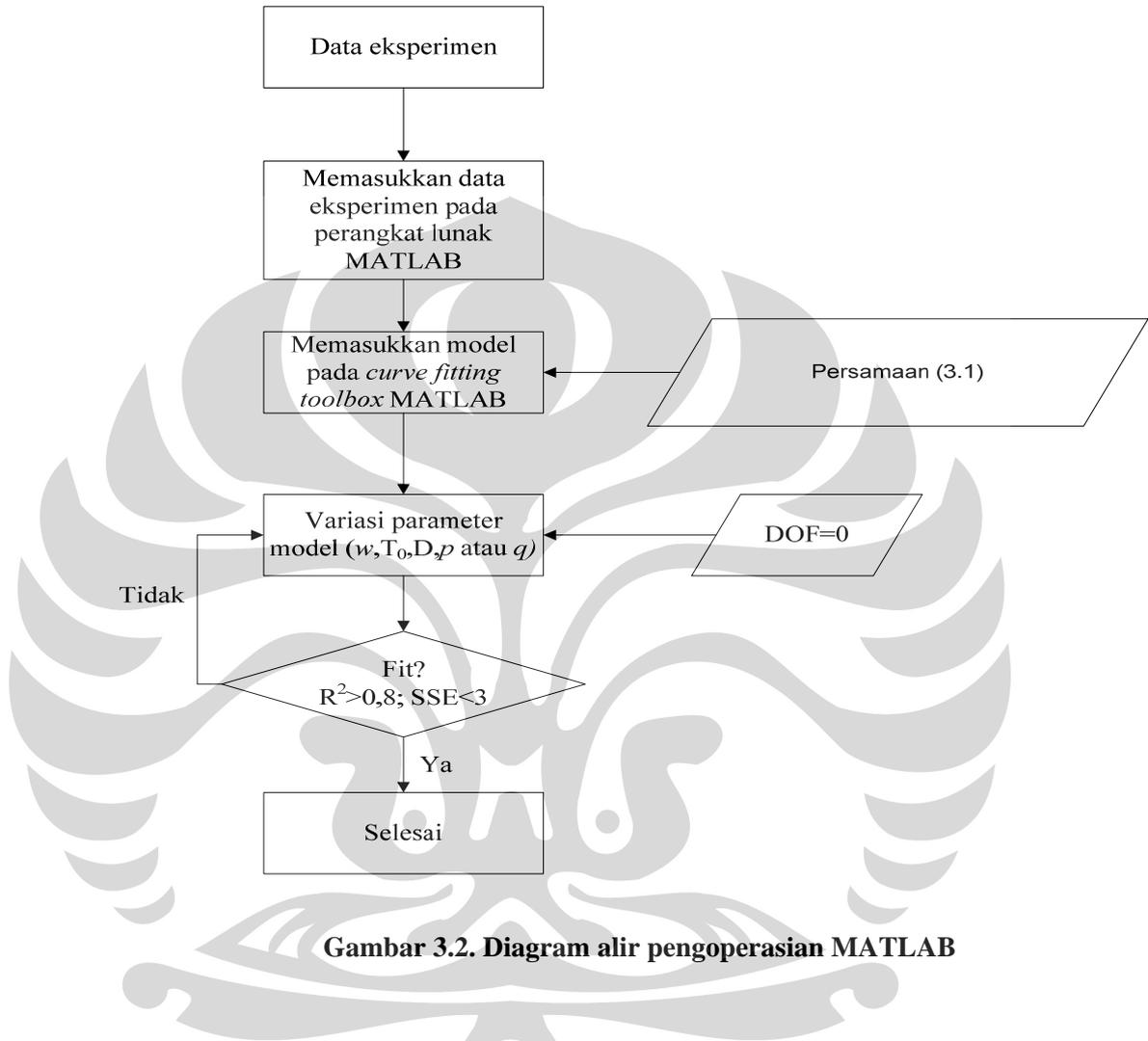
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

Penelitian ini dilakukan sepenuhnya secara simultan menggunakan perangkat lunak MATLAB, dengan menggunakan *curve fitting toolbox* yang terdapat didalam perangkat lunak tersebut. Model yang digunakan sebagai acuan dasar adalah berupa model empiris yang dikembangkan oleh Green^[31], dimana model ini akan dimodifikasi sehingga dapat juga digunakan pada data perengkahan yang memiliki variasi waktu tinggal.

3.2. Pengoperasian MATLAB

1. Simulasi fitting menggunakan model empiris

a. Input data pada MATLAB



Gambar 3.2. Diagram alir pengoperasian MATLAB

Penggunaan perangkat lunak MATLAB bertujuan untuk memudahkan perhitungan dan pembentukan grafik pada proses fitting, karena dalam perangkat lunak tersebut terdapat program yang memudahkan proses perhitungan dalam *curve fitting* dan regresi. Tahap pertama pengerjaan simulasi pada MATLAB adalah memasukkan data variabel bebas yang divariasikan dalam data eksperimen dan data variabel terikat yang dipengaruhi variabel bebas, dalam penelitian ini *yield*, ke dalam bentuk *array*. Data dalam bentuk *array* diperlukan dalam simulasi karena perangkat lunak MATLAB

beroperasi dengan matriks sebagai basis bagi segala macam perhitungan yang dilakukan didalamnya.

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, serta waktu tinggal pada beberapa jenis data.

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, kuadrat, sinusoidal, atau persamaan yang dapat dimasukkan sendiri. Persamaan yang digunakan pada simulasi ini adalah persamaan semi-empiris^[31] yang dimasukkan ke dalam program.

$$Y(T) = w \left[\frac{1}{1 + \exp((T_0 - T)/D)} \right]^p \left[\frac{1}{1 + \exp((T - T_0)/D)} \right]^q \quad (3.1)$$

Persamaan ini digunakan untuk mengetahui pengaruh suhu perengkahan. Sedangkan untuk mengetahui pengaruh waktu tinggal, persamaan tersebut dimodifikasi sehingga memiliki beberapa tambahan parameter yang berkaitan dengan waktu tinggal proses perengkahan.

Kedua persamaan memiliki beberapa parameter yang berkaitan dengan proses berjalannya suatu perengkahan, yang didapatkan secara empiris dari data eksperimen. Parameter-parameter tersebut memiliki fungsi sebagai berikut:

- w = parameter logistik yang menunjukkan maksimal yield yang dapat dicapai suatu produk perengkahan (%berat)
- T_0 = parameter logistik yang menunjukkan suhu (°C)
- D = parameter logistik yang berhubungan dengan suhu (°C)

- p = konstanta yang berhubungan dengan peningkatan produk perengkahan
- q = konstanta yang berhubungan dengan penurunan produk perengkahan

Tahap berikutnya yaitu memulasi simulasi. Antara persamaan dan data yang dimasukkan harus memiliki nilai *degree of freedom* ≥ 0 , agar simulasi dapat berjalan dan didapatkan penyelesaian perhitungan. Contohnya, pada persamaan yang digunakan terdapat 5 parameter, sehingga minimal diperlukan 5 data agar simulasi dapat berjalan. Apabila terdapat kurang dari 5 data, maka salah satu parameter harus dibuat konstan agar simulasi dapat berjalan. 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*.

2. Analisis hasil simulasi

Hasil simulasi *fitting* kemudian divariasikan dengan merubah rentang suhu menjadi berkisar antara 200 – 800°C, 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. Analisis statistik

Analisis ini dilakukan pada variabel bebas yang digunakan dalam simulasi, yaitu suhu dan waktu untuk melihat bagaimana hubungan dan pengaruh kedua variabel tersebut terhadap variabel terikat yaitu yield, secara kuantitatif. Pada simulasi yang dipengaruhi oleh satu variabel yaitu suhu, dilakukan uji-*t* (*t-test*), sedangkan pada simulasi dengan dua variabel, suhu dan waktu, digunakan analisis varians (ANOVA). Untuk melakukan kedua uji ini, pertama-tama ditentukan terlebih dahulu hipotesis terhadap variabel yang dianalisis. Hipotesis yang diajukan adalah sebagai berikut:

a. Uji-*t*

– Hipotesis nol, $H_0 : \{\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n\}$

– Hipotesis alternatif, $H_i : \{\text{minimal dua } \tau_i \text{ berbeda}\}$

b. ANOVA

– Hipotesis nol, $H_0 : \{\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n\}$

– Hipotesis alternatif, $H_i : \{\text{minimal dua } \tau_i \text{ berbeda}\}$

Hipotesis nol menjelaskan bahwa rata-rata nilai dari variabel yang digunakan adalah sama dan tidak berpengaruh signifikan terhadap variabel terikatnya. Hipotesis alternatif menjelaskan bahwa rata-rata nilai dari variabel yang digunakan tidak sama dan dapat memiliki pengaruh signifikan terhadap variabel terikatnya. Tingkat kepentingan (α) yang digunakan pada analisis ini adalah 0,05. Apabila nilai kedua uji lebih besar dari tabel kepercayaan, maka hipotesis nol ditolak dan hipotesis alternatif diterima.

3.3. Tahap Uji Model Penelitian

3.3.1. Penentuan Variabel Operasi

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

Variabel Bebas

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

1. Suhu operasi, berkisar antara 200-800°C untuk perengkahan minyak nabati
2. Waktu tinggal/reaksi, berkisar antara 0-60 detik

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 perengkahan yang dihasilkan dari proses simulasi.

Variabel Tetap

Variabel tetap ini tidak mengalami perubahan karena variabel bebas. Variabel tetap pada penelitian ini adalah parameter dan konstanta yang terdapat pada persamaan (3.1) dan (3.2)

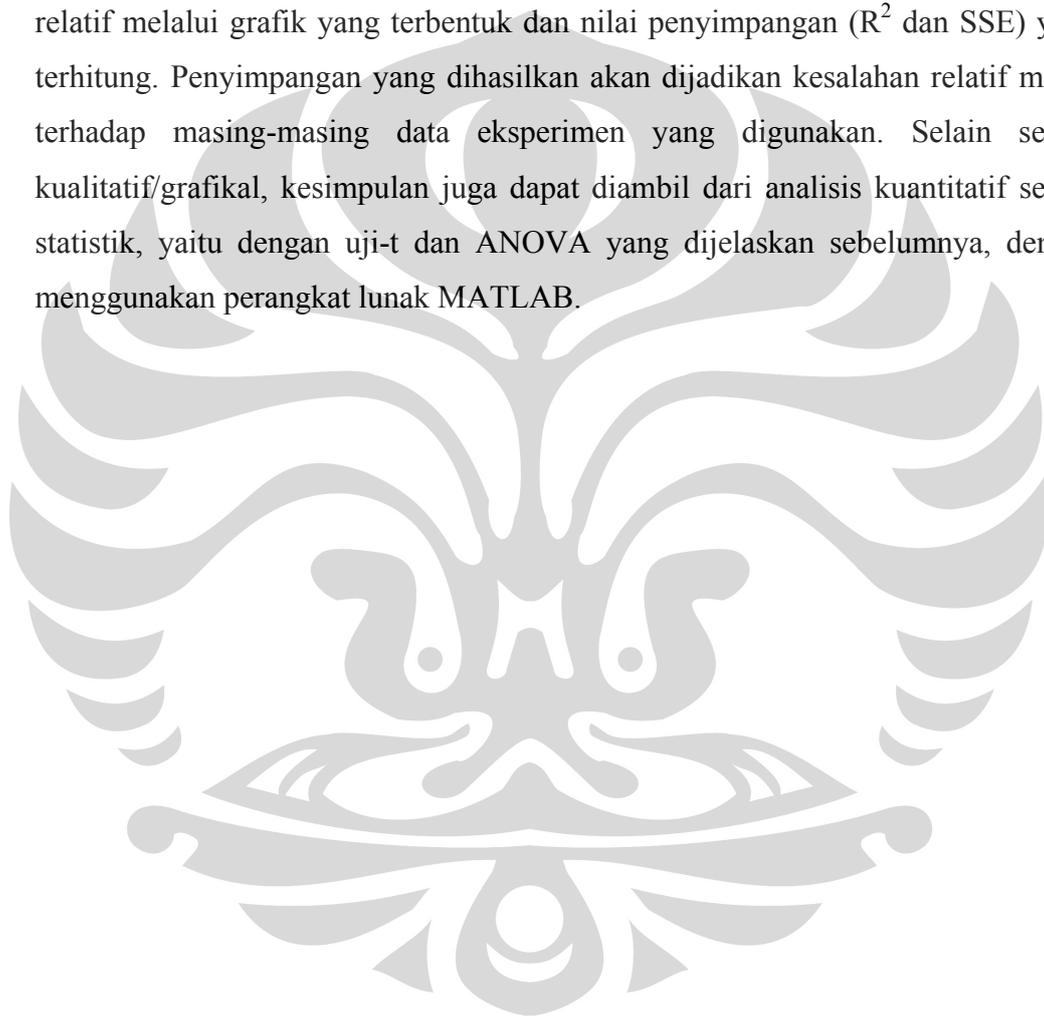
3.3.2. Teknik Pengolahan Data

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 terhitung. Penyimpangan yang dihasilkan akan dijadikan kesalahan relatif model terhadap masing-masing data eksperimen yang digunakan. Selain secara kualitatif/grafikal, kesimpulan juga dapat diambil dari analisis kuantitatif secara statistik, yaitu dengan uji-t dan ANOVA yang dijelaskan sebelumnya, dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tujuan penelitian ini adalah memberikan representasi terhadap produk hasil pirolisis minyak nabati, menggunakan model empiris dari data yang berkaitan dengan hal tersebut. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan kondisi yang optimum dalam proses perengkahan tanpa melakukan uji laboratorium. Variasi dilakukan pada suhu perengkahan dan waktu tinggal proses perengkahan, yang akan ditentukan nilai optimumnya. Model yang digunakan dijelaskan pada persamaan (3.1). Persamaan untuk variabel suhu adalah

$$Y(T) = w \left[\frac{1}{1 + \exp((T_0 - T)/D)} \right]^p \left[\frac{1}{1 + \exp((T - T_0)/D)} \right]^q \quad (3.1)$$

dan modifikasi persamaan untuk variabel waktu adalah

$$Y(T) = w \left[\frac{1}{1 + \exp((T_0 - T)/D)} \right]^p \left[\frac{1}{1 + \exp((T - T_0)/D)} \right]^q [1 - (\exp(-k_o \exp(r(1 - (T_1 - T))))t)] \quad t \neq 0 \quad (4.1)$$

Modifikasi pada persamaan ini dilakukan dengan menambahkan bagian persamaan yang berkaitan dengan laju reaksi, yang biasa dijabarkan sebagai suatu konstanta dikalikan dengan waktu. Konstanta yang berkaitan biasanya dihubungkan dengan persamaan Arrhenius dan yang merupakan persamaan eksponensial. Hasil modifikasi dari dua pertimbangan itu yang menjadi bagian tambahan pada persamaan diatas. Kedua persamaan memiliki beberapa parameter yang berkaitan dengan proses berjalannya suatu perengkahan, yang didapatkan secara empiris dari data eksperimen. Parameter-parameter tersebut memiliki fungsi sebagai berikut:

- w = parameter logistik yang menunjukkan maksimal yield yang dapat dicapai suatu produk perengkahan (%berat)
- T_0 = parameter logistik yang menunjukkan suhu ($^{\circ}\text{C}$)
- D = parameter logistik yang berhubungan dengan suhu ($^{\circ}\text{C}$)
- p = konstanta yang berhubungan dengan peningkatan produk perengkahan

- q = konstanta yang berhubungan dengan penurunan produk perengkahan
- T_1 = parameter logistik yang menunjukkan suhu ($^{\circ}\text{C}$)
- K_0 = konstanta reaksi (s^{-1})
- r = parameter logistik yang berhubungan dengan waktu reaksi

Pembahasan dari masing-masing tahapan pengerjaan adalah sebagai berikut.

4.1. Analisis hasil simulasi pada variasi suhu

Hasil simulasi pada setiap data dianalisis dan divariasikan pada rentang kondisi yang berbeda, menggunakan program *curve fitting* pada perangkat lunak MATLAB. Hasil analisis ini nantinya akan digunakan untuk melihat pengaruh perubahan kondisi proses perengkahan terhadap yield produk perengkahan pada tiap jenis reaktan dan metode perengkahan. Data yang digunakan berasal dari eksperimen peneliti lain dan tidak dilakukan simulasi model.

4.1.1. Hasil simulasi pada data perengkahan termal minyak *canola*

Eksperimen ini dilakukan oleh Idem^[8], mengenai perengkahan termal *minyak canola*. Eksperimen ini dilakukan pada minyak *canola* dan bertujuan untuk mengetahui jenis produk yang dihasilkan melalui perengkahan termal. Minyak *canola* yang digunakan 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 $\text{C}_{59}\text{H}_{94}\text{O}_5$. Eksperimen dilakukan dengan beberapa variasi, salah satunya variasi suhu pada 300°C , 370°C , 400°C , 450°C dan 500°C . produk yang dihasilkan sebagian besar berupa gas pada suhu $400\text{-}500^{\circ}\text{C}$, sedangkan pada suhu rendah, terdapat banyak minyak residu yang tidak terengkah, sehingga pada simulasi ini diambil data produk perengkahan pada fasa gas dan sedikit produk cair berupa BTX. Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi disajikan di bagian Lampiran.

Data kemudian disimulasikan dalam program dengan menggunakan persamaan (3.1). Proses simulasi dilakukan dengan membagi data menjadi dua bagian, yaitu simulasi untuk data produk fraksi parafin/alkana (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 ,

C₄H₁₀), simulasi untuk data produk fraksi olefin/alkena (C₂H₄, C₃H₆, C₄H₈) dan simulasi untuk data produk fraksi BTX. Parameter hasil simulasi disajikan pada tabel 4.1 dan analisis hasil simulasi disajikan pada gambar 4.1 s/d 4.3.

Tabel 4.1. Parameter hasil simulasi *curve fitting* pada data perengkahan termal minyak canola

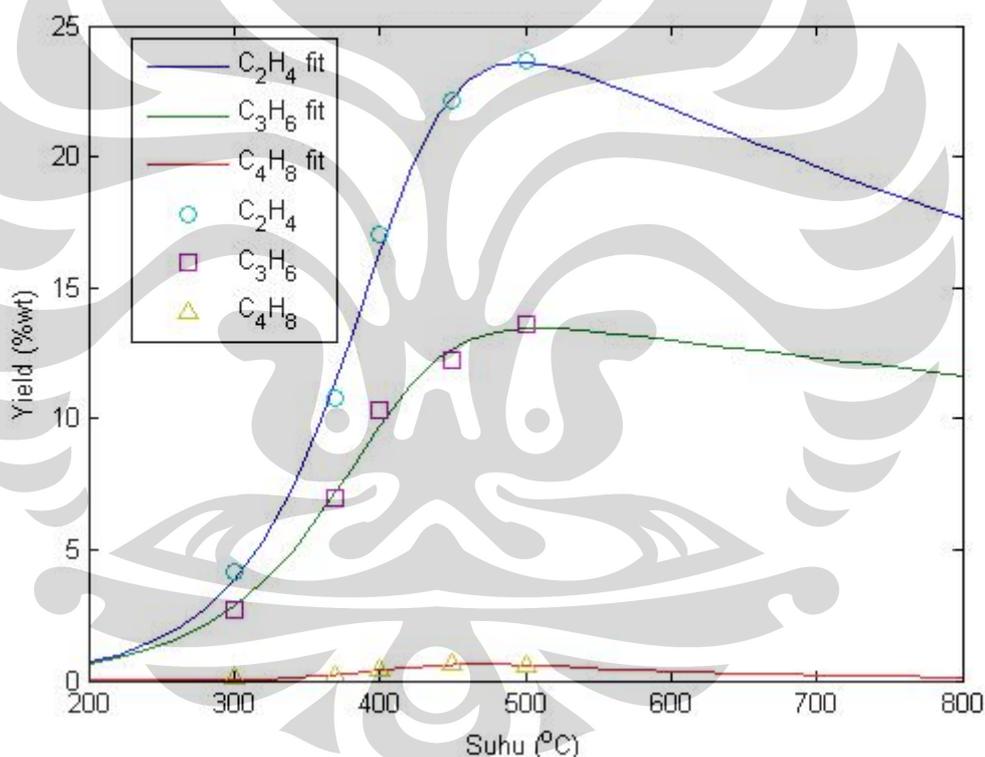
Produk	Parameter					Goodness of fit	
	<i>W</i>	T ₀	D	<i>p</i>	<i>q</i>	SSE	R ²
Olefin							
C ₂ H ₄	26,71	412,1	30	0,5166	0,03213	1,0250	0,9961
C ₃ H ₆	14,45	410	30	0,4407	0,01649	0,5921	0,9923
C ₄ H ₈	0,99	396,5	30	0,2038	0,1599	0,0055	0,9750
Parafin							
CH ₄	10,54	418,1	20	0,3091	0,0002	0,1342	0,9978
C ₂ H ₆	7,01	411,8	20	0,2516	0,0006	0,0032	0,9998
C ₃ H ₈	6,63	399,6	20	0,2470	0,0010	0,0250	0,9985
C ₄ H ₁₀	1,23	375	20	0,1130	0,0145	0,0261	0,9075
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
Xylena	1,81	325,1	20	0,8296	0,1350	0,0091	0,9765

Keterangan: penjelasan parameter telah dijelaskan di awal bab

Dari hasil simulasi, dapat dilihat bahwa tiap data spesi produk yang diamati memiliki tingkat keakuratan yang tinggi terhadap model yang digunakan, yang dapat dilihat dari nilai SSE dan R². Dari parameter di atas, terdapat beberapa kecenderungan yang didapatkan dari simulasi. Pada produk fraksi olefin dan parafin, nilai *w*, T₀ dan *p* mengalami penurunan seiring dengan peningkatan jumlah karbon dalam fraksi tersebut, tetapi nilai *q* mengalami peningkatan seiring peningkatan jumlah karbon. Kedua hal ini diakibatkan karena pada proses perengkahan, produk karbon rantai panjang yang mulai terengkah pada suhu rendah akan terus terengkah seiring dengan peningkatan suhu, hingga hampir sebagian besar terengkah dan membentuk karbon-karbon dengan rantai yang lebih pendek. Hal ini mengakibatkan produk karbon rantai pendek akan lebih banyak

dibanding karbon dengan rantai yang lebih panjang, yang berarti yield maksimalnya akan lebih besar (ditunjukkan oleh parameter w), suhu dimulainya perengkahan lebih lanjut akan lebih besar (ditunjukkan oleh parameter T_0) dan peningkatan yieldnya akan menjadi lebih besar (ditunjukkan oleh parameter p dan q).

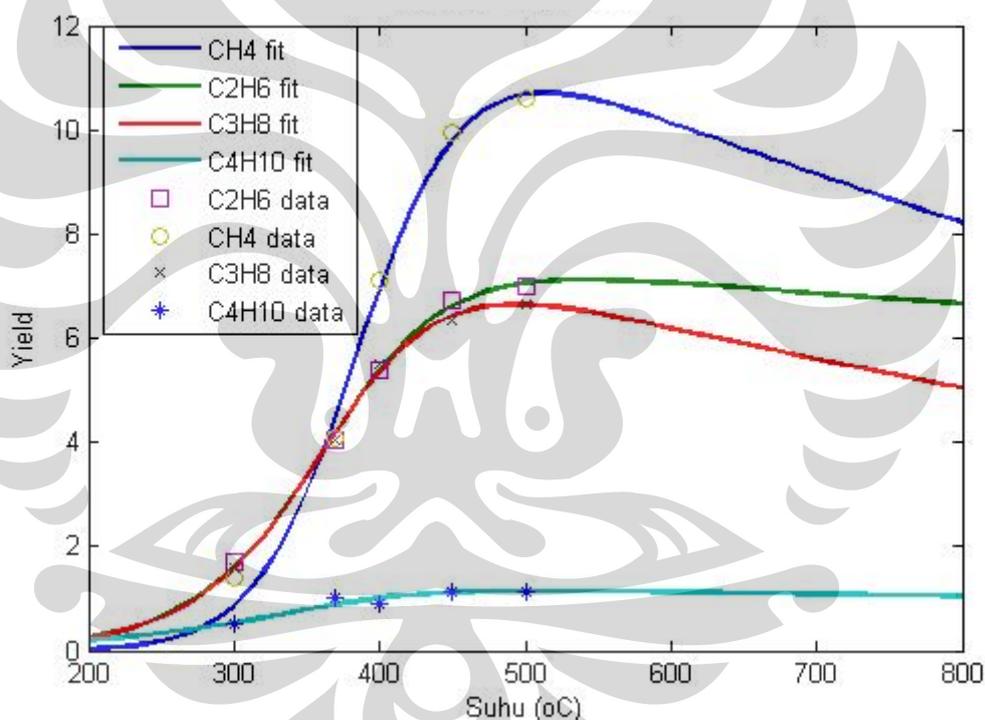
Untuk produk fraksi BTX, nilai parameter w dan T_0 mengalami penurunan seiring meningkatnya jumlah karbon, dengan alasan yang sama dengan produk fraksi olefin dan parafin. Namun, untuk nilai parameter p dan q mengalami kenaikan seiring bertambahnya jumlah karbon. Hal ini diakibatkan pada produk BTX proses perengkahan yang efektif hanya terjadi pada rentang suhu yang terbatas akibat tingginya energi aktivasi pada cincin benzena.



Gambar 4.1. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi olefin pada perengkahan termal minyak *canola*

Pada simulasi ini, rentang suhu digunakan adalah 200-800°C, untuk melihat pengaruh suhu di atas rentang suhu pada data, apakah terjadi kenaikan atau penurunan yield. Dari grafik yang terbentuk dari hasil simulasi, terlihat bahwa untuk produk fraksi olefin, suhu optimum yang diperlukan dalam proses perengkahan berada pada sekitar suhu 450°C, yang dapat terlihat dari peningkatan

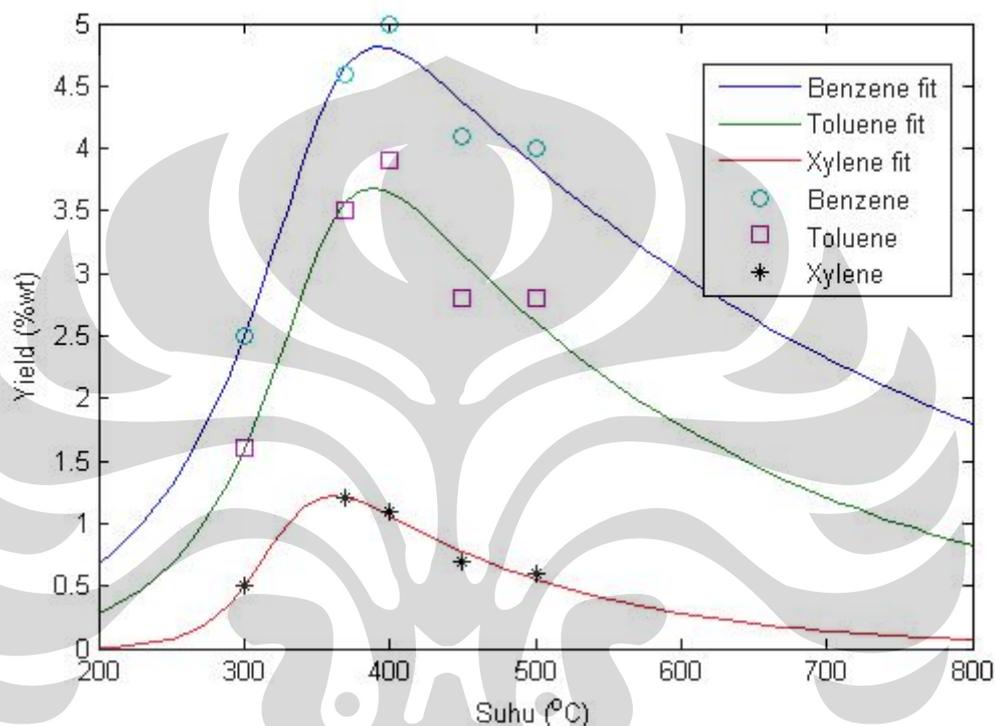
yield dari mulai suhu 300-500°C. Pada suhu yang lebih tinggi dari 500°C hingga 800°C, seluruh fraksi produk olefin mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena perengkahan lebih lanjut akan mengakibatkan rantai alkena terus terputus hingga mengakibatkan bertambahnya karbon/*coke* yang terbentuk akibat pemutusan rantai. Selain itu, dibanding fraksi produk lain, fraksi olefin terutama produk etilena memiliki yield yang paling besar dibanding produk lain. Hal ini disebabkan karena ikatan rangkap pada etilena sulit untuk terputus dibanding ikatan tunggal pada produk alkana karena membutuhkan energi yang besar untuk memutuskannya, sehingga seiring dengan meningkatnya suhu perengkahan, produk etilena akan menjadi semakin banyak.



Gambar 4.2. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi parafin pada perengkahan termal minyak *canola*

Dari grafik yang terbentuk dari hasil simulasi, terlihat bahwa untuk produk fraksi parafin, suhu optimum yang diperlukan dalam proses perengkahan berada pada sekitar suhu 450°C, yang dapat terlihat dari peningkatan yield dari mulai suhu 300-500°C. Pada suhu yang lebih tinggi dari 500°C hingga 800°C, seluruh fraksi produk parafin mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena

perengkahan lebih lanjut akan mengakibatkan rantai alkana terus terputus hingga mengakibatkan bertambahnya karbon/*coke* yang terbentuk akibat pemutusan rantai. Yield produk parafin juga memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan yield produk olefin karena alasan yang sama dengan banyaknya produk fraksi olefin di atas.



Gambar 4.3. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi BTX pada perengkahan termal minyak *canola*

Dari grafik yang terbentuk dari hasil simulasi, terlihat bahwa untuk produk fraksi BTX, suhu optimum yang diperlukan dalam proses perengkahan berada pada sekitar suhu 400°C, yang dapat terlihat dari peningkatan yield dari mulai suhu 300-400°C. Pada suhu yang lebih tinggi dari 400°C hingga 800°C, seluruh fraksi produk BTX mengalami penurunan. Pada produk fraksi BTX, kisaran suhu perengkahan yang optimum lebih terbatas, yaitu pada kisaran 350-450°C, dan di atas kisaran suhu tersebut ketiga produk fraksi BTX akan terus menurun. Hal ini diakibatkan karena pada suhu yang di luar kisaran tersebut, produk fraksi BTX akhirnya akan terengkahan lebih lanjut dengan memutus ikatan cincin aromatik dan sangat sulit untuk membentuk kembali cincin aromatik itu kembali, sehingga

yieldnya semakin lama semakin menurun. Selain itu, yield produk BTX hasil perengkahan lebih rendah dibanding produk fraksi lain, karena cincin aromatik sulit untuk terbentuk pada proses perengkahan termal karena energi yang dibutuhkan untuk membentuk cincin resonansi aromatik sangat besar dan tidak cukup untuk dilakukan hanya melalui perengkahan termal. Hal ini pula yang menyebabkan munculnya perengkahan katalitik pada minyak nabati yang sebagian besar digunakan untuk mendapatkan produk BTX.

4.1.2. Hasil simulasi pada data perengkahan katalitik minyak canola

Eksperimen ini dilakukan oleh Katikaneni^[26] pada minyak *canola* dan bertujuan untuk mengetahui jenis produk yang dihasilkan melalui perengkahan katalitik. Minyak *canola* yang digunakan 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 $C_{59}H_{94}O_5$. Katalis yang digunakan adalah HZSM-5. Eksperimen dilakukan dengan beberapa variasi, salah satunya variasi suhu pada 375°C, 400°C, 450°C dan 500°C. Produk yang dihasilkan sebagian besar berupa produk cair pada suhu 375-450°C, yang didominasi oleh produk BTX. Sedangkan pada suhu lebih tinggi, terdapat banyak gas yang terbentuk, sehingga pada simulasi ini diambil data produk perengkahan pada fasa cair berupa BTX dan produk gas yang diwakili fraksi parafin dan olefin. Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi disajikan di bagian Lampiran.

Data kemudian disimulasikan dalam program dengan menggunakan persamaan (3.1). Proses simulasi dilakukan dengan membagi data menjadi dua bagian, yaitu simulasi untuk data simulasi untuk data produk fraksi BTX, produk fraksi parafin/alkana (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8) dan simulasi untuk data produk fraksi olefin/alkena (C_2H_4 , C_3H_6).

Parameter hasil simulasi disajikan pada tabel 4.2 dan analisis hasil simulasi disajikan pada gambar 4.4 s/d 4.6.

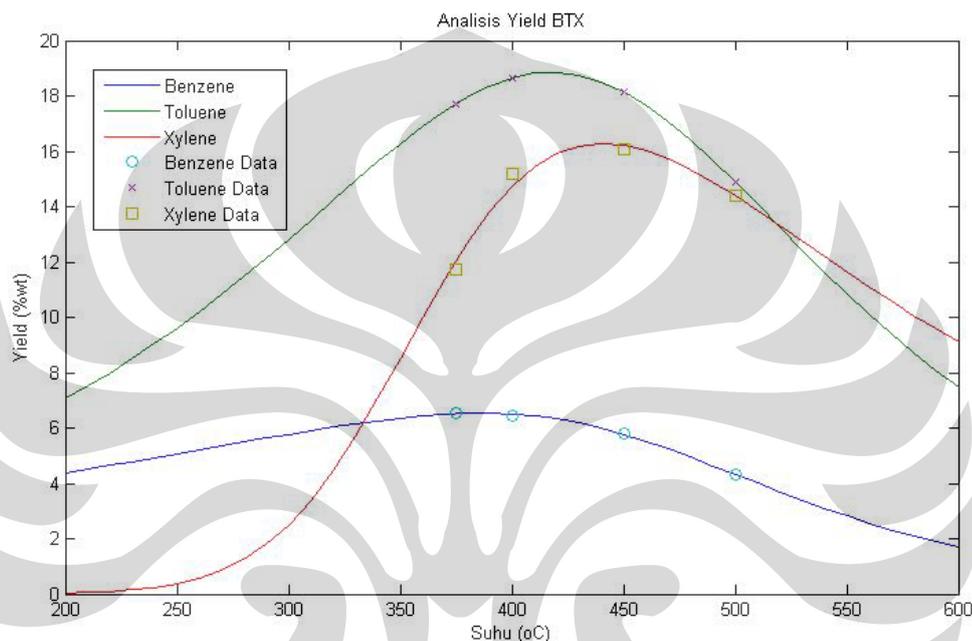
Tabel 4.2. Parameter hasil simulasi *curve fitting* pada data perengkahan termal minyak *canola*

Produk	Parameter					Goodness of fit	
	w	T_0	D	p	q	SSE	R^2
Olefin							
C ₂ H ₄	17,84	511,7	25	0,7822	1	0,0027	0,9998
C ₃ H ₆	28,08	509,1	25	0,725	1,2	0,0841	0,9976
Parafin							
CH ₄	18,81	642,6	20	0,4011	0,1	0,0484	0,921
C ₂ H ₆	17,35	630	20	0,3433	0,2	0,0697	0,9573
C ₃ H ₈	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	31,21	430,3	50	0,3212	0,4143	0,0083	1
Xylena	40	325,2	50	2,704	0,267	0,3401	0,9675

Dari hasil simulasi, dapat dilihat bahwa sebagian data spesi produk yang diamati memiliki tingkat keakuratan yang tinggi terhadap model yang digunakan, yang dapat dilihat dari nilai SSE dan R^2 , kecuali pada C₃H₈. Dari parameter di atas, terdapat beberapa kecenderungan yang didapatkan dari simulasi. Untuk produk fraksi BTX, nilai parameter T_0 mengalami penurunan seiring meningkatnya jumlah karbon, dengan alasan yang sama dengan produk fraksi olefin dan parafin. Nilai parameter p terbesar terdapat pada produk xylena. Hal ini menunjukkan bahwa pada perengkahan katalitik ini, selektivitas untuk produk xylena lebih besar dibanding benzena dan toluena, sehingga didapatkan yield yang besar untuk xylena.

Pada produk fraksi olefin dan parafin, nilai T_0 dan p mengalami penurunan seiring dengan peningkatan jumlah karbon dalam fraksi tersebut, tetapi nilai q mengalami peningkatan seiring peningkatan jumlah karbon. Kedua hal ini diakibatkan karena pada proses perengkahan, produk karbon rantai panjang yang mulai terengkah pada suhu rendah akan terus terengkah seiring dengan peningkatan suhu, hingga hampir sebagian besar terengkah dan membentuk karbon-karbon dengan rantai yang lebih pendek. Hal ini

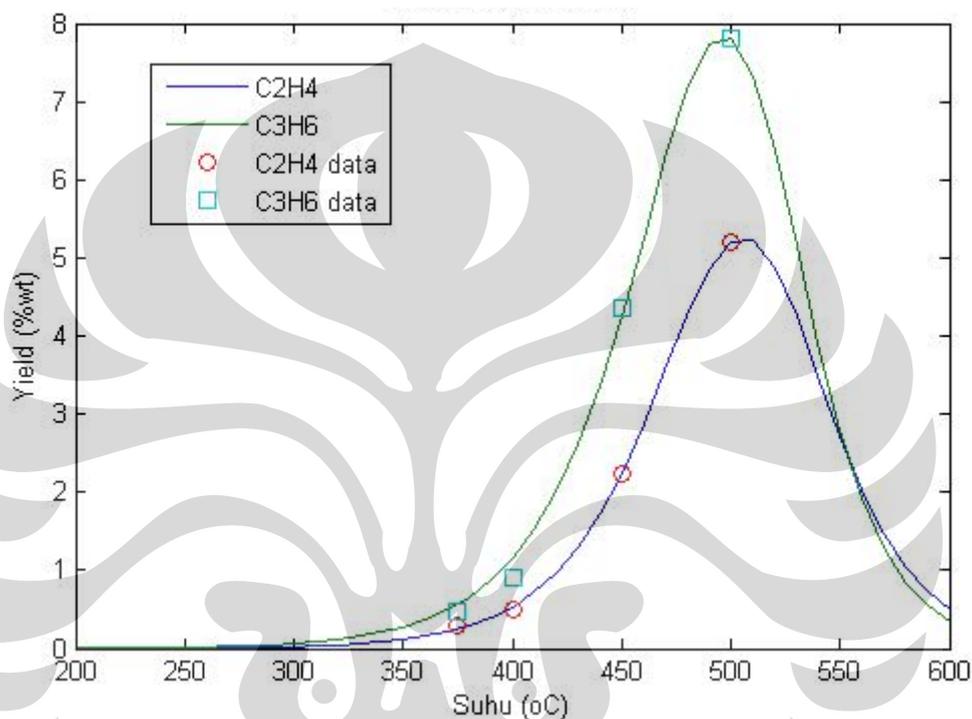
mengakibatkan produk karbon rantai pendek akan lebih banyak dibanding karbon dengan rantai yang lebih panjang, yang berarti yield maksimalnya akan lebih besar (ditunjukkan oleh parameter w), suhu dimana yield produk perengkahan yang terus meningkat akan mulai menurun (ditunjukkan oleh parameter T_0) dan peningkatan yieldnya akan menjadi lebih besar (ditunjukkan oleh parameter p dan q).



Gambar 4.4. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi BTX pada perengkahan katalitik minyak *canola*

Untuk simulasi ini, digunakan rentang suhu 200-600°C, mengingat eksperimen yang ditinjau merupakan perengkahan dengan katalis yang rentan yang dapat rusak pada suhu tinggi. Dari grafik yang terbentuk dari hasil simulasi, terlihat bahwa untuk produk fraksi BTX, suhu optimum yang diperlukan dalam proses perengkahan berada pada sekitar suhu 400°C, yang dapat terlihat dari peningkatan yield dari mulai suhu 300-400°C. Pada suhu yang lebih tinggi dari 440°C hingga 600°C, seluruh fraksi produk BTX mengalami penurunan. Pada produk fraksi BTX, kisaran suhu perengkahan yang optimum lebih terbatas, yaitu pada kisaran 350-450°C, dan diatas kisaran suhu tersebut ketiga produk fraksi BTX akan terus menurun. Hal ini diakibatkan karena pada suhu yang di luar

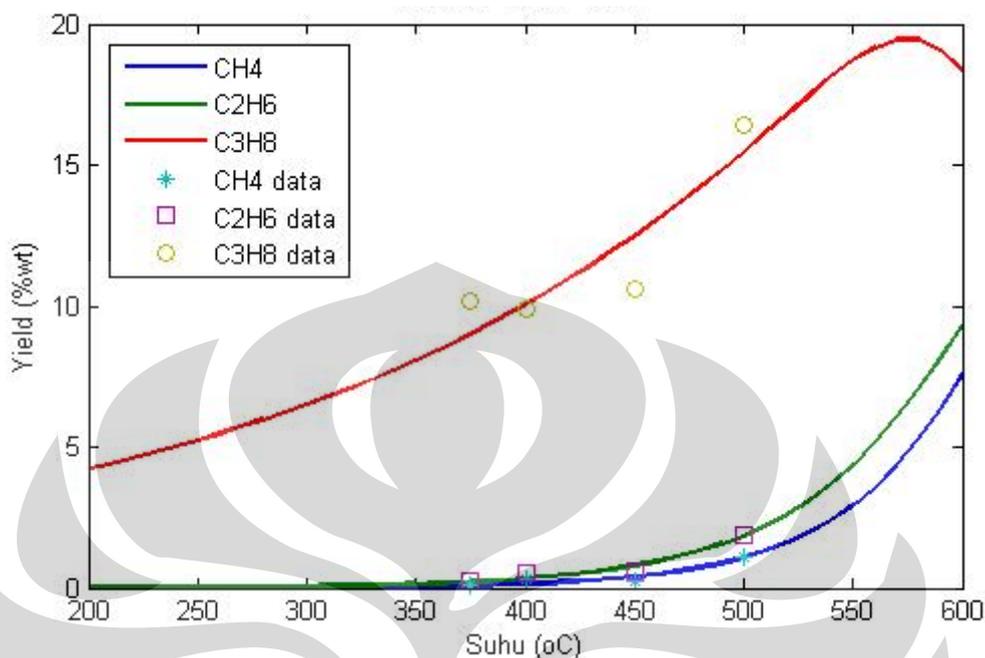
kisaran tersebut, produk fraksi BTX akhirnya akan terengkah lebih lanjut dengan memutus ikatan cincin aromatik dan sangat sulit untuk membentuk kembali cincin aromatik itu kembali, sehingga yieldnya semakin lama semakin menurun. Pada perengkahan katalitik, fraksi BTX memiliki yield yang paling besar, terutama xylene, karena reaksi katalitik bersifat lebih selektif dan tidak tergantung pada jumlah karbon yang direngkah seperti perengkahan termal.



Gambar 4.5. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi olefin pada perengkahan katalitik minyak *canola*

Dari grafik yang terbentuk dari hasil simulasi, terlihat bahwa untuk produk fraksi olefin, pembentukan baru terjadi pada suhu 350°C yang terus meningkat hingga suhu 500°C dan kemudian menurun hingga suhu lebih dari 600°C. Suhu optimum yang diperlukan dalam proses perengkahan berada pada sekitar suhu 500°C, yang dapat terlihat dari peningkatan yield dari mulai suhu 400-500°C. Pada suhu yang lebih tinggi dari 500°C, seluruh fraksi produk olefin mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena perengkahan lebih lanjut akan mengakibatkan rantai alkena terus terputus hingga mengakibatkan bertambahnya karbon/*coke* yang terbentuk akibat pemutusan rantai. Produk olefin pada

perengkahan katalitik tidak memiliki yield yang besar, karena reaksi yang katalitik yang terjadi lebih selektif terhadap produk BTX.



Gambar 4.6. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield fraksi parafin pada perengkahan katalitik minyak *canola*

Dari grafik yang terbentuk dari hasil simulasi, terlihat bahwa untuk produk fraksi parafin, yang pertama kali banyak terbentuk adalah C_3H_8 , sedangkan CH_4 dan C_2H_6 baru mulai terbentuk pada suhu $500^\circ C$. Suhu optimum yang diperlukan dalam proses perengkahan berada pada sekitar suhu $550^\circ C$, yang dapat terlihat dari peningkatan yield dari mulai suhu $450-600^\circ C$, dan terus mengalami peningkatan. Hal ini disebabkan karena pada suhu yang lebih tinggi produk fraksi BTX akan terengkah kembali menjadi produk fraksi parafin. Namun, pada suhu yang lebih tinggi lagi reaksi ini kemungkinan tidak berjalan karena suhu yang tinggi dapat merusak dan mengganggu kinerja katalis.

Peningkatan terjadi pada produk CH_4 dan C_2H_6 , sedangkan pada C_3H_8 pada suhu $>600^\circ C$, akan mengalami penurunan yield. Hal ini diakibatkan produk C_3H_8 akan terengkah lebih lanjut menjadi karbon dengan rantai lebih pendek, seperti CH_4 dan C_2H_6 .

4.1.3. Hasil simulasi pada perengkahan termal minyak jarak pagar

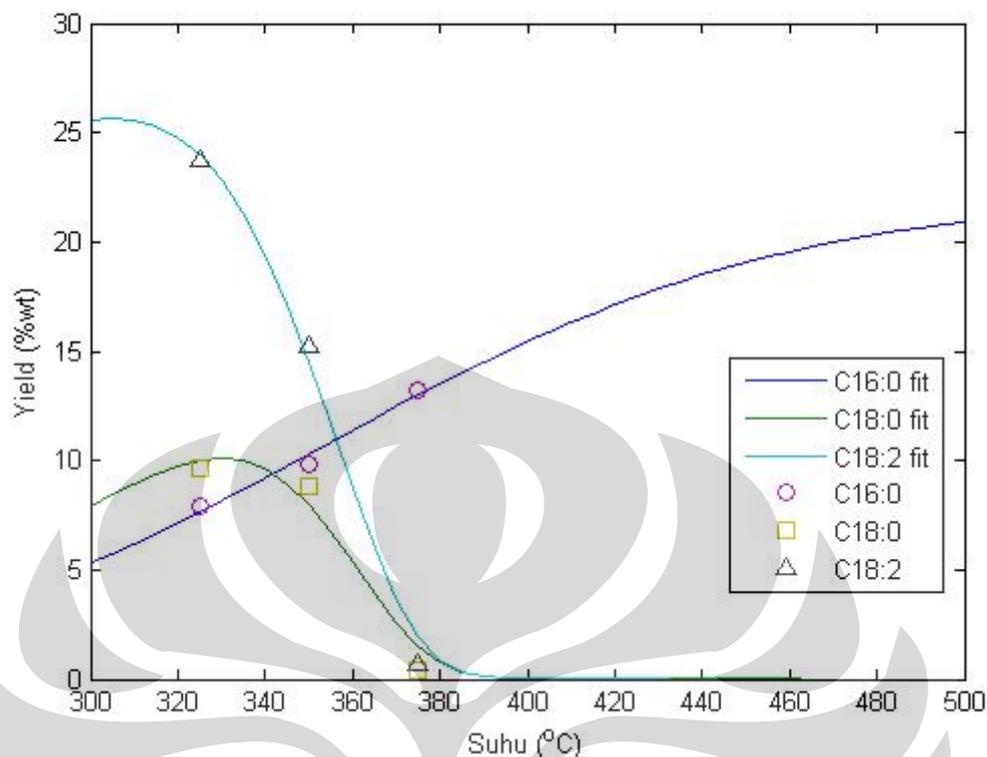
Eksperimen ini dilakukan oleh Rohmah^[27] dengan menggunakan minyak jarak sebagai bahan baku dan bertujuan untuk mendapatkan minyak dengan viskositas lebih rendah yang dapat digunakan sebagai biosolar. Eksperimen dilakukan dengan beberapa variasi, salah satunya variasi suhu pada 325°C, 350°C dan 375°C. Data eksperimen yang digunakan dalam simulasi disajikan di bagian Lampiran.

Sebenarnya pada data eksperimen terdapat lebih banyak produk perengkahan yang dihasilkan. Namun, karena nilai yieldnya sangat kecil maka tidak digunakan dalam simulasi. Data yang digunakan hanya produk yang dominan, diantaranya karbon C₁₆ dan C₁₈ yang merupakan molekul awal penyusun minyak jarak. Data diatas kemudian disimulasikan dalam program dengan menggunakan persamaan (3.1). Parameter hasil simulasi disajikan pada tabel 4.3 dan analisis hasil simulasi disajikan pada gambar 4.7.

Tabel 4.3. Parameter hasil simulasi *curve fitting* pada data perengkahan termal minyak jarak pagar

Produk	Parameter					Goodness of fit	
	w	T ₀	D	p	q	SSE	R ²
C16:0	22,41	340	55	1,282	1,16 x 10 ⁻¹⁰	0,3674	0,9744
C18:0	50	400,2	20	0,3522	11,85	2,2287	0,9577
C18:1	80	370,7	20	0,212	2,33 x 10 ⁻¹⁴	161,2	0,6736
C18:2	50	431	20	0,09158	50	2,2747	0,9916

Dari hasil simulasi yang dilakukan, terdapat data yang memiliki tingkat keakuratan yang rendah, yaitu pada produk C18:1. Hal ini disebabkan karena data yang diharapkan tidak sesuai perkiraan, dimana karbon rantai panjang yieldnya akan semakin menurun dengan bertambahnya suhu dan yang terjadi justru sebaliknya. Oleh karena itu, dalam pembuatan grafik analisis hasil simulasi, data dan hasil simulasi dari produk C18:1 tidak digambarkan.



Gambar 4.7. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield produk pada perengkahan termal minyak jarak pagar

Dari grafik hasil simulasi, terlihat bahwa dengan semakin bertambahnya suhu, maka karbon dengan rantai yang lebih panjang semakin berkurang. Hal ini disebabkan penambahan suhu akan mempercepat perengkahan lebih lanjut menjadi karbon dengan rantai yang lebih pendek, seperti karbon C₁₆. Pada suhu lebih dari 360°C, karbon rantai pendek akan terus bertambah. Hal ini serupa dengan hasil simulasi pada perengkahan termal minyak *canola*, dimana di atas suhu 350°C, yield produk karbon rantai pendek akan terus bertambah dan mencapai kondisi optimumnya pada suhu 450°C. pada grafik di bagian ini tidak dapat ditentukan suhu optimum perengkahan karena data yang digunakan terlalu sedikit dan produk yang dihasilkan masih merupakan karbon rantai panjang.

4.1.4. Hasil simulasi pada perengkahan katalitik minyak sawit

Pada bagian ini dilakukan simulasi mengenai perengkahan katalitik minyak sawit yang berbeda jenis katalisnya.

4.1.4.1. Katalis JRC-ALO-3

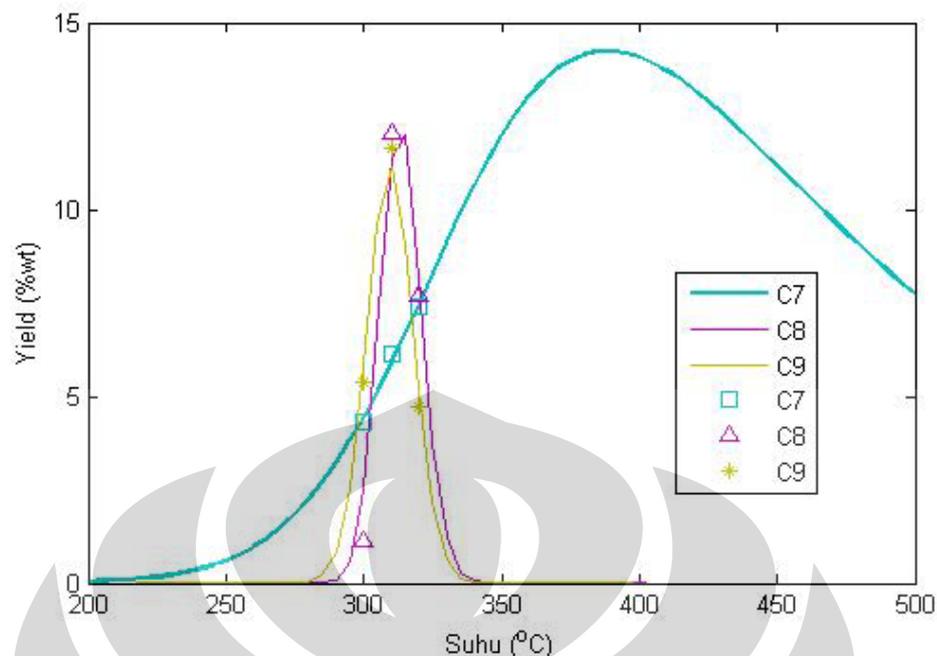
Eksperimen ini dilakukan Erahman^[28] menggunakan minyak sawit sebagai bahan baku dan bertujuan untuk mendapatkan minyak *biogasoline* yang dapat digunakan sebagai pengganti atau campuran bahan bakar konvensional. Eksperimen dilakukan dengan beberapa variasi, salah satunya variasi suhu pada 300°C-350°C. Pada simulasi hanya digunakan data pada suhu 300°C-320°C. Data eksperimen yang digunakan dalam simulasi disajikan di bagian Lampiran.

Data kemudian disimulasikan dalam program dengan menggunakan persamaan (3.1). Parameter hasil simulasi disajikan pada tabel 4.4 dan analisis hasil simulasi disajikan pada gambar 4.8.

Tabel 4.4. Parameter hasil simulasi *curve fitting* pada data perengkahan katalitik minyak sawit dengan katalis JRC-ALO-3

Produk	Parameter					Goodness of fit	
	w	T_0	D	p	Q	SSE	R^2
C ₆	50	310	20	3,686	1,698	0,0981	0,8795
C ₇	40	310	40	2,418	0,3413	0,0935	0,9808
C ₈	80	301,7	20	0,979	0,121	2,606	0,957
C ₉	80	311,1	20	0,99	0,118	0,6661	0,9771

Dari hasil simulasi yang dilakukan, terdapat data yang memiliki tingkat keakuratan yang tidak sesuai, yaitu pada produk C₆. Hal ini disebabkan karena data yang diharapkan tidak sesuai perkiraan, dimana karbon rantai pendek yieldnya akan semakin meningkat dengan bertambahnya suhu dan yang terjadi justru sebaliknya. Oleh karena itu, dalam pembuatan grafik analisis hasil simulasi, data dan hasil simulasi dari produk C₆ tidak digambarkan.



Gambar 4.8. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield produk pada perengkahan katalitik CPO dengan katalis JRC-ALO-3

Dari grafik hasil simulasi, terlihat bahwa dengan semakin bertambahnya suhu, maka karbon dengan rantai yang lebih panjang semakin berkurang. Hal ini disebabkan penambahan suhu akan mempercepat perengkahan lebih lanjut menjadi karbon dengan rantai yang lebih pendek. Suhu optimum untuk mendapatkan yield maksimal fraksi gasolin C₇ hingga C₉ adalah 325°C, yang dapat terlihat dari kenaikan karbon C₈ dan C₉ pada suhu 300-325°C.

4.1.4.2. Katalis REY

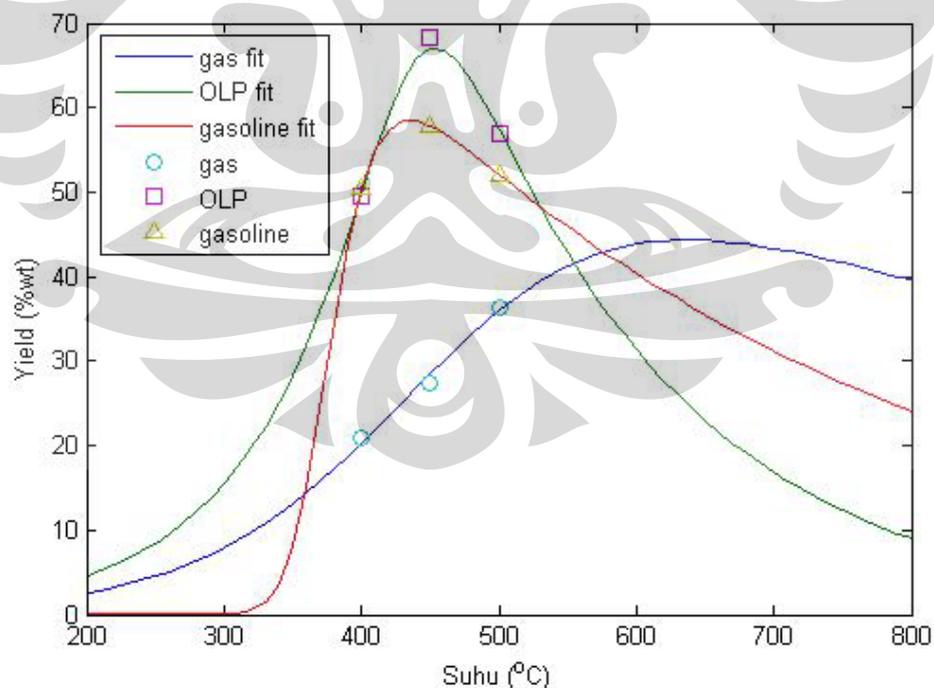
Eksperimen ini dilakukan Tamunaidu^[29] dengan menggunakan minyak sawit (CPO) dan bertujuan untuk menghasilkan bahan bakar bio. CPO yang digunakan memiliki komposisi asam lemak palmitat (C₁₆) jenuh. Katalis yang digunakan adalah zeolit *rare earth*-Y (REY). Eksperimen dilakukan dengan beberapa variasi, yaitu variasi suhu pada 400°C, 450°C, 500°C, dan variasi waktu tinggal pada 10, 20 dan 30 detik. Produk yang didapatkan digolongkan dalam dua kategori, gas dan produk cair (OLP), yang sebagian besar berupa gasoline yang merupakan produk yang ingin didapatkan. Model yang akan digunakan juga dapat diterapkan pada data yang telah digolongkan seperti ini, karena data tersebut juga berasal dari data produk-produk kategori masing-masing yang kemudian

dijumlahkan. Data hasil eksperimen untuk variasi suhu yang digunakan dalam simulasi disajikan di bagian Lampiran.

Data kemudian disimulasikan dalam program dengan menggunakan persamaan (3.1). Proses simulasi dilakukan dengan membagi data menjadi dua bagian, yaitu simulasi untuk data simulasi untuk data produk fraksi BTX, produk fraksi parafin/alkana (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8) dan simulasi untuk data produk fraksi olefin/alkena (C_2H_4 , C_3H_6). Parameter hasil simulasi disajikan pada tabel 4.5 dan analisis hasil simulasi disajikan pada gambar 4.9.

Tabel 4.5. Parameter hasil simulasi *curve fitting* pada data perengkahan katalitik CPO dengan katalis zeolit REY

Produk	Parameter					Goodness of fit	
	w	T_0	D	p	Q	SSE	R^2
Gas	62	452,6	80	1	0,1	1,651	0,9862
OLP	89	440	20	0,2673	0,1419	0,0002256	1
Gasolin	75	359,3	20	2,316	0,05149	$1,69 \times 10^{-13}$	1



Gambar 4.9. Hasil simulasi - pengaruh suhu perengkahan terhadap yield produk pada perengkahan katalitik CPO dengan katalis zeolit REY

Pada grafik yang terbentuk dari hasil simulasi, untuk produk gasolin yang menjadi target perengkahan, suhu optimum yang diperlukan dalam proses perengkahan berada pada sekitar suhu 450°C, yang dapat terlihat dari peningkatan yield dari mulai suhu 400-500°C. Pada suhu yang lebih tinggi dari 500°C, fraksi produk cair mengalami penurunan dan produk gas mengalami sedikit peningkatan dan menurun kembali. Hal ini disebabkan karena perengkahan lebih lanjut akan mengakibatkan rantai alkana terus terputus hingga mengakibatkan bertambahnya karbon/*coke* dan gas CO₂ yang terbentuk akibat pemutusan rantai.

4.2. Analisis hasil simulasi pada variasi waktu

4.2.1. Hasil simulasi pada perengkahan katalitik CPO dengan katalis REY

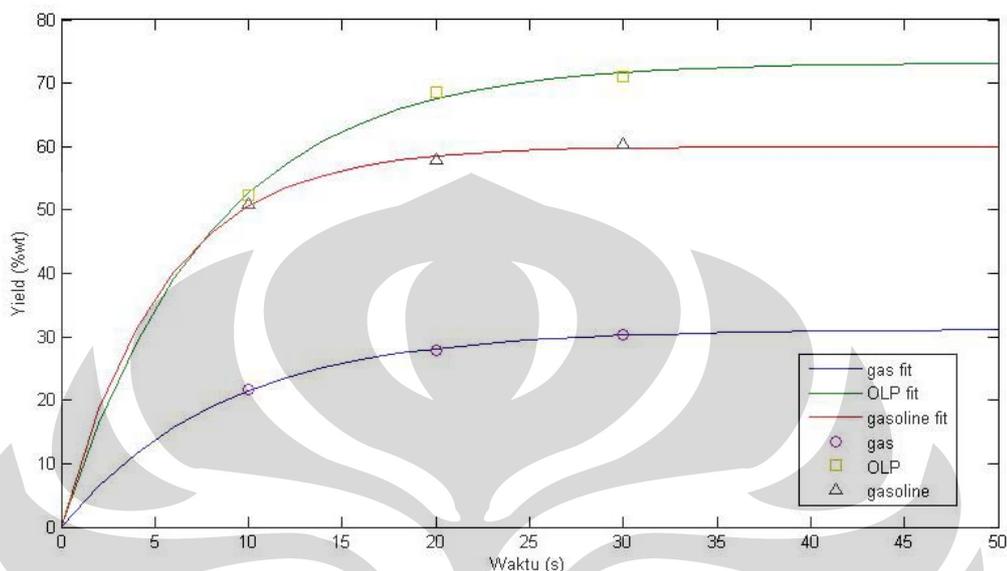
Penjelasan mengenai eksperimen ini terdapat pada bagian sebelumnya. Pada bagian ini akan dilakukan simulasi pada variasi waktu tinggal proses perengkahan, yaitu pada 10, 20 dan 30 detik dengan suhu perengkahan 450°C. Data hasil eksperimen untuk variasi waktu yang digunakan dalam simulasi disajikan di bagian Lampiran.

Data diatas kemudian disimulasikan dalam program dengan menggunakan persamaan (3.2). Pada simulasi ini terdapat banyak parameter yang dijadikan konstan karena sedikitnya data yang ada. Parameter tersebut adalah k_0 ($=1 \text{ s}^{-1}$), T_0 , D , p dan T_1 . Parameter hasil simulasi disajikan pada tabel 4.6 dan analisis hasil simulasi disajikan pada gambar 4.10.

Tabel 4.6. Parameter hasil simulasi *curve fitting* pada data perengkahan termal katalitik CPO dengan katalis zeolit REY

Produk	Parameter							Goodness of fit	
	w	T_0	D	P	q	r	T_1	SSE	R^2
Gas	57,56	440	60	1	0	22,04	520	0,1084	0,9974
OLP	135,4	440	60	1	$8,116 \times 10^{-4}$	21,3	520	1,59	0,9923
Gasolin	111,6	440	60	1	0,01016	17,39	520	0,8501	0,9825

Dari hasil *fitting* yang dilakukan, terlihat bahwa model yang digunakan mampu menghasilkan *fitting* yang akurat pada data yang digunakan, yang dapat dilihat dari nilai *goodness of fit*.

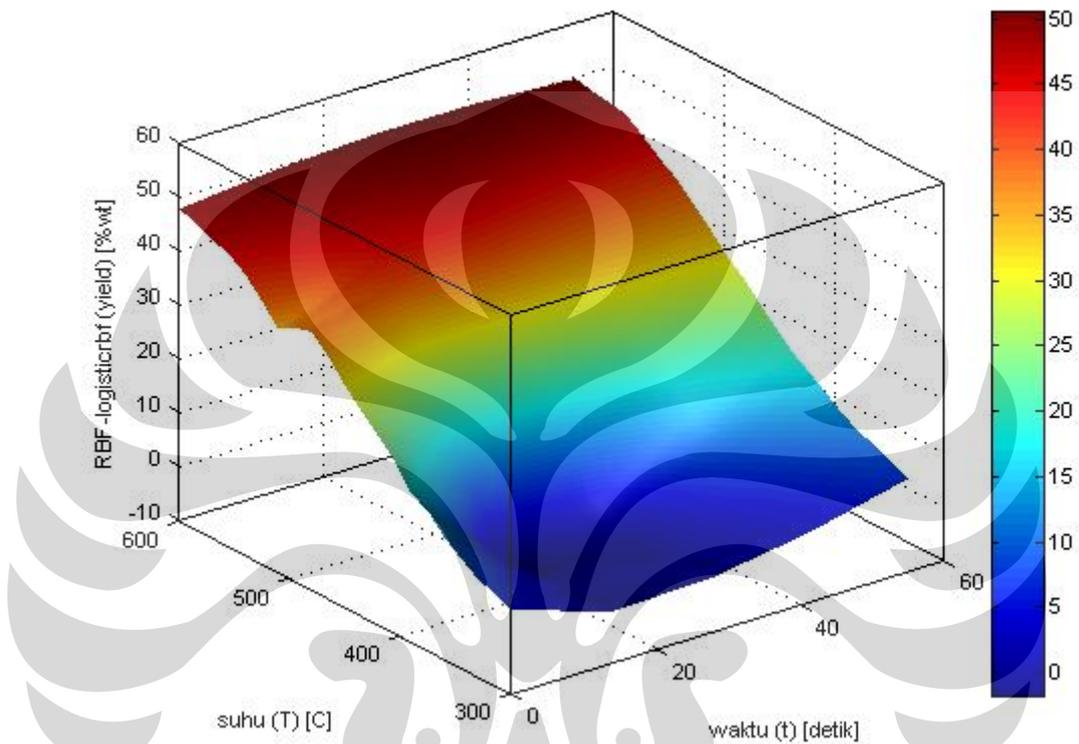


Gambar 4.10. Hasil simulasi - pengaruh waktu tinggal terhadap yield produk pada perengkahan katalitik CPO dengan katalis zeolit REY

Dari hasil simulasi, didapatkan waktu optimum adalah 25 detik, dilihat dari kenaikan yield pada kisaran waktu 10-30 detik. Pada grafik hasil simulasi, terlihat bahwa produk perengkahan baik gas maupun cair akan meningkat seiring bertambahnya waktu, tetapi kemudian menjadi konstan. Namun, dari beberapa sumber lain^[15,16] dituliskan bahwa peningkatan waktu tinggal dapat menurunkan yield dari produk karena produk cair dan gas akan terengkah kembali menjadi *coke* atau gas CO_x akibat pemanasan dan energi yang terus meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa model yang digunakan masih belum dapat merepresentasikan profil penurunan produk saat bertambahnya waktu.

Dari hasil simulasi yang dilakukan, kemudian dibuat model perhitungan yang menjelaskan hubungan antara variabel suhu dan waktu, yaitu dengan cara membuat grafik respon dari perubahan dua variabel tersebut serta tabel ANOVA untuk melihat variabel yang lebih signifikan dari variasi yang dilakukan. Grafik ini dibuat menggunakan MATLAB dengan memasukkan model yang digunakan dan data awal yang digunakan, kemudian dilakukan iterasi untuk menentukan

hubungan dan pengaruh variabel suhu dan waktu terhadap yield. Data yang digunakan pada simulasi ini adalah data hasil perengkahan minyak sawit dengan katalis REY^[30] pada fraksi gasoline yang memiliki variasi suhu dan waktu pada eksperimennya.



Gambar 4.11. Grafik respon perubahan yield terhadap pengaruh suhu dan waktu pada fraksi gasolin hasil perengkahan katalitik minyak sawit dengan katalis REY

Grafik yang terbentuk dibuat dalam bentuk 3-dimensi untuk memperjelas pengaruh kedua variabel yang diamati. Keterangan warna pada gambar menunjukkan yield, dimana semakin terang warnanya maka yield semakin meningkat. Dari grafik yang dihasilkan terlihat bahwa dengan meningkatnya suhu, yield akan semakin meningkat dan kemudian menjadi konstan dan cenderung menurun di atas suhu 500°C. Peningkatan waktu tinggal terlihat hanya mempengaruhi sedikit kenaikan yield dan kenaikan yang terjadi tidak terlalu pesat, walaupun tidak menunjukkan tanda-tanda penurunan yield.

4.2.2. Hasil simulasi pada perengkahan katalitik residu minyak bumi

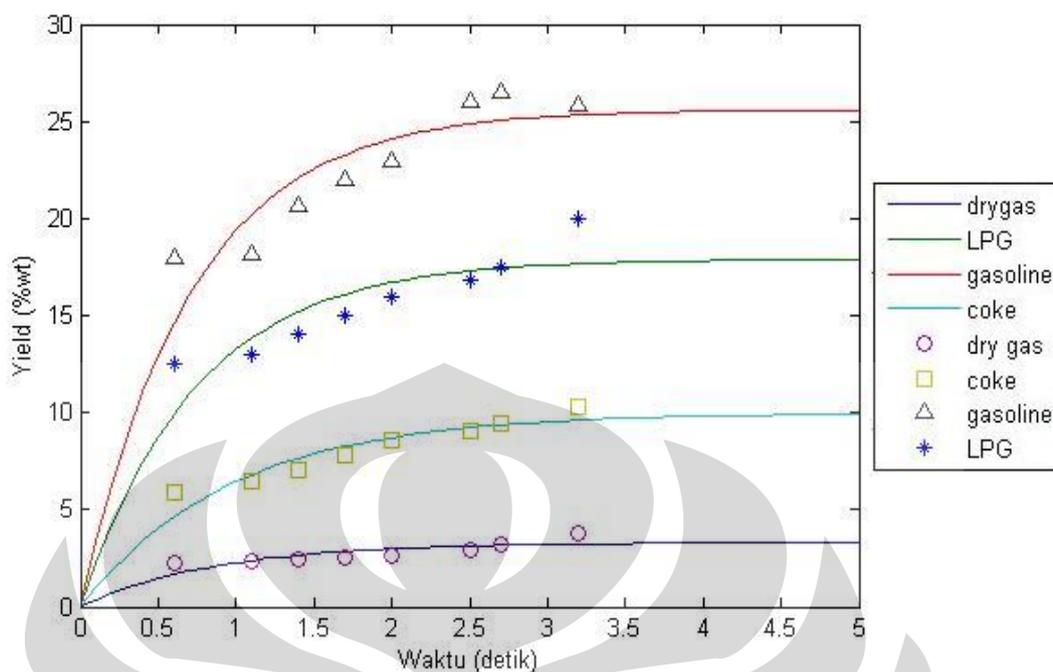
Eksperimen ini dilakukan oleh Wang^[30] pada residu fraksi berat minyak bumi dan bertujuan untuk mengetahui kondisi optimum pada perengkahan katalitik menggunakan katalis komersil LV-23 berbasis zeolit. Variasi yang dilakukan adalah variasi waktu tinggal pada suhu 690°C dan melihat pengaruhnya pada masing-masing fraksi produk. Data yang digunakan dalam simulasi disajikan di bagian Lampiran.

Data kemudian disimulasikan dalam program dengan menggunakan persamaan (3.2). Pada simulasi ini hanya digunakan data pada produk fraksi yang memiliki kecenderungan untuk meningkat dengan bertambahnya waktu. Hal ini disebabkan karena model yang digunakan ternyata tidak dapat digunakan pada data cenderung menurun dengan bertambahnya waktu, yang telah dijelaskan di bagian sebelumnya.

Parameter hasil simulasi disajikan pada tabel 4.7 dan analisis hasil simulasi disajikan pada gambar 4.12.

Tabel 4.7. Parameter hasil simulasi *curve fitting* pada data perengkahan termal katalitik residu minyak bumi dengan katalis komersil

Produk	Parameter							Goodness of fit	
	w	T_0	D	p	Q	r	T_1	SSE	R^2
Gas	4,636	440	35	1,539	0,04693	8,197	672,2	1,03	0,466
LPG	18,85	440	35	0,8857	0,007061	8,44	655,9	16,11	0,6327
Gasolin	25,88	440	35	0,4117	0,00144	8,696	651,8	23,64	0,7103
Coke	10,49	440	35	1,806	0,006785	7,854	685,6	2,846	0,8273



Gambar 4.12. Hasil simulasi - pengaruh waktu tinggal terhadap yield produk pada perengkahan katalitik residu minyak bumi dengan katalis komersil

Dari parameter hasil simulasi, terlihat bahwa model yang digunakan tidak memiliki kualitas fitting yang baik terhadap data. Hal ini menunjukkan masih terdapat kekurangan pada model hasil modifikasi yang digunakan dalam simulasi pada variasi waktu. Grafik hasil simulasi menunjukkan kecenderungan peningkatan yield produk perengkahan seiring bertambahnya waktu perengkahan. Seperti yang telah dijelaskan di bagian sebelumnya, hal ini bertentangan dengan beberapa sumber lain yang mengatakan bahwa dengan meningkatnya waktu dapat menurunkan yield dari produk karena produk cair dan gas akan terengkah kembali menjadi *coke* atau gas CO_x akibat pemanasan dan energi yang terus meningkat. Namun, apabila hanya dilihat secara grafikal, kurva yang dihasilkan sudah terlihat cocok dengan kecenderungan data yang digunakan.

Berikut ini merupakan tabel keseluruhan hasil simulasi yang telah dilakukan.

Tabel 4.8. Tabel keseluruhan simulasi yang dilakukan

Data	Bahan Baku	Variasi Perlakuan	Produk Dominan	Kondisi Optimum
Idem ^[8]	Minyak <i>canola</i>	Perengkahan termal, variasi suhu	Fraksi olefin	450°C
Katikaneni ^[26]	Minyak <i>canola</i>	Perengkahan katalitik, variasi suhu	Fraksi BTX	400°C
Rohmah ^[27]	Minyak jarak	Perengkahan termal, variasi suhu	Fraksi berat (C ₁₆ -C ₁₈)	350°C
Erahman ^[28]	Minyak sawit	Perengkahan katalitik, variasi suhu	Fraksi gasolin	325°C
Tamunaidu ^[29]	Minyak sawit	Perengkahan katalitik, variasi suhu	Fraksi gasolin	450°C
		Variasi waktu	Fraksi gasolin	25 detik
Wang ^[30]	Residu atmosferik	Variasi waktu	Fraksi gasolin	3 detik

Untuk parameter dari masing-masing data telah dijelaskan di bagian sebelumnya, untuk berbagai spesi produk pada masing-masing data. Dari hasil seluruh hasil simulasi yang dilakukan, dapat diberi kesimpulan umum yaitu pada proses perengkahan minyak nabati, suhu optimumnya adalah 400°C dan waktu tinggal 25 detik. Hal ini juga merupakan koreksi terhadap penelitian-penelitian sebelumnya di Departemen Teknik Kimia yang menggunakan waktu tinggal perengkahan hingga hitungan menit, yang sebenarnya dapat menyebabkan produk perengkahan mengalami proses lain seperti isomerisasi, sehingga didapatkan produk yang bervariasi dan tidak diinginkan seperti karbon/*coke*.

4.3. Analisis statistik

4.3.1. Uji-t pada simulasi dengan satu variabel

Uji-t dilakukan untuk menguji apakah rata-rata dari satu populasi, dalam hal ini suhu, memiliki nilai yang sama. Selain itu, dari hasil hipotesis pada uji ini dapat diketahui tingkat kepentingan variabel yang diuji terhadap variabel yang

dipengaruhi variabel uji tersebut. Uji-t dilakukan pada hasil simulasi yang menggunakan variasi suhu. Hasil dari uji-t yang dilakukan pada data suhu yang digunakan dan dihitung menggunakan MATLAB adalah sebagai berikut.

Tabel 4.9. Hasil uji-t pada simulasi dengan variasi suhu

Data	Variasi Suhu	h	p-value	Keterangan
Idem ^[8]	200 – 800°C	1	$2,077 \times 10^{-30}$	Signifikan
Katikaneni ^[26]	200 – 600°C	1	$3,202 \times 10^{-12}$	Signifikan
Rohmah ^[27]	300 – 500°C	1	$2,149 \times 10^{-9}$	Signifikan
Erahman ^[28]	200 – 500°C	1	$2,579 \times 10^{-10}$	Signifikan
Tamunaidu ^[29]	200 – 800°C	1	$2,077 \times 10^{-30}$	Signifikan

Dari hasil perhitungan, didapatkan bahwa seluruh variasi suhu pada hasil simulasi bersifat signifikan terhadap yield. Nilai $h = 1$ pada hasil uji ini menunjukkan hipotesis nol ditolak dan hipotesis alternatif diterima. Dengan kata lain, nilai rata-rata suhu tidak sama dan suhu memiliki pengaruh signifikan terhadap yield. Nilai p menunjukkan kemungkinan adanya nilai ekstrem pada data suhu yang digunakan. Hal ini menunjukkan tidak terdapat nilai ekstrem pada variasi suhu dari simulasi ini yang dapat merubah secara drastis nilai yield hasil perengkahan.

4.3.2. Analisis varians (ANOVA) pada simulasi dengan dua variabel

Selain grafik respon diatas, untuk menunjukkan hubungan kedua variabel bebas yang disimulasikan terhadap yield dapat juga dilakukan dengan analisis varians (ANOVA). Metode ANOVA yang digunakan adalah *N-way* ANOVA yang dapat digunakan untuk mengetahui hubungan dari suatu variabel bebas terhadap variabel yang dipengaruhinya dan juga dapat digunakan untuk mengukur signifikansi dari variabel bebas.

ANOVA dilakukan menggunakan MATLAB terhadap data yang didapatkan dari respon diatas, yaitu data perengkahan katalitik minyak sawit dengan variasi waktu, sebanyak 100 data dengan nilai kepentingan/*significance level* $\alpha = 0,05$. Hasil perhitungan ANOVA disajikan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.10. Analisis varians (ANOVA) pada variabel suhu dan waktu

Sumber	<i>Sum Square</i>	DOF	<i>Mean Square</i>	F	P-value
X1	11954,7	22	543,397	79,25	0
X2	1487,2	51	29,161	4,25	0,0001
<i>Error</i>	178,3	26	6,857		
Total	29814,9	99			

Nilai X1 dan X2 dari ANOVA merupakan nilai variabel suhu dan waktu. Dari hasil perhitungan ANOVA, didapatkan nilai F dan P-value/Prob-F yang menunjukkan hubungan data yang digunakan. Nilai P yang didapatkan pada variabel suhu X1 adalah sebesar $0 \leq \alpha$, yang berarti terdapat hasil yang signifikan, atau dapat dikatakan pengaruh suhu terhadap yield sangat signifikan. Begitu juga dengan variabel suhu X2 yang memiliki nilai $P = 0,0001 \leq \alpha$, yang berarti dapat dikatakan pengaruh waktu terhadap yield juga signifikan.

Dari analisis ANOVA ini, sulit untuk menentukan adanya hubungan saling dependen pada variabel suhu dan waktu. Namun, apabila dilihat dari pengaruh masing-masing variabel terhadap yield, dapat dikatakan bahwa variabel suhu dan waktu hanya mempengaruhi perubahan yield dan tidak memiliki hubungan dependen.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini, diperoleh kesimpulan yang dibagi berdasarkan variabel yang ditinjau, sebagai berikut:

1. Suhu

Model prediktif yang digunakan terbukti dapat merepresentasikan sebagian besar data eksperimen perengkahan minyak nabati yang memiliki variasi suhu, baik secara termal maupun katalitik. Secara umum, proses perengkahan dan yield produk akan meningkat dengan bertambahnya suhu hingga mencapai suhu optimum dan kemudian menurun kembali. Suhu optimum untuk perengkahan termal berkisar pada suhu 400-450°C, sedangkan suhu optimum untuk perengkahan katalitik berkisar pada suhu 300-350°C, tergantung jenis minyak nabati yang digunakan.

2. Waktu

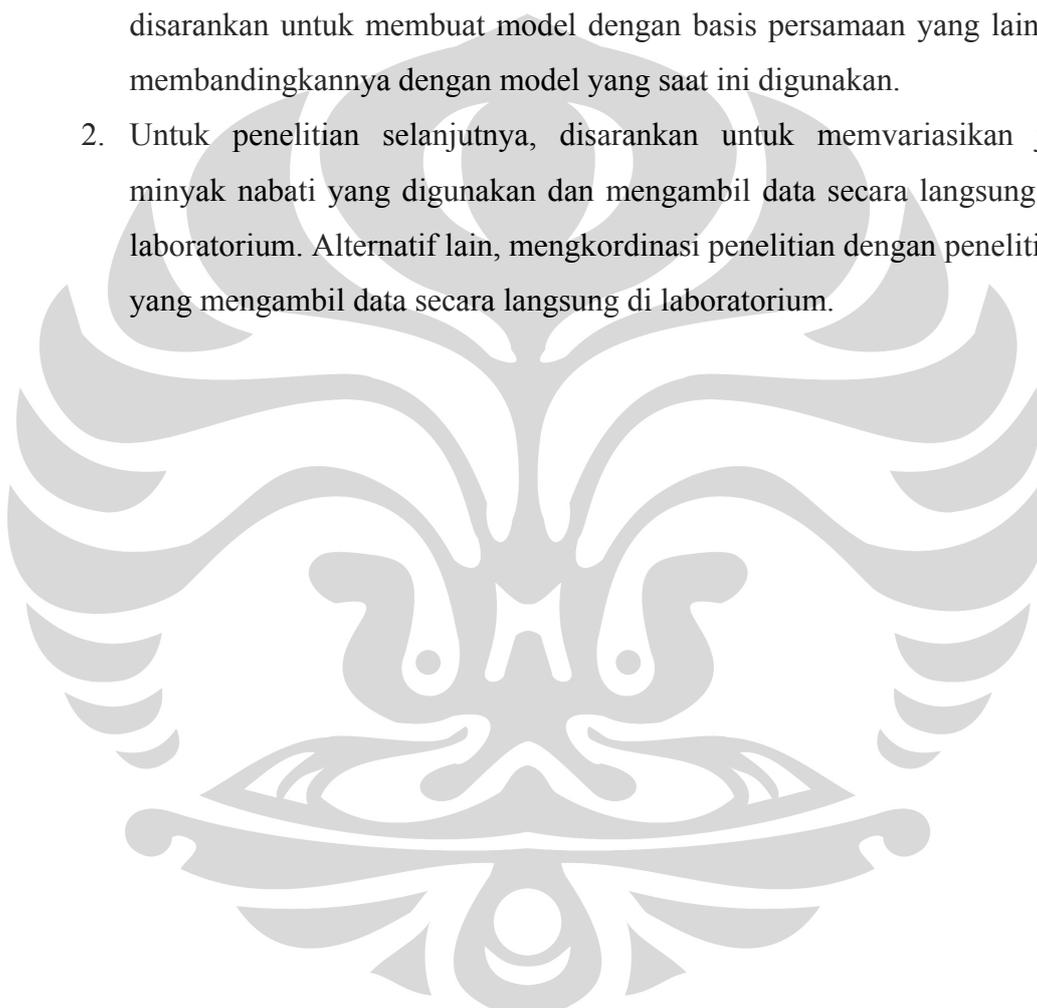
Model prediktif yang digunakan dapat merepresentasikan beberapa data eksperimen perengkahan minyak nabati yang memiliki variasi waktu, walaupun masih terdapat keterbatasan. Keterbatasan tersebut diantaranya dengan semakin bertambahnya waktu, yield yang dihasilkan cenderung konstan. Selain itu, tidak dapat digunakan untuk data yang memiliki kecenderungan semakin menurun dengan bertambahnya waktu. Dari hasil simulasi, waktu optimum untuk perengkahan minyak nabati berkisar pada 25 detik.

3. Tingkat kepentingan variabel suhu dan waktu terhadap yield sangat signifikan dilihat dari hasil uji-*t* dan uji ANOVA yang memiliki $P = 1$ untuk uji-*t* dan $P\text{-value} \approx 0$ untuk uji ANOVA. Hal ini menunjukkan variabel suhu dan waktu memiliki hubungan dan pengaruh yang signifikan terhadap yield hasil perengkahan.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini, dapat dikemukakan beberapa saran sebagai berikut:

1. Simulasi pada model prediktif dengan variasi waktu masih belum sempurna dan masih terdapat keterbatasan. Sebaiknya dilakukan pengembangan model lebih lanjut. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk membuat model dengan basis persamaan yang lain dan membandingkannya dengan model yang saat ini digunakan.
2. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk memvariasikan jenis minyak nabati yang digunakan dan mengambil data secara langsung dari laboratorium. Alternatif lain, mengkordinasi penelitian dengan peneliti lain yang mengambil data secara langsung di laboratorium.

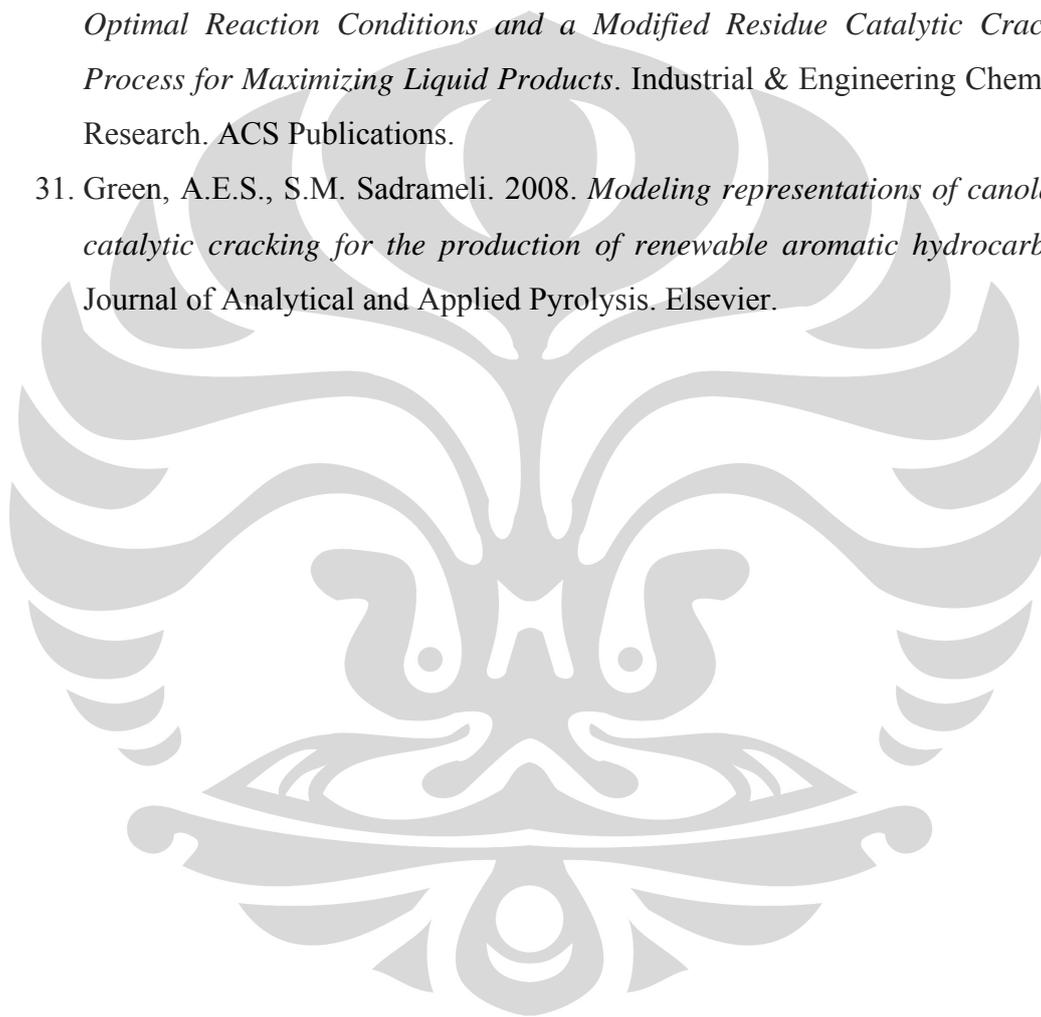


DAFTAR REFERENSI

1. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). 2006. *Statistik Ekonomi Energi Indonesia 2006*. Jakarta.
2. Tatang, S. 18 September 2005. *Biodiesel dari tanaman jarak*. Republika. Jakarta.
3. Achten, W.M.J., L.Verchot, Y.J.Franken, E.Mathijs, V.P.Singh, R.Aerts, dan B.Muys. 2008. *Review : Jatropha Bio-Diesel Production And Use*. Biomass And Bioenergy. 32. hal. 1063–1084.
4. Didin.,W. 2005. *Kelayakan Usaha dan Pola Kemitraan Kebun Industri Jarak Pagar*. PT.Permodalan Nasional Madani. Jakarta.
5. Demirbas, A. 2009. *Progress And Recent Trends In Biodiesel Fuels*. Energy Conversion and Management. 50. hal. 14–34.
6. Goyal, H.B., Diptendu Seal, dan R.C. Saxena. 2006. *Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 12. hal. 510.
7. Rohmah, E.N., M. Nasikin. 2008. *Kinetika Pyrolysis Minyak Jarak (Jatropha Oil) menjadi Biosolar*. Seminar Nasional Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia 2008. Institut Teknologi Surabaya. Surabaya. 5 November 2008.
8. Idem, R.O., Sai P. R. Katikaneni, dan N.N. Bakhshi. 1996. *Thermal Cracking of Canola Oil: Reaction Products in the Presence and Absence of Steam*. Energy & Fuels. 10. hal. 1150-1162.
9. Siregar, T.B. 2005. *Catalytic Cracking of Palm Oil to Gasoline using Zeolite Catalysts*. Tesis Universiti Teknologi Malaysia.
10. Demirbas, A. 2007. *Relationships derived from physical properties of vegetable oil and biodiesel fuels*. Fuel. 87. hal. 1744.
11. Ma, F., Milford A. Hanna. 1999. *Biodiesel Production: A Review*. Bioresource Technology, 70. hal. 1-15.
12. Anonim. *Fatty Acid*. http://www.wikipedia.org/fatty_acid (diakses pada 15 Mei 2009).
13. Koh, L.P., Jaboury Ghazoul. 2008. *Biofuel, Biodiversity, and People: Understanding the Conflicts and Finding Opportunities*. Biological Conservation, 141. hal. 2450-2460.

14. Demirbas, A. 2008. *Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections*. Energy Conversion and Management, 49. hal. 2106-2116.
15. Maher K.D., D.C. Bressler. 2007. *Pyrolysis of Triglyceride Materials for the Production of Renewable Fuels and Chemicals*. Bioresource Technology, 98. 2351-2368.
16. Wampler, T.P. 2007. *Applied Pyrolysis Handbook*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group.
17. Clark, J. *Cracking alkanes*. <http://www.chemguide.co.uk/crackingalkanes> (diakses pada 15 Mei 2009).
18. Demirbas, A. 2005. *Journal of Analytical Appl. Pyrolysis*. 73. hal. 39-43.
19. Satterfield, C.N. 1991. *Heterogeneous Catalysis In Industrial Practice 2nd edition*. USA: Mc. Graw Hill, Inc.
20. Smith, G.V., Ferenc Notheisz. 2007. *Heterogeneous Catalysis in Organic Chemistry*. San Diego: Academic Press.
21. Anonim. *Curve fitting*. http://www.wikipedia.org/Curve_fitting (diakses pada 28 Februari 2010).
22. Chapra, S.C., Raymond P. Canale. 2006. *Numerical Methods for Engineers 5th ed.* New York: McGraw-Hill.
23. Anonim. *Interpolation*. <http://www.wikipedia.org/Interpolation> (diakses pada 28 Februari 2010).
24. MATLAB Help & Documentation. Matrix Laboratory (MATLAB) Ver. 7.1.0. 2005. Math Works.
25. Anonim. *Regression model validation*. http://www.wikipedia.org/Regression_model_validation (diakses pada 20 Mei 2010).
26. Katikaneni, S.P.R., J.D. Adjaye, N.N. Bakhshi. 1995. *Catalytic Conversion of Canola Oil over Potassium-Impregnated HZSM-5 Catalysts: C2-C4 Olefin Production and Model Reaction Studies*. Energy Fuels, 9. hal. 599-609.
27. Rohmah, E.N. 2008. *Kinetika Pyrolysis Minyak Jarak (Jatropha Oil) menjadi Biosolar*. Tesis. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.

28. Erahman, Q.F. 2008. *Sintesis Biogasoline dari minyak kelapa sawit melalui reaksi perengkahan katalitik fasa gas menggunakan katalis alumina*. Tesis. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
29. Tamunaidu, P., Subhash Bathia. 2007. *Catalytic cracking of palm oil for the production of biofuels: Optimization studies*. *Bioresource Technology*, 98. hal. 3593-3601.
30. Wang, G., Xing-ying Lan, Chun-ming Xu, dan Jin-sen Gao. 2009. *Study of Optimal Reaction Conditions and a Modified Residue Catalytic Cracking Process for Maximizing Liquid Products*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. ACS Publications.
31. Green, A.E.S., S.M. Sadrameli. 2008. *Modeling representations of canola oil catalytic cracking for the production of renewable aromatic hydrocarbons*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Elsevier.



LAMPIRAN

A. Data yang digunakan dalam simulasi

Tabel A.1. Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi perengkahan termal minyak *canola*^[8]

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

Tabel A.2. Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi perengkahan katalitik minyak *canola*^[26]

Produk	Suhu (°C)			
	500	450	400	375
CH ₄	0,072 %	0,325 %	0,272 %	1,1 %
C ₂ H ₄	0,288 %	0,5 %	2,244 %	5,2 %
C ₂ H ₆	0,24 %	0,525 %	0,612 %	1,9 %
C ₃ H ₆	0,48 %	0,9 %	4,352 %	7,8 %
C ₃ H ₈	10,176 %	9,9 %	10,608 %	16,4 %
Benzena	6,555 %	6,426 %	5,824 %	4,305 %
Xylena	11,742 %	15,183 %	16,072 %	14,391 %
Toluena	17,727 %	18,648 %	18,144 %	14,883 %

Tabel A.3. Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi perengkahan termal minyak jarak pagar^[27]

Produk	Suhu (°C)		
	325	350	375
C16:0	7,93 %	9,81 %	13,22 %
C18:0	9,65 %	8,82 %	0,37 %
C18:1	51,79 %	51,08 %	78,64 %
C18:2	23,69 %	15,25 %	0,72 %

Tabel A.4. Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi perengkahan katalitik minyak sawit dengan katalis JRC-ALO-3^[28]

Produk	Suhu (°C)		
	300	310	320
C₆	0,41 %	1,42 %	1,59 %
C₇	4,30 %	6,15 %	7,40 %
C₈	1,17 %	12,05 %	7,72 %
C₉	5,40 %	11,63 %	4,71 %

Tabel A.5. Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi perengkahan katalitik CPO menggunakan katalis zeolit REY^[29]

Produk	Suhu (°C)		
	400	450	500
Gas	21 %	27,5 %	36,4 %
OLP	49,5 %	68,3 %	57 %
Gasolin	50,5 %	57,9 %	52,1 %

Tabel A.6. Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi perengkahan katalitik CPO menggunakan katalis zeolit REY^[29]

Produk	Waktu (detik)		
	10	20	30
Gas	21,6 %	27,9 %	30,4 %
OLP	52,3 %	68,5 %	71 %
Gasolin	50,8 %	57,8 %	60,3 %

Tabel A.7. Data hasil eksperimen yang digunakan dalam simulasi perengkahan katalitik residu minyak bumi menggunakan katalis komersil^[30]

Produk	Waktu (detik)							
	0,6	1,1	1,4	1,7	2	2,5	2,7	3,2
Gas	2,3 %	2,35 %	2,4 %	2,53 %	2,68 %	2,97 %	3,25 %	3,8 %
LPG	12,5 %	13 %	14 %	15 %	16 %	16,8 %	17,5 %	20 %
Gasolin	18 %	18,2 %	20,7 %	22 %	23 %	26 %	26,5 %	25,8 %
Diesel	24,5 %	26 %	24,7 %	24,4 %	24,2 %	23,7 %	23,4 %	23 %
Coke	5,9 %	6,5 %	7 %	7,8 %	8,6 %	9,1 %	9,4 %	10,3 %
Fraksi berat	36,5 %	32,8 %	30,9 %	27,5 %	24,7 %	21,3 %	19 %	18,1 %