



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**MODEL KINETIKA BERBASIS  
MEKANISME MICHAELIS-MENTEN  
UNTUK SINTESIS BIODIESEL SECARA ENZIMATIK**

**SKRIPSI**

**ENDRIKA ANDINI T.  
0706200283**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
DESEMBER 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**MODEL KINETIKA BERBASIS  
MEKANISME MICHAELIS-MENTEN  
UNTUK SINTESIS BIODIESEL SECARA ENZIMATIK**

**SKRIPSI**

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

**ENDRIKA ANDINI T.  
0706200283**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
DESEMBER 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Endrika Andini T.**

**NPM : 0706200283**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 30 Desember 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Endrika Andini T.  
NPM : 0706200283  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Model Kinetika Berbasis Mekanisme Michaelis –  
Menten untuk Sintesis Biodiesel secara Enzimatik

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Rita Arbianti, M.Si. ( )  
Pembimbing : Tania Surya Utami, ST., MT. ( )  
Penguji : Dr. Heri Hermansyah, ST., M. Eng. ( )  
Penguji : Prof. Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M. Eng. ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Desember 2009

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah S.W.T. yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul **Model Kinetika Berbasis Mekanisme Michaelis-Menten untuk Sintesis Biodiesel secara Enzimatik** ini. Teriring pula penulis panjatkan shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad S.A.W. beserta keluarga, sahabat dan pengikut-Nya.

Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi Teknik Kimia, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, serta untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Ibu Ir. Rita Arbianti M.Si., selaku pembimbing I atas bimbingan dan masukan yang diberikan kepada penulis, serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.
2. Ibu Tania Surya Utami, ST., MT., selaku pembimbing II sekaligus dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingan serta arahan kepada penulis guna terselesaikannya skripsi ini.
3. Bapak Dr. Heri Hermansyah ST., M.Eng., yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan.
4. Mehyek, Pandut, dan Joe, atas doa yang tak putus, cinta, semangat, dan dukungannya baik moral maupun materil.
5. Ferriansyah Hasan, atas bantuan, dukungan, penghargaan, kesabaran, dan cinta yang tulus yang senantiasa mengisi keseharian penulis.
6. Yongyek, P'de Rudi, De'Lien, Yangtie, dan Oenix atas doa, hiburan, dan perhatian yang diberikan kepada penulis.
7. Sahabat penulis, Octavia *da* *Chairman of Double Helixes*, Kenta, Adam, dan Anders yang telah menjadi sebagian dari anugerah terindah bagi penulis.

8. *The Fellowship of da FreakZ*, Aggy, Josc, dan Roma yang selalu menghadirkan semangat, tawa dan dukungan kepada penulis.
9. Teman seperjuangan penulis, Mutia, Bang Dar dan Qa Octovand, Ryan dan Anatta yang setia menemani penulis serta banyak memberikan masukan pada penulis selama proses pembuatan skripsi ini.
10. Rekan-rekan Teknik Kimia khususnya angkatan 2007 yang telah mengisi keseharian penulis.
11. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata, penulis berharap Allah S.W.T. berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu, khususnya hal-hal yang berkenaan dengan pemodelan kinetika berbasis mekanisme Michaelis-Menten untuk reaksi biokatalitik dalam pembuatan biodiesel .

Depok, Desember 2009

Penulis

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

---

---

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

Nama : Endrika Andini T.  
NPM : 0706200283  
Program Studi : Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

Model Kinetika Berbasis Mekanisme Michaelis – Menten  
untuk Sintesis Biodiesel secara Enzimatis

berserta perangkat yang ada. 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 : 30 Desember 2009  
Yang menyatakan

(Endrika Andini T.)

## ABSTRAK

Nama : Endrika Andini T.  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Model Kinetika Berbasis Mekanisme Michaelis – Menten  
untuk Sintesis Biodiesel secara Enzimatik

Suatu pemodelan matematis untuk mempelajari mekanisme kinetika sintesis biodiesel rute non alkohol menggunakan biokatalis pada berbagai kondisi operasi tertentu dikembangkan dalam penelitian ini. Mekanisme pemodelan sintesis biodiesel sederhana berbasis Michaelis – Menten dengan pertimbangan faktor adsorpsi digunakan, mengingat adanya perbedaan konsentrasi mula – mula maupun konsentrasi pada bulk, baik terhadap enzim, substrat, maupun produk. Validitas model ini diuji dengan melakukan fitting terhadap data yang diperoleh melalui percobaan pada berbagai kondisi tertentu dalam rangka mencari parameter-parameter kinetika. Persamaan model secara simultan diolah secara numeris menggunakan metode Runge-Kutta, dimana hasil fitting terbaik dari nilai parameter ditentukan menggunakan metode Simplex. Melalui penelitian ini, didapatkan bahwa model yang digunakan untuk sintesis biodiesel berbasis Michaelis – Menten dapat memberikan hasil fitting dan gambaran yang cukup baik mengenai pengaruh dari konsentrasi mula-mula enzim dan trigliserida yang digunakan, terhadap konsentrasi biodiesel yang dihasilkan pada suatu kondisi tertentu selama sintesis berlangsung.

Kata kunci:

Biodiesel, Model Kinetik, Interesterifikasi, Biokatalis, Michaelis – Menten



## ABSTRACT

Name : Endrika Andini T.  
Study Program : Chemical Engineering  
Title : Kinetic Model Based on Michaelis – Menten Mechanism for Enzymatic Synthesis of Biodiesel

A mathematical model describing biodiesel synthesis of non alcohol route using biocatalyst under various operating conditions was constructed in this research. The simplified kinetic mechanism based on Michaelis – Menten with adsorption factor was considered in addition to the differences in the interfacial and bulk concentration of the enzyme, substrate and product. This modeling validation was done by fitting the model equations with the experimental result data in order to obtain the kinetic parameters. A set of arbitrary values for the constants was assumed, and then the simultaneous differential equations based on Michaelis-Menten were numerically solved using Runge-Kutta method, where the best fitted values of the constants were determined using Simplex method. The results of simulation model for the synthesis of biodiesel using biocatalyst based on Michaelis – Menten mechanism gave better fitted result and well described the effect of the initial enzyme concentration, initial concentrations of triglyceride and biodiesel on the entire process of biodiesel synthesis.

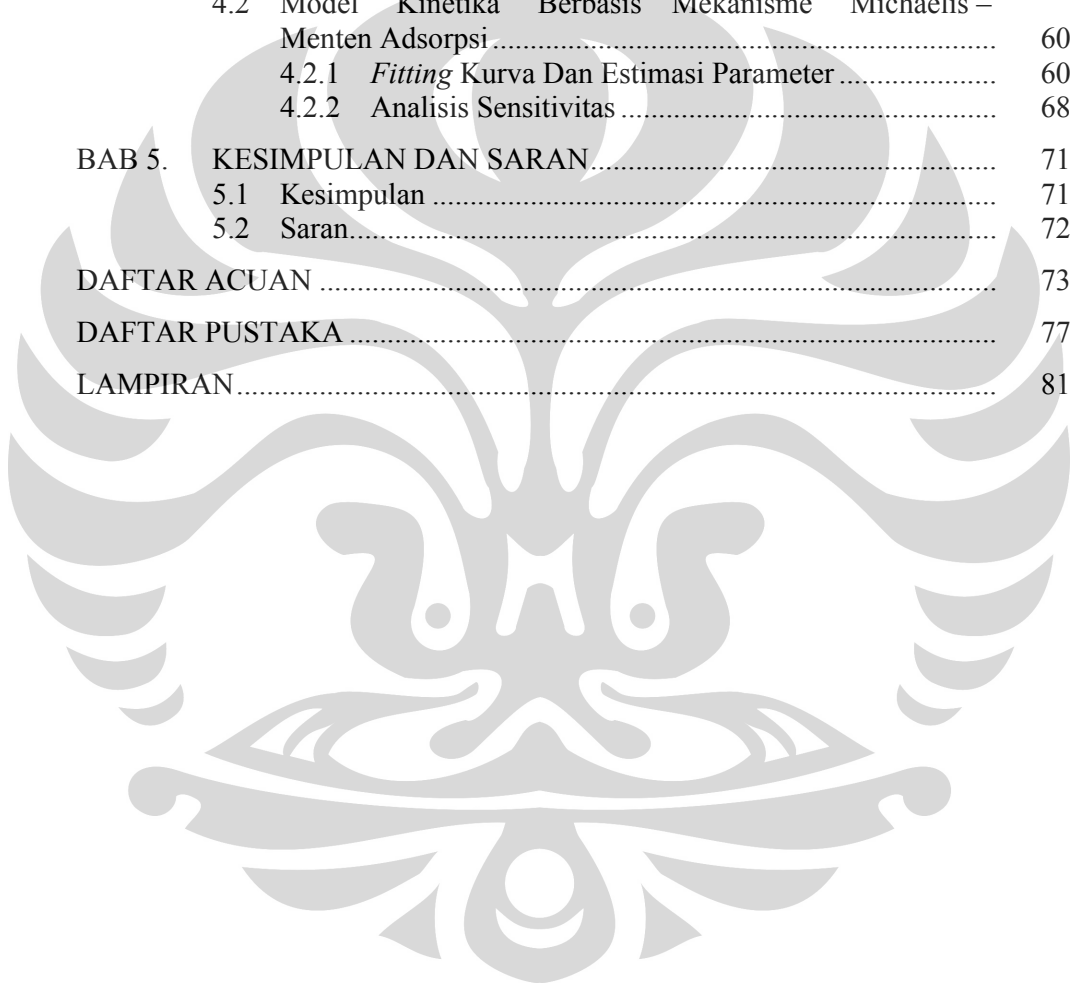
Key words:

Biodiesel, Kinetic Model, Interesterification, Biocatalyst, Michaelis – Menten

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
<b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Sintesis Biodiesel Enzimatik.....	6
2.1.1 Rute Alkohol.....	7
2.1.2 Rute Non Alkohol .....	9
2.2 Biokatalis .....	11
2.3 Model Kinetika Reaksi Sintesis Biodiesel.....	18
2.3.1 Mekanisme Reaksi Stoikiometri .....	18
2.3.2 Mekanisme Reaksi Enzimatik.....	21
2.3.2.1 Mekanisme Reaksi Enzimatik Melibatkan <i>Satu Substrat dan Satu Produk</i> .....	21
2.3.2.2 Mekanisme Reaksi Enzimatik Melibatkan <i>Dua Substrat dan Dua Produk</i> .....	23
2.4 Metode Runge – Kutta Orde 4 .....	29
2.5 <i>State Of The Art</i> .....	30
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>32</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	32
3.2 Pemodelan Kinetika Berbasis Mekanisme Michaelis – Menten.....	33
3.2.1 Penurunan Model Kinetika Berbasis Michaelis – Menten.....	34

3.2.3	Penurunan Model Kinetika Berbasis Michaelis – Menten Dengan Adsorpsi.....	37
3.3	Data – Data Kinetika.....	40
3.4	Metode Estimasi Parameter Kinetika.....	41
3.5	Analisis Sensitivitas.....	42
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
4.1	Model Kinetika Berbasis Mekanisme Michaelis – Menten.....	44
4.1.1	<i>Fitting</i> Kurva Dan Estimasi Parameter.....	44
4.1.2	Analisis Sensitivitas.....	58
4.2	Model Kinetika Berbasis Mekanisme Michaelis – Menten Adsorpsi.....	60
4.2.1	<i>Fitting</i> Kurva Dan Estimasi Parameter.....	60
4.2.2	Analisis Sensitivitas.....	68
BAB 5.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	71
5.1	Kesimpulan.....	71
5.2	Saran.....	72
	DAFTAR ACUAN.....	73
	DAFTAR PUSTAKA.....	77
	LAMPIRAN.....	81



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b>	Rumus Kimia Biodiesel 6
<b>Gambar 2.2</b>	Reaksi Transesterifikasi Triglicerida Dengan Alkohol <sup>[22]</sup> 8
<b>Gambar 2.3</b>	Tahapan Reaksi Transesterifikasi <sup>[22]</sup> 8
<b>Gambar 2.4</b>	Reaksi Interesterifikasi Minyak Nabati Melalui Rute Non Alkohol <sup>[4]</sup> 10
<b>Gambar 2.5</b>	Tahapan Reaksi Interesterifikasi Melalui Rute Non Alkohol <sup>[5]</sup> 11
<b>Gambar 2.6</b>	Struktur Lipase <sup>[25]</sup> 12
<b>Gambar 2.7</b>	<i>Pseudomonas Sp.</i> <sup>[26]</sup> 13
<b>Gambar 2.8</b>	<i>Aspergillus Niger</i> <sup>[26]</sup> 13
<b>Gambar 2.9</b>	<i>G. Candidum</i> <sup>[26]</sup> 13
<b>Gambar 2.10</b>	Metode Adsorpsi <sup>[26]</sup> 16
<b>Gambar 2.11</b>	Metode <i>Entrapment</i> <sup>[26]</sup> 16
<b>Gambar 2.12</b>	Metode <i>Cross Linking</i> <sup>[26]</sup> 17
<b>Gambar 2.13</b>	Metode <i>Covalent Binding</i> <sup>[26]</sup> 17
<b>Gambar 2.14</b>	Pemetaan Model Kinetik untuk Sintesis Biodiesel 18
<b>Gambar 2.15</b>	Mekanisme Reaksi Bertingkat Irreversibel dengan Tiga Tahapan 18
<b>Gambar 2.16</b>	Mekanisme Reaksi Bertingkat Reversibel dengan Tiga Tahapan 19
<b>Gambar 2.17</b>	Mekanisme Reaksi Enzimatik Berbasis Michaelis – Menten 22
<b>Gambar 2.18</b>	Mekanisme Reaksi Enzimatik yang Melibatkan Dua Substrat 23
<b>Gambar 2.19</b>	Mekanisme Reaksi Enzimatik Kompleks Terner Acak 23
<b>Gambar 2.20</b>	Mekanisme Reaksi Enzimatik Kompleks Terner Teratur 24
<b>Gambar 2.21</b>	Mekanisme Ping Pong 25
<b>Gambar 2.22</b>	Mekanisme Ping Pong Bi Bi 25
<b>Gambar 2.23</b>	Esterifikasi Triglicerida Berkatalis Lipase dengan Inhibisi Kompetitif Alkohol 26

<b>Gambar 2.24</b>	Mekanisme Reaksi Enzimatik Berbasis Ping Pong Bi Bi untuk Pembentukan (A) Trigliserida, (B) Digliserida, (C) Monogliserida.	27
<b>Gambar 2.25</b>	Skema Konseptual untuk Mekanisme I	28
<b>Gambar 2.26</b>	Skema Konseptual untuk Mekanisme II	28
<b>Gambar 2.27</b>	Skema Konseptual untuk Mekanisme III	29
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir Penelitian	32
<b>Gambar 3.2</b>	Reaksi Enzimatik Berbasis Michaelis – Menten	34
<b>Gambar 3.3</b>	Reaksi Enzimatik Berbasis Michaelis – Menten Adsorpsi	37
<b>Gambar 3.4</b>	Flowchart Prosedur Perhitungan Konstanta Pemodelan	42
<b>Gambar 4.1</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 1 <sup>[27]</sup> .	45
<b>Gambar 4.2</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 2 <sup>[27]</sup> .	47
<b>Gambar 4.3</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 3 <sup>[27]</sup> .	48
<b>Gambar 4.4</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 4 <sup>[10]</sup> .	49
<b>Gambar 4.5</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 5 <sup>[10]</sup> .	51
<b>Gambar 4.6</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 6 <sup>[11]</sup> .	52
<b>Gambar 4.7</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 7 <sup>[11]</sup> .	53
<b>Gambar 4.8</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 8 <sup>[5]</sup> .	55
<b>Gambar 4.9</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis–Menten Adsorpsi terhadap Data 2 <sup>[27]</sup> .	61
<b>Gambar 4.10</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis–Menten Adsorpsi terhadap Data 3 <sup>[27]</sup> .	62
<b>Gambar 4.11</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis–Menten Adsorpsi terhadap Data 5 <sup>[10]</sup> .	63
<b>Gambar 4.12</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis–Menten Adsorpsi terhadap Data 7 <sup>[11]</sup> .	64
<b>Gambar 4.13</b>	Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis–Menten Adsorpsi terhadap Data 8 <sup>[5]</sup> .	65

## DAFTAR TABEL

		Halaman
<b>Tabel 2.1</b>	Kandungan Asam Lemak Terikat pada Trigliserida Minyak Sawit <sup>[19]</sup>	7
<b>Tabel 2.2</b>	Perbandingan Kelebihan dan Kekurangan antara Rute Non Alkohol dengan Rute Alkohol <sup>[3]</sup>	11
<b>Tabel 2.3</b>	Perbandingan Efek Berbagai Lipase dalam Reaksi Esterifikasi <sup>[44]</sup>	13
<b>Tabel 2.4</b>	Perbandingan antara Metode Katalis Basa dengan Biokatalis untuk Produksi Biodiesel <sup>[22]</sup>	14
<b>Tabel 2.5</b>	Perbandingan Berbagai Metode Immobilisasi Lipase <sup>[25]</sup>	17
<b>Tabel 2.6</b>	Pemodelan Sintesis Biodiesel yang Pernah Dilakukan	31
<b>Tabel 4.1</b>	Pemetaan Data Kinetika Berdasarkan Bentuk Enzim (Lipase)	44
<b>Tabel 4.2</b>	Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis <i>Candida rugosa</i> Lipase dalam Bentuk Tersuspensi Menggunakan Substrat Minyak Sawit <sup>[27]</sup> .	45
<b>Tabel 4.3</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 1 <sup>[27]</sup> .	46
<b>Tabel 4.4</b>	Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis <i>Candida rugosa</i> Lipase Terimmobilisasi Metode Adsorpsi Menggunakan Substrat Minyak Sawit <sup>[27]</sup> .	46
<b>Tabel 4.5</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 2 <sup>[27]</sup> .	47
<b>Tabel 4.6</b>	Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis <i>Candida antartica</i> Lipase (Novozym 435) Terimmobilisasi pada <i>Acrylic Resin</i> dalam Bentuk Sol-Gel Menggunakan Substrat Minyak Jelantah <sup>[27]</sup> .	48
<b>Tabel 4.7</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 3 <sup>[27]</sup> .	48
<b>Tabel 4.8</b>	Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis <i>Candida rugosa</i> Lipase dalam Bentuk Tersuspensi Menggunakan Substrat Minyak Jelantah <sup>[10]</sup> .	49
<b>Tabel 4.9</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 4 <sup>[10]</sup> .	50

<b>Tabel 4.10</b>	Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis <i>Candida rugosa</i> Lipase Terimmobilisasi Metode Adsorpsi Menggunakan Substrat Minyak Jelantah <sup>[10]</sup> .	50
<b>Tabel 4.11</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 5 <sup>[10]</sup> .	51
<b>Tabel 4.12</b>	Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis <i>Porcine pancreatic</i> Lipase dalam Bentuk Tersuspensi Menggunakan Substrat Minyak Jelantah <sup>[11]</sup> .	52
<b>Tabel 4.13</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 6 <sup>[11]</sup> .	52
<b>Tabel 4.14</b>	Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis <i>Porcine pancreatic</i> Lipase Terimmobilisasi Metode Adsorpsi Menggunakan Substrat Minyak Jelantah <sup>[11]</sup> .	53
<b>Tabel 4.15</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 7 <sup>[11]</sup> .	54
<b>Tabel 4.16</b>	Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis <i>Candida antartica</i> Lipase (Novozym 435) Menggunakan Substrat Minyak Kedelai <sup>[5]</sup> .	54
<b>Tabel 4.17</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 7 <sup>[11]</sup> .	55
<b>Tabel 4.18</b>	Analisis sensitivitas konstanta laju reaksi menggunakan pemodelan Michealis – Menten	58
<b>Tabel 4.19</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 2 <sup>[27]</sup> .	61
<b>Tabel 4.20</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 3 <sup>[27]</sup> .	62
<b>Tabel 4.21</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 5 <sup>[10]</sup> .	63
<b>Tabel 4.22</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 7 <sup>[11]</sup> .	64
<b>Tabel 4.23</b>	Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 8 <sup>[5]</sup> .	65
<b>Tabel 4.24</b>	Analisis Sensitivitas Konstanta Laju Reaksi Menggunakan Pemodelan Michealis – Menten Adsorpsi	69

## DAFTAR LAMPIRAN

		Halaman
<b>Lampiran 1</b>	Hasil <i>Fitting</i> Menggunakan Model Michaelis – Menten	81
<b>Lampiran 2</b>	Hasil <i>Fitting</i> Menggunakan Model Michaelis – Menten Adsorpsi	113





# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Penggunaan sumber daya alam minyak dan gas (migas), sejak dahulu tidak dapat dipisahkan dari kehidupan manusia, karena perannya sangat signifikan sebagai bahan bakar dalam industri maupun rumah tangga. Tetapi kebutuhan akan bahan bakar yang tinggi akibat pertambahan jumlah penduduk dan kemajuan ekonomi yang pesat di beberapa negara tidak diimbangi dengan persediaan sumber daya alam migas tersebut. Oleh karena itu, pencarian terhadap energi alternatif selain migas merupakan suatu isu besar dalam kaitannya dengan politik dan menjadi salah satu permasalahan lingkungan global di dunia internasional.

Mengingat Indonesia memiliki beragam sumber energi alternatif terbarukan, maka Indonesia memiliki peluang yang besar dalam hal eksploitasi sumber daya alam yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif. Salah satu sumber energi alternatif yang terbarukan adalah *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) atau yang biasa disebut dengan biodiesel. Biodiesel merupakan substitusi yang unggul untuk menggantikan kebutuhan bahan bakar minyak nasional. Biodiesel dapat dihasilkan dari minyak nabati, seperti kelapa sawit, jarak pagar, kacang tanah, kelapa, kacang kedelai, biji bunga matahari dan lain sebagainya. Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) merupakan salah satu sumber minyak nabati yang prospektif dikembangkan sebagai bahan baku biodiesel, mengingat Indonesia merupakan salah satu penghasil minyak sawit dan kelapa terbesar di dunia<sup>[1]</sup>, dimana produksinya di Indonesia meningkat tiap tahunnya<sup>[2]</sup>.

Pengolahan biodiesel pada umumnya melalui reaksi transesterifikasi menggunakan katalis asam atau basa (alkali), dimana penggunaan katalis tersebut dapat menyebabkan terbentuknya reaksi penyabunan, yang merupakan reaksi samping yang tidak dikehendaki karena dapat membuat konversi minyak menjadi biodiesel menjadi lebih kecil. Reaksi samping yang tidak diinginkan ini juga pada akhirnya membebani proses pemurnian produk dan menurunkan *yield* biodiesel yang pada akhirnya mengakibatkan biaya produksi yang tinggi.

Untuk mengatasi masalah di atas, maka dapat digunakan enzim lipase sebagai biokatalis. Enzim lipase dapat memperbaiki kelemahan katalis alkali, yaitu tidak bercampur homogen, sehingga pemisahannya mudah dan mampu mengarahkan reaksi secara spesifik tanpa adanya reaksi samping yang tak diinginkan. Namun, biokatalis mudah terdeaktivasi oleh alkohol yang merupakan reaktan dalam reaksi sintesis biodiesel. Oleh karena itu, untuk mempertahankan aktivitas dan stabilitas biokatalis selama reaksi berlangsung, maka dikembangkan suatu metode dengan mengubah rute reaksi dari menggunakan alkohol ke rute reaksi yang tidak menggunakan alkohol. Rute reaksi non alkohol bisa dilakukan dengan cara mengganti alkohol dengan alkil asetat yang sama-sama berfungsi sebagai pensuplai gugus alkil<sup>[5]</sup>. Proses ini dirasakan menguntungkan karena selain deaktivasi enzim oleh lingkungan beralkohol tidak terjadi, produk samping yang dihasilkan berupa triasetilgliserol juga memiliki nilai ekonomis yang lebih tinggi daripada gliserol pada rute konvensional.

Sedangkan, untuk memperbaiki beberapa kekurangan penggunaan enzim, seperti: harga enzim yang mahal, ketidak-stabilan enzim, ketersediaan enzim yang sangat sedikit, dan mahalnya biaya *recovery* enzim, maka dapat dilakukan immobilisasi enzim dengan menggabungkan enzim dengan suatu matrik padat (*support*) secara fisik, sehingga enzim dapat digunakan secara berulang kali dan secara kontinu<sup>[29]</sup>.

Mengingat bahwa sintesis biodiesel rute non alkohol dengan menggunakan biokatalis dinilai sangat menjanjikan, maka penelitian terhadap model kinetika reaksi pada sintesis biodiesel melalui reaksi enzimatik dirasakan penting untuk mengetahui perilaku setiap komponen dalam sintesis biodiesel secara enzimatik serta dapat memberikan informasi yang tidak dapat diberikan oleh penelitian secara eksperimental.

Beberapa penelitian mengenai kinetika reaksi sintesis biodiesel telah dilakukan didunia, dan pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk memperoleh suatu model mekanisme reaksi enzimatik yang dapat menggambarkan perilaku sintesis biodiesel tersebut, agar dapat diperoleh produksi biodiesel yang efisien dan layak secara teknis maupun ekonomis untuk dapat diterapkan dalam skala komersial.

Penelitian ini mengembangkan suatu pemodelan kinetika berbasis Michaelis – Menten, dimana melalui pemodelan tersebut, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang baik mengenai pengaruh dari konsentrasi mula-mula enzim dan trigliserida yang digunakan, terhadap konsentrasi biodiesel yang dihasilkan pada suatu kondisi tertentu selama sintesis berlangsung. Mekanisme reaksi sintesis biodiesel secara enzimatik pun belum banyak di investigasi. Oleh karena itu, diharapkan pula penelitian mengenai sintesis biodiesel menggunakan biokatalis ini dapat memberikan kontribusi yang cukup besar bagi pengembangan riset mengenai sintesis biodiesel.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan menjadi, antara lain:

1. Bagaimanakah mekanisme model kinetika reaksi enzimatik dalam sintesis biodiesel berbasis Michaelis -Menten?
2. Bagaimanakah metode estimasi parameter kinetika serta analisis sensitivitas parameter hasil estimasi dalam suatu pemodelan?
3. Apakah hasil *fitting* yang diperoleh melalui pemodelan terhadap data eksperimen dapat memberikan hasil yang baik?
4. Apakah profil konsentrasi reaktan dan produk (biodiesel) yang dihasilkan berdasarkan simulasi dapat menggambarkan dengan baik kondisi sintesis biodiesel secara enzimatik?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan judul skripsi yang dikerjakan oleh penulis, tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini antara lain untuk:

1. Mengetahui mekanisme model kinetika reaksi enzimatik dalam sintesis biodiesel berbasis Michaelis-Menten.
2. Mempelajari metode estimasi parameter kinetika serta analisis sensitivitas parameter hasil estimasi dalam suatu pemodelan.
3. Memperoleh hasil *fitting* yang baik antara pemodelan dengan data hasil eksperimen.

4. Mendapatkan profil konsentrasi reaktan dan produk (biodiesel) hasil simulasi yang dapat menggambarkan dengan baik kondisi sintesis biodiesel secara enzimatik.

#### 1.4 Batasan Masalah

Aspek yang dibahas berdasarkan tujuan dari penelitian ini, yaitu dibatasi pada permasalahan sebagai berikut:

1. Simulasi sintesis biodiesel secara enzimatik dilakukan dengan menggunakan model kinetika berbasis Michaelis – Menten.
2. Data – data yang digunakan merupakan data hasil penelitian sintesis biodiesel secara enzimatik yang diperoleh melalui skripsi yang berasal dari Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia maupun jurnal – jurnal ilmiah (nasional maupun internasional).
3. Data – data yang diolah melalui proses simulasi dalam penelitian ini merupakan data sintesis biodiesel rute non alkohol yang menggunakan biokatalis berupa enzim lipase, dan substrat yang berasal dari minyak nabati.
4. Parameter – parameter kinetika ditentukan dengan *fitting* menggunakan metode Runge-Kutta, dimana hasil *fitting* terbaik dari nilai konstanta ditentukan menggunakan metode Simplex.

#### 1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi yang berjudul “Model Kinetika Berbasis Michaelis-Menten untuk Reaksi Enzimatik Sintesis Biodiesel” ini pembahasannya akan dibagi menjadi lima bab. Hal tersebut dimaksudkan agar dapat lebih mudah memahami hasil penelitian ini secara lebih sistematis. Kelima bab yang telah tersebut diatas dapat dirinci sebagai berikut:

##### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

##### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi tentang prinsip dasar ilmu yang berkaitan dengan penelitian, dimana akan dibahas mengenai sintesis biodiesel secara enzimatik yang meliputi

rute dan jenis katalis yang digunakan, model kinetika reaksi untuk sintesis biodiesel, serta *state of the art* dari penelitian yang dilakukan.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini memberi gambaran tentang diagram alir penelitian, prosedur dan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian, seperti penurunan model kinetika reaksi yang digunakan, metode estimasi parameter kinetika, analisis sensitivitas, serta simulasi berdasarkan data hasil penelitian.

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menjelaskan mengenai hasil yang diperoleh berdasarkan simulasi menggunakan data-data hasil penelitian, antara lain mengenai estimasi parameter model kinetika, analisis sensitivitas, serta profil konsentrasi dari reaktan yaitu trigliserida dan produk yang dihasilkan yaitu biodiesel.

### **BAB V KESIMPULAN**

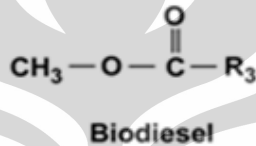
Bab ini berisi tentang inti dari tujuan dilakukannya penelitian, yang meliputi data - data hasil simulasi dan kesimpulan - kesimpulan yang diambil berdasarkan hasil pengamatan dari data-data tersebut.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sintesis Biodiesel Secara Enzimatik

Biodiesel, secara kimia didefinisikan sebagai *mono alkyl ester* dari asam lemak rantai panjang yang diturunkan dari sumber lipida yang dapat diperbaharui. Biodiesel dapat disintesis dari lemak hewani maupun minyak nabati melalui proses transesterifikasi. Beberapa minyak nabati yang dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel yaitu minyak kelapa sawit, minyak kedelai (*soybean*), minyak *rapesad* (*canola*), dan minyak bunga matahari (*sunflower*)<sup>[14]</sup>.



**Gambar 2.1** Rumus Kimia Biodiesel

Kelapa sawit merupakan bahan baku pembuat biodiesel yang paling umum digunakan. Hal tersebut karena kelapa sawit merupakan tumbuhan sepanjang tahun yang dapat menghasilkan minyak paling tinggi. Senyawa trigliserida pada minyak sawit mengandung hidrokarbon, seperti halnya minyak bumi. Sehingga apabila dianalogikan dengan proses pengilangan minyak bumi, maka minyak sawit dapat pula menghasilkan produk-produk turunan yang dapat dihasilkan dari pengolahan minyak bumi, diantaranya adalah solar (diesel), *gasoline*, *kerosine*, dan termasuk pelumas<sup>[19]</sup>.

Minyak sering disebut juga dengan trigliserida yang merupakan ester dari gliserol dan asam-asam karboksilat suku tinggi yang berasal dari tumbuhan. Sedangkan istilah lemak biasanya berwujud padat dan berasal dari hewan. Asam-asam karboksilat dari minyak disebut sebagai asam lemak. Asam lemak pada monoalkil ester dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam mesin diesel. Karena asam lemak tersusun oleh gugus karboksil yang bersifat polar, dan rantai hidrokarbon yang panjang, hal tersebut menyebabkan trigliserida tidak dapat larut dalam air.

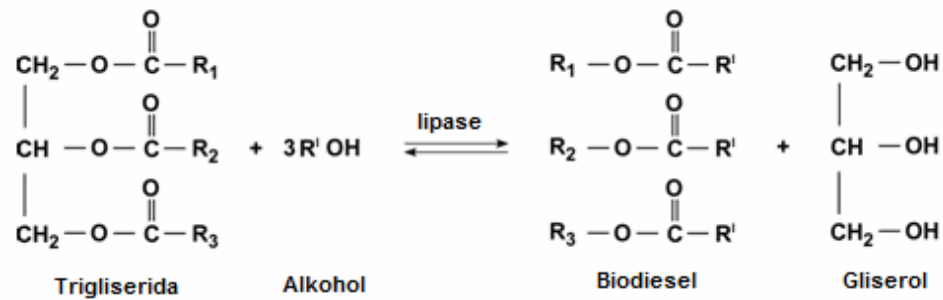
**Tabel 2.1** Kandungan Asam Lemak Terikat pada Trigliserida Minyak Sawit<sup>[19]</sup>

Asam Lemak	Struktur
Asam Laurat (12:0)	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COH} \end{array}$
Asam Palmitat (16:0)	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COH} \end{array}$
Asam Stearat (18:0)	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COH} \end{array}$
Asam Oleat (18:1)	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COH} \end{array}$
Asam Linoleat (18:2)	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3(\text{CH}_2)_4(\text{CH}=\text{CH}\text{CH}_2)_2(\text{CH}_2)_6\text{COH} \end{array}$
Asam Linolenat (18:3)	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3\text{CH}_2(\text{CH}=\text{CH}\text{CH}_2)_2(\text{CH}_2)_6\text{COH} \end{array}$
Asam Eruseat (22:1)	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_{11}\text{COH} \end{array}$
Asam Risinoleat (19:2)	$\begin{array}{c} \text{OH} \qquad \qquad \qquad \text{O} \\ \parallel \qquad \qquad \qquad \parallel \\ \text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COH} \end{array}$

### 2.1.1 Rute Alkohol

Transesterifikasi (alkoholisis) merupakan reaksi antara lemak atau minyak nabati dengan alkohol untuk membentuk ester dan gliserol. Reaksi transesterifikasi banyak digunakan untuk mengurangi viskositas dari trigliserida agar dapat digunakan pada biodiesel. Karena semua jenis minyak nabati kandungan utamanya adalah trigliserida, maka lebih dari 95% minyak kelapa sawit terdiri dari campuran trigliserida, yaitu molekul gliserol, masing-masing diesterifikasi dengan tiga asam lemak<sup>[18]</sup>.

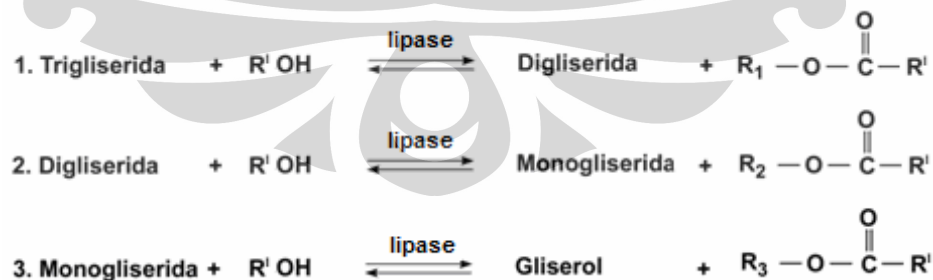
Biasanya dalam reaksi ini digunakan katalis untuk meningkatkan laju reaksi dan jumlah *yield* produk. Karena reaksi ini adalah reaksi reversible, maka digunakan alkohol berlebih untuk menggeser kesetimbangan ke arah produk<sup>[20]</sup>. Reaksi transesterifikasi trigliserida menjadi metil ester dapat dilihat seperti pada **Gambar 2.2**.



**Gambar 2.2** Reaksi Transesterifikasi Trigliserida dengan Alkohol <sup>[22]</sup>

R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> dan R<sub>3</sub> merupakan hidrokarbon panjang yang sering disebut dengan asam lemak, dimana asam lemak tersebut tergantung dari tipe minyak nabati. Rantainya bisa sama antar ketiganya atau berlainan. Alkohol yang digunakan juga dapat berbeda, jika methanol yang digunakan maka akan menghasilkan asam lemak metil ester, tetapi jika etanol yang digunakan menjadi asam lemak etil ester. Metanol merupakan jenis alkohol yang paling sering digunakan dalam proses produksi biodiesel karena harganya yang lebih ekonomis dan memiliki kelebihan secara fisika (merupakan alkohol rantai terpendek) serta kimia (bersifat polar) dan dapat secara cepat bereaksi dengan trigliserida.

Reaksi transesterifikasi sebenarnya terdiri atas beberapa reaksi berurutan yang bersifat reversibel. Trigliserida sebagai penyusun utama minyak nabati akan terkonversi secara bertahap menjadi digliserida, monogliserida, untuk kemudian akhirnya menjadi gliserol. Pada setiap tahapan ini akan dihasilkan satu mol senyawa ester. Meski reaksi bersifat reversibel, tetapi kesetimbangan alami bergerak ke arah pembentukan senyawa ester asam lemak dan gliserol.



**Gambar 2.3** Tahapan Reaksi Transesterifikasi <sup>[22]</sup>

Agar suatu reaksi transesterifikasi dapat bereaksi sempurna, secara stoikiometri dibutuhkan alkohol dan trigliserida dengan rasio molar 3:1. Tetapi



pada praktiknya, rasio yang dibutuhkan jauh lebih tinggi untuk mendorong terbentuknya ester secara maksimum [22].

Reaksi transesterifikasi dipengaruhi oleh beberapa aspek, antara lain jenis katalis, jumlah katalis, temperatur, kecepatan pengadukan (agitasi), waktu transesterifikasi, dan rasio mol reaktan. Ada beberapa pilihan katalis reaksi yang dapat digunakan dalam proses transesterifikasi ini, antara lain berupa alkali, katalis asam, atau enzim. Katalis alkali yang biasa digunakan antara lain NaOH, KOH, karbonat, sodium metoksida, sodium etoksida, sodium propoksida, dan sodium butoksida. Katalis asam yang biasa digunakan antara lain asam sulfat, asam sulfonat, dan asam hidroklorida. Sedangkan sebagai katalis enzim dalam proses transesterifikasi biasa digunakan lipase [22].

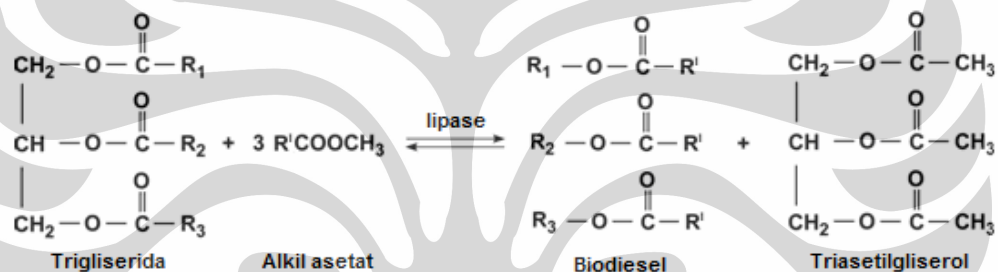
### 2.1.2 Rute Non Alkohol

Biodiesel secara konvensional diproduksi melalui reaksi transesterifikasi gliserida dengan alkohol dan menggunakan katalis asam atau alkali. Tetapi penggunaan katalis asam atau basa pada reaksi sintesis biodiesel ini dapat membentuk reaksi penyabunan yang merupakan reaksi samping yang tidak dikehendaki. Dengan adanya reaksi samping inilah konversi minyak menjadi ester (biodiesel) menjadi kecil dan pada akhirnya membebani proses pemurnian produk, sehingga menurunkan *yield* biodiesel yang pada akhirnya mengakibatkan biaya produksi yang tinggi. Untuk mengatasi masalah di atas, maka dapat digunakan enzim lipase sebagai biokatalis. Penggunaan enzim lipase sebagai biokatalis untuk sintesis biodiesel sangat menjanjikan karena mampu memperbaiki kelemahan katalis alkali, yaitu tidak bercampur homogen, sehingga pemisahannya mudah dan mampu mengarahkan reaksi secara spesifik tanpa reaksi samping yang tidak diinginkan.

Selain kelebihan, penggunaan lipase sebagai katalis menyisakan masalah yang cukup besar. Lingkungan beralkohol menyebabkan lipase terdeaktivasi secara cepat dan stabilitasnya dalam mengkatalisis reaksi menjadi buruk. Untuk menyelesaikan masalah tersebut, maka dilakukan sintesis biodiesel menggunakan rute non alkohol.

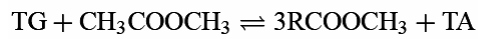
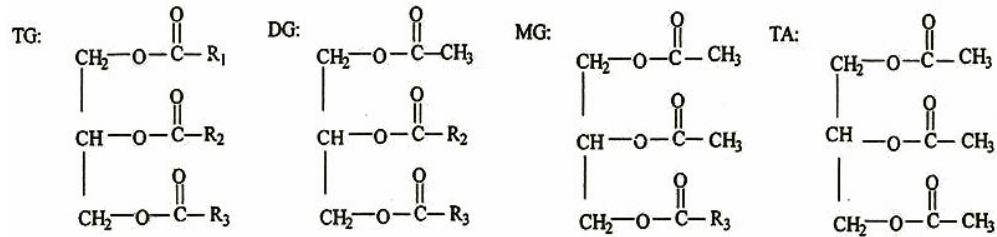
Pada sintesis biodiesel dengan rute non alkohol, metanol digantikan dengan metil asetat sebagai pensuplai gugus metil. Penggantian alkohol dengan alkil asetat ini diharapkan mampu mencegah deaktivasi dan meningkatkan stabilitas enzim lipase selama proses reaksi. Disamping itu, produk samping rute non alkohol ini yaitu *triasetilgliserol* mempunyai nilai jual yang lebih tinggi dibanding produk samping rute alkohol, yaitu gliserol<sup>[3]</sup>.

Sedangkan, untuk memperbaiki beberapa kekurangan penggunaan enzim, seperti: harga enzim yang mahal, ketidak-stabilan enzim, ketersediaan enzim yang sangat sedikit, dan mahalnya biaya untuk *recovery* enzim, maka dapat dilakukan immobilisasi enzim dengan menggabungkan suatu enzim dengan suatu matrik padat (*support*) secara fisik, sehingga enzim dapat digunakan secara berulang kali dan secara kontinyu.

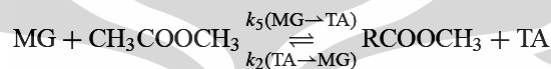
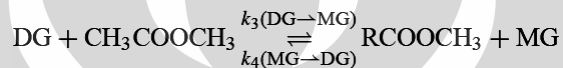
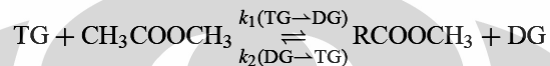


**Gambar 2.4** Reaksi Interesterifikasi Minyak Nabati Melalui Rute Non Alkohol<sup>[4]</sup>

Pada sintesis biodiesel menggunakan rute non alkohol, trigliserida (TG) mengalami reaksi interesterifikasi menjadi digliserida (DG), monogliserida (MG) dan triacylglycerol (TA), dimana pada disetiap tahap tersebut menghasilkan biodiesel (B)<sup>[5]</sup>, dan produk samping berupa *triasetilgliserol* (TAG).



Stepwise reactions:



**Gambar 2.5** Tahapan Reaksi Interesterifikasi Melalui Rute Non Alkohol <sup>[5]</sup>

Berikut ini merupakan beberapa kelebihan dan kekurangan dari masing – masing rute baik rute alkohol, maupun rute non alkohol:

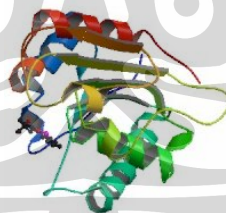
**Tabel 2.2** Perbandingan Kelebihan dan Kekurangan antara Rute Non Alkohol dengan Rute Alkohol <sup>[3]</sup>

No	Parameter	Perbandingan	
		Rute Non-Alkohol	Rute Alkohol
1	Hasil samping	produk samping yang dihasilkan yakni triasetilgliserol yang mempunyai nilai jual yang lebih tinggi	produk samping yang dihasilkan yakni gliserol yang nilai jualnya lebih rendah dibandingkan dengan triasetilgliserol
2	Mekanisme reaksi	lebih rumit dibandingkan dengan rute alkohol karena ada kaitannya dengan tiga reaksi dari trigliserida menjadi produk	lebih sederhana dibandingkan dengan rute non alkohol
3	Penggunaan biokatalis	tidak mudah terdeaktivasi dan stabilitasnya selama proses reaksi signifikan	mudah terdeaktivasi secara cepat dan stabilitasnya dalam mengkatalis reaksi menjadi buruk

## 2.2 Biokatalis

Biokatalitik merupakan metoda yang tidak asing dalam proses sintesis kimia organik dalam tataran industri. Biokatalis yang berupa enzim, sel mikroba (hidup atau mati), yang terikat dalam matriks atau bebas, secara konvensional telah digunakan untuk mengkonversi bahan baku yang berasal dari bahan organik atau bahan baku yang terbarukan. Namun, pemanfaatannya terus meluas, sehingga digunakan juga untuk mengolah material yang berasal dari bahan bakar fosil. Pemanfaatannya juga begitu beragam, dari biotransformasi senyawa khiral secara enzimatik untuk produksi obat sampai sintesis biodiesel<sup>[30]</sup>. Secara umum, enzim digunakan sebagai biokatalis dalam beragam reaksi, seperti hidrolisis, transesterifikasi, dan lain-lain. Sehingga, tidaklah mengherankan, bila biokatalis dianggap sebagai komponen penting dan bagian yang tak terpisahkan dari industri<sup>[19]</sup>.

Lipase merupakan enzim yang biasa digunakan dalam mengkatalisis hidrolisis lemak dan minyak menjadi diasilgliserol, monoasilgliserol, asam lemak bebas, dan gliserol<sup>[23]</sup>. Nama lain dari lipase adalah asilgliserol hidrolase, triasilgliserol hidrolase atau gliserol ester hidrolase. Lipase yang berasal dari mikroba merupakan enzim yang disekresikan oleh mikroba ke dalam medium pertumbuhannya untuk mencerna lemak atau minyak.



**Gambar 2.6** Struktur Lipase<sup>[25]</sup>

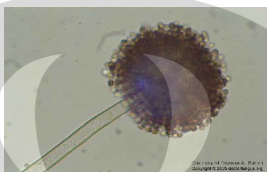
Lipase yang diisolasi dari mikroba dapat digolongkan menjadi tiga kelompok<sup>[23]</sup>. Kelompok tersebut antara lain:

1. Lipase yang menghidrolisis triasilgliserol (TAG) secara acak terhadap posisi asam lemak pada triasilgliserol menjadi asam lemak. Kelompok mikroba tersebut antara lain *Candida sp.* dan *Pseudomonas sp.* Enzim dapat menghidrolisis ikatan ester secara sempurna, menghasilkan asam lemak bebas dan gliserol.



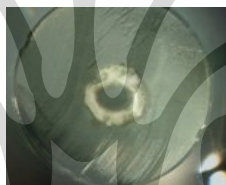
**Gambar 2.7** *Pseudomonas* sp.<sup>[26]</sup>

2. Lipase yang menghidrolisis spesifik pada posisi 1 dan 3 dari triasilgliserol. Contoh mikroba penghasil tersebut adalah *A. niger* dan *M. miehei* produk yang dihasilkan berupa asam lemak bebas, 1,2-diasilgliserol, dan 2monoasilgliserol.



**Gambar 2.8** *Aspergillus niger*<sup>[26]</sup>

3. Lipase yang menghidrolisis secara spesifik asam lemak tertentu dari trasilgliserol. Contoh mikroba penghasil lipase tersebut adalah *G.candidum* yang mempunyai spesifitas terhadap asam lemak rantai panjang.



**Gambar 2.9** *G. candidum*<sup>[26]</sup>

**Tabel 2.3** Perbandingan Efek Berbagai Lipase dalam Reaksi Esterifikasi<sup>[44]</sup>

<b>Lipase</b>	<b>% Yield</b>
Porcine pancreas (non-immobilized)	22.45
Porcine pancreas (immobilized)	13.79
Lipolase 100T (immobilized)	42.17
<i>Rhizopus arrhizus</i> lipase (non-immobilized)	66.39
<i>Rhizopus arrhizus</i> lipase (immobilized)	26.31
<i>Rhizopus usamii</i> lipase (non-immobilized)	61.18
<i>Rhizopus usamii</i> lipase (immobilized)	20.60
<i>Candida cylindracea</i> (non-immobilized)	19.72
<i>Candida cylindracea</i> (immobilized)	17.20
<i>Candida</i> sp. 99-125 lipase (non-immobilized)	80.50
<i>Candida</i> sp. 99-125 lipase (immobilized)	81.51

Sebagai enzim, lipase memiliki aktivitas yang merupakan ukuran besarnya kemampuan enzim dalam mempercepat reaksi penguraian sumber karbon<sup>[23]</sup>. Aktivitas enzim dinyatakan dalam unit per mL menit di mana 1 unit aktivitas enzim didefinisikan sebagai jumlah yang menyebabkan perubahan 1  $\mu\text{mol}$  sumber karbon atau 1  $\mu\text{mol}$  produk yang dihasilkan per menit pada kondisi tertentu. Jadi, satu unit aktivitas enzim lipase didefinisikan sebagai jumlah enzim yang dibutuhkan untuk menghidrolisis 1  $\mu\text{mol}$  ikatan per menit pada kondisi pengujian tertentu<sup>[23]</sup>. Aktivitas dari enzim lipase dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain: pH (derajat keasaman), suhu, aktivator, inhibitor, konsentrasi enzim, konsentrasi substrat.

Lipase mempunyai beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan katalis lain, karena mempunyai spesifikasi dan stereoselektivitas reaksi yang relatif tinggi, sangat stabil pada pelarut organik dan menunjukkan substrat ketegasan yang luas. Lipase juga mempunyai sifat lebih ramah lingkungan bila dibandingkan dengan katalis lainnya, terutama katalis logam toksik, sehingga lipase mempunyai peranan penting dalam mewujudkan proses dan produk industri yang ramah lingkungan.

Enzim lipase sebagai katalis untuk produksi biodiesel sangat menjanjikan karena mampu memperbaiki kelemahannya katalis alkali<sup>[23]</sup>, yang antara lain:

1. berbeda fasa dengan reaktan atau produk baik dalam bentuk free atau terimobilisasi sehingga dapat dipisahkan dari sistem dengan mudah,
2. mampu mengarahkan reaksi secara spesifik tanpa ada nya reaksi samping yang tak diinginkan seperti reaksi penyabunan.

**Tabel 2.4** Perbandingan antara Metode Katalis Basa dengan Biokatalis untuk Produksi Biodiesel<sup>[22]</sup>

	<b>Proses alkali</b>	<b>Proses biokatalis</b>
Suhu reaksi	60 – 70 °C	30 – 40 °C
Yield biodiesel	Normal	Lebih tinggi
Pemisahan biodiesel dari katalis	Pencucian berulang (sulit)	Filtrasi (mudah)
Produk samping yang tak diinginkan	Asam lemak bebas, sabun	Tidak ada

Walaupun enzim lipase sangat menjanjikan untuk digunakan sebagai biokatalis dalam sintesis biodiesel, tetapi penggunaannya memiliki beberapa kelemahan seperti harga enzim yang sangat mahal, ketidakstabilan enzim, ketersediaan enzim yang sangat sedikit, dan mahal biaya untuk *recovery* enzim yang digunakan pada reaksi dalam media cair karena sifat enzim yang larut dalam media cair.

Untuk mengatasi masalah tersebut, maka dapat dilakukan immobilisasi enzim dengan menggabungkan enzim dengan suatu matrik padat (*support*) secara fisik, sehingga enzim dapat digunakan secara berulang kali dan secara kontinu<sup>[29]</sup>. Teknik ini dikembangkan untuk memperbaiki beberapa kekurangan penggunaan enzim. Kelebihan enzim yang ter-immobilisasi dari pada enzim yang terlarut yaitu: sejumlah mikro protein yang terlarut akan lebih cepat bereaksi, hasil akhir reaksi hanya pelarut dan produk itu sendiri, produk lebih mudah dipisahkan, katalis dapat digunakan secara berulang sehingga dapat menghemat pembuatan biokatalis yang mahal, dan enzim yang ter-immobilisasi mempunyai kestabilan yang lebih baik dibandingkan dengan katalis yang terlarut.

Bahan *support* untuk biokatalis merupakan bahan tambahan yang digunakan untuk mengikat enzim agar enzim tidak larut didalam air, yang biasanya berupa polimer. Bahan *support* untuk enzim ini sangat mempengaruhi sekali efek dari kestabilan dan keefektifan penggunaan enzim. Bahan *support* yang biasa digunakan untuk sintesis biodiesel ialah zeolit karena harganya murah, mudah di dapat, serta zeolit memiliki struktur berongga dan biasanya rongga ini berisi air dan kation-kation yang dapat dipertukarkan dan memiliki ukuran pori tertentu. Oleh karena itu zeolit dapat dimanfaatkan sebagai penyaring molekuler, penukar ion, dan katalisator.

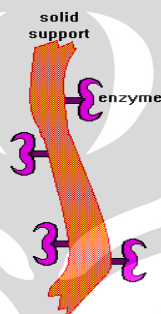
Metoda yang digunakan dalam immobilisasi enzim pada umumnya dapat dilakukan dengan 4 cara<sup>[26]</sup>, yaitu :

1. Adsorpsi

Adsorpsi didasari pada kontak antara enzim dengan permukaan support. Bergantung dengan sifat alami permukaan tersebut, ikatan enzim boleh jadi merupakan hasil dari interaksi ionik, adsorpsi fisik, ikatan hidrofobik atau gaya *van der waals* (atau kontaminasi dari semuanya). Prosedurnya didasarkan pada

pencampuran enzim dengan material support pada kondisi yang tepat, diikuti dengan interaksi hingga periode tertentu, diakhiri dengan proses pemisahan enzim yang tidak larut dengan sentrifugasi atau filtrasi.

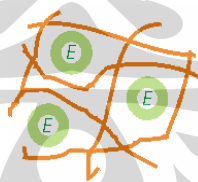
Metode ini merupakan metode yang paling banyak digunakan dalam proses imobilisasi enzim. Metode ini lebih murah, lebih mudah dilakukan, dan memberikan gangguan kestabilan protein yang rendah dibandingkan dengan metode yang lain. Tetapi, metode ini memiliki kelemahan yaitu gaya ikatan antara enzim dengan support umumnya rendah karena terjadinya desorpsi pada enzim.



**Gambar 2.10** Metode Adsorpsi <sup>[26]</sup>

## 2. *Entrapment*

Metode ini pada umumnya digunakan dalam proses imobilisasi sel tapi tidak digunakan dalam proses imobilisasi katalis. Kelemahan utama dari metode ini adalah adanya kemungkinan terjadinya kebocoran secara perlahan jika digunakan secara terus-menerus, karena ukuran partikel sel lebih kecil daripada katalis.

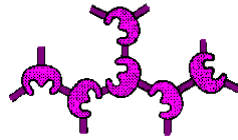


**Gambar 2.11** Metode *Entrapment* <sup>[26]</sup>

## 3. *Cross linking*

Suatu metode proses imobilisasi enzim dengan menghubungkan secara silang ikatan kovalen antar molekul protein. Metode ini sangatlah mahal dan tidak mencukupi kebutuhan katalis yang bear, selain itu enzim yang terbentuk memiliki aktifitas sangat rendah.

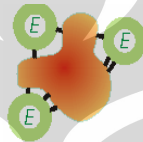




**Gambar 2.12** Metode *Cross Linking* <sup>[26]</sup>

4. *Covalent binding*

Merupakan pembentukan ikatan kovalen antara enzim dengan bahan pendukung (*support*). Keterbatasannya yaitu jika terjadi reaksi antar portein yang tidak terlarut, maka reaksi harus dilakukan dibawah kondisi yang tidak menyebabkan hilangnya aktivitas enzim dan daerah aktif enzim belum tersentuh oleh pereaksinya (*reagents*).



**Gambar 2.13** Metode *Covalent Binding* <sup>[26]</sup>

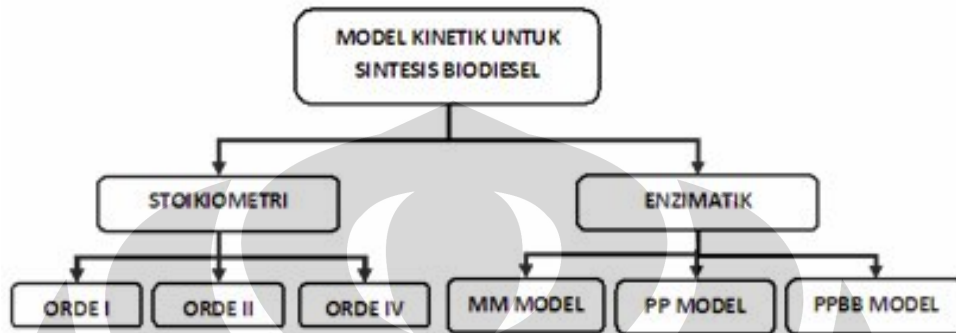
Teknik immobilisasi enzim tersebut dikembangkan untuk memperbaiki beberapa kekurangan penggunaan enzim. Berbagai macam perbandingan metode immobilisasi untuk enzim yang dapat larut dapat dilihat pada tabel 2.9.

**Tabel 2.5** Perbandingan Berbagai Metode Immobilisasi Lipase <sup>[25]</sup>

Karakteristik	<i>Cross-linking</i>	Adsorpsi Fisik	Ikatan Ionik	Ikatan Logam	Ikatan Kovalen	<i>Entrapping</i>
<b>Preparasi</b>	sedang	mudah	sedang	mudah	sulit	sulit
<b>Gaya ikatan</b>	kuat	lemah	sedang	sedang	kuat	sedang
<b>Aktivitas enzim</b>	rendah	sedang	tinggi	tinggi	tinggi	rendah
<b>Regenerasi carrier</b>	tak mungkin	mungkin	mungkin	mungkin	sangat mungkin	mungkin
<b>Biaya immobilisasi</b>	sedang	rendah	rendah	sedang	tinggi	sedang
<b>Stabilitas</b>	tinggi	rendah	sedang	sedang	tinggi	tinggi
<b>Perlindungan dari kontaminasi</b>	sedikit	tidak ada	tidak ada	tidak ada	tidak ada	ada

### 2.3 Model Mekanisme Kinetika Reaksi Sintesis Biodiesel

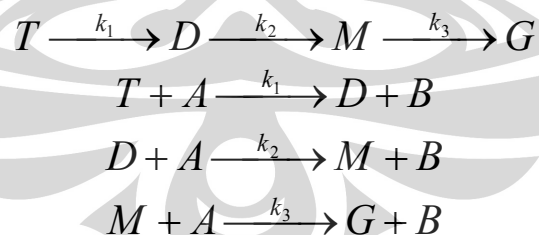
Hingga saat ini telah banyak dibuat berbagai model untuk menggambarkan proses sintesis biodiesel, dimana secara umum model yang ada dapat diklasifikasikan sebagaimana pemetaan pada **Gambar 2.14**.



**Gambar 2.14** Pemetaan Model Kinetik untuk Sintesis Biodiesel

#### 2.3.1 Mekanisme Reaksi Stoikiometri

Reaksi irreversibel dapat didefinisikan sebagai reaksi yang berjalan satu arah saja, dimulai dengan reaktan awal kemudian menghasilkan zat intermediet atau produk akhir. Reaksi bertingkat dapat dipandang sebagai reaksi irreversibel yang berjalan secara berurutan, dimana dapat diklasifikasikan ke dalam 2 jenis yaitu yang berorde satu dan gabungan orde satu serta orde dua. Reaksi bertingkat berorde satu merupakan jenis yang paling sederhana. Skema reaksi bertingkat orde satu dengan tiga tahapan ditunjukkan oleh **Gambar 2.15**.



**Gambar 2.15** Mekanisme Reaksi Bertingkat Irreversibel dengan Tiga Tahapan

Dalam hal ini, D dan M disebut sebagai zat intermediet karena bukan merupakan produk akhir. Pada sintesis biodiesel, trigliserida (T) mengalami reaksi interesterifikasi menjadi digliserida (D), monogliserida dan gliserol (G), dimana disetiap tahap tersebut dihasilkan biodiesel (B). Mekanisme di atas dapat dituliskan dalam persamaan laju berikut,

$$\frac{dC_T}{dt} = -k_1 C_T \quad (2.1)$$

$$\frac{dC_D}{dt} = k_1 C_T - k_2 C_D \quad (2.2)$$

$$\frac{dC_M}{dt} = k_2 C_D - k_3 C_M \quad (2.3)$$

$$\frac{dC_G}{dt} = k_3 C_M \quad (2.4)$$

Dengan integrasi dan substitusi persamaan kinetika (2.1) – (2.4) didapatkan persamaan akhir untuk setiap komponen sebagai berikut:

$$C_T = C_{T0} \exp(-k_1 t) \quad (2.5)$$

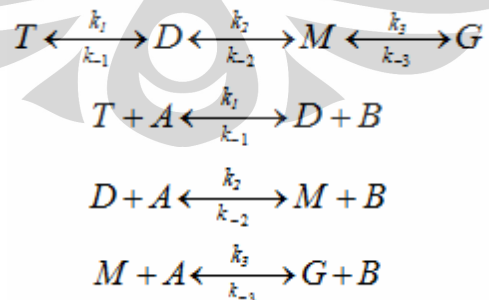
$$C_D = \frac{k_1 C_{T0}}{k_2 - k_1} [\exp(-k_1 t) - \exp(-k_2 t)] + C_{D0} \exp(-k_2 t) \quad (2.6)$$

$$C_M = \left[ \frac{k_1 k_2 C_{T0}}{(k_2 - k_1)(k_3 - k_1)} \right] \exp(-k_1 t) + \left[ \frac{k_1 k_2 C_{T0}}{(k_1 - k_2)(k_3 - k_2)} \right] \exp(-k_2 t) + \left[ \frac{k_1 k_2 C_{T0}}{(k_1 - k_3)(k_2 - k_3)} \right] \exp(-k_3 t) \quad (2.7)$$

dan,

$$C_B = C_{T0} - (C_T + C_D + C_M) \quad (2.8)$$

Untuk reaksi elementer berorde dua, asumsi reaktan yang sangat berlebih tidak lagi digunakan. Penggunaan pendekatan reaksi orde dua inilah yang umum digunakan untuk menggambarkan proses transesterifikasi trigliserida. Mekanisme dapat digunakan ini keadaan alkohol tidak berlebih.



**Gambar 2.16.** Mekanisme Reaksi Bertingkat Reversibel dengan Tiga Tahapan

Dengan notasi A, T, D, M dan B berturut-turut menggambarkan alkohol, trigliserida, digliserida dan biodiesel. Persamaan model dari model berorde dua digambarkan sebagai:

$$\frac{dC_T}{dt} = -k_1 C_T C_A + k_{-1} C_B C_D \quad (2.9)$$

$$\frac{dC_D}{dt} = k_1 C_T C_A - k_{-1} C_B C_D - k_2 C_D C_A + k_{-2} C_B C_M \quad (2.10)$$

$$\frac{dC_M}{dt} = k_2 C_D C_A - k_{-2} C_B C_M - k_3 C_M C_A + k_{-3} C_B C_G \quad (2.11)$$

$$\frac{dC_G}{dt} = k_3 C_M C_A - k_{-3} C_B C_G \quad (2.12)$$

$$\frac{dC_E}{dt} = k_1 C_T C_A - k_{-1} C_B C_D + k_2 C_D C_A - k_{-2} C_B C_M + k_3 C_M C_A - k_{-3} C_B C_G \quad (2.13)$$

$$\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_T C_A + k_{-1} C_B C_D - k_2 C_D C_A + k_{-2} C_B C_M - k_3 C_M C_A + k_{-3} C_B C_G \quad (2.14)$$

Dimana,  $k_1$ ,  $k_2$ , dan  $k_3$  merupakan konstanta reaksi maju, sedangkan  $k_{-1}$ ,  $k_{-2}$ , dan  $k_{-3}$  adalah konstanta reaksi balik.

Untuk kondisi alkohol yang hanya sedikit berlebih mekanisme reaksi dapat digambarkan dengan model kinetik orde dua dengan kombinasi reaksi shunt orde empat yaitu reaksi langsung tiga molekul trigliserida menjadi tiga molekul ester. t.

Perubahan persamaan kinetika akibat menyertakan reaksi shunt ini adalah sebagai berikut.

$$\frac{dC_T}{dt} = -k_1 C_T C_A + k_{-1} C_B C_D - k_4 C_T C_A^3 + k_5 C_A C_G^3 \quad (2.15)$$

$$\frac{dC_G}{dt} = k_3 C_M C_A - k_{-3} C_B C_G + k_4 C_T C_A^3 - k_5 C_G C_B^3 \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_E}{dt} = & k_1 C_T C_A - k_{-1} C_B C_D + k_2 C_D C_A - k_{-2} C_B C_M + k_3 C_M C_A - k_{-3} C_B C_G \\ & + k_4 C_T C_A^3 - k_5 C_G C_B^3 \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{-dC_B}{dt} \quad (2.18)$$

Dimana,  $k_4$  merupakan konstanta reaksi maju pada reaksi langsung (tak bertahap), sedangkan  $k_5$ , adalah konstanta reaksi balik pada reaksi langsung (tak bertahap).

### 2.3.2 Mekanisme Reaksi Enzimatik

Enzim merupakan suatu protein dengan berat molekul tinggi yang saling berikatan oleh ikatan peptida. Dalam fungsinya sebagai katalis reaksi, enzim dapat mengurangi kebutuhan energi sehingga reaksi dapat berjalan. Mekanisme tersebut muncul karena berikatannya reaktan (substrat) dengan enzim membentuk suatu kompleks enzim-substrat, yang membuat substrat menjadi lebih aktif.

Reaksi dari suatu enzim dengan suatu substrat akan melibatkan pembentukan produk tengah (intermediate) yang kemudian beraksi kembali dengan substrat yang lain atau terdekomposisi untuk membentuk produk. Secara khas, data laju dari sebuah enzim akan dilaporkan sebagai data laju awal, dimana laju pengurangan substrate atau pembentukan produk ditentukan dari periode waktu yang sangat pendek yang mengikuti (tergantung) dari awal mula sebuah reaksi. Pengaruh konsentrasi substrat terhadap laju awal reaksi merupakan konsep utama dari kinetika enzimatik. Ketika data percobaan reaksi secara enzimatik didapat, lalu di plot antara laju awal reaksi terhadap konsentrasi substrat, maka kebanyakan reaksi secara enzimatik cenderung menunjukkan kurva hiperbola yang *rectangular*.

#### 2.3.2.1 Mekanisme Reaksi Enzimatis yang Melibatkan Satu Substrat dan Satu Produk

##### 1. Mekanisme Reaksi Enzimatis Berbasis Michaelis-Menten

Michaelis dan Menten memperoleh perumusan yang sangat baik dari data percobaan yang mendukung analisis mereka terhadap adanya ketergantungan laju awal reaksi substrat dan konsentrasi enzim. Mereka mengemukakan bahwa apabila enzim dan substrat dikombinasikan, maka akan memberikan sebuah enzim-substrat kompleks, diasumsikan reaksinya bersifat reversibel dan berlangsung sangat cepat, dengan tidak adanya perubahan kimia yang ditemukan pada substrat.

Substrat dipengaruhi oleh gaya (dorongan) secara fisik yang diberikan enzim. Sifat kompleks ini kemudian mengarah terhadap terjadinya perubahan kimia, menghasilkan pembentukan produk dan pelepasan produk oleh enzim, dengan orde pertamanya tergantung terhadap konsentrasi enzim-substrat kompleks.

Secara sistematis, mekanisme reaksi berbasis Michaelis – Menten dapat dituliskan seperti pada **Gambar 2.17**.



**Gambar 2.17** Mekanisme Reaksi Enzimatis Berbasis Michaelis – Menten

Biokatalis (E) bereaksi dengan substrat (T) trigliserida membentuk kompleks substrat-biokatalis (ET), selanjutnya dilepaskan produk biodiesel (B). Dimana,  $k_1$ : konstanta laju reaksi pembentukan enzim-substrat kompleks,  $k_2$ : konstanta laju reaksi penguraian substrat yang tak berubah dalam enzim, dan  $k_p$ : konstanta laju reaksi pembentukan produk yang terpisah dari enzim.

Laju reaksi untuk masing-masing komponennya adalah sebagai berikut:

$$v_E = \frac{dC_E}{dt} = -k_1 C_E C_T + k_{-1} C_{ET} + k_2 C_{ET} \quad (2.19)$$

$$v_T = \frac{dC_T}{dt} = -k_1 C_E C_T + k_{-1} C_{ET} \quad (2.20)$$

$$v_{ET} = \frac{dC_{ET}}{dt} = k_1 C_E C_T - k_{-1} C_{ET} - k_2 C_{ET} \quad (2.21)$$

$$v_B = \frac{dC_B}{dt} = k_2 C_{ET} \quad (2.22)$$

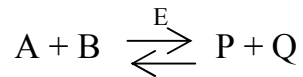
Dengan asumsi keadaan *pseudo-steady state* pada konsentrasi kompleks enzim, maka diperoleh persamaan:

$$v = \frac{v_{\max} C_T}{K_m + C_T} \quad (2.23)$$

Dimana  $v_{\max}$  merupakan laju reaksi tercepat pada konsentrasi substrat yang tinggi, dan  $K_M$  merupakan konstanta Michaelis – Menten.

### 2.3.2.2 Mekanisme Reaksi Enzimatis yang Melibatkan Dua Substrat dan Dua Produk

Saat terjadi reaksi antara dua spesies substrat, persamaan laju secara *steady state* menjadi lebih rumit dibandingkan dengan reaksi yang hanya melibatkan satu substrat. Sebagian besar reaksi biokimiawi melibatkan sedikitnya dua substrat sehingga enzim yang terlibat tidak hanya mengubah satu substrat, melainkan dapat mengkatalis perubahan dua substrat dan menghasilkan dua produk.



**Gambar 2.18** Mekanisme Reaksi Enzimatik yang Melibatkan Dua Substrat

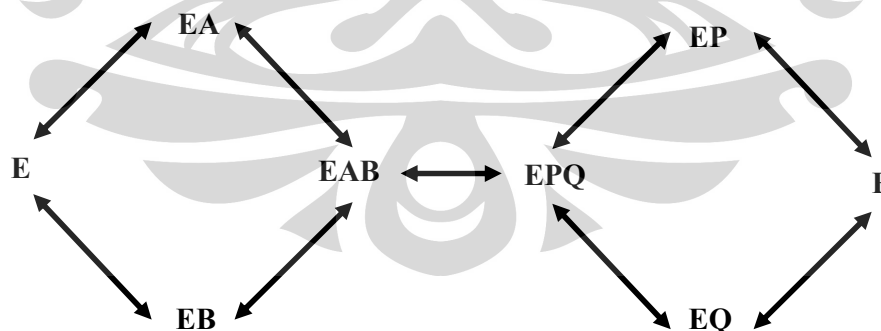
Biokatalis (E) bereaksi dengan substrat (T) trigliserida dan substrat (A) membentuk produk utama biodiesel (B) dan produk samping (G). Terdapat tiga kemungkinan mekanisme yang dapat terjadi pada reaksi enzimatik dengan dua substrat, antara lain meliputi mekanisme kompleks terner acak, mekanisme kompleks terner teratur dan mekanisme Ping-Pong Bi Bi.

### 1. *Mekanisme Reaksi Enzimatik Kompleks Terner Acak*

Dalam mekanisme kompleks terner acak ini, enzim (E) membentuk kompleks biner (EA) dan (EB) bersama kedua substrat (A) dan (B). Kemudian enzim juga membentuk kompleks terner (EAB) dengan mengikat (A) atau (B) secara acak tanpa pengauran. Penurunan persamaan laju untuk mekanisme ini cenderung rumit. Beberapa penyederhanaan dapat dibuat dengan mengasumsikan laju perubahan (EAB) menjadi (EA) atau (EB) sangat lambat sehingga (EA), (EB) dan (EAB) dianggap berada dalam kondisi kesetimbangan. Persamaan laju akan berkurang menjadi:

$$v = \frac{VC_A C_B}{K_{1A}K_{mB} + K_{mB}C_A + K_{mA}C_B + C_A C_B} \quad (2.24)$$

dimana ,  $v$  merupakan laju reaksi,  $V$  adalah laju reaksi maksimum,  $K_{1A}$ ,  $K_{mA}$  dan  $K_{mB}$  merupakan konstanta.



**Gambar 2.19** Mekanisme Reaksi Enzimatik Kompleks Terner Acak

Jika konsentrasi B dipertahankan konstan, variasi  $v$  terhadap  $C_A$  menjadi mirip dengan bentuk Michelis-Menten. Hal ini dapat diperlihatkan pada kondisi dimana B dalam kondisi yang berlebih.

Karena itu, jika  $C_B$  cukup besar maka dua suku pertama pada penyebut persamaan (2.24) dapat diabaikan dan menghasilkan:

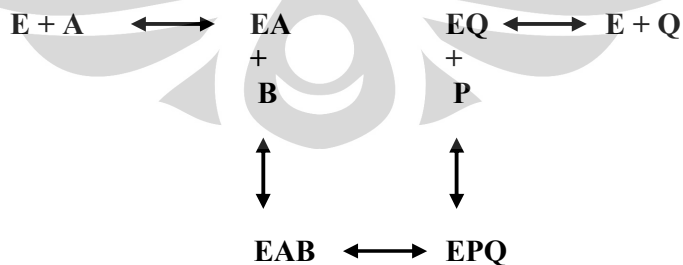
$$v = \frac{VC_A}{K_{mA} + C_A} \quad (2.25)$$

Persamaan ini mirip dengan bentuk persamaan Michealis Menten, dengan demikian  $K_{mA}$  merupakan konstanta Michealis untuk substrat (A) dalam kondisi substrat (B) yang berlebih. Sama halnya, jika (A) dalam kondisi yang berlebih maka dihasilkan persamaan,

$$v = \frac{VC_B}{K_{mB} + C_B} \quad (2.26)$$

## 2. *Mekanisme Reaksi Enzimatis Kompleks Terner Teratur (Ordered Bi Bi Mechanism)*

Pada pemodelan reaksi enzimatik yang melibatkan dua substrat dan dua produk, mekanisme lain yang dapat muncul adalah mekanisme kompleks terner yang teratur, dimana mekanisme ini dipakai untuk asumsi reaksi esterifikasi sederhana. Asumsi yang dipakai pada kinetika ini adalah dengan menganggap asam lemak (A) merupakan reaktan pertama yang terlibat dan menghasilkan kompleks aktif enzim-asam (EA). Kemudian alkohol (B) akan bergabung menjadi kompleks terner enzim-asam-alkohol (EAB). Dari kompleks ini, kemudian akan membentuk kompleks baru yaitu kompleks enzim-ester-air (EPQ). Selanjutnya molekul ester (P) akan dilepaskan dan terakhir molekul air (Q) dilepaskan dari enzim (E).



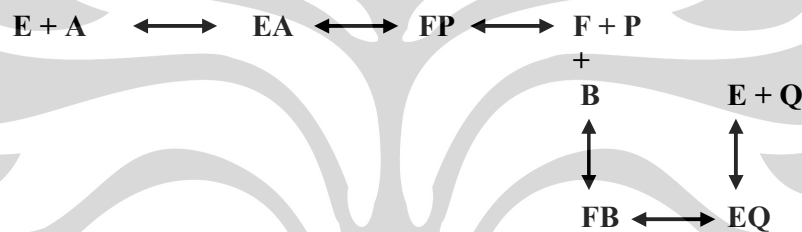
**Gambar 2.20** Mekanisme Reaksi Enzimatis Kompleks Terner Teratur



Sebagai contoh, kompleks terner (EAB) dapat terbentuk dari kompleks biner (EA) dengan tambahan (B), tetapi tidak dari kompleks (EB) dengan tambahan (A). Pada mekanisme ini substrat harus terikat dengan urutan yang khusus dan teratur. Mekanisme ini memiliki bentuk persamaan laju yang sama dengan mekanisme kompleks terner acak untuk persamaan (2.24), hanya saja pada mekanisme kompleks terner teratur memiliki perbedaan pada signifikansi setiap konstantanya.

### 3. *Mekanisme Reaksi Enzimatik Berbasis Ping Pong*

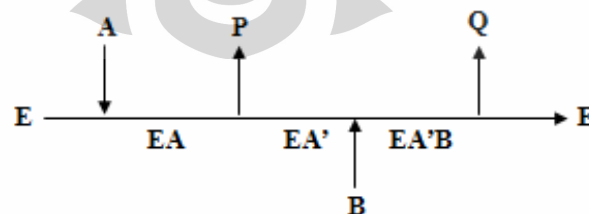
Mekanisme ping pong dapat dipakai untuk menjelaskan katalisis oleh lipase. Mekanisme ini secara umum menjelaskan reaksi interesterifikasi dan transesterifikasi. Berikut adalah skema reaksi dari mekanisme ping pong yang dijelaskan oleh Garcia.



Gambar 2.21. Mekanisme Ping Pong

### 4. *Mekanisme Reaksi Enzimatik Berbasis Ping Pong Bi Bi*

Model kinetika berbasis mekanisme Ping-Pong Bi Bi dikembangkan untuk lebih mendekati fenomena reaksi biokatalis yang melibatkan dua reaktan dan dua produk. Secara eksperimen, mekanisme ini disebut sebagai mekanisme Ping-Pong Bi Bi. 'Bi' yang pertama mengidentifikasi terdapat dua reaktan pada reaksi, dan "Bi" yang kedua adalah untuk dua produk yang dihasilkan.



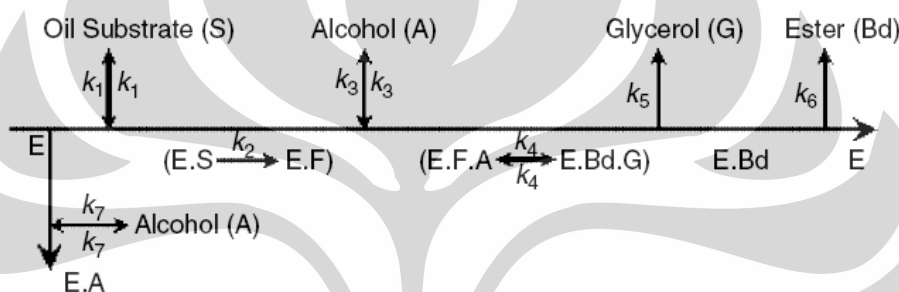
Gambar 2.22 Mekanisme Ping Pong Bi Bi

Dengan mengaplikasikan kondisi steady-state pada mekanisme ini diperoleh persamaan laju berbentuk

$$v = \frac{V C_A C_B}{K_{mB} C_A + K_{mA} C_B + C_A C_B} \quad [2.27]$$

Persamaan ini mirip dengan persamaan (2.24) dengan menghilangkan suku pertama pada penyebutnya.

Mekanisme Ping pong Bi Bi dapat dimodifikasi pada esterifikasi trigliserida berkatalis lipase dengan inhibisi kompetitif alkohol. Skema keseluruhan yang diusulkan adalah sebagai berikut.

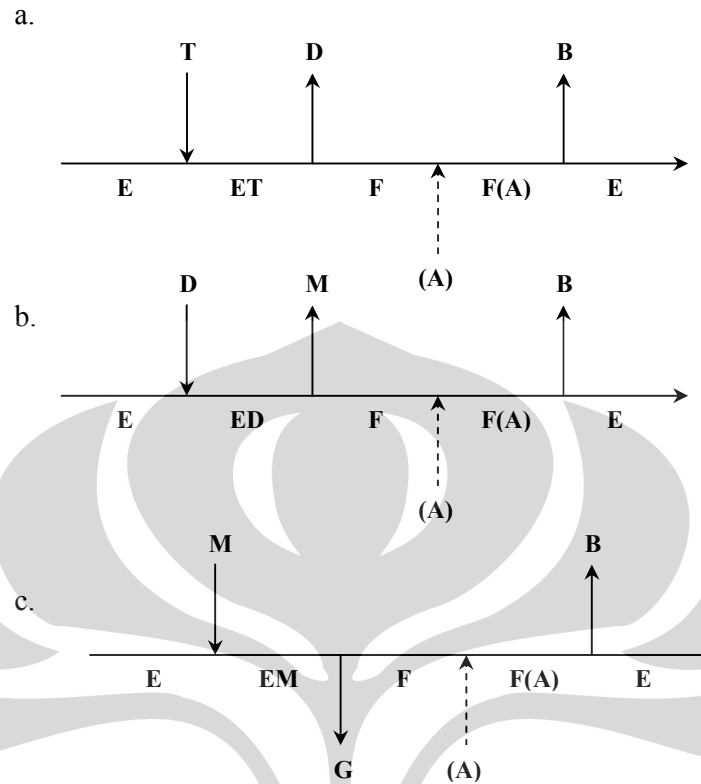


**Gambar 2.23** Esterifikasi Trigliserida Berkatalis Lipase dengan Inhibisi Kompetitif Alkohol

Persamaan yang menyatakan laju reaksi trigliserida untuk mekanisme seperti di atas adalah sebagai berikut:

$$v = k_6 C_{EBd} = \frac{V_{\max} C_S}{1 + K_{IS} C_S + \frac{K_S}{C_S} \left( 1 + \frac{C_A}{K_{IA}} \right) + \frac{K_A}{C_A}} \quad (2.28)$$

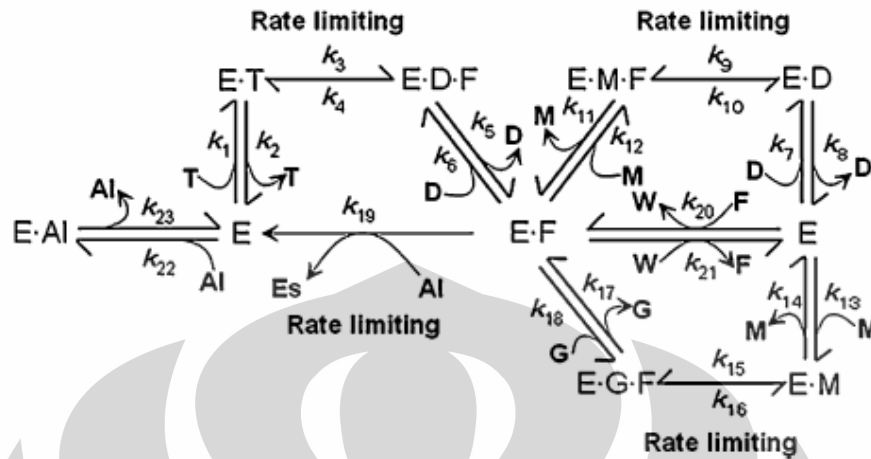
Pada reaksi transesterifikasi, model ping pong bi bi dapat diturunkan berdasarkan keterlibatan alkohol dalam reaksi. Terdapat tiga mekanisme berbeda yang menjelaskan dimana alkohol mulai terlibat dalam reaksi.



**Gambar 2.24** Mekanisme Reaksi Enzimatis Berbasis Ping Pong Bi Bi untuk Pembentukan (a) Trigliserida, (b) Digliserida, (c) Monogliserida.

Pada mekanisme ini, enzim bebas (E) akan bereaksi dengan trigliserida (T), untuk membentuk kompleks pertama (ET). Digliserida (D) kemudian dilepaskan oleh kompleks ET untuk membentuk kompleks kedua (F). Kompleks kedua ini bereaksi dengan alkohol untuk melepaskan biodiesel (B). Reaksi yang melibatkan alkohol ditunjukkan dengan garis putus-putus, dapat diabaikan karena keberadaan A yang dalam kondisi berlebih. Mekanisme alkoholisis digliserida dan monogliserida (gambar bagian b dan c) berjalan dengan cara yang sama seperti ini pula. Berikut adalah ketiga mekanisme berdasarkan keterlibatan alkohol dalam reaksi.

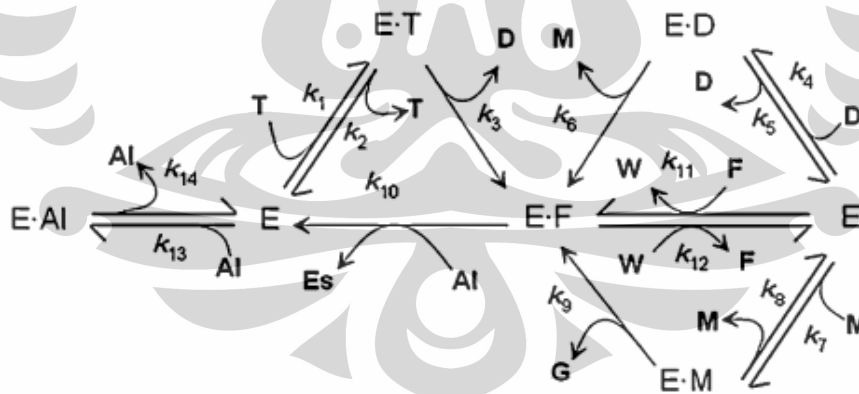
- Mekanisme I



**Gambar 2.25** Skema Konseptual untuk Mekanisme I

Pada mekanisme I, reaksi untuk produksi ester diklasifikasikan menjadi dua kelompok: hidrolisis dan esterifikasi. Reaksi hidrolisis merupakan reaksi yang menghasilkan asam lemak bebas termasuk juga tahapan proses hidrolisis trigliserida, digliserida, dan monogliserida. Reaksi esterifikasi berlangsung pada fatty acid ethyl ester dengan etanol berlebih.

- Mekanisme II

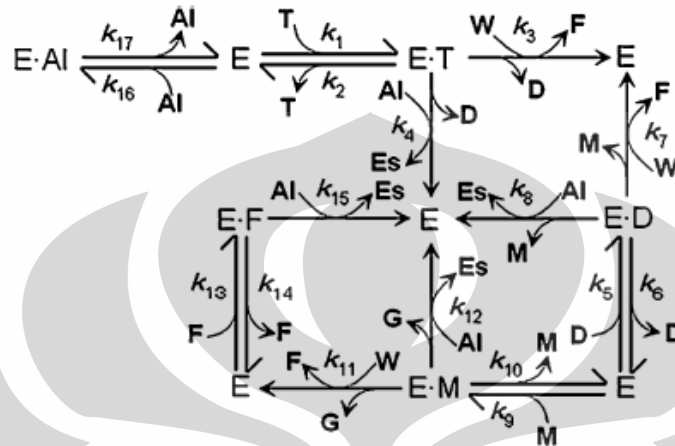


**Gambar 2.26** Skema Konseptual untuk Mekanisme II

Mekanisme II berbeda dengan mekanisme I dalam hal dekompleksasi enzim dan produk intermediet setelah reaksi hidrolisis. Hal ini bisa terjadi jika substrat terikat langsung ke sisi aktif enzim, kemudian terbentuk kompleks asil

campuran dan produk intermediet hidrolisis akan dilepaskan selanjutnya. Untuk menyederhanakan mekanisme, diasumsikan bahwa dekompleksasi produk intermediet dari kompleks asil campuran setelah hidrolisis terjadi sangat cepat.

- Mekanisme III



**Gambar 2.27** Skema Konseptual untuk Mekanisme III

Mekanisme III berbeda dari mekanisme I dan II dari segi kinetik dalam hal pemakaian molekul etanol. Mekanisme III memakai dasar asumsi transesterifikasi yang terjadi berlangsung dengan mekanisme alkoholisis langsung dari trigliserida daripada dengan dua tahapan reaksi hidrolisis dan esterifikasi. Dalam mekanisme III reaksi katalitik dibagi menjadi dua bagian, yaitu tahap hidrolisis untuk memproduksi asam lemak bebas dan tahap etanolisis untuk memproduksi fatty acid ethyl ester secara langsung. Reaksi ini berjalan secara simultan.

#### 2.4 Metode Runge-Kutta Orde 4

Metode Runge-Kutta orde 4 merupakan metode numerik untuk menyelesaikan persamaan diferensial biasa (persamaan diferensial orde satu) dalam bentuk:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), y(0) = y_0 \quad (2.29)$$

Metode runge kutta orde 4 berdasarkan pada persamaan berikut:

$$y_{i+1} = y_i + (a_1k_1 + a_2k_2 + a_3k_3 + a_4k_4)h \quad (2.30)$$

Ketika diketahui nilai  $y = y_i$  pada  $x_i$ , dapat dicari nilai  $y = y_{i+1}$  pada  $x_{i+1}$ , dan  $h = x_{i+1} - x_i$

Persamaan (2.30) dapat dicari solusinya dengan menurunkan dari deret Taylor.

$$y_{i+1} = y_i + \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_i, y_i} (x_{i+1} - x_i) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2y}{dx^2} \right|_{x_i, y_i} (x_{i+1} - x_i)^2 + \frac{1}{3!} \left. \frac{d^3y}{dx^3} \right|_{x_i, y_i} (x_{i+1} - x_i)^3 + \frac{1}{4!} \left. \frac{d^4y}{dx^4} \right|_{x_i, y_i} (x_{i+1} - x_i)^4 \quad (2.31)$$

Diketahui bahwa  $\frac{dy}{dx} = f(x, y)$  dan  $x_{i+1} - x_i = h$ , maka,

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)h + \frac{1}{2!} f'(x_i, y_i)h^2 + \frac{1}{3!} f''(x_i, y_i)h^3 + \frac{1}{4!} f'''(x_i, y_i)h^4 \quad (2.32)$$

Berdasarkan persamaan [2.31] dan [2.32], solusi persamaannya adalah

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + a_4 k_4) h \quad (2.33)$$

dengan,

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (2.34)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1h\right) \quad (2.35)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_2h\right) \quad (2.36)$$

$$k_3 = f(x_i + h, y_i + k_2h) \quad (2.37)$$

## 2.5 *State of The Art* : Pemetaan Model Kinetika Sintesis Biodiesel

Pemodelan kinetika dalam sintesis biodiesel yang telah dilakukan di dunia hingga saat ini didominasi oleh model kinetika rute alkohol baik berbasis enzim maupun non enzim. Penelitian terhadap pemodelan sintesis biodiesel berbasis mekanisme Michaelis – Menten pada rute alkohol baru dilakukan oleh Baghwat, et al. untuk inhibisi substrat maupun produk, dan Torres, et al., untuk inhibisi produk, serta Zeng, et al. untuk mekanisme Michaelis – Menten non inhibisi.

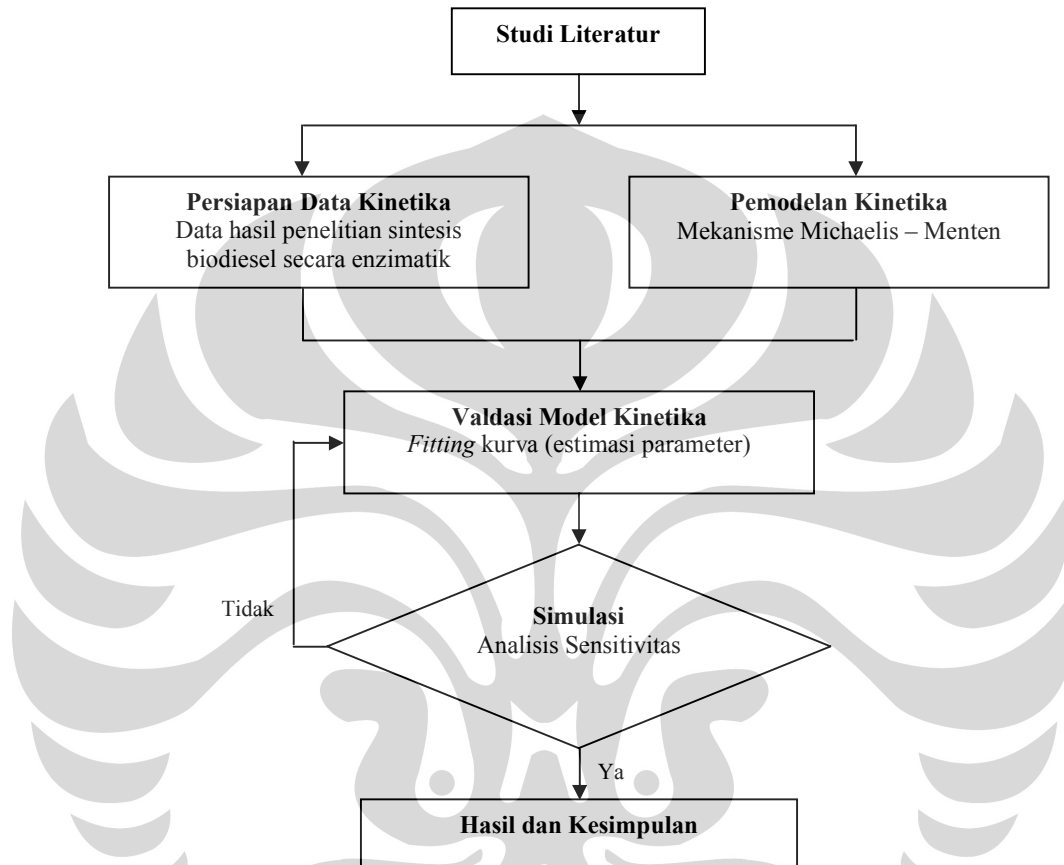
Sedangkan pada rute non alkohol, berdasarkan data tersebut, belum pernah ada peneliti yang melakukan pemodelan kinetika enzimatik berbasis mekanisme Michaelis – Menten baik inhibisi maupun non inhibisi. Sehingga diharapkan penelitian yang dilakukan dapat melingkupi penelitian yang telah ada di dunia saat ini, dan dapat memberikan kontribusi yang cukup besar bagi pengembangan riset mengenai sintesis biodiesel.

**Tabel 2.6** Pemodelan Sintesis Biodiesel yang Pernah Dilakukan

PEMETAAN KINETIKA SINTESIS BIODIESEL			Rute Alkohol		Rute Non Alkohol	
			Non Enzim	Enzim	Non Enzim	Enzim
Ping Pong Bi - Bi	Non Inhibisi					
	Inhibisi	Produk				Hermansyah, H. (2009) <sup>[45]</sup>
		Substrat		Dossat (2002) <sup>[28]</sup> Al-Zuhair (2006) <sup>[43]</sup> Al-Zuhair (2005) <sup>[41]</sup> Cheirsilp (2008) <sup>[42]</sup> Kiraai (2008) <sup>[51]</sup>		Xu (2004) <sup>[22]</sup>
Michaelis Menten	Non Inhibisi			Zeng (2009) <sup>[49]</sup>		Riset ini
	Inhibisi	Produk		Torres (2004) <sup>[47]</sup> Baghwat (2005) <sup>[6]</sup>		
		Substrat		Baghwat (2005) <sup>[6]</sup>		
Stoikiometri	Orde 1		Diasakou (1997) <sup>[33]</sup> Karmee (2004) <sup>[34]</sup> Kusdiana (1999) <sup>[35]</sup> Ognjanovic (2009) <sup>[48]</sup>	Paola (2009) <sup>[50]</sup>		Ognjanovic (2009) <sup>[48]</sup>
	Orde 2		Vicente (2005) <sup>[36]</sup> Vicente (2006) <sup>[37]</sup> Noureddini (1997) <sup>[38]</sup> Colucci (2005) <sup>[39]</sup> Darnoko (2000) <sup>[40]</sup> Karmee (2004) <sup>[34]</sup>			
	Orde 4		Noureddini (1997) <sup>[38]</sup>			

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini terdapat beberapa prosedur penting yang harus dilakukan, antara lain:

1. Studi literatur.

Mengumpulkan dan mempelajari literatur mengenai biodiesel dan mekanisme kinetika biokatalitik dari beberapa sumber, seperti: jurnal ilmiah (nasional dan internasional), jurnal on-line, text book, dan beberapa fasilitas perpustakaan.



## 2. Persiapan data kinetika.

Mengumpulkan data kinetika berupa profil konsentrasi substrat dan produk selama waktu tertentu, yang diperoleh dari beberapa hasil penelitian mengenai sintesis biodiesel secara enzimatik, baik yang berasal dari skripsi yang berasal dari Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia, maupun hasil yang telah dipublikasikan dalam jurnal.

## 3. Pemodelan kinetika.

Dalam sintesis biodiesel secara enzimatik, enzim dipergunakan untuk mengkatalisis reaksi. Oleh karena itu, digunakan model kinetika berbasis Michaelis – Menten yang mempertimbangkan mekanisme reaksi biokatalisis.

## 4. Validasi model kinetika (Estimasi parameter)

Melakukan validasi menggunakan metode *fitting* kurva berdasarkan mekanisme model Michaelis – Menten dan data kinetika dari hasil penelitian sintesis biodiesel secara enzimatik untuk memperoleh parameter – parameter kinetika.

## 5. Simulasi (Analisis Sensitivitas)

Menguji sensitivitas dan kelayakan terhadap parameter – parameter yang diperoleh melalui *fitting* antara hasil perhitungan dengan hasil eksperimen untuk menilai *reliability* dari model yang digunakan, sebelum akhirnya dilakukan simulasi untuk memperkirakan profil konsentrasi biodiesel pada kondisi operasi yang belum dilakukan dalam penelitian.

## 6. Hasil dan kesimpulan

### 3.2 Pemodelan Kinetika Berbasis Mekanisme Michaelis – Menten

Dalam setiap reaksi yang berlangsung untuk membentuk suatu produk, reaksi tersebut akan memiliki mekanisme reaksi tersendiri yang dapat dirumuskan atau dimodelkan menggunakan persamaan parametrik tertentu. Adanya pengaruh substrat dan katalis yang digunakan terhadap pembentukan produk dalam rentang waktu tertentu membuat setiap reaksi dapat dianalisa menggunakan pemodelan sederhana secara aljabar. Oleh karena itu, untuk mengetahui sifat dan perilaku dari reaksi enzimatik dalam sintesa biodiesel, maka digunakan pemodelan

menggunakan mekanisme reaksi sederhana berbasis Michaelis-Menten, dimana dalam reaksi biokatalitik tersebut hanya terdapat satu substrat tunggal.

### 3.2.1 Penurunan Model Kinetika Berbasis Michaelis – Menten



**Gambar 3.2** Reaksi Enzimatik Berbasis Michaelis – Menten Non Inhibisi dan Non Adsorpsi

Di sini biokatalis (E) bereaksi dengan substrat (S) trigliserida membentuk kompleks substrat-biokatalis (ES), selanjutnya dilepaskan produk biodiesel (B). Dimana,  $k_1$ : konstanta laju reaksi pembentukan enzim-substrat kompleks,  $k_{-1}$ : konstanta laju reaksi penguraian substrat yang tak berubah dalam enzim, dan  $k_2$ : konstanta laju reaksi pembentukan produk yang terpisah dari enzim.

- Jika laju reaksi pembentukan produk adalah  $v_B = \frac{C_B}{dt}$ , maka laju reaksi untuk masing-masing komponennya adalah sebagai berikut:

$$v_E = \frac{dC_E}{dt} = -k_1 C_E C_S + k_{-1} C_{ES} + k_2 C_{ES} \quad (3.1a)$$

$$v_S = \frac{dC_S}{dt} = -k_1 C_E C_S + k_{-1} C_{ES} \quad (3.2a)$$

$$v_{ES} = \frac{dC_{ES}}{dt} = k_1 C_E C_S - k_{-1} C_{ES} - k_2 C_{ES} \quad (3.3a)$$

$$v_B = \frac{dC_B}{dt} = k_2 C_{ES} \quad (3.4a)$$

- Dengan asumsi keadaan *pseudo-steady state* pada konsentrasi kompleks enzim  $\frac{dC_{ES}}{dt} = 0$ , maka:

$$\begin{aligned} \frac{dC_{ES}}{dt} &= k_1 C_E C_S - k_{-1} C_{ES} - k_2 C_{ES} = 0 \\ k_1 C_E C_S &= C_{ES} (k_{-1} + k_2) \\ C_{ES} &= \frac{k_1 C_E C_S}{k_{-1} + k_2} \end{aligned} \quad (3.5a)$$

Dengan metode substitusi persamaan (3.5a) ke dalam persamaan (3.2a) dan (3.4a), maka diperoleh:

$$\begin{aligned}
 \frac{dC_S}{dt} &= -k_1 C_E C_S + k_{-1} C_{ES} \\
 &= -k_1 C_E C_S + k_{-1} \left( \frac{k_1 C_E C_S}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= C_E C_S \left( \frac{-k_1 + k_{-1} k_1}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= C_E C_S \left( \frac{-k_1 k_{-1} - k_1 k_2 + k_1 k_{-1}}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= -C_E C_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \tag{3.6a}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dC_B}{dt} &= k_2 C_{ES} \\
 &= k_2 \left( \frac{k_1 C_E C_S}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= C_E C_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \tag{3.7a}
 \end{aligned}$$

➤ Neraca Massa, total konsentrasi dari enzim bebas dan kompleks enzim ialah:

$$\begin{aligned}
 C_{E,TOTAL} &= C_E + C_{ES} \\
 C_{E,TOTAL} &= C_E + \frac{k_1 C_E C_S}{k_{-1} + k_2} \\
 C_{E,TOTAL} &= C_E \left( 1 + C_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 C_E &= \frac{C_{E,TOTAL}}{\left( 1 + C_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right)} \tag{3.8a}
 \end{aligned}$$

Dengan metode substitusi persamaan (3.8a) ke dalam persamaan (3.6a) dan (3.7a), maka diperoleh:

$$\begin{aligned}
 \frac{dC_S}{dt} &= -C_E C_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= -\frac{C_{E,TOTAL}}{\left( 1 + C_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right)} C_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right)
 \end{aligned}$$

$$= -\frac{C_{E,TOTAL} C_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right)}{\left( 1 + C_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right)}$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_B}{dt} &= C_E C_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \\ &= \frac{C_{E,TOTAL}}{\left( 1 + C_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right)} C_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \\ &= \frac{C_{E,TOTAL} C_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right)}{\left( 1 + C_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right)} \end{aligned}$$

Jika  $\frac{k_1}{k_{-1} + k_2} = K_M$ , dan  $k_2 K_M C_{E,TOTAL} = V_{Max}$ , maka:

$$v_S = \frac{dC_S}{dt} = -\frac{k_2 K_M C_{E,TOTAL} C_S}{1 + K_M C_S}$$

$$v_S = \frac{dC_S}{dt} = -\frac{V_{Max} C_S}{1 + K_M C_S}$$

$$v_B = \frac{dC_B}{dt} = \frac{k_2 K_M C_{E,TOTAL} C_S}{1 + K_M C_S}$$

$$v_B = \frac{dC_B}{dt} = \frac{V_{Max} C_S}{1 + K_M C_S}$$

- Karena substrat yang digunakan ialah trigliserida  $C_T$ , dimana  $C_T = 3 C_S$ , maka laju penguraian konsentrasi substrat terhadap waktu, menjadi:

$$v_S = -\frac{V_{Max} C_S}{1 + K_M C_S} \quad (3.9a)$$

dan laju pembentukan konsentrasi biodiesel terhadap waktu menjadi:

$$v_B = \frac{3 V_{Max} C_S}{1 + K_M C_S} \quad (3.10a)$$

### 3.2.2 Penurunan Model Kinetika Berbasis Michaelis – Menten Adsorpsi



**Gambar 3.3** Reaksi Enzimatis Berbasis Michaelis – Menten Adsorpsi

Di sini biokatalis (E) bereaksi dengan substrat (S) trigliserida membentuk kompleks substrat-biokatalis (ES), selanjutnya dilepaskan produk biodiesel (B). Dimana,  $k_1$ : konstanta laju reaksi pembentukan enzim-substrat kompleks,  $k_{-1}$ : konstanta laju reaksi penguraian substrat yang tak berubah dalam enzim, dan  $k_2$ : konstanta laju reaksi pembentukan produk yang terpisah dari enzim, dan \* : komponen yang teradsorpsi pada permukaan.

Persamaan laju transfer massa pada adsorpsi isothermis digambarkan sebagai:

$$q_i = K_i C_i \quad (3.1b)$$

- Jika laju reaksi pembentukan produk adalah  $v_B = \frac{q_B}{dt}$ , maka laju reaksi untuk masing-masing komponennya adalah sebagai berikut:

$$v_E = \frac{dq_E}{dt} = -k_1 q_E q_S + k_{-1} q_{ES} + k_2 q_{ES} \quad (3.2b)$$

$$v_S = \frac{dq_S}{dt} = -k_1 q_E q_S + k_{-1} q_{ES} \quad (3.3b)$$

$$v_{ES} = \frac{dq_{ES}}{dt} = k_1 q_E q_S - k_{-1} q_{ES} - k_2 q_{ES} \quad (3.4b)$$

$$v_B = \frac{dq_B}{dt} = k_2 q_{ES} \quad (3.5b)$$

- Dengan asumsi keadaan *pseudo-steady state* pada konsentrasi kompleks enzim  $\frac{dq_{ES}}{dt} = 0$ , maka:

$$\frac{dq_{ES}}{dt} = k_1 q_E q_S - k_{-1} q_{ES} - k_2 q_{ES} = 0$$

$$k_1 q_E q_S = q_{ES} (k_{-1} + k_2)$$

$$q_{ES} = \frac{k_1 q_E q_S}{k_{-1} + k_2} \quad (3.6b)$$

Dengan metode substitusi persamaan (3.6b) ke dalam persamaan (3.3b) dan (3.5b), maka diperoleh:

$$\begin{aligned}
 \frac{dq_S}{dt} &= -k_1 q_E q_S + k_{-1} q_{ES} \\
 &= -k_1 q_E q_S + k_{-1} \left( \frac{k_1 q_E q_S}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= q_E q_S \left( \frac{-k_1 + k_{-1} k_1}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= q_E q_S \left( \frac{-k_1 k_{-1} - k_1 k_2 + k_1 k_{-1}}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= -q_E q_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \tag{3.7b}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dq_B}{dt} &= k_2 q_{ES} \\
 &= k_2 \left( \frac{k_1 q_E q_S}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= q_E q_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \tag{3.8b}
 \end{aligned}$$

➤ Neraca Massa, total konsentrasi dari enzim bebas dan kompleks enzim ialah:

$$\begin{aligned}
 q_{E,TOTAL} &= q_E + q_{ES} \\
 q_{E,TOTAL} &= q_E + \frac{k_1 q_E q_S}{k_{-1} + k_2} \\
 q_{E,TOTAL} &= q_E \left( 1 + q_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 q_E &= \frac{q_{E,TOTAL}}{\left( 1 + q_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right)} \tag{3.9b}
 \end{aligned}$$

Dengan metode substitusi persamaan (3.9b) ke dalam persamaan (3.7b) dan (3.8a), menghasilkan:

$$\begin{aligned}
 \frac{dq_S}{dt} &= -q_E q_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= -\frac{q_{E,TOTAL}}{\left( 1 + q_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right)} q_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= -\frac{q_{E,TOTAL} q_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right)}{\left( 1 + q_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right)} \\
 \frac{dq_B}{dt} &= q_E q_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= \frac{q_{E,TOTAL}}{\left( 1 + q_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right)} q_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \\
 &= \frac{q_{E,TOTAL} q_S \left( \frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right)}{\left( 1 + q_S \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} \right)}
 \end{aligned}$$

Jika  $\frac{k_1}{k_{-1} + k_2} = K_M$ , dan  $k_2 K_M q_{E,TOTAL} = V_{Max}$ , maka:

$$\begin{aligned}
 v_S &= \frac{dq_S}{dt} = -\frac{k_2 K_M q_{E,TOTAL} q_S}{1 + K_M q_S} \\
 v_S &= \frac{dq_S}{dt} = -\frac{V_{Max} q_S}{1 + K_M q_S} \quad (3.10b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_B &= \frac{dq_B}{dt} = \frac{k_2 K_M q_{E,TOTAL} q_S}{1 + K_M q_S} \\
 v_B &= \frac{dq_B}{dt} = \frac{V_{Max} q_S}{1 + K_M q_S} \quad (3.11b)
 \end{aligned}$$

- Neraca massa, total laju reaksi komponen dalam bulk dan yang teradsorpsi, digambarkan sebagai:

$$\frac{dC_i}{dt} + \frac{dq_i}{dt} = v_i \quad (3.12b)$$

Dengan metode substitusi persamaan (3.1b) ke persamaan (3.12b) menghasilkan:

$$\begin{aligned}\frac{dC_i}{dt} + \frac{dq_i}{dt} &= v_i \\ \frac{dC_i}{dt} + \frac{dC_i K_i}{dt} &= v_i \\ \frac{dC_i}{dt} (1 + K_i) &= v_i \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{v_i}{(1 + K_i)}\end{aligned}\quad (3.13b)$$

Dengan metode substitusi persamaan (3.1b), (3.10b), dan (3.11b) ke dalam persamaan (3.13b), maka diperoleh:

$$\begin{aligned}\frac{dC_S}{dt} &= -\frac{V_{Max} K_S C_S}{(1 + K_M K_S C_S)(1 + K_S)} \\ \frac{dC_B}{dt} &= \frac{V_{Max} K_S C_S}{(1 + K_M K_S C_S)(1 + K_B)}\end{aligned}$$

- Karena substrat yang digunakan ialah trigliserida  $C_T$ , dimana  $C_T = 3 C_S$ , maka laju penguraian konsentrasi substrat terhadap waktu, menjadi:

$$\frac{dC_S}{dt} = -\frac{V_{Max} K_S C_S}{(1 + K_M K_S C_S)(1 + K_S)} \quad (3.14b)$$

dan laju pembentukan konsentrasi biodiesel terhadap waktu menjadi:

$$\frac{dC_B}{dt} = 3 \frac{V_{Max} K_S C_S}{(1 + K_M K_S C_S)(1 + K_B)} \quad (3.15b)$$

### 3.3 Data Kinetika

Dalam melakukan suatu pemodelan sintesis biodiesel secara enzimatik, selain dibutuhkan suatu model kinetika yang mampu menggambarkan perilaku yang sebenarnya dari suatu proses sintesis tersebut, dibutuhkan pula data – data hasil penelitian yang sesuai agar proses simulasi dapat dilakukan. Telah banyak peneliti yang melakukan penelitian mengenai sintesis biodiesel, tetapi hanya beberapa yang melakukan sintesis tersebut menggunakan biokatalis dan sayangnya data hasil sintesis tersebut juga tidak selalu ditampilkan dalam jurnal yang dipublikasikan.

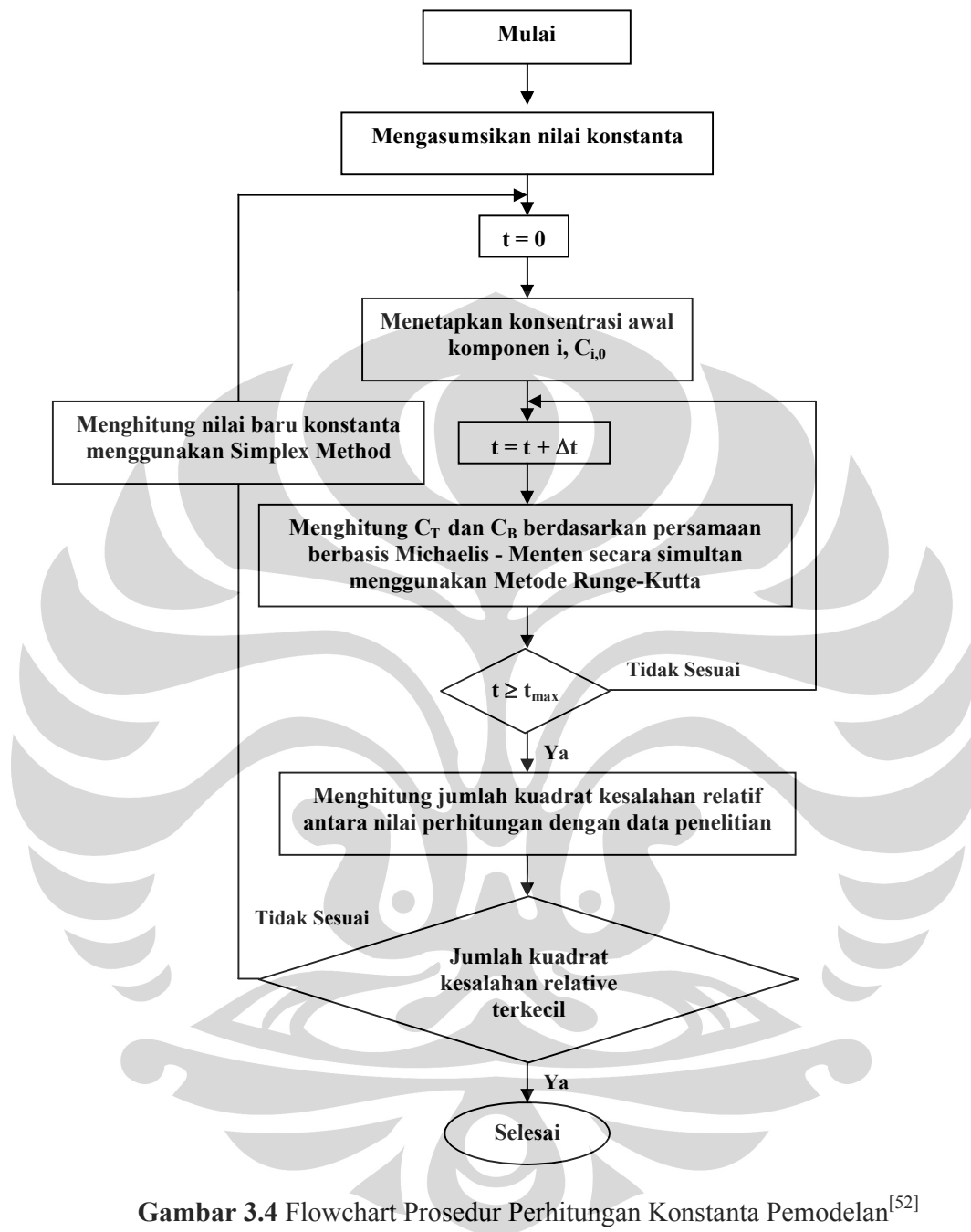


Untuk kepentingan pemodelan secara kinetika berbasis Michaelis – Menten, dibutuhkan data penelitian yang menampilkan komponen reaksi (trigliserida dan biodiesel) dalam bentuk konsentrasi dan waktu reaksi. Data – data tersebut diperoleh dari skripsi yang berasal dari Departemen Teknik Kimia UI serta jurnal ilmiah (nasional dan Internasional).

### 3.4 Metode Estimasi Parameter Kinetika

Dalam melakukan estimasi parameter - parameter kinetika, data - data hasil penelitian yang diperoleh akan diolah menggunakan program Fortran untuk dilakukan *fitting* dengan menggunakan model kinetika dalam rangka mencari parameter-parameter kinetika secara simultan. Terdapat 2 buah parameter yang tidak diketahui pada model kinetika Michaelis – Menten, yaitu  $K_M$  dan  $V_{MAX}$ . Sedangkan pada model kinetika Michaelis – Menten dengan adsorpsi terdapat 4 buah parameter yang tidak diketahui, yaitu  $K_M$ ,  $K_S$ ,  $K_B$ , dan  $V_{max}$ . Parameter tersebut diestimasi dengan melakukan *fitting* terhadap persamaan model dengan data eksperimen yang diperoleh pada berbagai kondisi. Prosedur *fitting* pada dasarnya ialah seperti yang terlihat pada **Gambar 3.4**.

Prosedur fitting tersebut diawali dengan menetapkan nilai konstanta-konstanta secara sembarang, serta memasukkan data - data awal, seperti waktu reaksi, konsentrasi enzim dan komponen trigliserida mula-mula. Kemudian secara simultan dengan menggunakan persamaan (3.9a) dan (3.10a) untuk mekanisme reaksi berbasis Michaelis – Menten, serta persamaan (3.14b) dan (3.15b) untuk mekanisme reaksi berbasis Michaelis – Menten dengan adsorpsi, dilakukan penghitungan konsentrasi masing-masing komponen (trigliserida dan biodiesel) dari mulai awal reaksi ( $t=0$ ) hingga akhir reaksi dengan rentang waktu,  $h = 0.1$ , yang secara numeris akan diolah menggunakan Metode Runge-Kutta. Estimasi konstanta-konstanta dalam pemodelan dilakukan secara *trial and error* menggunakan metode Simplex hingga diperoleh hasil *fitting* terbaik dari nilai konstanta-konstanta tersebut, dengan meminimalkan jumlah kuadrat kesalahan relatif antara data hasil perhitungan dengan data hasil penelitian untuk konsentrasi trigliserida dan biodiesel<sup>[52]</sup>.



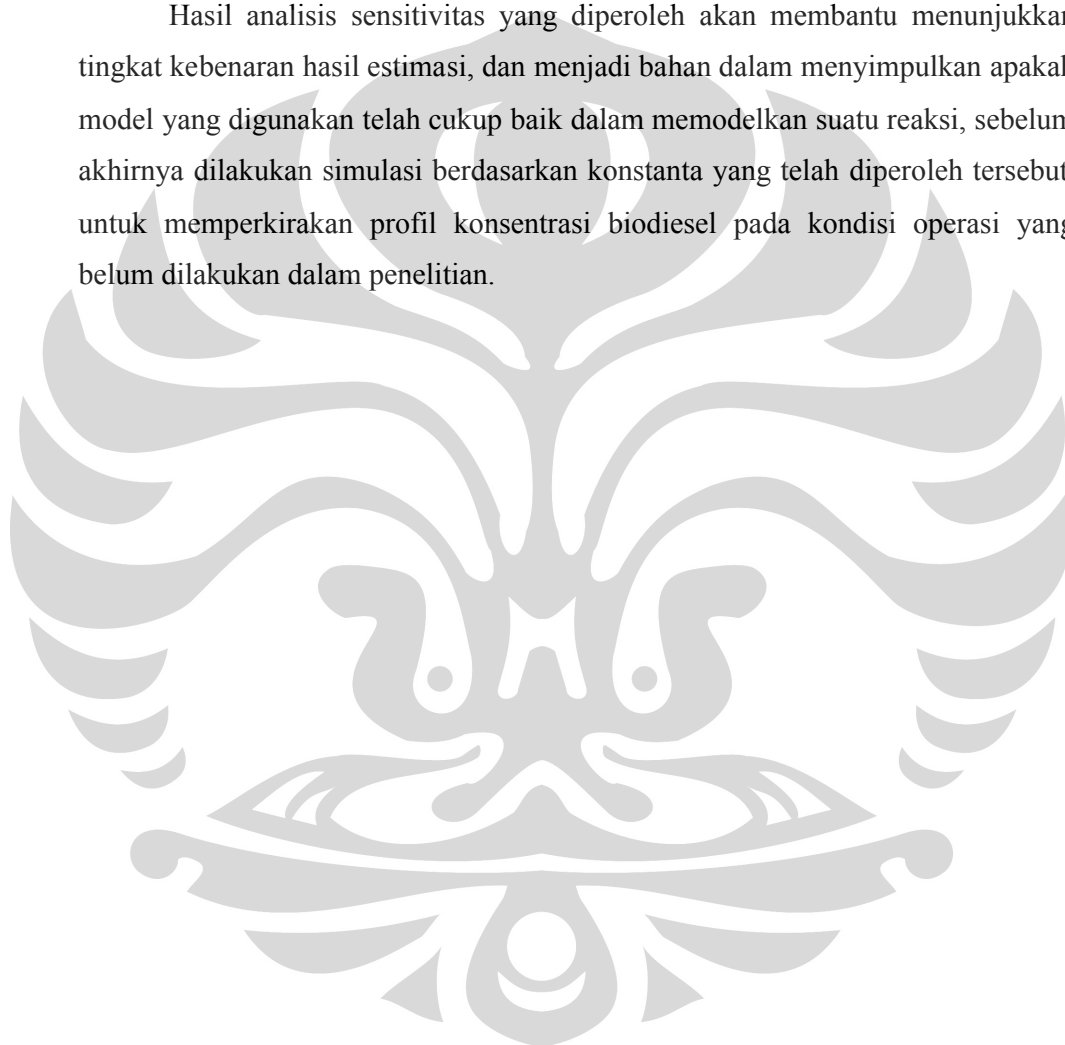
**Gambar 3.4** Flowchart Prosedur Perhitungan Konstanta Pemodelan<sup>[52]</sup>

### 3.5 Analisis Sensitivitas

Pada tahap ini, parameter - parameter yang telah diestimasi melalui prosedur *fitting*, kemudian diuji sensitivitasnya. Analisis sensitivitas bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh perubahan nilai parameter kinetik yang diperoleh dengan perubahan profil konsentrasi zat-zat yang terlibat dari

sintesis biodiesel enzimatis. Hal ini dilakukan dengan mengubah nilai satu konstanta sebesar 50% lebih rendah dan 50% lebih tinggi dari nilai estimasi tanpa mengubah nilai konstanta yang lain. Kemudian dibandingkan nilai jumlah kuadrat error relatif,  $S$ , dari ketiga nilai konstanta tersebut. Melalui analisis ini dapat diketahui apakah nilai konstanta yang diperoleh merupakan nilai yang tepat, hal tersebut ditandai dengan dihasilkannya nilai  $S$  terkecil<sup>[52]</sup>.

Hasil analisis sensitivitas yang diperoleh akan membantu menunjukkan tingkat kebenaran hasil estimasi, dan menjadi bahan dalam menyimpulkan apakah model yang digunakan telah cukup baik dalam memodelkan suatu reaksi, sebelum akhirnya dilakukan simulasi berdasarkan konstanta yang telah diperoleh tersebut, untuk memperkirakan profil konsentrasi biodiesel pada kondisi operasi yang belum dilakukan dalam penelitian.



## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Model kinetika berbasis Michaelis - Menten merupakan model yang mampu mendeskripsikan perilaku reaktan dan produk yang terlibat selama reaksi. Parameter kinetika diperoleh dengan melakukan *fitting* kurva berdasarkan model kinetika terhadap data kinetika sintesis biodiesel secara enzimatik. Data yang digunakan diperoleh dari beberapa hasil penelitian mengenai sintesis biodiesel secara enzimatik, baik data yang diperoleh dari skripsi yang berasal dari Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia, maupun hasil yang telah dipublikasikan dalam jurnal. Berikut ini merupakan pemetaan data – data sintesis biodiesel secara enzimatik, yang digunakan dalam penelitian.

**Tabel 4.1** Pemetaan Data Kinetika Berdasarkan Bentuk Enzim (Lipase)

Data	Enzim (Lipase)	
	Suspensi	Immobilisasi
1 <sup>(27)</sup>	<i>Candida rugosa</i>	
2 <sup>(27)</sup>		<i>Candida rugosa</i>
3 <sup>(27)</sup>		<i>Candida antarctica</i> / Novozym 435
4 <sup>(10)</sup>	<i>Candida rugosa</i>	
5 <sup>(10)</sup>		<i>Candida rugosa</i>
6 <sup>(11)</sup>	<i>Porcine pancreatic</i>	
7 <sup>(11)</sup>		<i>Porcine pancreatic</i>
8 <sup>(5)</sup>		<i>Candida antarctica</i> / Novozym 435

#### 4.1 MODEL KINETIKA BERBASIS MICHAELIS - MENTEN

##### 4.1.1 Fitting Kurva dan Estimasi Parameter

Dalam melakukan estimasi parameter - parameter kinetika, data - data hasil penelitian yang diperoleh diolah berdasarkan prosedur *fitting* dengan menggunakan model kinetika yang telah dibuat, dalam rangka mencari parameter-parameter kinetika secara simultan menggunakan metode runge kutta orde empat yang dievaluasi dengan metode simplex. Berikut merupakan data hasil eksperimen sintesis biodiesel rute non alkohol, beserta hasil plot antara data hasil eksperimen dengan data yang diperoleh melalui pemodelan berbasis Michaelis – Menten, yang ditunjukkan pada **Gambar 4.1 – 4.8**.

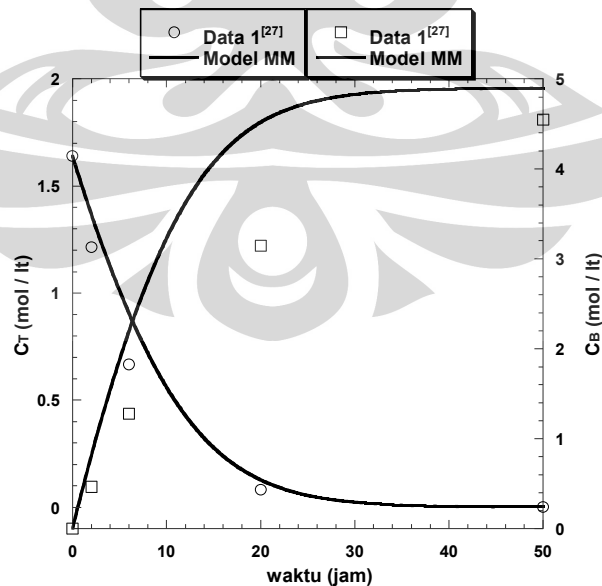
**Data 1** <sup>[27]</sup>.

Data eksperimen untuk melakukan *fitting* diperoleh dari hasil eksperimen S. Marno (2008). Eksperimen dilakukan dengan menggunakan biokatalis *Candida rugosa* lipase dalam bentuk tersuspensi pada sintesis biodiesel rute non alkohol. Substrat yang digunakan berupa minyak sawit dan metil asetat, dengan rasio mol reaktan = 1 : 12, pada suhu reaksi  $T = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$  dalam waktu  $t = 50$  jam. Konsentrasi enzim yang digunakan sebesar 4% wt dari substrat campuran minyak sawit dan metil asetat (gr enzim/gr larutan).

**Tabel 4.2** Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis *Candida rugosa* Lipase dalam Bentuk Tersuspensi Menggunakan Substrat Minyak Sawit <sup>[27]</sup>.

<b>t (jam)</b>	<b><math>C_T</math> (mol/Lt)</b>	<b><math>C_B</math> (mol/Lt)</b>
0	1.640000	0.000000
0.5	1.521499	0.120810
2	1.214942	0.466072
6	0.666774	1.278399
12	0.271090	2.239321
20	0.081651	3.146246
30	0.018219	3.865019
50	0.000907	4.547560

Dengan melakukan *fitting* terhadap data diatas dengan menggunakan model kinetika Michaelis – Menten, maka dihasilkan:



**Gambar 4.1** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 1 <sup>[27]</sup>

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.3** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 1 <sup>[27]</sup>.

Parameter	Nilai	Error	Parameter	Nilai	Error
$V_{MAX}$	2.8052E-01	1.8850	$K_M$	1.6052E+00	1.8850

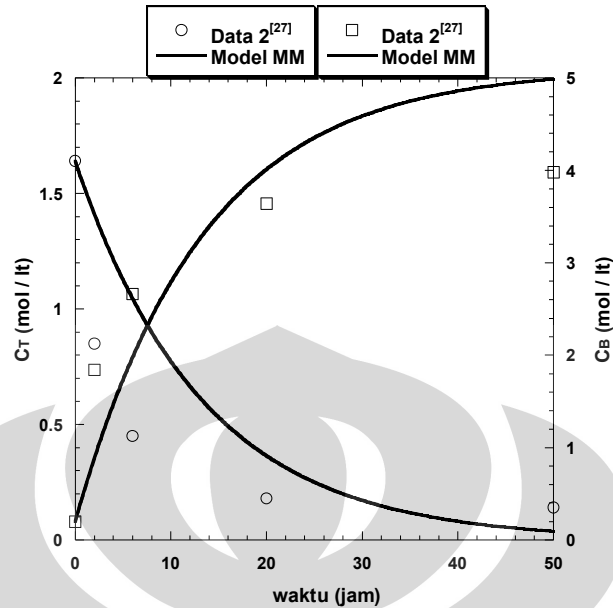
**Data 2** <sup>[27]</sup>.

Data eksperimen untuk melakukan *fitting* diperoleh dari hasil eksperimen S. Marno (2008). Eksperimen dilakukan dengan menggunakan biokatalis *Candida rugosa* lipase terimmobilisasi metode adsorpsi pada sintesis biodiesel rute non alkohol. Substrat yang digunakan berupa minyak sawit dan metil asetat, dengan rasio mol reaktan = 1 : 12, pada suhu reaksi  $T = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$  dalam waktu  $t = 50$  jam. Konsentrasi enzim yang digunakan sebesar 4% wt dari substrat campuran minyak sawit dan metil asetat (gr enzim/gr larutan) <sup>[27]</sup>.

**Tabel 4.4** Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis *Candida rugosa* Lipase Terimmobilisasi Metode Adsorpsi Menggunakan Substrat Minyak Sawit <sup>[27]</sup>.

t (jam)	$C_T$ (mol/Lt)	$C_B$ (mol/Lt)
0	1.640000	0.200000
0.5	1.260000	1.220000
2	0.850000	1.840000
6	0.450000	2.660000
12	0.250000	3.150000
20	0.180000	3.640000
30	0.170000	3.850000
50	0.170000	3.980000

Dengan melakukan *fitting* terhadap data diatas dengan menggunakan model kinetika Michaelis – Menten, maka dihasilkan:



**Gambar 4.2** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 2<sup>[27]</sup>

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.5** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 2<sup>[27]</sup>.

Parameter	Nilai	Error	Parameter	Nilai	Error
$V_{MAX}$	4.2364E+02	5.5843	$K_M$	5.6345E+03	5.5843

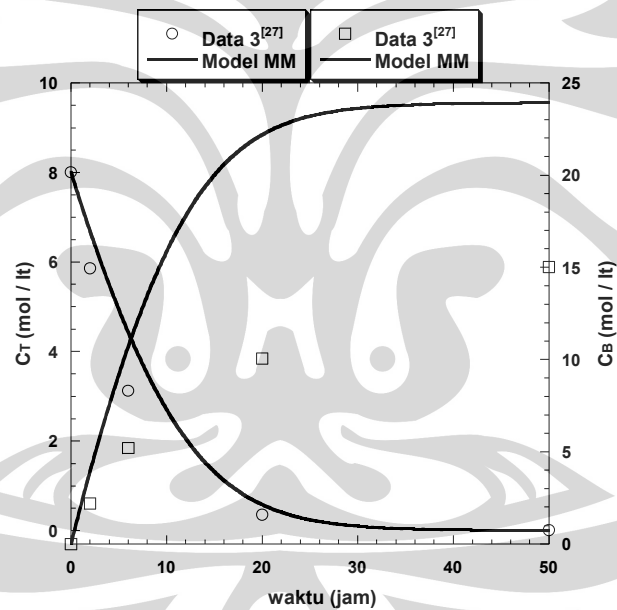
### Data 3<sup>[27]</sup>.

Data eksperimen untuk melakukan *fitting* diperoleh dari hasil eksperimen S. Marno (2008). Eksperimen dilakukan dengan menggunakan biokatalis *Candida antartica* lipase / Novozym 435 terimmobilisasi metode adsorpsi pada sintesis biodiesel rute non alkohol. Substrat yang digunakan berupa minyak sawit bekas pakai (jelantah) dan metil asetat, dengan rasio mol reaktan = 1 : 12, pada suhu reaksi  $T = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$  dalam waktu  $t = 50$  jam. Konsentrasi enzim yang digunakan sebesar 4% wt dari substrat campuran minyak sawit dan metil asetat (gr enzim/gr larutan)<sup>[27]</sup>.

**Tabel 4.6** Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis *Candida antartica* Lipase (Novozym 435) Terimmobilisasi pada *Acrylic Resin* dalam Bentuk Sol-Gel Menggunakan Substrat Minyak Jelantah <sup>[27]</sup>.

<b>t (jam)</b>	<b>C<sub>T</sub> (mol/Lt)</b>	<b>C<sub>B</sub> (mol/Lt)</b>
0	8.007000	0.000000
0.5	7.403747	0.605995
2	5.853245	2.195344
6	3.127882	5.206017
12	1.221887	7.868716
20	0.348930	10.054610
30	0.072840	12.104230
50	0.003174	15.017000

Dengan melakukan *fitting* terhadap data diatas dengan menggunakan model kinetika Michaelis – Menten, maka dihasilkan:



**Gambar 4.3** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 3<sup>[27]</sup>

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.7** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 3<sup>[27]</sup>.

<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>	<b>Error</b>	<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>	<b>Error</b>
<b>V<sub>MAX</sub></b>	1.2858E+00	3.6430	<b>K<sub>M</sub></b>	6.9720E+00	3.6430



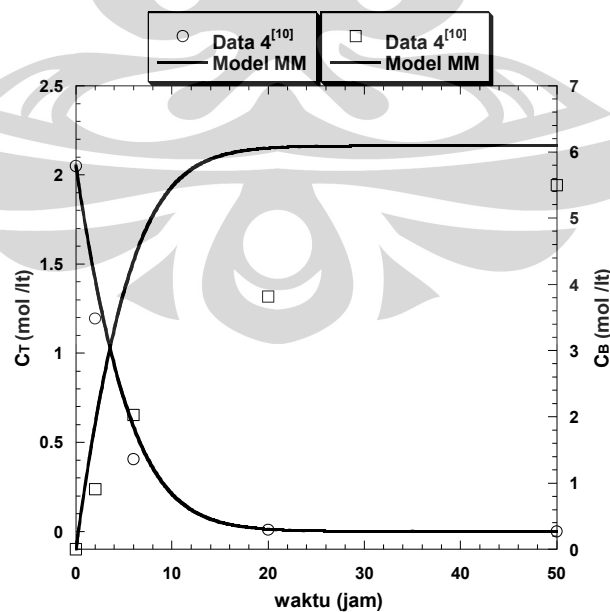
**Data 4** <sup>[10]</sup>.

Data eksperimen untuk melakukan *fitting* diperoleh dari hasil eksperimen M. Ekky Rizkiyadi (2008). Eksperimen dilakukan dengan menggunakan biokatalis *Candida rugosa* lipase dalam bentuk tersuspensi pada sintesis biodiesel rute non alkohol. Substrat yang digunakan berupa minyak sawit (jelantah) dan metil asetat, dengan rasio mol reaktan = 1 : 12, pada suhu reaksi  $T = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$  dalam waktu  $t = 50$  jam. Konsentrasi enzim yang digunakan sebesar 4% wt dari substrat campuran minyak sawit (jelantah) dan metil asetat (gr enzim/gr larutan) <sup>[10]</sup>.

**Tabel 4.8** Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis *Candida rugosa* Lipase dalam Bentuk Tersuspensi Menggunakan Substrat Minyak Jelantah <sup>[10]</sup>.

<b>t</b> <b>(jam)</b>	<b>C<sub>T</sub></b> <b>(mol/Lt)</b>	<b>C<sub>B</sub></b> <b>(mol/Lt)</b>
0	2.0494214	0.0000000
0.5	1.7906121	0.2617583
2	1.1942968	0.9078746
6	0.4055778	2.0289343
12	0.0802633	2.9931530
20	0.0092564	3.8165542
30	0.0006221	4.5253671
50	0.0000028	5.4953275

Dengan melakukan *fitting* terhadap data diatas dengan menggunakan model kinetika Michaelis – Menten, maka dihasilkan:



**Gambar 4.4** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 4 <sup>[10]</sup>

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.9** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 4<sup>[10]</sup>.

Parameter	Nilai	Error	Parameter	Nilai	Error
$V_{MAX}$	8.8753E-01	2.6345	$K_M$	3.0869E+00	2.6345

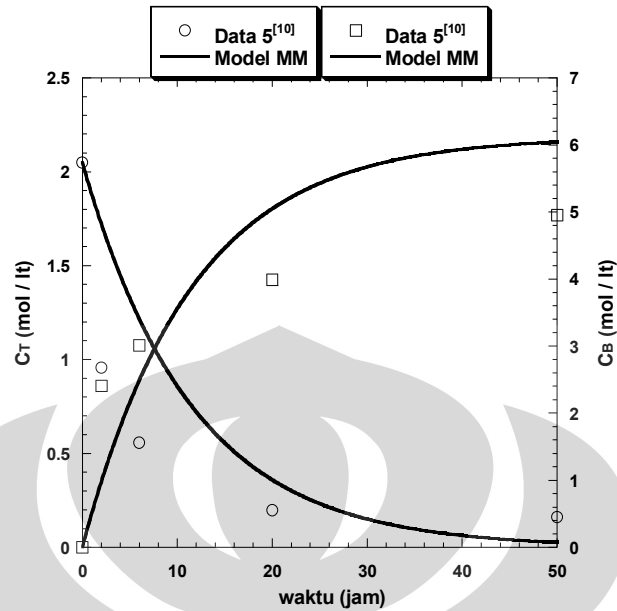
**Data 5** <sup>[10]</sup>.

Data eksperimen untuk melakukan *fitting* diperoleh dari hasil eksperimen M. Ekky Rizkiyadi (2008). Eksperimen dilakukan dengan menggunakan biokatalis *Candida rugosa* lipase terimmobilisasi metode adsorpsi pada sintesis biodiesel rute non alkohol. Substrat yang digunakan berupa minyak sawit (jelantah) dan metil asetat, dengan rasio mol reaktan = 1 : 12, pada suhu reaksi  $T = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$  dalam waktu  $t = 50$  jam. Konsentrasi enzim yang digunakan sebesar 4% wt dari substrat campuran minyak sawit (jelantah) dan metil asetat (gr enzim/gr larutan) <sup>[10]</sup>.

**Tabel 4.10**Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis *Candida rugosa* Lipase Terimmobilisasi Metode Adsorpsi Menggunakan Substrat Minyak Jelantah <sup>[10]</sup>.

t (jam)	$C_T$ (mol/Lt)	$C_B$ (mol/Lt)
0	2.0494214	0.0000000
0.5	1.5039355	1.3134409
2	0.9562120	2.4058764
6	0.5568442	3.0116639
12	0.2751487	3.4830096
20	0.1954023	3.9840301
30	0.1729492	4.3531059
50	0.1611658	4.9527620

Dengan melakukan *fitting* terhadap data diatas dengan menggunakan model kinetika Michaelis – Menten, maka dihasilkan:



**Gambar 4.5** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 5<sup>[10]</sup>

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.11** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 5<sup>[10]</sup>.

Parameter	Nilai	Error	Parameter	Nilai	Error
$V_{MAX}$	1.9107E+02	6.9063	$K_M$	2.1930E+03	6.9063

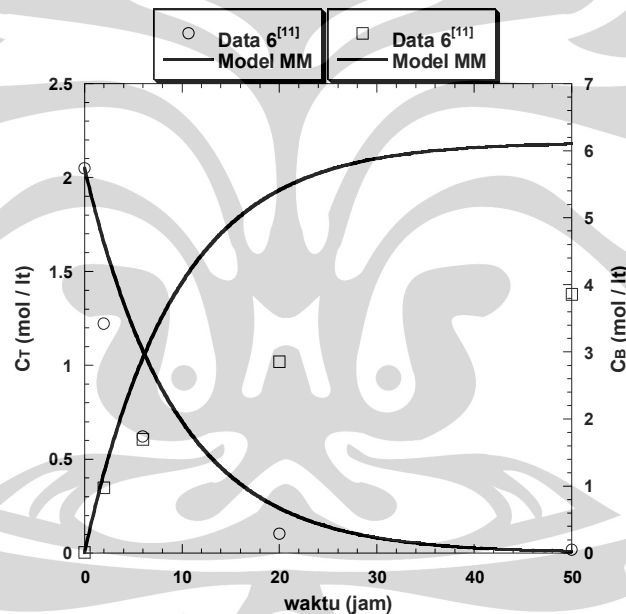
#### Data 6<sup>[11]</sup>.

Data eksperimen untuk melakukan *fitting* diperoleh dari hasil eksperimen Risan A. Surendro (2008). Eksperimen dilakukan dengan menggunakan biokatalis *Porcine pancreatic* lipase dalam bentuk tersuspensi pada sintesis biodiesel rute non alkohol. Substrat yang digunakan berupa minyak sawit (jelantah) dan metil asetat, dengan rasio mol reaktan = 1 : 12, pada suhu reaksi  $T = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$  dalam waktu  $t = 50$  jam. Konsentrasi enzim yang digunakan sebesar 4% wt dari substrat campuran minyak sawit (jelantah) dan metil asetat (gr enzim/gr larutan)<sup>[11]</sup>.

**Tabel 4.12** Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis *Porcine pancreatic* Lipase dalam Bentuk Tersuspensi Menggunakan Substrat Minyak Jelantah<sup>[11]</sup>.

<b>t (jam)</b>	<b>C<sub>T</sub> (mol/Lt)</b>	<b>C<sub>B</sub> (mol/Lt)</b>
0	2.049400	0.012800
0.5	1.684200	0.257900
2	1.221500	0.978400
6	0.620900	1.699600
12	0.217000	2.356000
20	0.103000	2.856500
30	0.053400	3.289800
50	0.017250	3.860100

Dengan melakukan *fitting* terhadap data diatas dengan menggunakan model kinetika Michaelis – Menten, maka dihasilkan:



**Gambar 4.6** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 6<sup>[11]</sup>

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.13** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 6<sup>[11]</sup>.

<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>	<b>Error</b>	<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>	<b>Error</b>
<b>V<sub>MAX</sub></b>	2.1243E+02	3.9949	<b>K<sub>M</sub></b>	1.9799E+03	3.9949

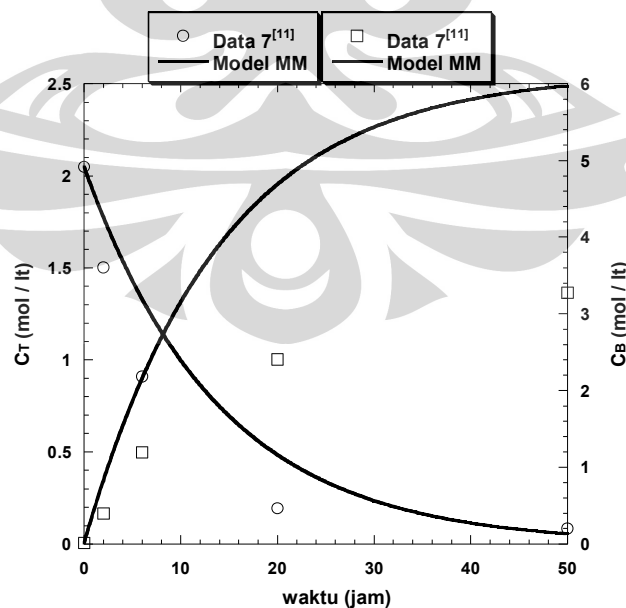
**Data 7<sup>[11]</sup>.**

Data eksperimen untuk melakukan *fitting* diperoleh dari hasil eksperimen Risan A. Surendro (2008). Eksperimen dilakukan dengan menggunakan biokatalis *Porcine pancreatic* lipase terimmobilisasi metode adsorpsi pada sintesis biodiesel rute non alkohol. Substrat yang digunakan berupa minyak sawit (jelantah) dan metil asetat, dengan rasio mol reaktan = 1 : 12, pada suhu reaksi  $T = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$  dalam waktu  $t = 50$  jam. Konsentrasi enzim yang digunakan sebesar 4% wt dari substrat campuran minyak sawit (jelantah) dan metil asetat (gr enzim/gr larutan)<sup>[11]</sup>.

**Tabel 4.14** Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis *Porcine pancreatic* Lipase Terimmobilisasi Metode Adsorpsi Menggunakan Substrat Minyak Jelantah<sup>[11]</sup>.

<b>t (jam)</b>	<b><math>C_T</math> (mol/Lt)</b>	<b><math>C_B</math> (mol/Lt)</b>
0	2.049400	0.012800
0.5	1.876200	0.282800
2	1.501200	0.398000
6	0.910400	1.193520
12	0.446800	1.904360
20	0.194500	2.406500
30	0.116400	2.814050
50	0.085100	3.274700

Dengan melakukan *fitting* terhadap data diatas dengan menggunakan model kinetika Michaelis – Menten, maka dihasilkan:



**Gambar 4.7** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 7<sup>[11]</sup>

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.15** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 7<sup>[11]</sup>.

Parameter	Nilai	Error	Parameter	Nilai	Error
$V_{MAX}$	3.0100E+01	4.3437	$K_M$	4.1658E+02	4.3437

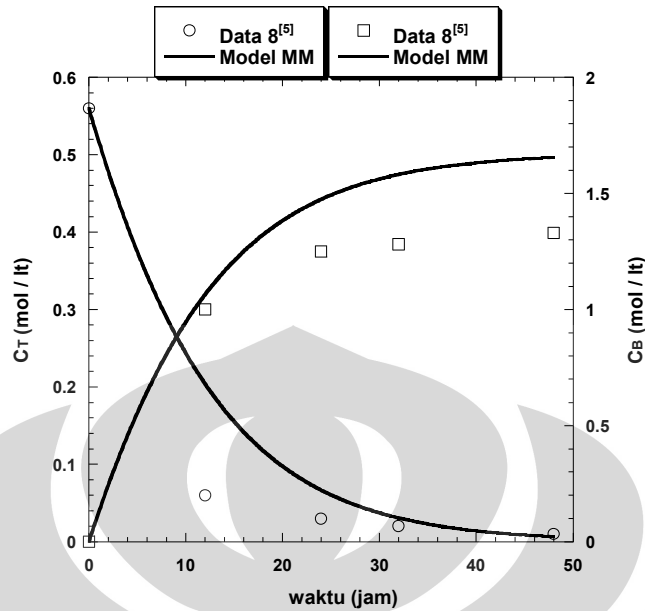
**Data 8** <sup>[5]</sup>.

Data eksperimen untuk melakukan *fitting* diperoleh dari hasil eksperimen Xu, et. al. (2008). Eksperimen dilakukan dengan menggunakan biokatalis *Candida antarctica* lipase / Novozym 435 terimmobilisasi metode adsorpsi pada sintesis biodiesel rute non alkohol. Substrat yang digunakan berupa minyak kedelai dan metil asetat, dengan rasio mol reaktan = 1 : 12, pada suhu reaksi T = 40 °C dalam waktu t = 48 jam. Konsentrasi enzim yang digunakan sebesar 5% wt dari substrat campuran minyak kedelai dan metil asetat (gr enzim/gr larutan) <sup>[5]</sup>.

**Tabel 4.16** Data Hasil Sintesis Biodiesel Rute Non – Alkohol Menggunakan Biokatalis *Candida antarctica* Lipase (Novozym 435) Terimmobilisasi Metode Adsorpsi Menggunakan Substrat Minyak Kedelai <sup>[5]</sup>.

t (jam)	$C_T$ (mol/Lt)	$C_B$ (mol/Lt)
0	0.560	0.000
6	0.200	0.600
12	0.060	1.000
24	0.030	1.250
32	0.020	1.280
40	0.020	1.290
48	0.010	1.330

Dengan melakukan *fitting* terhadap data diatas dengan menggunakan model kinetika Michaelis – Menten, maka dihasilkan:



**Gambar 4.8** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 8<sup>[5]</sup>

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.17** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten terhadap Data 8<sup>[5]</sup>.

Parameter	Nilai	Error	Parameter	Nilai	Error
$V_{MAX}$	1.9966E-01	2.7224	$K_M$	2.0189E+00	2.7224

*Fitting* kurva dilakukan guna mengestimasi nilai parameter – parameter yang tak diketahui pada persamaan model, dimana terdapat dua buah parameter yang tidak diketahui pada model kinetika Michaelis – Menten, yaitu  $K_M$  dan  $V_{MAX}$ . Nilai parameter  $V_{MAX}$  yang diperoleh berdasarkan hasil *fitting* kurva memiliki nilai yang bervariasi mulai dari 1.9966E-01 hingga 4.2364E+02, dimana nilai terkecil tersebut diperoleh pada data 8<sup>[5]</sup>, sedangkan nilai terbesar diperoleh pada data 2<sup>[27]</sup>. Sedangkan nilai parameter  $K_M$  yang diperoleh berdasarkan hasil *fitting* kurva memiliki nilai yang bervariasi mulai dari 1.6052E+00 hingga 5.6345E+03, dimana konstanta terkecil tersebut diperoleh pada data 1<sup>[27]</sup>, sedangkan konstanta terbesar diperoleh pada data 2<sup>[27]</sup>. Kecilnya nilai konstanta mengindikasikan bahwa laju reaksi yang diwakili oleh konstanta tersebut berlangsung lambat. Sedangkan nilai konstanta yang besar mengindikasikan bahwa laju reaksi yang diwakili oleh konstanta tersebut berlangsung cepat. Semakin cepat laju reaksi pembentukan produk, maka semakin cepat

dihasilkannya produk biodiesel. Karena  $K_M$  merupakan parameter yang mewakili konstanta – konstanta dari laju reaksi elementer yaitu  $k_1$ ,  $k_{-1}$ , dan  $k_2$  maka lebih besarnya nilai  $K_M$  yang diperoleh terhadap nilai  $V_{max}$  pada masing – masing data mengindikasikan bahwa konstanta laju reaksi pembentukan produk memiliki nilai yang sangat kecil bila dibandingkan dengan konstanta laju reaksi pembentukan kompleks enzim – substrat.

Pengaruh dari nilai konstanta tersebut terhadap laju reaksi pembentukan biodiesel, dapat dilihat pada kurva hasil plot antara data eksperimen terhadap model kinetika Michaelis – Menten yang ditunjukkan oleh garis lurus **Gambar 4.1 – 4.8**. Pada kurva tersebut terlihat, bahwa data yang menghasilkan konstanta dengan nilai yang lebih besar memiliki laju reaksi pembentukan biodiesel yang lebih besar pula, hal tersebut ditandai dengan peningkatan kurva yang signifikan dalam jangka waktu kurang dari 10 jam.

Berdasarkan teori tentang laju reaksi pembentukan produk, suatu produk yang terbentuk akan semakin besar jika waktu reaksi yang digunakan semakin lama. Kurva-kurva hasil pemodelan yang terbentuk hampir seluruhnya mengikuti bentuk kurva hiperbola yang rectangular seperti pada umumnya mekanisme reaksi enzimatik. Peningkatan konsentrasi biodiesel yang dihasilkan pada hampir setiap kurva di setiap penambahan waktu masih terlihat meningkat. Peningkatan konsentrasi biodiesel tersebut mengindikasikan bahwa kemampuan enzim untuk mengikat substrat masih sangat efektif dan tingkat aktivitas enzim belum mengalami penurunan. Ada kemungkinan kurva dari produk yang dihasilkan akan turun, saat inilah kinerja enzim sebagai biokatalis sudah terdeaktivasi, dimana enzim sudah tidak mampu mengikat substrat dan enzim sudah mengalami kejenuhan.

Melalui **Gambar 4.1 – 4.8**, dapat dilihat laju pembentukan biodiesel terhadap waktu, dimana banyaknya jumlah konsentrasi biodiesel yang terbentuk dalam waktu tertentu dapat menunjukkan kinerja optimal dari suatu enzim sebagai biokatalis. Dari profil laju reaksi konsentrasi trigliserida (mol/L) yang terbentuk maka didapatkan *trend* profil konsentrasi yang terus menurun. Penurunan konsentrasi trigliserida menunjukkan adanya laju reaksi pembentukan produk selama reaksi. Hal ini terlihat dari profil konsentrasi biodiesel yang semakin terus



meningkat seiring dengan meningkatnya waktu. Berdasarkan teori laju reaksi dengan semakin lamanya waktu reaksi maka produk yang dihasilkan akan semakin besar. Konsentrasi biodiesel pun akan terus mengalami peningkatan seiring berjalannya reaksi untuk kemudian akhirnya konstan yang menandakan reaksi telah mencapai kesetimbangan.

Melalui **Gambar 4.1 – 4.8** dapat dilihat pula pada saat konsentrasi trigliserida awal mulai meningkat, terjadi penurunan laju reaksi yang dipertimbangkan akibat adanya biodiesel yang telah dihasilkan yang kemudian menghambat reaksi. Inhibitor berupa produk dapat mengurangi atau bahkan menghentikan aktivitas katalitik enzim dalam reaksi pembentukan produk selanjutnya, karena produk yang terbentuk ini dapat menghalangi atau mengganggu *active site*, yang dapat mencegah molekul substrat untuk terikat pada enzim, dimana produk biodiesel yang terbentuk dapat “berkompetisi” dengan substrat untuk berikatan dengan *active site* pada enzim. Selain dapat mengganggu *active site* enzim, inhibitor berupa produk dapat pula menempel pada bagian enzim lainnya yang mampu mengubah bentuk enzim, sehingga substrat tidak mampu “mengenali” enzim.

Secara umum, berdasarkan kurva yang dihasilkan melalui pemodelan menunjukkan hasil yang tidak terlalu sesuai antara data percobaan dengan hasil pemodelan. Dapat dilihat penyimpangan yang cukup besar terjadi pada beberapa kurva hasil pemodelan biodiesel yang terbentuk, dimana produk biodiesel yang terbentuk tidak terlalu besar, sedangkan berdasarkan hasil pemodelan seharusnya produk biodiesel yang dihasilkan dapat lebih besar. Konsentrasi biodiesel yang dihasilkan dari perhitungan dengan model ini mempunyai nilai yang lebih tinggi, disebabkan karena berdasarkan fenomena yang terjadi pada eksperimen, enzim yang diimmobilisasi menyebabkan enzim tidak dapat mengkonversi substrat trigliserida secara total menjadi biodiesel sehingga konsentrasi trigliserida pada eksperimen di atas tidak habis dan cenderung tetap setelah reaksi mencapai waktu 50 jam. Oleh karena itu dibutuhkan suatu model yang mempertimbangkan laju adsorpsi pada reaksi biokatalitik dengan metode immobilisasi.

### 4.1.2 Analisis Sensitivitas

Setelah nilai konstanta kinetika reaksi diperoleh, selanjutnya dilakukan analisis sensitivitas untuk menguji sensitivitas dan kelayakan terhadap konstanta - konstanta yang diperoleh melalui *fitting* antara hasil perhitungan dengan hasil eksperimen untuk menilai *reliability* dari model yang digunakan.

**Tabel 4.18** Analisis Sensitivitas Konstanta Laju Reaksi Menggunakan Pemodelan Michealis – Menten

Data 1 <sup>[27]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
V <sub>MAX</sub>	1.4026E-01	10.6681	465.9542	K <sub>M</sub>	8.0260E-01	12.7863	578.3248
	2.8052E-01	1.8850	min		1.6052E+00	1.8850	min
	4.2078E-01	10.7958	472.7284		2.4078E+00	7.1261	278.0482
Data 2 <sup>[27]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
V <sub>MAX</sub>	2.1182E+02	9.1309	63.5096	K <sub>M</sub>	2.8173E+03	8.3606	49.7151
	4.2364E+02	5.5843	min		5.6345E+03	5.5843	min
	6.3546E+02	6.5507	17.3049		8.4518E+03	6.8915	23.4081
Data 3 <sup>[27]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
V <sub>MAX</sub>	6.4291E-01	11.9047	226.7836	K <sub>M</sub>	3.4860E+00	14.4310	296.1330
	1.2858E+00	3.6430	min		6.9720E+00	3.6430	min
	1.9287E+00	12.7200	249.1643		1.0458E+01	8.9813	146.5384
Data 4 <sup>[10]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
V <sub>MAX</sub>	4.4376E-01	14.9595	467.8279	K <sub>M</sub>	1.5435E+00	18.4212	599.2236
	8.8753E-01	2.6345	min		3.0869E+00	2.6345	min
	1.3313E+00	15.5616	490.6829		4.6304E+00	12.4233	371.5605
Data 5 <sup>[10]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
V <sub>MAX</sub>	9.5534E+01	10.8416	56.9814	K <sub>M</sub>	1.0965E+03	9.8269	42.2893
	1.9107E+02	6.9063	min		2.1930E+03	6.9063	min
	2.8660E+02	7.9094	14.5247		3.2894E+03	8.2589	19.5854
Data 6 <sup>[11]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
V <sub>MAX</sub>	1.0622E+02	10.4567	161.7487	K <sub>M</sub>	9.8994E+02	12.2999	207.8881
	2.1243E+02	3.9949	min		1.9799E+03	3.9949	min
	3.1865E+02	7.6505	91.5051		2.9698E+03	7.5305	88.5014
Data 7 <sup>[11]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
V <sub>MAX</sub>	1.5050E+01	7.7233	77.8043	K <sub>M</sub>	2.0829E+02	10.5145	142.0631
	3.0100E+01	4.3437	min		4.1658E+02	4.3437	min
	4.5150E+01	6.7094	54.4621		6.2487E+02	5.9507	36.9966
Data 8 <sup>[5]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
V <sub>MAX</sub>	9.9828E-02	11.4328	319.9493	K <sub>M</sub>	1.0095E+00	12.4341	356.7278
	1.9966E-01	2.7224	min		2.0189E+00	2.7224	min
	2.9949E-01	8.0051	194.0440		3.0284E+00	6.8489	151.5719

Analisis sensitivitas dilakukan dengan mengubah nilai satu konstanta sebesar 50% lebih rendah dan 50% lebih tinggi dari nilai estimasi tanpa mengubah nilai konstanta yang lain. Kemudian dibandingkan nilai jumlah kuadrat error relatif,  $S$ , dari ketiga nilai konstanta tersebut, dimana suatu konstanta dikatakan sensitif (baik) jika memiliki nilai  $S$  minimum terhadap nilai konstanta yang telah disimpangkan. Melalui analisis ini dapat diketahui apakah nilai konstanta yang diperoleh merupakan nilai yang tepat.

Model kinetika Michaelis – Menten memiliki dua buah konstanta yang akan diuji sensitifitasnya, yaitu  $K_M$  dan  $V_{MAX}$ . Hasil analisis sensitivitas berdasarkan model kinetika Michaelis – Menten ditunjukkan pada **Tabel 4.18**.

Pada tabel terlihat bahwa seluruh nilai  $S$  dari konstanta  $K_M$  pada seluruh data menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan  $S_{min}$  yang diperoleh berdasarkan hasil *fitting*, dimana nilai deviasi yang diperoleh berkisar antara 19.5854 hingga 599.2236. Deviasi minimum sebesar 19.5854 terdapat pada data  $6^{[10]}$  yaitu nilai  $S$  yang disimpangkan menjadi 50% lebih besar. Sedangkan untuk nilai  $S$  yang disimpangkan menjadi 50% lebih kecil pada data  $6^{[10]}$  tersebut, diperoleh deviasi sebesar 42.2893. Lebih rendahnya deviasi nilai error ( $S$ ) yang dihasilkan pada data  $6^{[10]}$ , menunjukkan bahwa konstanta  $K_M$  pada data tersebut kurang sensitif dibandingkan dengan konstanta  $K_M$  pada data yang lainnya. Sedangkan nilai deviasi maksimum sebesar 599.2236, terdapat pada data  $5^{[10]}$  yaitu nilai  $S$  yang disimpangkan menjadi 50% lebih kecil. Sedangkan untuk nilai  $S$  yang disimpangkan menjadi 50% lebih besar pada data  $5^{[10]}$  tersebut, diperoleh deviasi sebesar 371.5605. Lebih besarnya deviasi nilai error ( $S$ ) yang dihasilkan pada data  $5^{[10]}$ , menunjukkan bahwa konstanta  $K_M$  pada data tersebut lebih sensitif dibandingkan dengan konstanta  $K_M$  pada data yang lainnya.

Pada tabel terlihat pula bahwa seluruh nilai  $S$  dari  $V_{MAX}$  pada seluruh data menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan  $S_{min}$  yang diperoleh berdasarkan hasil *fitting*, dimana nilai deviasi yang diperoleh berkisar antara 14.5247 hingga 490.6829. Deviasi minimum sebesar 14.5247 juga terdapat pada data  $6^{[10]}$  yaitu nilai  $S$  yang disimpangkan menjadi 50% lebih besar. Sedangkan untuk nilai  $S$  yang disimpangkan menjadi 50% lebih kecil pada data  $6^{[10]}$  tersebut, diperoleh deviasi sebesar 56.9814. Lebih rendahnya deviasi nilai error ( $S$ ) yang

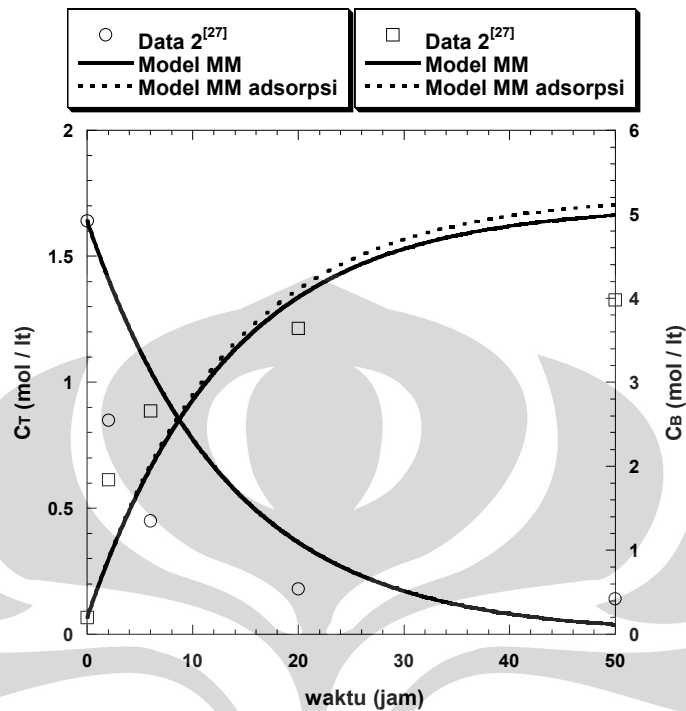
dihasilkan pada data 6<sup>[10]</sup>, menunjukkan bahwa  $V_{MAX}$  pada data tersebut kurang sensitif dibandingkan dengan konstanta  $V_{MAX}$  pada data yang lainnya. Sedangkan nilai deviasi maksimum sebesar 490.6829, terdapat pada data 5<sup>[10]</sup> yaitu nilai S yang disimpangkan menjadi 50% lebih besar. Sedangkan untuk nilai S yang disimpangkan menjadi 50% lebih kecil pada data 5<sup>[10]</sup> tersebut, diperoleh deviasi sebesar 467.8279. Lebih besarnya deviasi nilai error (S) yang dihasilkan pada data 5<sup>[10]</sup>, menunjukkan bahwa konstanta  $V_{MAX}$  pada data tersebut lebih sensitif dibandingkan dengan konstanta  $V_{MAX}$  pada data yang lainnya.

Untuk itu, berdasarkan hasil analisis sensitivitas dari keseluruhan konstanta yang diperoleh berdasarkan model kinetika Michaelis – Menten, menunjukkan *reliability* dari konstanta hasil pemodelan.

## 4.2 Model Kinetika Berbasis Michaelis–Menten Adsorpsi

### 4.2.1 *Fitting* Kurva Dan Estimasi Parameter

Model Michaelis – Menten adsorpsi ini diturunkan agar mampu menjelaskan adanya mekanisme reaksi di bulk dan permukaan katalis sehingga mampu menggambarkan dengan baik mekanisme yang direpresentasikan oleh data hasil eksperimen sintesis biodiesel dengan biokatalis terimmobilisasi. Berikut merupakan hasil plot antara data hasil eksperimen dengan data yang diperoleh melalui pemodelan berbasis Michaelis – Menten adsorpsi, yang ditunjukkan pada **Gambar 4.9 – 4.13**.

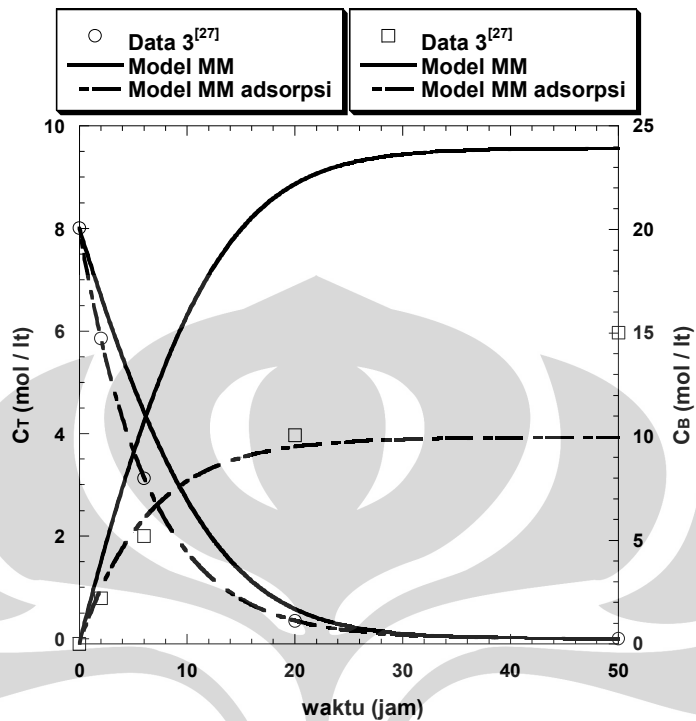
Data 2<sup>[27]</sup>

**Gambar 4.9** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis–Menten Adsorpsi terhadap Data 2<sup>[27]</sup>.

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.19** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten adsorpsi terhadap Data 2<sup>[27]</sup>.

Parameter	Nilai	Error	Parameter	Nilai	Error
$V_{\max}$	2.023E+02	5.5546	$K_S$	2.663E-02	5.5546
$K_M$	7.002E+01	5.5546	$K_B$	1.000E-10	5.5546

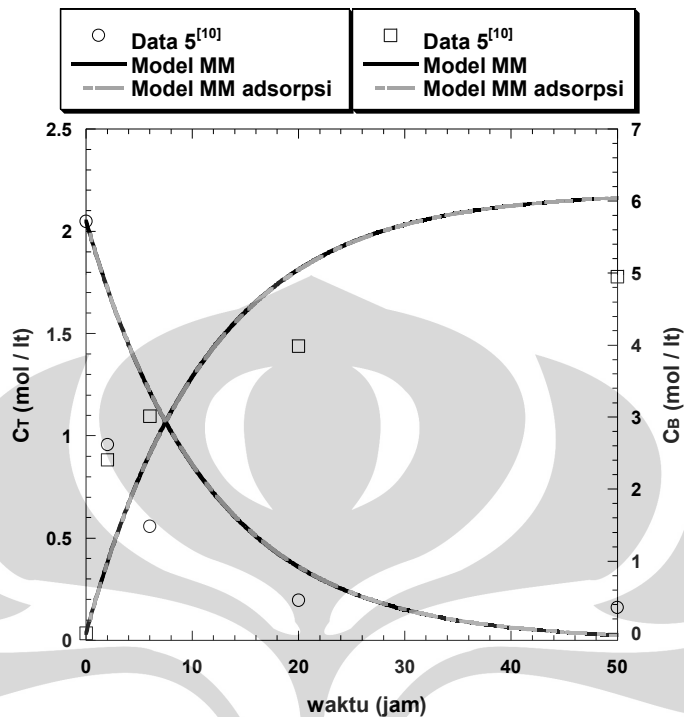
Data 3<sup>[27]</sup>

**Gambar 4.10** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis–Menten Adsorpsi terhadap Data 3<sup>[27]</sup>.

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.20** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten adsorpsi terhadap Data 3<sup>[27]</sup>.

Parameter	Nilai	Error	Parameter	Nilai	Error
$V_{\max}$	4.635E+02	0.3179	$K_S$	2.653E-04	0.3179
$K_M$	7.891E-01	0.3179	$K_B$	1.394E+00	0.3179

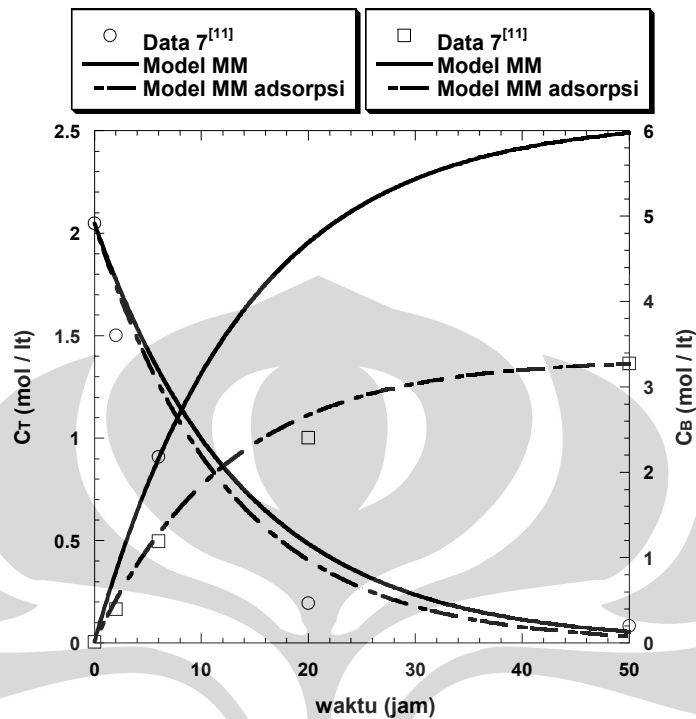
Data 5<sup>[10]</sup>

**Gambar 4.11** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis–Menten Adsorpsi terhadap Data 5<sup>[10]</sup>.

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.21** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten adsorpsi terhadap Data 5<sup>[10]</sup>.

Parameter	Nilai	Error	Parameter	Nilai	Error
$V_{\max}$	1.135E+03	6.9035	$K_S$	1.099E-04	6.9035
$K_M$	1.436E+00	6.9035	$K_B$	1.000E-10	6.9035

Data 7<sup>[11]</sup>

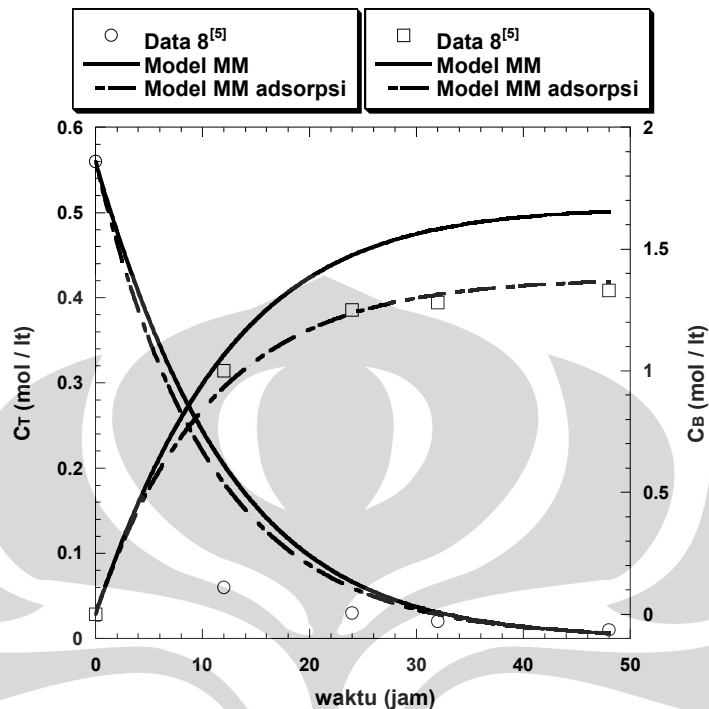
**Gambar 4.12** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis–Menten Adsorpsi terhadap Data 7<sup>[11]</sup>.

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.22** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten adsorpsi terhadap Data 7<sup>[11]</sup>.

Parameter	Nilai	Error	Parameter	Nilai	Error
$V_{max}$	1.382E+02	2.2783	$K_S$	5.154E-04	2.2783
$K_M$	8.773E-01	2.2783	$K_B$	8.610E-01	2.2783



Data 8<sup>[5]</sup>

**Gambar 4.13** Hasil Fitting Model Kinetika Michaelis–Menten Adsorpsi terhadap Data 8<sup>[5]</sup>.

Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* di atas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.23** Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika Michaelis – Menten adsorpsi terhadap Data 8<sup>[5]</sup>.

Parameter	Nilai	Error	Parameter	Nilai	Error
$V_{\max}$	8.208E+02	2.1542	$K_S$	1.041E-04	2.1542
$K_M$	9.138E-01	2.1542	$K_B$	2.098E-01	2.1542

Melalui prosedur *fitting* kurva, diperoleh parameter – parameter yang tidak diketahui dalam pemodelan kinetika Michaelis – Menten adsorpsi, yaitu  $K_M$ ,  $K_S$ ,  $K_B$ , dan  $V_{\max}$ , dimana  $K_S$  dan  $K_B$  masing – masing mewakili konstanta adsorpsi dari substrat dan produk biodiesel. Parameter yang diperoleh dari berbagai data penelitian menggunakan prosedur *fitting* tersebut ditunjukkan melalui **Tabel 4.19** – **4.23**. Pada nilai  $V_{\max}$  yang diperoleh berdasarkan hasil *fitting* kurva memiliki nilai yang bervariasi mulai dari 1.383E+02 hingga 1.135E+03, dimana nilai terkecil tersebut diperoleh pada data 7<sup>[11]</sup>, dan nilai terbesar diperoleh pada data 5<sup>[10]</sup>. Nilai konstanta  $K_M$  yang diperoleh berdasarkan hasil *fitting* kurva memiliki nilai yang bervariasi mulai dari 7.891E-01 hingga 7.002E+01, dimana konstanta

Universitas Indonesia

terkecil tersebut diperoleh pada data 3<sup>[27]</sup>, dan konstanta terbesar diperoleh pada data 2<sup>[27]</sup>. Sedangkan untuk nilai konstanta adsorpsi  $K_S$  yang diperoleh berdasarkan hasil *fitting* kurva memiliki nilai yang bervariasi mulai dari 1.041E-04 hingga 2.653E-04, dimana konstanta terkecil tersebut diperoleh pada data 8<sup>[5]</sup>, dan konstanta terbesar diperoleh pada data 3<sup>[27]</sup>. Untuk nilai konstanta adsorpsi  $K_B$  yang diperoleh berdasarkan hasil *fitting* kurva memiliki nilai yang bervariasi mulai dari 1.000E-10 hingga 1.394E+00, dimana konstanta terkecil tersebut diperoleh pada data 2<sup>[27]</sup>, 5<sup>[10]</sup> dan konstanta terbesar diperoleh pada data 3<sup>[27]</sup>. Kecilnya nilai konstanta mengindikasikan bahwa laju reaksi yang diwakili oleh konstanta tersebut berlangsung lambat. Sedangkan nilai konstanta yang besar mengindikasikan bahwa laju reaksi yang diwakili oleh konstanta tersebut berlangsung cepat. Besarnya nilai konstanta adsorpsi yang diperoleh mengindikasikan kecepatan adsorpsi suatu komponen.

Kurva hasil plot antara data eksperimen terhadap model kinetika Michaelis – Menten adsorpsi ditunjukkan oleh garis putus - putus pada **Gambar 4.9 – 4.13**. Melalui gambar tersebut dapat dilihat laju pembentukan biodiesel terhadap waktu, dimana banyaknya jumlah konsentrasi biodiesel yang terbentuk dalam waktu tertentu dapat menunjukkan kinerja optimal dari suatu enzim sebagai biokatalis. Dari profil laju reaksi konsentrasi trigliserida (mol/L) yang terbentuk maka didapatkan *trend* profil konsentrasi yang terus menurun. Penurunan konsentrasi trigliserida menunjukkan adanya laju reaksi pembentukan produk selama reaksi. Hal ini terlihat dari profil konsentrasi biodiesel yang semakin terus meningkat seiring dengan meningkatnya waktu. Berdasarkan teori laju reaksi dengan semakin lamanya waktu reaksi maka produk yang dihasilkan akan semakin besar.

Melalui **Gambar 4.9 – 4.13** dapat dilihat pula pada saat konsentrasi trigliserida awal mulai meningkat, terjadi penurunan laju reaksi yang dipertimbangkan akibat adanya biodiesel yang telah dihasilkan yang kemudian menghambat reaksi. Inhibitor berupa produk dapat mengurangi atau bahkan menghentikan aktivitas katalitik enzim dalam reaksi pembentukan produk selanjutnya, karena produk yang terbentuk ini dapat menghalangi atau mengganggu *active site*, yang dapat mencegah molekul substrat untuk terikat pada enzim, dimana produk biodiesel yang terbentuk dapat “berkompetisi” dengan substrat

untuk berikatan dengan *active site* pada enzim. Selain dapat mengganggu *active site* enzim, inhibitor berupa produk dapat pula menempel pada bagian enzim lainnya yang mampu mengubah bentuk enzim, sehingga substrat tidak mampu “mengenali” enzim.

Karena adsorpsi didasari pada kontak antara enzim dengan permukaan *support*, maka kecenderungan kurva pada data yang menggunakan lipase terimmobilisasi metode adsorpsi untuk terus mengalami peningkatan konsentrasi tersebut disebabkan oleh adanya sebagian *free* lipase yang tidak terikat secara sempurna pada *support*. Selain itu dapat pula akibat pengaruh luas kontak biokatalis dipermukaan *support* untuk mengikat substrat yang menyebabkan rendahnya konsentrasi biodiesel yang terbentuk dari immobilisasi metode adsorpsi. Perbedaan dapat dilihat melalui kurva laju pembentukan biodiesel dengan lipase terimmobilisasi metode adsorpsi pada data 2<sup>[27]</sup>, 3<sup>[27]</sup>, 5<sup>[10]</sup>, 7<sup>[11]</sup>, 8<sup>[5]</sup>, dimana terlihat bahwa pembentukan produk biodiesel masih terus mengalami peningkatan bahkan pada  $t = 50$  jam, jika dibandingkan dengan pembentukan produk biodiesel yang dihasilkan dengan menggunakan lipase tersuspensi pada data 1<sup>[27]</sup>, 3<sup>[27]</sup>, 4<sup>[5]</sup>, 5<sup>[10]</sup>, 7<sup>[11]</sup>, terlihat bahwa laju pembentukan produk biodiesel cenderung sudah konstan sebelum memasuki  $t = 50$  jam.

Dari **Gambar 4.9 – 4.13** terlihat bahwa kurva konsentrasi biodiesel yang dihasilkan melalui pemodelan dengan mekanisme Michaelis – Menten tanpa mempertimbangkan adanya faktor adsorpsi, yang ditunjukkan melalui garis lurus mempunyai nilai yang lebih tinggi pada akhir reaksi dibandingkan dengan kurva konsentrasi biodiesel yang dihasilkan melalui pemodelan dengan mekanisme Michaelis – Menten yang mempertimbangkan adanya faktor adsorpsi, yang ditunjukkan melalui garis putus – putus, dimana pada beberapa data cenderung untuk mendekati data eksperimen yang sebenarnya. Hal tersebut karena berdasarkan fenomena yang terjadi pada eksperimen, enzim yang diimmobilisasi menyebabkan enzim tidak dapat dapat mengkonversi substrat trigliserida secara total menjadi biodiesel, sehingga konsentrasi trigliserida pada eksperimen tidak habis dan cenderung tetap setelah reaksi mencapai waktu 50 jam. Oleh karena itu, model Michaelis – Menten adsorpsi digunakan untuk menjelaskan adanya fenomena reaksi di bulk dan permukaan katalis sehingga mampu menggambarkan

dengan baik fenomena yang direpresentasikan oleh data hasil eksperimen sintesis biodiesel dengan biokatalis terimmobilisasi, seperti yang ditunjukkan oleh garis putus – putus pada **Gambar 4.9 – 4.13**.

Secara umum, berdasarkan kurva yang dihasilkan melalui pemodelan menunjukkan hasil yang cukup sesuai antara data percobaan dengan hasil pemodelan menggunakan mekanisme Michaelis – Menten adsorpsi, tidak ditemukan penyimpangan yang terlalu signifikan pada beberapa data khususnya data 3<sup>[27]</sup>, 7<sup>[11]</sup>, 8<sup>[5]</sup>, hal tersebut menandakan bahwa pemodelan ini mampu menggambarkan laju reaksi pembentukan produk biodiesel dengan cukup baik. Hal tersebut ditunjukkan pula dengan hasil estimasi konstanta yang memiliki nilai kesalahan relatif yang sangat rendah untuk masing-masing data, seperti yang terlihat pada **Tabel 4.24**.

#### 4.2.2 Analisis Sensitivitas

Setelah nilai konstanta kinetika reaksi diperoleh, selanjutnya dilakukan analisis sensitivitas untuk menguji sensitivitas dan kelayakan terhadap konstanta - konstanta yang diperoleh melalui *fitting* antara hasil perhitungan dengan hasil eksperimen untuk menilai *reliability* dari model yang digunakan.

Setelah nilai konstanta kinetika reaksi diperoleh, selanjutnya dilakukan analisis sensitivitas untuk menguji sensitivitas dan kelayakan terhadap konstanta - konstanta yang diperoleh melalui *fitting* antara hasil perhitungan dengan hasil eksperimen untuk menilai *reliability* dari model yang digunakan.

Analisis sensitivitas dilakukan dengan mengubah nilai satu konstanta sebesar 50% lebih rendah dan 50% lebih tinggi dari nilai estimasi tanpa mengubah nilai konstanta yang lain. Kemudian dibandingkan nilai jumlah kuadrat error relatif,  $S$ , dari ketiga nilai konstanta tersebut, dimana suatu konstanta dikatakan sensitif (baik) jika memiliki nilai  $S$  minimum terhadap nilai konstanta yang telah disimpangkan. Melalui analisis ini dapat diketahui apakah nilai konstanta yang diperoleh merupakan nilai yang tepat.

Model kinetika Michaelis – Menten adsorpsi memiliki empat buah konstanta yang akan diuji sensitifitasnya, yaitu  $K_M$ ,  $K_S$ ,  $K_B$ , dan  $V_{MAX}$ . Hasil analisis sensitivitas berdasarkan model kinetika Michaelis – Menten adsorpsi ditunjukkan pada **Tabel 4.24**.

**Tabel 4.24** Analisis Sensitivitas Konstanta Laju Reaksi Menggunakan Pemodelan Michealis – Menten Adsorpsi

Data 2 <sup>[27]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
$V_{max}$	1.012E+02	9.0629	63.1590	$K_S$	1.331E-02	8.9962	61.9578
	2.023E+02	5.5546	min		2.663E-02	5.5546	min
	3.035E+02	6.5438	17.8078		3.994E-02	6.4896	16.8323
$K_M$	3.501E+01	8.3685	50.6584	$K_B$	5.000E-11	5.5546	2.305E-09
	7.002E+01	5.5546	min		1.000E-10	5.5546	min
	1.050E+02	6.8425	23.1848		1.500E-10	5.5546	4.204E-09
Data 3 <sup>[27]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
$V_{max}$	2.318E+02	10.0723	3067.9351	$K_S$	1.327E-04	10.0636	3065.1984
	4.635E+02	0.3179	min		2.653E-04	0.3179	min
	6.953E+02	9.9546	3030.8932		3.980E-04	9.9425	3027.0865
$K_M$	3.945E-01	15.7582	4856.2479	$K_B$	6.971E-01	1.0706	236.7305
	7.891E-01	0.3179	min		1.394E+00	0.3179	min
	1.184E+00	6.4996	1944.2447		2.091E+00	0.7692	141.9273
Data 5 <sup>[10]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
$V_{max}$	5.677E+02	10.8666	57.4067	$K_S$	5.494E-05	10.8657	57.3935
	1.135E+03	6.9035	min		1.099E-04	6.9035	min
	1.703E+03	7.8932	14.3365		1.648E-04	7.8930	14.3337
$K_M$	7.181E-01	9.8034	42.0057	$K_B$	5.000E-11	6.9035	1.727E-09
	1.436E+00	6.9035	min		1.000E-10	6.9035	min
	2.154E+00	8.2770	19.8953		1.500E-10	6.9035	1.170E-09
Data 7 <sup>[11]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
$V_{max}$	6.912E+01	7.8010	242.4093	$K_S$	2.577E-04	7.7949	242.1423
	1.382E+02	2.2783	min		5.154E-04	2.2783	min
	2.074E+02	4.4996	97.5027		7.731E-04	4.4960	97.3446
$K_M$	4.387E-01	8.2617	262.6300	$K_B$	4.305E-01	2.7106	18.9769
	8.773E-01	2.2783	min		8.610E-01	2.2783	min
	1.316E+00	4.6864	105.6989		1.291E+00	2.5464	11.7697
Data 8 <sup>[5]</sup>							
Parameter	Nilai	S	Deviasi	Parameter	Nilai	S	Deviasi
$V_{max}$	4.104E+02	10.8282	402.6586	$K_S$	5.203E-05	10.8275	402.6246
	8.208E+02	2.1542	min		1.041E-04	2.1542	min
	1.231E+03	7.3981	243.4290		1.561E-04	7.3970	243.3791
$K_M$	4.569E-01	12.6105	485.3912	$K_B$	1.049E-01	10.5804	391.1560
	9.138E-01	2.1542	min		2.098E-01	2.1542	min
	1.371E+00	6.6363	208.0647		3.147E-01	11.1326	416.7855

Pada tabel terlihat bahwa seluruh nilai S dari konstanta  $K_M$ ,  $K_S$ ,  $K_B$ , dan  $V_{MAX}$  pada seluruh data menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan  $S_{min}$  yang diperoleh berdasarkan hasil *fitting*, dimana nilai deviasi yang diperoleh untuk  $K_M$  berkisar antara 19.8953 hingga 4,856.2479. Deviasi minimum sebesar 19.8953 terdapat pada data 5<sup>[10]</sup> yaitu nilai S yang disimpangkan menjadi 50%

lebih besar. Sedangkan untuk nilai S yang disimpangkan menjadi 50% lebih kecil pada data tersebut, diperoleh deviasi sebesar 42.0057. Lebih rendahnya deviasi nilai error (S) yang dihasilkan pada data  $5^{[10]}$ , menunjukkan bahwa  $K_M$  pada data tersebut kurang sensitif dibandingkan dengan  $K_M$  pada data yang lainnya.

Nilai deviasi yang diperoleh untuk  $K_S$  berkisar antara 14.3337 hingga 3,065.1984. Deviasi minimum sebesar 14.3337 terdapat pada data  $5^{[10]}$  yaitu nilai S yang disimpangkan menjadi 50% lebih besar. Sedangkan untuk nilai S yang disimpangkan menjadi 50% lebih kecil pada data tersebut, diperoleh deviasi sebesar 57.3935. Lebih rendahnya deviasi nilai error (S) yang dihasilkan pada data  $5^{[10]}$ , menunjukkan bahwa  $K_S$  pada data tersebut kurang sensitif dibandingkan dengan  $K_S$  pada data yang lainnya.

Nilai deviasi yang diperoleh untuk  $K_B$  berkisar antara 1.170E-09 hingga 416.7855. Deviasi minimum sebesar 1.170E-09 terdapat pada data  $5^{[10]}$  yaitu nilai S yang disimpangkan menjadi 50% lebih besar. Sedangkan untuk nilai S yang disimpangkan menjadi 50% lebih kecil pada data tersebut, diperoleh deviasi sebesar 1.173E-09. Lebih rendahnya deviasi nilai error (S) yang dihasilkan pada data  $5^{[10]}$ , menunjukkan bahwa  $K_B$  pada data tersebut kurang sensitif dibandingkan dengan  $K_B$  pada data yang lainnya.

Nilai deviasi yang diperoleh untuk  $V_{MAX}$  berkisar antara 14.3365 hingga 3,067.9351. Deviasi minimum sebesar 14.3365 terdapat pada data  $5^{[10]}$  yaitu nilai S yang disimpangkan menjadi 50% lebih besar. Sedangkan untuk nilai S yang disimpangkan menjadi 50% lebih kecil pada data tersebut, diperoleh deviasi sebesar 57.4067. Lebih rendahnya deviasi nilai error (S) yang dihasilkan pada data  $5^{[10]}$ , menunjukkan bahwa konstanta  $V_{MAX}$  pada data tersebut kurang sensitif dibandingkan dengan konstanta  $V_{MAX}$  pada data yang lainnya.

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas konstanta pada berbagai data, diketahui bahwa data  $5^{[10]}$  memiliki sensitivitas yang lebih rendah dibandingkan dengan data lainnya. Sedangkan data yang memiliki sensitivitas paling baik ialah data  $3^{[27]}$ . Secara umum, berdasarkan hasil analisis sensitivitas dari keseluruhan konstanta yang diperoleh berdasarkan model kinetika Michaelis – Menten adsorpsi, menunjukkan *reliability* dari konstanta hasil pemodelan.

## BAB 5

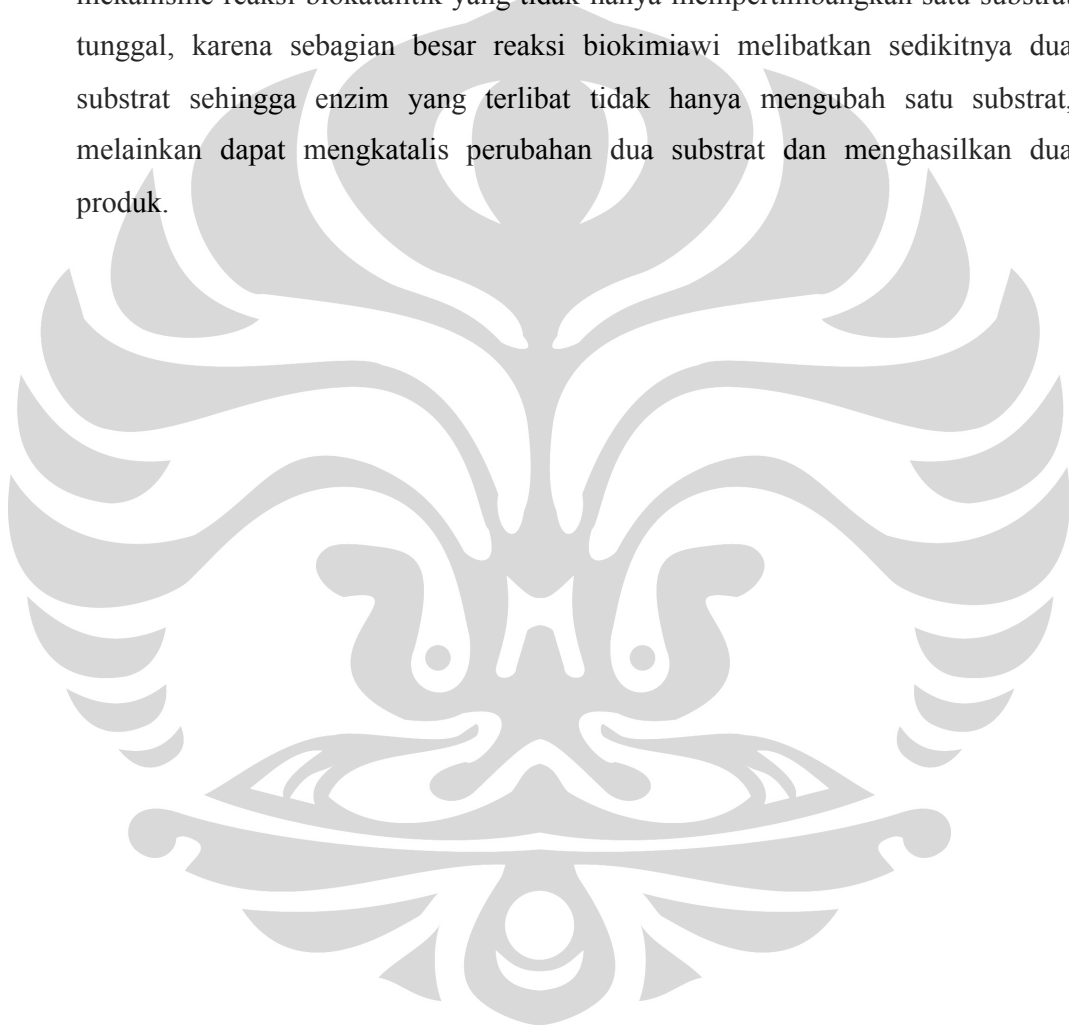
### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

- ▶ Pemodelan matematis untuk sintesis biodiesel menggunakan mekanisme Michaelis-Menten memiliki validitas yang belum cukup baik, khususnya dalam menggambarkan profil konsentrasi reaktan, dan produk dalam sintesis biodiesel rute non-alkohol dengan menggunakan biokatalis terimmobilisasi, hal tersebut dapat dilihat dari nilai error yang dihasilkan.
- ▶ Nilai error paling kecil untuk pemodelan Michaelis – Menten dihasilkan oleh data 1<sup>[27]</sup> dengan nilai 1.8850, dimana nilai parameter hasil estimasi yang dihasilkan yaitu  $V_{max}$  sebesar 2.8052E-01 dan  $K_M$  sebesar 1.6052E+00.
- ▶ Pemodelan matematis untuk sintesis biodiesel menggunakan mekanisme Michaelis-Menten dengan mempertimbangkan adanya faktor adsorpsi yang diaplikasikan pada data sintesis biodiesel dengan menggunakan biokatalis terimmobilisasi memiliki validitas yang lebih baik daripada model Michaelis-Menten yang tidak mempertimbangkan faktor adsorpsi, hal tersebut dapat dilihat dari nilai error yang dihasilkan.
- ▶ Nilai error paling kecil untuk pemodelan Michaelis – Menten adsorpsi dihasilkan oleh data 3<sup>[27]</sup> dengan nilai 0.3179, dimana nilai parameter hasil estimasi yang dihasilkan yaitu  $V_{max}$  sebesar 4.635E+02,  $K_M$  sebesar 7.891E-01,  $K_S$  sebesar 2.653E-04, dan  $K_B$  sebesar 1.394E+00.
- ▶ Secara umum, berdasarkan hasil analisis sensitivitas dari keseluruhan konstanta yang diperoleh baik berdasarkan model kinetika Michaelis – Menten yang mempertimbangkan adanya faktor adsorpsi maupun tanpa pertimbangan adanya faktor adsorpsi, menunjukkan sensitivitas yang cukup tinggi dari konstanta hasil pemodelan tersebut.

## 5.2 Saran

Pada dasarnya, reaksi dari suatu enzim dengan suatu substrat akan melibatkan pembentukan produk tengah (intermediate) yang kemudian beraksi kembali dengan substrat yang lain atau terdekomposisi untuk membentuk produk. Sehingga untuk mengetahui sifat dan perilaku dari reaksi enzimatik dalam sintesa biodiesel secara lebih valid, sebaiknya digunakan pemodelan menggunakan mekanisme reaksi biokatalitik yang tidak hanya mempertimbangkan satu substrat tunggal, karena sebagian besar reaksi biokimiawi melibatkan sedikitnya dua substrat sehingga enzim yang terlibat tidak hanya mengubah satu substrat, melainkan dapat mengkatalis perubahan dua substrat dan menghasilkan dua produk.





## DAFTAR ACUAN

- [1]. Tatang H. Soerawidjaja, *Membangun Industri Biodiesel Di Indonesia, Beberapa Skenario dan Persoalan Pengembangan yang Perlu Dicermati*, (Bandung, 2005).
- [2]. A. Suryana, *et al.*, *Prospek dan Arah Pengembangan Agribisnis Kelapa Sawit di Indonesia*, (Jakarta: Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian Republik Indonesia, 2005).
- [3]. Heri Hermansyah, dkk. (2008). "Pengembangan Rute Sintesis Biodiesel Non Alkohol Menggunakan Biokatalis: State of the Art". Depok: Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- [4]. Wei Du, *et al.* (2004). "Comparative Study on Lipase – Catalyzed Transformation of Soybean Oil for Biodiesel Production with Different Acyl Acceptor". *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 30(2004): 125–129.
- [5]. Yuanyuan Xu, Wei Du, and Dehua Liu. (2005). "Study on the Kinetics of Enzymatic Interesterification of Triglycerides for Biodiesel Production with Methyl Acetate as the Acyl Acceptor". *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 32(2005): 241–245.
- [6]. Sunil S. Bhagwat. (2005). "Transesterification of Substituted Ethanol-Modelling Studies". *Biochemical Engineering Journal*, 22 (2005) 253.259.
- [7]. Mukesh Kumar Modi. (2007). 'Lipase-Mediated Conversion of Vegetable Oils Into Biodiesel Using Ethyl Acetate as Acyl Acceptor'. *Bioresource Technology*, 98 (2007): 1260-1264.
- [8]. Heri Hermasnyah, dkk. (2008). "Sintesis Biodiesel Rute Non Alkohol Menggunakan *Candida rugosa* lipase dalam Bentuk Tersuspensi". Depok: Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- [9]. Heri Hermasnyah, dkk. (2008). "Sintesis Biodiesel Rute Non Alkohol Menggunakan *Candida rugosa* lipase yang diimobilisasi melalui Metode Adsorpsi". Depok: Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- [10]. M. Ekky Rizkiyadi, "Reaksi Interesterifikasi Minyak Jelantah dengan Metil Asetat Menggunakan Biokatalis *Candida rugosa* Lipase untuk Memproduksi Biodiesel", Skripsi, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.
- [11]. Risan A. Surendro, "Reaksi Interesterifikasi Minyak Jelantah dengan Metil Asetat Menggunakan Biokatalis *Porcine pancreatic* Lipase Untuk Memproduksi Biodiesel" Skripsi, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.
- [12]. Anonim. *Biodiesel Sebagai Pengganti Solar*. Diakses tanggal 15 Januari 2009, dari terranet. <http://www.terranet.or.id>

- [13]. Haryanto, Bode, *Bahan Bakar Alternatif Biodiesel*, (Jurusan Teknik Kimia Universitas Sumatera Utara: USU digital library, 2002).
- [14]. Adustinus Zandy, *Intensifikasi Proses Produksi Biodiesel*, (Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2002).
- [15]. Anjana Srivastava and Prasad Ram, *Triglycerides-Based Diesel Fuels*, (PERGAMON, 1999).
- [16]. Fangrui Ma and Milford A. Hanna. (1999). "Biodiesel Production: A Review". *Bioresourche Technology*, 70 (1999): 1-15.
- [17]. Tomi Hendartono. 2005. *Pemanfaatan Minyak dari Tumbuhan untuk Pembuatan Biodiesel*. Diakses tanggal 28 maret 2007.
- [18]. Ulf Schuchardt. et al. (1998). "Transesterfication of Vegetable Oils: a Review". *J. Braz. Chem. Sec.*, Vol. 9 No. 1, 199-210.1998.
- [19]. Endang Sukara. *Pemanfaatn Biodiversity*. Diakses tanggal 5 Mei 2009. <http://www.biotek.lipi.go.id>
- [20]. Johan Nasiri. *Biodiesel : Upaya Mengurangi Ketergantungan Minyak Bumi*. Diakses tanggal 15 Januari 2009. <http://www.sentrapolimer.com>
- [21]. Takaaki Watanabe, et al. (2003). "Optimization of Reaction Conditions for the Production of DAG Using Immobilized 1,3-Regiospecific Lipase Lipozyme RM IM". *JAACS*, 80 (2003): 1201-1207.
- [22]. Hideki Fukuda, A. Kondo, and H. Noda. (2001). "Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils". *J. Biosci. Bioeng.*, 92(2001):405-416.
- [23]. A. R. MacRae. (1983). "Lipase Catalysed Interesterification of Oil and Fats". *JAOC*, 60(2):291-294.
- [24]. G. Vicente, M. Martinez, and J. Aracil. (2004). "Integrated Biodiesel Production: A Comparison of Different Homogeneous Catalysts Systems." *Bioresourche Technology*, 92(3) 297-305 (2004).
- [25]. Anonim. *Tips Memilih Enzim Sebagai Ingridien Pangan*. Diakses tanggal 20 Februari 2009. <http://pipimm.org/cetak>
- [26]. Anonim. *Ilustrasi Metode Immobilisasi Enzim*. Diakses tanggal 15 Maret 2009. <http://www.lsbu.ac.uk/biology/enztech/immmethod.html>
- [27]. Septhian Marno, "Interesterifikasi Minyak Kelapa Sawit dengan Metil Asetat Menggunakan Biokatalis untuk Memproduksi Biodiesel", Skripsi, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik UI, Depok 2008.
- [28]. Valerie Dossat, Didier Combes, and Alain Marty. (2002). "Lipase-catalysed Transesterification of High Oleic Sunflower Oil". *Enzyme and Microbial Technology*, 30 (2002): 90-94.
- [29]. P. J. Worsfold, *Classification and Chemical Characteristic of Immobilized Enzymes*, (United Kingdom: Department of Environmental Sciences, University of Plymouth, Plymouth, Devon,1995).

- [30]. Knothe, *et al.*, *Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels Oil Research. National Center for Agricultural Utilization Research.* (Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Peoria, 1996).
- [31]. Supranto, *Pengaruh Suhu dan Perbandingan Reaksi pada Pembuatan Metil Ester Biodiesel dari Destilat Asam Lemak Minyak Sawit*, (Pusat Studi Energi Universitas Gadjah Mada, 2002).
- [32]. G. Vicente, Martinez, M., & Aracil, J. (2004). "Integrated Biodiesel Production: A Comparison of Different Homogeneous Catalysts Systems." *Bioresource Technology*, 92(3) 297-305 (2004).
- [33]. M. Diasakou, A. Louloudi, and N. Papayannakos. (1997). "Kinetics of the Non – catalytic Transesterification of Soybean Oil". *Elsevier Science*, 16-2361 (98) 25-8.
- [34]. K.S. Karmee, et al. (2004). "Kinetic Study of the Base - Catalyzed Transesterification of Monoglycerides from Pongamia Oil". *JAOCS*, 8 (2004): 425 -430.
- [35]. D. Kusdiana, and S. Saka. (1999). "Kinetics of Transesterification in Rapeseed Oil to Biodiesel Fuel as Treated in Supercritical Methanol". *Elsevier Science, Fuel* 80 (2001): 693±698.
- [36]. G. Vicente, *et al.* (2005). "Kinetics of Sunflower Oil Methanolysis". *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44 (2005): 5447-5454.
- [37]. G. Vicente, Mercedes Martinez, and Jose Aracil. (2006). "Kinetics of *Brassica carinata* Oil Methanolysis". *Energy and Fuels*, 2006, 20, 1722-1726.
- [38]. H. Nouredini and D.Zhu. (1997). "Kinetics of Transesterification of Soybean Oil". *JAOCS*, 74 (1997): 1457–1463.
- [39]. José A., Colucci, Ernesto E. Borrero, and Fabio Alape. (2005). "Biodiesel from an Alkaline Transesterification Reaction of Soybean Oil Using Ultrasonic Mixing". *JAOCS*, 82(2005): 525–530.
- [40]. D. Darnoko. and Munir Cheryan. (2000). Kinetics of Palm Oil Transesterification in a Batch Reactor". *JAOCS*, 77(2000): 1263–1267.
- [41]. Sulaiman Al-Zuhair. (2005). "Production of Biodiesel by Lipase-Catalyzed Transesterification of Vegetable Oils: A Kinetics Study". *Biotechnol. Prog.*, 21(2005): 1442-1448.
- [42]. Benjamas Cheirsilpa, Aran H-Kittikuna, and Suchart Limkatanyub. (2008). "Impact of Transesterification Mechanisms on the Kinetic Modeling of Biodiesel Production by Immobilized Lipase". *Biochemical Engineering Journal* , xxx (2008) xxx–xxx.
- [43]. Sulaiman Al-Zuhair. (2006). "The Effect of Substrate Concentrations on the Production of Biodiesel by Lipase-catalysed Transesterification of Vegetable Oils". *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 81 (2006): 299–30.

- [44]. Li Deng, *et al.* 2003. "Enzymatic production of Fatty Acid Alkyl Esters with a Lipase Preparation from *Candida Sp.* 99-125". *Eur. J. Lipid Sci. Technol*, 105 (2003) 727-734.
- [45]. Heri Hermansyah, dkk. (2009). "Kinetic Model Based on Ping Pong Bi-Bi Mechanism for Enzymatic Interesterification to Produce Biodiesel". Depok: Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- [46]. Oznur Kose, *et al.* "Immobilized *Candida antarctica* lipase-catalyzed alcoholysis of cotton seed oil in a solvent-free medium". *Bioresource Technology*, 83 (2002) 125-129.
- [47]. C.K.Torres, *et al.* "Lipase – Catalyzed Ethanolysis of Borage Oil: A Kinetic Study". *Biotechnol. Prog*, 20 ( 2004), 756- 763.
- [48]. Nevena Ognjanovic, *et. al.* "Enzymatic Conversion of Sunflower Oil to Biodiesel in a Solvent- Free System Process Optimization and the immobilized system stability". *Bioresource Technology*, 100 (2009) 5146-5154.
- [49]. H. Zeng, *et al.* "Characterization of the Lipase Immobilized on Mg-Al Hidrotalcite for Biodiesel Process". *Biochemistry*, 44 (2009) 791 – 798.
- [50]. M.G. De Paola, *et al.* "Factor Analysis of Transesterification Reaction of Waste Oil for Biodiesel Production". *Bioresource Technology*, 100 (2009) 5126 - 5131.
- [51]. G.N. Kraai, *et al.* "Kinetic Study on the *Rhizomucor mieher* lipase Catalized Esterification Reaction of Oelic Acid with 1-Butanol in a Biphasic System. *Biochemical Engineering Journal*, 41 (2008) 87 – 94.
- [52]. Heri Hermansyah, *et al.* (2006). "Mathematical Model for Stepwise Hydrolysis of Triolein using *Candida rugosa* lipase in Biphasic oil – Water System". *Biochemical Engineering Journal*, 31(2006): 125-132.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Zuhair, Sulaiman. (2005). "Production of Biodiesel by Lipase-Catalyzed Transesterification of Vegetable Oils: A Kinetics Study". *Biotechnol. Prog.*, 21(2005): 1442-1448.
- Al-Zuhair, Sulaiman. (2006). "The Effect of Substrate Concentrations on the Production of Biodiesel by Lipase-catalysed Transesterification of Vegetable Oils". *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 81 (2006): 299–30.
- Anonim. *Biodiesel*. Diakses tanggal 15 Januari 2009, dari Wikipedia online. <http://id.wikipedia.org/wiki/biodiesel>
- Anonim. *Biodiesel Sebagai Pengganti Solar*. Diakses tanggal 15 Januari 2009, dari terranet. <http://www.terranet.or.id>
- Anonim. *Tips Memilih Enzim Sebagai Ingridien Pangan*. Diakses tanggal 20 Februari 2009. <http://pipimm.org/cetak>
- Anonim. *Ilustrasi Metode Immobilisasi Enzim*. Diakses tanggal 15 Maret 2009. <http://www.lsbu.ac.uk/biology/enztech/immmethod.html>
- Bhagwat, Sunil S. (2005). "Transesterification of Substituted Ethanol-Modelling Studies". *Biochemical Engineering Journal*, 22 (2005) 253.259.
- Blanch W, Harvey, and Douglas Clark S, *Biochemical Engineering* (New York: Marcel Decker, Inc., 1997).
- Boyd, Mike. *Biodiesel in British Columbia Feasibility Study Report*. Diakses tanggal 22 Maret 2009, dari scribd. <http://www.scribd.com>
- Cheirsilp, Benjamas, Aran H-Kittikuna, and Suchart Limkatanyub. (2008). "Impact of Transesterification Mechanisms on the Kinetic Modeling of Biodiesel Production by Immobilized Lipase". *Biochemical Engineering Journal*, xxx (2008) xxx-xxx.
- Colucci, José A., Ernesto E. Borrero, and Fabio Alape. (2005). "Biodiesel from an Alkaline Transesterification Reaction of Soybean Oil Using Ultrasonic Mixing". *JAACS*, 82(2005): 525–530.
- Darnoko, D., and Munir Cheryan. (2000). Kinetics of Palm Oil Transesterification in a Batch Reactor". *JAACS*, 77(2000): 1263–1267.
- Deng, Li, *et al.* 2003. "Enzymatic production of Fatty Acid Alkyl Esters with a Lipase Preparation from *Candida Sp.* 99-125". *Eur. J. Lipid Sci. Technol*, 105 (2003) 727–734.
- Diasakou, M., A. Louloudi, and N. Papayannakos. (1997). "Kinetics of the Non – catalytic Transesterification of Soybean Oil". *Elsevier Science*, 16-2361 (98) 25-8.
- Dossat, Valerie, Didier Combes, and Alain Marty. (2002). "Lipase-catalysed Transesterification of High Oleic Sunflower Oil". *Enzyme and Microbial Technology*, 30 (2002): 90–94.

- Du Wei, *et al.* (2004). "Comparative Study on Lipase-Catalyzed Transformation of Soybean Oil for Biodiesel Production with Different Acyl Acceptors". *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 30 (2004): 125–129.
- Fukuda, H, A. Kondo, and H. (2001) Noda. *Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils*. *J. Biosci. Bioeng.*, 92(2001): 405–416.
- Haryanto, Bode, *Bahan Bakar Alternatif Biodiesel*, (Jurusan Teknik Kimia Universitas Sumatera Utara: USU digital library, 2002).
- Hendartono, Tomi. 2005. *Pemanfaatan Minyak dari Tumbuhan untuk Pembuatan Biodiesel*. Diakses tanggal 28 maret 2007.
- Hermansyah, Heri, dkk. (2009). "Kinetic Model Based on Ping Pong Bi-Bi Mechanism for Enzymatic Interesterification to Produce Biodiesel". Depok: Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- Hermansyah, Heri, et al. (2006). "Mathematical Model for Stepwise Hydrolysis of Triolein using *Candida rugosa* lipase in Biphasic oil – Water System". *Biochemical Engineering Journal*, 31(2006): 125–132.
- Hermansyah, Heri, dkk. (2008). "Pengembangan Rute Sintesis Biodiesel Non Alkohol Menggunakan Biokatalis: State of the Art". Depok: Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- Hermansyah, Heri, dkk. (2008). "Sintesis Biodiesel Rute Non Alkohol Menggunakan *Candida rugosa* lipase dalam Bentuk Tersuspensi". Depok: Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- Hermansyah, Heri, dkk. (2008). "Sintesis Biodiesel Rute Non Alkohol Menggunakan *Candida rugosa* lipase yang diimobilisasi melalui Metode Adsorpsi". Depok: Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- Kaieda, Masaru *et al.* (1999). "Biodiesel Fuel Production from Plant Oil Catalyzed by *Rhizopus oryzae* Lipase on a Water-Containing System Without an Organic Solvent". *Journal Of Bioscience And Bioengineering*, Vol. 88, No. 6, 627-631
- Kaieda, M., Samukawa T, Kondo A, and Fukuda H. (2001). "Effect of Methanol and Water Contents on Production of Biodiesel Fuel from Plant Oil Catalyzed by Various Lipases in a Solvent-Free System". *J Biosci. Bioeng.*, 91(2001): 12–5.
- Karmee, K.S., et al. (2004). "Kinetic Study of the Base - Catalyzed Transesterification of Monoglycerides from Pongamia Oil". *JAOCs*, 8 (2004): 425 -430.
- Khan Karl, Adam, *Kinetics and Catalyst Development*, (Brisbane-Queensland: Departement of Chemical Engineering University of Queensland, 2002).
- Knothe, et al. *Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels Oil Research. National Center for Agricultural Utilization Research*. (Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Peoria, 1996).

- Kose, Ozgur, *et al.* (2002). "Immobilized *Candida antarctica* lipase-catalyzed alcoholysis of cotton seed oil in a solvent-free medium". *Bioresource Technology*, 83 (2002) 125–129.
- Kusdiana, D., and S. Saka. (1999). "Kinetics of Transesterification in Rapeseed Oil to Biodiesel Fuel as Treated in Supercritical Methanol". *Elsevier Science, Fuel* 80 (2001): 693±698.
- Kraai, G.N. *et al.* "Kinetic Study on the *Rhizomucor mieher* lipase Catalyzed Esterification Reaction of Oleic Acid with 1-Butanol in a Biphasic System. *Biochemical Engineering Journal*, 41 (2008) 87 – 94.
- Ma, Fangrui dan Milford A. Hanna. (1999). "Biodiesel Production: A Review". *Bioresourche Technology*, 70 (1999) 1-15.
- MacRae, A.R. (1983). "Lipase Catalysed Interesterification of Oil and Fats". *JAOAC*, 60(2):291-294.
- Modi, Mukesh Kumar. (2007). 'Lipase-Mediated Conversion of Vegetable Oils Into Biodiesel Using Ethyl Acetate as Acyl Acceptor'. *Bioresource Technology*, 98 (2007) 1260-1264.
- Nasiri, Johan. *Biodiesel : Upaya Mengurangi Ketergantungan Minyak Bumi*. Diakses tanggal 15 Januari 2009. <http://www.sentrapolimer.com>
- Noureddini, H. and D.Zhu. (1997). "Kinetics of Transesterification of Soybean Oil". *JAOCS*, 74(1997): 1457–1463.
- Noureddini, H. *et al.* (2005). "Immobilized *Pseudomonas cepacia* lipase for Biodiesel Fuel Production from Soybean Oil". *Bioresource Technology*, 96(2005): 769-777.
- Ognjanovic, Nevena. *et al.* "Enzymatic Conversion of Sunflower Oil to Biodiesel in a Solvent- Free System Process Optimization and the immobilized system stability". *Bioresource Technology*, 100 (2009) 5146-5154.
- Paola, M.G. De. *et al.* "Factor Analysis of Transesterification Reaction of Waste Oil for Biodiesel Production". *Bioresource Technology*, 100 (2009) 5126 - 5131.
- Rizkiyadi, M. Ekky, "Reaksi Interesterifikasi Minyak Jelantah dengan Metil Asetat Menggunakan Biokatalis *Candida rugosa* Lipase untuk Memproduksi Biodiesel", Skripsi, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.
- Schuchardt, Ulf. *et al.* (1998). "Transesterification of Vegetable Oils: a Review". *J. Braz. Chem. Sec.*, Vol. 9 No. 1, 199-210.1998.
- Marno, Septhian, "Interesterifikasi Minyak Kelapa Sawit dengan Metil Asetat Menggunakan Biokatalis untuk Memproduksi Biodiesel", Skripsi, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik UI, Depok 2008.
- Shimada, Y., *et al.*(1999). "Conversion of Vegetable Oil to Biodiesel Using Immobilized *Candida Antarctica* Lipase". *JAOCS*, 76(7):789-793.1999.

- Soerawidjaja, Tatang H., *Membangun Industri Biodiesel di Indonesia, Beberapa Skenario dan Persoalan Pengembangan yang Perlu Dicermati*. (Bandung, 2005).
- Srivastava, Anjana and Prasad Ram, *Triglycerides-Based Diesel Fuels*, (PERGAMON, 1999).
- Sukara, Endang. *Pemanfaatn Biodiversity*. Diakses tanggal 5 Mei 2009. <http://www.biotek.lipi.go.id>
- Supranto, *Pengaruh Suhu dan Perbandingan Reaksi pada Pembuatan Metil Ester Biodiesel dari Destilat Asam Lemak Minyak Sawit*, (Pusat Studi Energi Universitas Gadjah Mada, 2002).
- Surendro, Risan A., "Reaksi Interesterifikasi Minyak Jelantah dengan Metil Asetat Menggunakan Biokatalis *Porcine pancreatic* Lipase Untuk Memproduksi Biodiesel" Skripsi, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.
- Suryana, A., et al., *Prospek dan Arah Pengembangan Agribisnis Kelapa Sawit di Indonesia*, (Jakarta: Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian Republik Indonesia, 2005).
- Torres, C.K., et al. "Lipase – Catalyzed Ethanolysis of Borage Oil: A Kinetic Study". *Biotechnol. Prog.*, 20 (2004), 756- 763.
- Tambun, Rondang, *Proses Pembuatan Asam Lemak Secara Langsung dari Buah Kelapa Sawit*, (Sumatera: USU digital library, 2002).
- Vicente, G., Martinez, M., & Aracil, J. (2004). "Integrated Biodiesel Production: A Comparison of Different Homogeneous Catalysts Systems." *Bioresource Technology*, 92(3) 297-305 (2004).
- Vicente, G., et al. (2005). "Kinetics of Sunflower Oil Methanolysis". *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44 (2005): 5447-5454.
- Vicente, G., Mercedes Martinez, and Jose Aracil. (2006). "Kinetics of *Brassica carinata* Oil Methanolysis". *Energy and Fuels*, 2006, 20, 1722-1726.
- Watanabe, Takaaki, et al. (2003). "Optimization of Reaction Conditions for the Production of DAG Using Immobilized 1,3-Regiospecific Lipase Lipozyme RM IM". *JAOCs*, 80 (2003): 1201-1207.
- Worsfold, P. J., *Classification and Chemical Characteristic of Immobilized Enzymes*, (United Kingdom: Department of Environmental Sciences, University of Plymouth, Plymouth, Devon, 1995).
- Xu Y, Wei Du, and Dehua Liu. (2005). "Study on the Kinetics of Enzymatic Interesterification of Triglycerides for Biodiesel Production with Methyl Acetate as the Acyl Acceptor". *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 32(2005): 241–245.
- Zandy, Adustinus, *Intensifikasi Proses Produksi Biodiesel*, (Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2002).
- Zeng, H. et al. "Characterization of the Lipase Immobilized on Mg-Al Hidrotalcite for Biodiesel Process". *Biochemistry*, 44 (2009) 791 – 798.



## LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil *Fitting* Menggunakan Model Michaelis – MentenData 1<sup>[27]</sup>

t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)
0.00	1.6400000	0.0000000												
0.10	1.6258541	0.0423465	10.10	0.5526890	3.2514435	20.10	0.1256247	4.5249230	30.10	0.0233240	4.8293797	40.10	0.0041120	4.8865220
0.20	1.6117691	0.0845099	10.20	0.5455390	3.2727896	20.20	0.1236039	4.5309398	30.20	0.0229257	4.8305647	40.20	0.0040409	4.8867334
0.30	1.5977453	0.1264894	10.30	0.5384582	3.2939282	20.30	0.1216134	4.5368665	30.30	0.0225340	4.8317297	40.30	0.0039711	4.8869410
0.40	1.5837828	0.1682843	10.40	0.5314465	3.3148600	20.40	0.1196527	4.5427043	30.40	0.0221489	4.8328751	40.40	0.0039025	4.8871451
0.50	1.5698821	0.2098938	10.50	0.5245036	3.3355856	20.50	0.1177214	4.5484544	30.50	0.0217704	4.8340011	40.50	0.0038350	4.8873457
0.60	1.5560433	0.2513170	10.60	0.5176293	3.3561059	20.60	0.1158192	4.5541177	30.60	0.0213982	4.8351082	40.60	0.0037687	4.8875428
0.70	1.5422667	0.2925531	10.70	0.5108233	3.3764215	20.70	0.1139457	4.5596955	30.70	0.0210323	4.8361966	40.70	0.0037036	4.8877365
0.80	1.5285526	0.3336015	10.80	0.5040855	3.3965332	20.80	0.1121005	4.5651889	30.80	0.0206726	4.8372666	40.80	0.0036396	4.8879269
0.90	1.5149012	0.3744612	10.90	0.4974155	3.4164417	20.90	0.1102833	4.5705990	30.90	0.0203189	4.8383185	40.90	0.0035767	4.8881140
1.00	1.5013129	0.4151316	11.00	0.4908131	3.4361478	21.00	0.1084937	4.5759268	31.00	0.0199712	4.8393527	41.00	0.0035149	4.8882979
1.10	1.4877878	0.4556117	11.10	0.4842780	3.4556524	21.10	0.1067313	4.5811735	31.10	0.0196294	4.8403693	41.10	0.0034541	4.8884786
1.20	1.4743262	0.4959010	11.20	0.4778099	3.4749562	21.20	0.1049958	4.5863401	31.20	0.0192934	4.8413688	41.20	0.0033944	4.8886562
1.30	1.4609283	0.5359986	11.30	0.4714087	3.4940601	21.30	0.1032868	4.5914277	31.30	0.0189631	4.8423514	41.30	0.0033357	4.8888307
1.40	1.4475945	0.5759038	11.40	0.4650739	3.5129650	21.40	0.1016039	4.5964373	31.40	0.0186384	4.8433173	41.40	0.0032780	4.8890022
1.50	1.4343250	0.6156158	11.50	0.4588053	3.5316717	21.50	0.0999469	4.6013700	31.50	0.0183191	4.8442669	41.50	0.0032214	4.8891707
1.60	1.4211199	0.6551339	11.60	0.4526027	3.5501811	21.60	0.0983153	4.6062269	31.60	0.0180053	4.8452004	41.60	0.0031657	4.8893364
1.70	1.4079797	0.6944573	11.70	0.4464656	3.5684942	21.70	0.0967089	4.6110089	31.70	0.0176968	4.8461180	41.70	0.0031109	4.8894992
1.80	1.3949044	0.7335853	11.80	0.4403939	3.5866118	21.80	0.0951272	4.6157171	31.80	0.0173935	4.8470201	41.80	0.0030571	4.8896591
1.90	1.3818944	0.7725172	11.90	0.4343871	3.6045349	21.90	0.0935700	4.6203524	31.90	0.0170953	4.8479069	41.90	0.0030043	4.8898163
2.00	1.3689499	0.8112523	12.00	0.4284450	3.6222645	22.00	0.0920369	4.6249159	32.00	0.0168023	4.8487787	42.00	0.0029523	4.8899708



(lanjutan)

4.90	1.0230209	1.8460486	14.90	0.2826478	4.0570938	24.90	0.0566803	4.7301410	34.90	0.0101641	4.8685225	44.90	0.0017799	4.8934577
5.00	1.0121376	1.8785917	15.00	0.2784744	4.0695349	25.00	0.0557314	4.7329647	35.00	0.0099891	4.8690430	45.00	0.0017491	4.8935493
5.10	1.0013256	1.9109208	15.10	0.2743536	4.0818188	25.10	0.0547978	4.7357427	35.10	0.0098171	4.8695545	45.10	0.0017188	4.8936393
5.20	0.9905849	1.9430354	15.20	0.2702850	4.0939468	25.20	0.0538793	4.7384757	35.20	0.0096480	4.8700573	45.20	0.0016891	4.8937277
5.30	0.9799159	1.9749352	15.30	0.2662682	4.1059201	25.30	0.0529757	4.7411643	35.30	0.0094819	4.8705515	45.30	0.0016598	4.8938147
5.40	0.9693184	2.0066200	15.40	0.2623026	4.1177402	25.40	0.0520868	4.7438092	35.40	0.0093186	4.8710372	45.40	0.0016311	4.8939001
5.50	0.9587927	2.0380893	15.50	0.2583880	4.1294083	25.50	0.0512124	4.7464111	35.50	0.0091581	4.8715146	45.50	0.0016029	4.8939840
5.60	0.9483389	2.0693430	15.60	0.2545237	4.1409259	25.60	0.0503522	4.7489706	35.60	0.0090003	4.8719839	45.60	0.0015751	4.8940665
5.70	0.9379570	2.1003806	15.70	0.2507095	4.1522941	25.70	0.0495060	4.7514883	35.70	0.0088452	4.8724450	45.70	0.0015479	4.8941476
5.80	0.9276471	2.1312021	15.80	0.2469448	4.1635144	25.80	0.0486736	4.7539650	35.80	0.0086928	4.8728983	45.80	0.0015211	4.8942273
5.90	0.9174094	2.1618072	15.90	0.2432291	4.1745881	25.90	0.0478548	4.7564012	35.90	0.0085430	4.8733438	45.90	0.0014948	4.8943056
6.00	0.9072438	2.1921955	16.00	0.2395622	4.1855165	26.00	0.0470494	4.7587976	36.00	0.0083958	4.8737817	46.00	0.0014689	4.8943825
6.10	0.8971505	2.2223670	16.10	0.2359434	4.1963010	26.10	0.0462571	4.7611548	36.10	0.0082511	4.8742121	46.10	0.0014435	4.8944581
6.20	0.8871295	2.2523214	16.20	0.2323723	4.2069429	26.20	0.0454779	4.7634733	36.20	0.0081089	4.8746350	46.20	0.0014185	4.8945324
6.30	0.8771809	2.2820587	16.30	0.2288486	4.2174435	26.30	0.0447114	4.7657539	36.30	0.0079691	4.8750508	46.30	0.0013939	4.8946054
6.40	0.8673047	2.3115785	16.40	0.2253718	4.2278043	26.40	0.0439574	4.7679970	36.40	0.0078317	4.8754594	46.40	0.0013698	4.8946772
6.50	0.8575010	2.3408809	16.50	0.2219413	4.2380265	26.50	0.0432159	4.7702032	36.50	0.0076967	4.8758610	46.50	0.0013461	4.8947477
6.60	0.8477698	2.3699656	16.60	0.2185568	4.2481115	26.60	0.0424865	4.7723732	36.60	0.0075640	4.8762556	46.60	0.0013228	4.8948170
6.70	0.8381112	2.3988327	16.70	0.2152178	4.2580607	26.70	0.0417692	4.7745075	36.70	0.0074335	4.8766436	46.70	0.0012999	4.8948851
6.80	0.8285251	2.4274819	16.80	0.2119239	4.2678753	26.80	0.0410636	4.7766066	36.80	0.0073054	4.8770248	46.80	0.0012774	4.8949520
6.90	0.8190117	2.4559134	16.90	0.2086746	4.2775568	26.90	0.0403697	4.7786711	36.90	0.0071794	4.8773995	46.90	0.0012553	4.8950178
7.00	0.8095708	2.4841270	17.00	0.2054694	4.2871065	27.00	0.0396872	4.7807016	37.00	0.0070555	4.8777678	47.00	0.0012335	4.8950824
7.10	0.8002026	2.5121227	17.10	0.2023080	4.2965256	27.10	0.0390160	4.7826985	37.10	0.0069338	4.8781298	47.10	0.0012122	4.8951459
7.20	0.7909070	2.5399006	17.20	0.1991898	4.3058156	27.20	0.0383559	4.7846624	37.20	0.0068142	4.8784855	47.20	0.0011912	4.8952083
7.30	0.7816840	2.5674606	17.30	0.1961145	4.3149778	27.30	0.0377067	4.7865939	37.30	0.0066967	4.8788351	47.30	0.0011706	4.8952696
7.40	0.7725336	2.5948028	17.40	0.1930815	4.3240135	27.40	0.0370682	4.7884934	37.40	0.0065811	4.8791787	47.40	0.0011503	4.8953299
7.50	0.7634559	2.6219273	17.50	0.1900905	4.3329241	27.50	0.0364403	4.7903614	37.50	0.0064676	4.8795164	47.50	0.0011304	4.8953891
7.60	0.7544506	2.6488341	17.60	0.1871410	4.3417108	27.60	0.0358228	4.7921984	37.60	0.0063560	4.8798484	47.60	0.0011108	4.8954473

Universitas Indonesia

(lanjutan)

7.70	0.7455180	2.6755234	17.70	0.1842326	4.3503750	27.70	0.0352155	4.7940050	37.70	0.0062463	4.8801746	47.70	0.0010916	4.8955045
7.80	0.7366578	2.7019953	17.80	0.1813647	4.3589181	27.80	0.0346183	4.7957816	37.80	0.0061385	4.8804951	47.80	0.0010727	4.8955607
7.90	0.7278700	2.7282499	17.90	0.1785371	4.3673413	27.90	0.0340311	4.7975287	37.90	0.0060326	4.8808102	47.90	0.0010541	4.8956159
8.00	0.7191547	2.7542874	18.00	0.1757491	4.3756459	28.00	0.0334536	4.7992468	38.00	0.0059284	4.8811199	48.00	0.0010359	4.8956702
8.10	0.7105117	2.7801080	18.10	0.1730005	4.3838333	28.10	0.0328856	4.8009362	38.10	0.0058261	4.8814242	48.10	0.0010180	4.8957235
8.20	0.7019409	2.8057119	18.20	0.1702907	4.3919048	28.20	0.0323272	4.8025976	38.20	0.0057255	4.8817233	48.20	0.0010003	4.8957759
8.30	0.6934424	2.8310993	18.30	0.1676194	4.3998616	28.30	0.0317780	4.8042312	38.30	0.0056267	4.8820173	48.30	0.0009830	4.8958274
8.40	0.6850159	2.8562705	18.40	0.1649860	4.4077050	28.40	0.0312380	4.8058377	38.40	0.0055295	4.8823062	48.40	0.0009660	4.8958780
8.50	0.6766616	2.8812258	18.50	0.1623903	4.4154364	28.50	0.0307070	4.8074173	38.50	0.0054341	4.8825901	48.50	0.0009493	4.8959278
8.60	0.6683791	2.9059653	18.60	0.1598316	4.4230570	28.60	0.0301849	4.8089706	38.60	0.0053403	4.8828692	48.60	0.0009328	4.8959767
8.70	0.6601685	2.9304896	18.70	0.1573097	4.4305681	28.70	0.0296715	4.8104979	38.70	0.0052480	4.8831434	48.70	0.0009167	4.8960247
8.80	0.6520296	2.9547988	18.80	0.1548241	4.4379710	28.80	0.0291666	4.8119997	38.80	0.0051574	4.8834129	48.80	0.0009008	4.8960719
8.90	0.6439623	2.9788934	18.90	0.1523743	4.4452669	28.90	0.0286702	4.8134764	38.90	0.0050684	4.8836778	48.90	0.0008852	4.8961183
9.00	0.6359665	3.0027737	19.00	0.1499600	4.4524570	29.00	0.0281821	4.8149284	39.00	0.0049808	4.8839381	49.00	0.0008699	4.8961639
9.10	0.6280420	3.0264401	19.10	0.1475808	4.4595427	29.10	0.0277022	4.8163561	39.10	0.0048948	4.8841939	49.10	0.0008548	4.8962086
9.20	0.6201888	3.0498930	19.20	0.1452361	4.4665251	29.20	0.0272303	4.8177599	39.20	0.0048103	4.8844454	49.20	0.0008400	4.8962527
9.30	0.6124067	3.0731330	19.30	0.1429257	4.4734056	29.30	0.0267663	4.8191401	39.30	0.0047272	4.8846925	49.30	0.0008255	4.8962959
9.40	0.6046955	3.0961603	19.40	0.1406490	4.4801853	29.40	0.0263101	4.8204972	39.40	0.0046455	4.8849353	49.40	0.0008112	4.8963384
9.50	0.5970551	3.1189756	19.50	0.1384057	4.4868654	29.50	0.0258615	4.8218316	39.50	0.0045653	4.8851740	49.50	0.0007971	4.8963802
9.60	0.5894852	3.1415794	19.60	0.1361955	4.4934472	29.60	0.0254205	4.8231435	39.60	0.0044864	4.8854085	49.60	0.0007833	4.8964212
9.70	0.5819858	3.1639720	19.70	0.1340177	4.4999318	29.70	0.0249869	4.8244334	39.70	0.0044089	4.8856390	49.70	0.0007698	4.8964616
9.80	0.5745567	3.1861542	19.80	0.1318722	4.5063206	29.80	0.0245605	4.8257016	39.80	0.0043327	4.8858656	49.80	0.0007564	4.8965012
9.90	0.5671977	3.2081265	19.90	0.1297585	4.5126146	29.90	0.0241413	4.8269485	39.90	0.0042579	4.8860882	49.90	0.0007433	4.8965402
10.00	0.5599085	3.2298894	20.00	0.1276761	4.5188150	30.00	0.0237292	4.8281744	40.00	0.0041843	4.8863070	50.00	0.0007305	4.8965784
$V_{\max}$ : 2.8052E-01														
$K_M$ : 1.6052E+00														
Error : 1.8850														

Data 2<sup>[27]</sup>

t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)
0.00	1.6400000	0.2000000												
0.10	1.6277193	0.2367038	10.10	0.7675696	2.8074685	20.10	0.3619270	4.0198282	30.10	0.1706506	4.5915033	40.10	0.0804612	4.8610554
0.20	1.6155305	0.2731329	10.20	0.7618210	2.8246496	20.20	0.3592162	4.0279300	30.20	0.1693724	4.5953235	40.20	0.0798585	4.8628567
0.30	1.6034330	0.3092893	10.30	0.7561154	2.8417021	20.30	0.3565257	4.0359712	30.30	0.1681037	4.5991151	40.30	0.0792604	4.8646444
0.40	1.5914261	0.3451750	10.40	0.7504526	2.8586269	20.40	0.3538554	4.0439522	30.40	0.1668446	4.6028783	40.40	0.0786667	4.8664188
0.50	1.5795090	0.3807920	10.50	0.7448321	2.8754249	20.50	0.3512050	4.0518734	30.50	0.1655949	4.6066133	40.50	0.0780775	4.8681799
0.60	1.5676812	0.4161424	10.60	0.7392538	2.8920971	20.60	0.3485745	4.0597353	30.60	0.1643546	4.6103203	40.60	0.0774926	4.8699277
0.70	1.5559419	0.4512282	10.70	0.7337172	2.9086445	20.70	0.3459637	4.0675383	30.70	0.1631235	4.6139996	40.70	0.0769122	4.8716625
0.80	1.5442904	0.4860512	10.80	0.7282221	2.9250680	20.80	0.3433725	4.0752828	30.80	0.1619017	4.6176513	40.80	0.0763361	4.8733843
0.90	1.5327262	0.5206136	10.90	0.7227681	2.9413685	20.90	0.3408006	4.0829694	30.90	0.1606890	4.6212756	40.90	0.0757643	4.8750932
1.00	1.5212486	0.5549173	11.00	0.7173550	2.9575469	21.00	0.3382481	4.0905984	31.00	0.1594854	4.6248728	41.00	0.0751968	4.8767893
1.10	1.5098569	0.5889641	11.10	0.7119824	2.9736042	21.10	0.3357146	4.0981702	31.10	0.1582909	4.6284431	41.10	0.0746336	4.8784727
1.20	1.4985505	0.6227561	11.20	0.7066500	2.9895412	21.20	0.3332001	4.1056854	31.20	0.1571052	4.6319866	41.20	0.0740746	4.8801435
1.30	1.4873287	0.6562951	11.30	0.7013576	3.0053589	21.30	0.3307045	4.1131442	31.30	0.1559285	4.6355036	41.30	0.0735197	4.8818018
1.40	1.4761910	0.6895830	11.40	0.6961048	3.0210582	21.40	0.3282275	4.1205472	31.40	0.1547606	4.6389943	41.40	0.0729690	4.8834476
1.50	1.4651366	0.7226216	11.50	0.6908914	3.0366398	21.50	0.3257691	4.1278947	31.50	0.1536014	4.6424588	41.50	0.0724225	4.8850812
1.60	1.4541650	0.7554130	11.60	0.6857169	3.0521048	21.60	0.3233291	4.1351873	31.60	0.1524509	4.6458973	41.60	0.0718800	4.8867024
1.70	1.4432755	0.7879588	11.70	0.6805813	3.0674540	21.70	0.3209074	4.1424251	31.70	0.1513090	4.6493101	41.70	0.0713416	4.8883116
1.80	1.4324676	0.8202610	11.80	0.6754841	3.0826882	21.80	0.3185038	4.1496088	31.80	0.1501757	4.6526974	41.80	0.0708072	4.8899087
1.90	1.4217405	0.8523213	11.90	0.6704250	3.0978083	21.90	0.3161182	4.1567387	31.90	0.1490508	4.6560592	41.90	0.0702769	4.8914938
2.00	1.4110938	0.8841416	12.00	0.6654039	3.1128153	22.00	0.3137505	4.1638152	32.00	0.1479344	4.6593959	42.00	0.0697505	4.8930671
2.10	1.4005268	0.9157237	12.10	0.6604203	3.1277098	22.10	0.3114005	4.1708387	32.10	0.1468263	4.6627076	42.10	0.0692280	4.8946285
2.20	1.3900389	0.9470694	12.20	0.6554741	3.1424928	22.20	0.3090681	4.1778096	32.20	0.1457266	4.6659945	42.20	0.0687095	4.8961783
2.30	1.3796295	0.9781804	12.30	0.6505649	3.1571651	22.30	0.3067532	4.1847283	32.30	0.1446350	4.6692568	42.30	0.0681948	4.8977165
2.40	1.3692980	1.0090584	12.40	0.6456925	3.1717275	22.40	0.3044556	4.1915951	32.40	0.1435517	4.6724946	42.40	0.0676840	4.8992431

(lanjutan)

2.50	1.3590439	1.0397053	12.50	0.6408565	3.1861809	22.50	0.3021752	4.1984105	32.50	0.1424765	4.6757082	42.50	0.0671770	4.9007583
2.60	1.3488666	1.0701227	12.60	0.6360568	3.2005260	22.60	0.2999120	4.2051749	32.60	0.1414093	4.6788977	42.60	0.0666739	4.9022622
2.70	1.3387655	1.1003124	12.70	0.6312930	3.2147637	22.70	0.2976656	4.2118886	32.70	0.1403501	4.6820633	42.70	0.0661745	4.9037548
2.80	1.3287399	1.1302761	12.80	0.6265649	3.2288948	22.80	0.2954361	4.2185521	32.80	0.1392989	4.6852052	42.80	0.0656788	4.9052362
2.90	1.3187895	1.1600154	12.90	0.6218722	3.2429200	22.90	0.2932233	4.2251656	32.90	0.1382555	4.6883236	42.90	0.0651868	4.9067065
3.00	1.3089135	1.1895321	13.00	0.6172147	3.2568402	23.00	0.2910270	4.2317296	33.00	0.1372199	4.6914186	43.00	0.0646986	4.9081658
3.10	1.2991115	1.2188278	13.10	0.6125920	3.2706562	23.10	0.2888472	4.2382444	33.10	0.1361921	4.6944905	43.10	0.0642140	4.9096142
3.20	1.2893829	1.2479041	13.20	0.6080039	3.2843687	23.20	0.2866838	4.2447105	33.20	0.1351720	4.6975393	43.20	0.0637330	4.9110517
3.30	1.2797271	1.2767628	13.30	0.6034502	3.2979785	23.30	0.2845365	4.2511281	33.30	0.1341595	4.7005653	43.30	0.0632556	4.9124785
3.40	1.2701436	1.3054054	13.40	0.5989306	3.3114864	23.40	0.2824053	4.2574976	33.40	0.1331547	4.7035686	43.40	0.0627818	4.9138946
3.50	1.2606319	1.3338335	13.50	0.5944449	3.3248932	23.50	0.2802901	4.2638195	33.50	0.1321573	4.7065495	43.50	0.0623115	4.9153000
3.60	1.2511913	1.3620488	13.60	0.5899927	3.3381995	23.60	0.2781907	4.2700940	33.60	0.1311674	4.7095080	43.60	0.0618448	4.9166950
3.70	1.2418215	1.3900529	13.70	0.5855739	3.3514062	23.70	0.2761071	4.2763215	33.70	0.1301849	4.7124443	43.70	0.0613816	4.9180795
3.80	1.2325218	1.4178473	13.80	0.5811882	3.3645140	23.80	0.2740390	4.2825023	33.80	0.1292098	4.7153587	43.80	0.0609218	4.9194536
3.90	1.2232917	1.4454336	13.90	0.5768353	3.3775236	23.90	0.2719865	4.2886369	33.90	0.1282420	4.7182512	43.90	0.0604655	4.9208174
4.00	1.2141307	1.4728133	14.00	0.5725150	3.3904358	24.00	0.2699493	4.2947255	34.00	0.1272815	4.7211221	44.00	0.0600126	4.9221711
4.10	1.2050384	1.4999880	14.10	0.5682271	3.4032513	24.10	0.2679273	4.3007685	34.10	0.1263281	4.7239715	44.10	0.0595631	4.9235145
4.20	1.1960141	1.5269593	14.20	0.5639713	3.4159708	24.20	0.2659206	4.3067663	34.20	0.1253819	4.7267995	44.20	0.0591169	4.9248479
4.30	1.1870574	1.5537287	14.30	0.5597473	3.4285951	24.30	0.2639288	4.3127191	34.30	0.1244427	4.7296063	44.30	0.0586741	4.9261714
4.40	1.1781677	1.5802976	14.40	0.5555550	3.4411248	24.40	0.2619520	4.3186274	34.40	0.1235106	4.7323921	44.40	0.0582346	4.9274849
4.50	1.1693446	1.6066675	14.50	0.5513941	3.4535607	24.50	0.2599899	4.3244914	34.50	0.1225855	4.7351571	44.50	0.0577984	4.9287886
4.60	1.1605875	1.6328401	14.60	0.5472643	3.4659035	24.60	0.2580426	4.3303114	34.60	0.1216673	4.7379013	44.60	0.0573655	4.9300825
4.70	1.1518961	1.6588167	14.70	0.5431655	3.4781538	24.70	0.2561098	4.3360879	34.70	0.1207560	4.7406250	44.70	0.0569358	4.9313667
4.80	1.1432697	1.6845987	14.80	0.5390974	3.4903124	24.80	0.2541916	4.3418212	34.80	0.1198515	4.7433283	44.80	0.0565093	4.9326413
4.90	1.1347078	1.7101878	14.90	0.5350597	3.5023799	24.90	0.2522877	4.3475114	34.90	0.1189538	4.7460113	44.90	0.0560861	4.9339063
5.00	1.1262101	1.7355852	15.00	0.5310523	3.5143571	25.00	0.2503980	4.3531591	35.00	0.1180628	4.7486743	45.00	0.0556660	4.9351619
5.10	1.1177761	1.7607925	15.10	0.5270748	3.5262446	25.10	0.2485225	4.3587645	35.10	0.1171785	4.7513173	45.10	0.0552490	4.9364081

Universitas Indonesia

(lanjutan)

5.20	1.1094051	1.7858111	15.20	0.5231272	3.5380430	25.20	0.2466611	4.3643279	35.20	0.1163008	4.7539405	45.20	0.0548352	4.9376449
5.30	1.1010969	1.8106423	15.30	0.5192092	3.5497531	25.30	0.2448135	4.3698496	35.30	0.1154297	4.7565440	45.30	0.0544245	4.9388725
5.40	1.0928508	1.8352876	15.40	0.5153204	3.5613754	25.40	0.2429799	4.3753299	35.40	0.1145651	4.7591281	45.40	0.0540168	4.9400909
5.50	1.0846665	1.8597484	15.50	0.5114608	3.5729108	25.50	0.2411599	4.3807692	35.50	0.1137069	4.7616927	45.50	0.0536122	4.9413001
5.60	1.0765435	1.8840260	15.60	0.5076301	3.5843597	25.60	0.2393536	4.3861678	35.60	0.1128552	4.7642382	45.60	0.0532106	4.9425003
5.70	1.0684813	1.9081218	15.70	0.5038281	3.5957229	25.70	0.2375609	4.3915260	35.70	0.1120099	4.7667647	45.70	0.0528121	4.9436915
5.80	1.0604794	1.9320372	15.80	0.5000546	3.6070011	25.80	0.2357815	4.3968440	35.80	0.1111709	4.7692721	45.80	0.0524165	4.9448738
5.90	1.0525375	1.9557736	15.90	0.4963093	3.6181947	25.90	0.2340155	4.4021221	35.90	0.1103383	4.7717609	45.90	0.0520239	4.9460472
6.00	1.0446551	1.9793322	16.00	0.4925921	3.6293045	26.00	0.2322627	4.4073608	36.00	0.1095118	4.7742309	46.00	0.0516342	4.9472119
6.10	1.0368316	2.0027144	16.10	0.4889027	3.6403311	26.10	0.2305230	4.4125602	36.10	0.1086915	4.7766825	46.10	0.0512474	4.9483678
6.20	1.0290668	2.0259215	16.20	0.4852409	3.6512752	26.20	0.2287964	4.4177207	36.20	0.1078774	4.7791157	46.20	0.0508636	4.9495150
6.30	1.0213601	2.0489549	16.30	0.4816066	3.6621372	26.30	0.2270827	4.4228425	36.30	0.1070694	4.7815307	46.30	0.0504826	4.9506537
6.40	1.0137110	2.0718158	16.40	0.4779995	3.6729180	26.40	0.2253818	4.4279259	36.40	0.1062674	4.7839276	46.40	0.0501044	4.9517838
6.50	1.0061193	2.0945056	16.50	0.4744194	3.6836180	26.50	0.2236937	4.4329713	36.50	0.1054714	4.7863065	46.50	0.0497292	4.9529055
6.60	0.9985844	2.1170254	16.60	0.4708661	3.6942378	26.60	0.2220182	4.4379789	36.60	0.1046814	4.7886677	46.60	0.0493567	4.9540188
6.70	0.9911059	2.1393766	16.70	0.4673394	3.7047781	26.70	0.2203553	4.4429490	36.70	0.1038973	4.7910111	46.70	0.0489870	4.9551237
6.80	0.9836835	2.1615605	16.80	0.4638391	3.7152395	26.80	0.2187048	4.4478818	36.80	0.1031191	4.7933370	46.80	0.0486200	4.9562203
6.90	0.9763166	2.1835782	16.90	0.4603651	3.7256225	26.90	0.2170666	4.4527778	36.90	0.1023467	4.7956455	46.90	0.0482559	4.9573088
7.00	0.9690048	2.2054311	17.00	0.4569171	3.7359278	27.00	0.2154408	4.4576370	37.00	0.1015801	4.7979366	47.00	0.0478944	4.9583891
7.10	0.9617478	2.2271203	17.10	0.4534948	3.7461559	27.10	0.2138271	4.4624599	37.10	0.1008193	4.8002106	47.10	0.0475357	4.9594613
7.20	0.9545452	2.2486472	17.20	0.4500983	3.7563074	27.20	0.2122255	4.4672466	37.20	0.1000641	4.8024676	47.20	0.0471796	4.9605254
7.30	0.9473965	2.2700128	17.30	0.4467271	3.7663829	27.30	0.2106359	4.4719975	37.30	0.0993146	4.8047077	47.30	0.0468262	4.9615816
7.40	0.9403013	2.2912185	17.40	0.4433812	3.7763829	27.40	0.2090583	4.4767127	37.40	0.0985707	4.8069310	47.40	0.0464755	4.9626299
7.50	0.9332592	2.3122654	17.50	0.4400604	3.7863080	27.50	0.2074924	4.4813927	37.50	0.0978324	4.8091376	47.50	0.0461274	4.9636703
7.60	0.9262699	2.3331547	17.60	0.4367644	3.7961588	27.60	0.2059382	4.4860376	37.60	0.0970996	4.8113278	47.60	0.0457818	4.9647030
7.70	0.9193329	2.3538875	17.70	0.4334931	3.8059358	27.70	0.2043957	4.4906478	37.70	0.0963723	4.8135015	47.70	0.0454389	4.9657279
7.80	0.9124479	2.3744652	17.80	0.4302463	3.8156396	27.80	0.2028648	4.4952234	37.80	0.0956504	4.8156589	47.80	0.0450986	4.9667451

Universitas Indonesia

(lanjutan)

7.90	0.9056144	2.3948887	17.90	0.4270239	3.8252707	27.90	0.2013453	4.4997647	37.90	0.0949340	4.8178002	47.90	0.0447608	4.9677547
8.00	0.8988320	2.4151593	18.00	0.4238255	3.8348297	28.00	0.1998372	4.5042720	38.00	0.0942229	4.8199254	48.00	0.0444255	4.9687567
8.10	0.8921005	2.4352781	18.10	0.4206512	3.8443171	28.10	0.1983404	4.5087456	38.10	0.0935171	4.8220347	48.10	0.0440927	4.9697513
8.20	0.8854194	2.4552463	18.20	0.4175005	3.8537335	28.20	0.1968548	4.5131857	38.20	0.0928167	4.8241282	48.20	0.0437625	4.9707384
8.30	0.8787883	2.4750649	18.30	0.4143735	3.8630793	28.30	0.1953803	4.5175925	38.30	0.0921215	4.8262061	48.30	0.0434347	4.9717181
8.40	0.8722068	2.4947352	18.40	0.4112699	3.8723551	28.40	0.1939169	4.5219662	38.40	0.0914314	4.8282684	48.40	0.0431093	4.9726904
8.50	0.8656746	2.5142581	18.50	0.4081896	3.8815615	28.50	0.1924644	4.5263073	38.50	0.0907466	4.8303152	48.50	0.0427864	4.9736555
8.60	0.8591914	2.5336349	18.60	0.4051323	3.8906989	28.60	0.1910229	4.5306158	38.60	0.0900669	4.8323467	48.60	0.0424659	4.9746133
8.70	0.8527567	2.5528665	18.70	0.4020979	3.8997678	28.70	0.1895921	4.5348920	38.70	0.0893922	4.8343629	48.70	0.0421479	4.9755640
8.80	0.8463702	2.5719542	18.80	0.3990863	3.9087689	28.80	0.1881720	4.5391363	38.80	0.0887227	4.8363641	48.80	0.0418322	4.9765075
8.90	0.8400315	2.5908989	18.90	0.3960972	3.9177025	28.90	0.1867626	4.5433487	38.90	0.0880581	4.8383503	48.90	0.0415188	4.9774440
9.00	0.8337402	2.6097018	19.00	0.3931304	3.9265693	29.00	0.1853637	4.5475296	39.00	0.0873985	4.8403216	49.00	0.0412078	4.9783735
9.10	0.8274961	2.6283638	19.10	0.3901860	3.9353696	29.10	0.1839753	4.5516791	39.10	0.0867439	4.8422782	49.10	0.0408992	4.9792960
9.20	0.8212987	2.6468862	19.20	0.3872635	3.9441040	29.20	0.1825973	4.5557976	39.20	0.0860942	4.8442201	49.20	0.0405928	4.9802116
9.30	0.8151478	2.6652698	19.30	0.3843629	3.9527730	29.30	0.1812296	4.5598853	39.30	0.0854493	4.8461474	49.30	0.0402888	4.9811203
9.40	0.8090429	2.6835157	19.40	0.3814841	3.9613771	29.40	0.1798722	4.5639423	39.40	0.0848093	4.8480603	49.40	0.0399870	4.9820223
9.50	0.8029837	2.7016250	19.50	0.3786268	3.9699168	29.50	0.1785249	4.5679689	39.50	0.0841740	4.8499589	49.50	0.0396875	4.9829174
9.60	0.7969699	2.7195988	19.60	0.3757910	3.9783924	29.60	0.1771877	4.5719654	39.60	0.0835435	4.8518432	49.60	0.0393902	4.9838059
9.70	0.7910011	2.7374379	19.70	0.3729763	3.9868047	29.70	0.1758606	4.5759320	39.70	0.0829178	4.8537135	49.70	0.0390952	4.9846877
9.80	0.7850770	2.7551434	19.80	0.3701828	3.9951539	29.80	0.1745433	4.5798688	39.80	0.0822967	4.8555697	49.80	0.0388023	4.9855629
9.90	0.7791973	2.7727164	19.90	0.3674101	4.0034405	29.90	0.1732360	4.5837761	39.90	0.0816803	4.8574121	49.90	0.0385117	4.9864316
10.00	0.7733616	2.7901577	20.00	0.3646583	4.0116651	30.00	0.1719384	4.5876542	40.00	0.0810684	4.8592406	50.00	0.0382232	4.9872937
V <sub>max</sub> : 4.2364E+02														
K <sub>M</sub> : 5.6345E+03														
Error : 5.5843														









(lanjutan)

8.30	3.3694695	13.8723148	18.30	0.7732776	21.6173446	28.30	0.1340322	23.5195000	38.30	0.0215413	23.8539380	48.30	0.0034155	23.9078171
8.40	3.3277507	13.9969446	18.40	0.7605359	21.6552844	28.40	0.1316284	23.5266477	38.40	0.0211488	23.8551046	48.40	0.0033531	23.9080026
8.50	3.2863829	14.1205214	18.50	0.7479837	21.6926587	28.50	0.1292668	23.5336695	38.50	0.0207635	23.8562500	48.50	0.0032919	23.9081846
8.60	3.2453661	14.2430458	18.60	0.7356189	21.7294742	28.60	0.1269469	23.5405675	38.60	0.0203852	23.8573745	48.60	0.0032317	23.9083633
8.70	3.2046999	14.3645184	18.70	0.7234393	21.7657374	28.70	0.1246679	23.5473439	38.70	0.0200137	23.8584787	48.70	0.0031727	23.9085388
8.80	3.1643843	14.4849398	18.80	0.7114427	21.8014549	28.80	0.1224291	23.5540007	38.80	0.0196490	23.8595627	48.80	0.0031148	23.9087111
8.90	3.1244189	14.6043111	18.90	0.6996269	21.8366333	28.90	0.1202298	23.5605399	38.90	0.0192910	23.8606271	48.90	0.0030579	23.9088802
9.00	3.0848034	14.7226330	19.00	0.6879897	21.8712792	29.00	0.1180694	23.5669636	39.00	0.0189394	23.8616721	49.00	0.0030020	23.9090462
9.10	3.0455374	14.8399067	19.10	0.6765290	21.9053989	29.10	0.1159472	23.5732737	39.10	0.0185943	23.8626982	49.10	0.0029472	23.9092092
9.20	3.0066207	14.9561334	19.20	0.6652425	21.9389991	29.20	0.1138624	23.5794722	39.20	0.0182554	23.8637056	49.20	0.0028934	23.9093692
9.30	2.9680528	15.0713144	19.30	0.6541282	21.9720860	29.30	0.1118146	23.5855609	39.30	0.0179226	23.8646946	49.30	0.0028405	23.9095263
9.40	2.9298333	15.1854510	19.40	0.6431838	22.0046660	29.40	0.1098031	23.5915418	39.40	0.0175959	23.8656657	49.40	0.0027886	23.9096805
9.50	2.8919616	15.2985448	19.50	0.6324074	22.0367456	29.50	0.1078271	23.5974168	39.50	0.0172752	23.8666191	49.50	0.0027377	23.9098319
9.60	2.8544372	15.4105975	19.60	0.6217967	22.0683311	29.60	0.1058862	23.6031875	39.60	0.0169603	23.8675552	49.60	0.0026877	23.9099806
9.70	2.8172596	15.5216107	19.70	0.6113498	22.0994286	29.70	0.1039798	23.6088559	39.70	0.0166511	23.8684743	49.70	0.0026386	23.9101265
9.80	2.7804282	15.6315864	19.80	0.6010644	22.1300445	29.80	0.1021071	23.6144237	39.80	0.0163475	23.8693766	49.80	0.0025904	23.9102698
9.90	2.7439423	15.7405265	19.90	0.5909385	22.1601849	29.90	0.1002677	23.6198926	39.90	0.0160495	23.8702626	49.90	0.0025431	23.9104104
10.00	2.7078012	15.8484331	20.00	0.5809701	22.1898560	30.00	0.0984610	23.6252643	40.00	0.0157569	23.8711324	50.00	0.0024966	23.9105485
V <sub>max</sub> : 1.2858E+00														
K <sub>M</sub> : 6.9720E+00														
Error : 3.6430														







(lanjutan)

8.30	0.3290676	5.1208085	18.30	0.0205137	6.0345707	28.30	0.0011644	6.0917937	38.30	0.0000657	6.0950428	48.30	0.0000037	6.0952261
8.40	0.3206177	5.1458610	18.40	0.0199360	6.0362792	28.40	0.0011314	6.0918913	38.40	0.0000638	6.0950483	48.40	0.0000036	6.0952264
8.50	0.3123648	5.1703278	18.50	0.0193745	6.0379399	28.50	0.0010994	6.0919861	38.50	0.0000620	6.0950536	48.50	0.0000035	6.0952267
8.60	0.3043052	5.1942201	18.60	0.0188287	6.0395541	28.60	0.0010682	6.0920782	38.60	0.0000603	6.0950588	48.60	0.0000034	6.0952270
8.70	0.2964354	5.2175485	18.70	0.0182982	6.0411231	28.70	0.0010380	6.0921677	38.70	0.0000586	6.0950639	48.70	0.0000033	6.0952273
8.80	0.2887517	5.2403240	18.80	0.0177826	6.0426482	28.80	0.0010086	6.0922546	38.80	0.0000569	6.0950688	48.80	0.0000032	6.0952276
8.90	0.2812506	5.2625572	18.90	0.0172814	6.0441304	28.90	0.0009800	6.0923391	38.90	0.0000553	6.0950735	48.90	0.0000031	6.0952278
9.00	0.2739284	5.2842588	19.00	0.0167943	6.0455712	29.00	0.0009522	6.0924213	39.00	0.0000537	6.0950782	49.00	0.0000030	6.0952281
9.10	0.2667817	5.3054393	19.10	0.0163208	6.0469715	29.10	0.0009252	6.0925010	39.10	0.0000522	6.0950827	49.10	0.0000029	6.0952284
9.20	0.2598069	5.3261090	19.20	0.0158606	6.0483325	29.20	0.0008990	6.0925786	39.20	0.0000507	6.0950871	49.20	0.0000029	6.0952286
9.30	0.2530007	5.3462782	19.30	0.0154133	6.0496554	29.30	0.0008736	6.0926539	39.30	0.0000493	6.0950913	49.30	0.0000028	6.0952288
9.40	0.2463597	5.3659571	19.40	0.0149786	6.0509411	29.40	0.0008488	6.0927271	39.40	0.0000479	6.0950954	49.40	0.0000027	6.0952291
9.50	0.2398803	5.3851558	19.50	0.0145561	6.0521907	29.50	0.0008248	6.0927982	39.50	0.0000465	6.0950995	49.50	0.0000026	6.0952293
9.60	0.2335594	5.4038842	19.60	0.0141454	6.0534053	29.60	0.0008014	6.0928673	39.60	0.0000452	6.0951034	49.60	0.0000026	6.0952295
9.70	0.2273937	5.4221521	19.70	0.0137463	6.0545857	29.70	0.0007787	6.0929344	39.70	0.0000439	6.0951071	49.70	0.0000025	6.0952297
9.80	0.2213798	5.4399691	19.80	0.0133583	6.0557329	29.80	0.0007566	6.0929997	39.80	0.0000427	6.0951108	49.80	0.0000024	6.0952299
9.90	0.2155145	5.4573450	19.90	0.0129813	6.0568479	29.90	0.0007352	6.0930631	39.90	0.0000415	6.0951144	49.90	0.0000023	6.0952301
10.00	0.2097948	5.4742890	20.00	0.0126149	6.0579316	30.00	0.0007143	6.0931247	40.00	0.0000403	6.0951179	50.00	0.0000023	6.0952303
V <sub>max</sub> : 8.8753E-01														
K <sub>M</sub> : 3.0869E+00														
Error : 2.6345														









(lanjutan)

8.30	0.9948912	3.1498477	18.30	0.4163890	4.8778098	28.30	0.1742433	5.6010875	38.30	0.0729097	5.9037661	48.30	0.0305072	6.0304202
8.40	0.9862645	3.1756154	18.40	0.4127775	4.8885971	28.40	0.1727319	5.6056020	38.40	0.0722772	5.9056553	48.40	0.0302426	6.0312107
8.50	0.9777125	3.2011598	18.50	0.4091973	4.8992908	28.50	0.1712336	5.6100774	38.50	0.0716503	5.9075280	48.50	0.0299802	6.0319943
8.60	0.9692347	3.2264828	18.60	0.4056482	4.9098918	28.60	0.1697483	5.6145140	38.60	0.0710287	5.9093845	48.60	0.0297202	6.0327711
8.70	0.9608303	3.2515863	18.70	0.4021299	4.9204009	28.70	0.1682758	5.6189122	38.70	0.0704126	5.9112250	48.70	0.0294623	6.0335412
8.80	0.9524988	3.2764722	18.80	0.3986421	4.9308189	28.80	0.1668162	5.6232721	38.80	0.0698018	5.9130494	48.80	0.0292068	6.0343046
8.90	0.9442395	3.3011424	18.90	0.3951845	4.9411465	28.90	0.1653692	5.6275943	38.90	0.0691963	5.9148580	48.90	0.0289534	6.0350614
9.00	0.9360518	3.3255988	19.00	0.3917570	4.9513845	29.00	0.1639347	5.6318789	39.00	0.0685960	5.9166509	49.00	0.0287022	6.0358116
9.10	0.9279351	3.3498432	19.10	0.3883591	4.9615338	29.10	0.1625127	5.6361264	39.10	0.0680010	5.9184283	49.10	0.0284532	6.0365553
9.20	0.9198887	3.3738774	19.20	0.3849907	4.9715950	29.20	0.1611030	5.6403371	39.20	0.0674111	5.9201903	49.20	0.0282064	6.0372926
9.30	0.9119120	3.3977034	19.30	0.3816515	4.9815690	29.30	0.1597055	5.6445112	39.30	0.0668263	5.9219369	49.30	0.0279617	6.0380235
9.40	0.9040045	3.4213228	19.40	0.3783413	4.9914565	29.40	0.1583202	5.6486491	39.40	0.0662466	5.9236685	49.40	0.0277192	6.0387480
9.50	0.8961655	3.4447375	19.50	0.3750598	5.0012582	29.50	0.1569469	5.6527512	39.50	0.0656719	5.9253850	49.50	0.0274787	6.0394662
9.60	0.8883945	3.4679492	19.60	0.3718067	5.0109750	29.60	0.1555855	5.6568176	39.60	0.0651023	5.9270866	49.60	0.0272403	6.0401782
9.70	0.8806909	3.4909598	19.70	0.3685818	5.0206075	29.70	0.1542359	5.6608488	39.70	0.0645375	5.9287734	49.70	0.0270040	6.0408841
9.80	0.8730540	3.5137709	19.80	0.3653850	5.0301565	29.80	0.1528980	5.6648450	39.80	0.0639777	5.9304457	49.80	0.0267698	6.0415838
9.90	0.8654833	3.5363842	19.90	0.3622158	5.0396226	29.90	0.1515717	5.6688066	39.90	0.0634227	5.9321034	49.90	0.0265376	6.0422774
10.00	0.8579782	3.5588016	20.00	0.3590741	5.0490067	30.00	0.1502569	5.6727338	40.00	0.0628725	5.9337467	50.00	0.0263073	6.0429650
V <sub>max</sub> : 1.9107E+02														
K <sub>M</sub> : 2.1930E+03														
Error : 6.9063														







(lanjutan)

8.30	0.8416435	3.6166943	18.30	0.2879185	5.2689786	28.30	0.0984761	5.8342627	38.30	0.0336795	6.0276118	48.30	0.0115183	6.0937391
8.40	0.8326651	3.6434855	18.40	0.2848462	5.2781461	28.40	0.0974252	5.8373985	38.40	0.0333200	6.0286843	48.40	0.0113954	6.0941059
8.50	0.8237824	3.6699911	18.50	0.2818067	5.2872158	28.50	0.0963855	5.8405009	38.50	0.0329644	6.0297454	48.50	0.0112738	6.0944688
8.60	0.8149944	3.6962139	18.60	0.2787996	5.2961888	28.60	0.0953569	5.8435702	38.60	0.0326126	6.0307951	48.60	0.0111535	6.0948278
8.70	0.8063001	3.7221572	18.70	0.2758246	5.3050660	28.70	0.0943393	5.8466067	38.70	0.0322646	6.0318336	48.70	0.0110345	6.0951830
8.80	0.7976986	3.7478237	18.80	0.2728813	5.3138485	28.80	0.0933325	5.8496108	38.80	0.0319203	6.0328611	48.80	0.0109167	6.0955344
8.90	0.7891887	3.7732166	18.90	0.2699695	5.3225373	28.90	0.0923365	5.8525829	38.90	0.0315796	6.0338776	48.90	0.0108002	6.0958820
9.00	0.7807696	3.7983387	19.00	0.2670887	5.3311334	29.00	0.0913511	5.8555232	39.00	0.0312426	6.0348832	49.00	0.0106849	6.0962260
9.10	0.7724403	3.8231929	19.10	0.2642386	5.3396377	29.10	0.0903763	5.8584322	39.10	0.0309092	6.0358781	49.10	0.0105709	6.0965662
9.20	0.7641999	3.8477821	19.20	0.2614190	5.3480514	29.20	0.0894118	5.8613101	39.20	0.0305793	6.0368624	49.20	0.0104581	6.0969029
9.30	0.7560473	3.8721090	19.30	0.2586294	5.3563753	29.30	0.0884576	5.8641573	39.30	0.0302530	6.0378362	49.30	0.0103465	6.0972359
9.40	0.7479816	3.8961766	19.40	0.2558696	5.3646103	29.40	0.0875136	5.8669742	39.40	0.0299301	6.0387996	49.40	0.0102360	6.0975654
9.50	0.7400019	3.9199874	19.50	0.2531393	5.3727575	29.50	0.0865797	5.8697609	39.50	0.0296107	6.0397527	49.50	0.0101268	6.0978914
9.60	0.7321074	3.9435443	19.60	0.2504381	5.3808178	29.60	0.0856557	5.8725180	39.60	0.0292947	6.0406957	49.60	0.0100187	6.0982138
9.70	0.7242970	3.9668500	19.70	0.2477657	5.3887921	29.70	0.0847416	5.8752456	39.70	0.0289820	6.0416286	49.70	0.0099118	6.0985329
9.80	0.7165700	3.9899072	19.80	0.2451218	5.3966813	29.80	0.0838373	5.8779441	39.80	0.0286727	6.0425515	49.80	0.0098060	6.0988485
9.90	0.7089253	4.0127184	19.90	0.2425061	5.4044863	29.90	0.0829426	5.8806138	39.90	0.0283667	6.0434646	49.90	0.0097014	6.0991608
10.00	0.7013622	4.0352864	20.00	0.2399183	5.4122080	30.00	0.0820574	5.8832550	40.00	0.0280640	6.0443679	50.00	0.0095978	6.0994697
V <sub>max</sub> : 2.1243E+02														
K <sub>M</sub> : 1.9799E+03														
Error : 3.9949														









(lanjutan)

8.30	1.1275386	2.7684802	18.30	0.5481918	4.5002740	28.30	0.2663321	5.3428079	38.30	0.1293491	5.7522754	48.30	0.0628102	5.9511723
8.40	1.1194426	2.7926810	18.40	0.5442503	4.5120562	28.40	0.2644159	5.3485359	38.40	0.1284182	5.7550582	48.40	0.0623580	5.9525238
8.50	1.1114046	2.8167085	18.50	0.5403370	4.5237538	28.50	0.2625134	5.3542228	38.50	0.1274939	5.7578210	48.50	0.0619092	5.9538656
8.60	1.1034241	2.8405640	18.60	0.5364518	4.5353673	28.60	0.2606246	5.3598687	38.60	0.1265763	5.7605639	48.60	0.0614635	5.9551977
8.70	1.0955008	2.8642486	18.70	0.5325945	4.5468975	28.70	0.2587494	5.3654741	38.70	0.1256653	5.7632871	48.70	0.0610211	5.9565202
8.80	1.0876343	2.8877635	18.80	0.5287650	4.5583449	28.80	0.2568877	5.3710391	38.80	0.1247608	5.7659907	48.80	0.0605818	5.9578333
8.90	1.0798241	2.9111101	18.90	0.5249629	4.5697100	28.90	0.2550393	5.3765642	38.90	0.1238628	5.7686749	48.90	0.0601457	5.9591368
9.00	1.0720698	2.9342894	19.00	0.5211881	4.5809936	29.00	0.2532043	5.3820495	39.00	0.1229714	5.7713397	49.00	0.0597127	5.9604310
9.10	1.0643710	2.9573027	19.10	0.5174405	4.5921961	29.10	0.2513824	5.3874953	39.10	0.1220863	5.7739854	49.10	0.0592829	5.9617159
9.20	1.0567275	2.9801511	19.20	0.5137197	4.6033181	29.20	0.2495737	5.3929020	39.20	0.1212076	5.7766120	49.20	0.0588562	5.9629915
9.30	1.0491386	3.0028359	19.30	0.5100257	4.6143603	29.30	0.2477779	5.3982699	39.30	0.1203352	5.7792197	49.30	0.0584325	5.9642580
9.40	1.0416042	3.0253581	19.40	0.5063582	4.6253232	29.40	0.2459951	5.4035991	39.40	0.1194691	5.7818087	49.40	0.0580118	5.9655153
9.50	1.0341237	3.0477190	19.50	0.5027171	4.6362073	29.50	0.2442251	5.4088900	39.50	0.1186092	5.7843790	49.50	0.0575942	5.9667636
9.60	1.0266967	3.0699198	19.60	0.4991021	4.6470133	29.60	0.2424678	5.4141428	39.60	0.1177555	5.7869308	49.60	0.0571797	5.9680029
9.70	1.0193231	3.0919614	19.70	0.4955130	4.6577416	29.70	0.2407231	5.4193579	39.70	0.1169080	5.7894643	49.70	0.0567680	5.9692333
9.80	1.0120022	3.1138452	19.80	0.4919498	4.6683929	29.80	0.2389910	5.4245355	39.80	0.1160665	5.7919795	49.80	0.0563594	5.9704548
9.90	1.0047338	3.1355721	19.90	0.4884121	4.6789677	29.90	0.2372714	5.4296758	39.90	0.1152311	5.7944767	49.90	0.0559537	5.9716675
10.00	0.9975174	3.1571434	20.00	0.4848999	4.6894665	30.00	0.2355641	5.4347792	40.00	0.1144017	5.7969558	50.00	0.0555509	5.9728715
V <sub>max</sub> : 3.0100E+01														
K <sub>M</sub> : 4.1658E+02														
Error : 4.3437														







(lanjutan)

8.30	0.2827220	0.8290116	17.90	0.1186701	1.3191533	27.50	0.0475694	1.5314834	37.10	0.0186739	1.6177556	46.70	0.0072674	1.6518083
8.40	0.2802788	0.8363132	18.00	0.1175666	1.3224493	27.60	0.0471120	1.5328492	37.20	0.0184918	1.6182992	46.80	0.0071962	1.6520210
8.50	0.2778542	0.8435593	18.10	0.1164727	1.3257163	27.70	0.0466589	1.5342022	37.30	0.0183115	1.6188376	46.90	0.0071256	1.6522317
8.60	0.2754480	0.8507502	18.20	0.1153885	1.3289546	27.80	0.0462100	1.5355425	37.40	0.0181329	1.6193708	47.00	0.0070557	1.6524403
8.70	0.2730602	0.8578862	18.30	0.1143139	1.3321643	27.90	0.0457653	1.5368702	37.50	0.0179561	1.6198988	47.10	0.0069865	1.6526468
8.80	0.2706907	0.8649676	18.40	0.1132487	1.3353457	28.00	0.0453249	1.5381853	37.60	0.0177809	1.6204217	47.20	0.0069180	1.6528514
8.90	0.2683392	0.8719947	18.50	0.1121929	1.3384990	28.10	0.0448885	1.5394881	37.70	0.0176074	1.6209396	47.30	0.0068502	1.6530539
9.00	0.2660059	0.8789678	18.60	0.1111465	1.3416244	28.20	0.0444563	1.5407786	37.80	0.0174357	1.6214524	47.40	0.0067830	1.6532545
9.10	0.2636905	0.8858872	18.70	0.1101093	1.3447222	28.30	0.0440282	1.5420570	37.90	0.0172655	1.6219603	47.50	0.0067165	1.6534531
9.20	0.2613929	0.8927532	18.80	0.1090813	1.3477925	28.40	0.0436041	1.5433233	38.00	0.0170971	1.6224633	47.60	0.0066506	1.6536498
9.30	0.2591131	0.8995662	18.90	0.1080624	1.3508356	28.50	0.0431840	1.5445776	38.10	0.0169302	1.6229614	47.70	0.0065854	1.6538445
9.40	0.2568509	0.9063263	19.00	0.1070525	1.3538517	28.60	0.0427678	1.5458201	38.20	0.0167650	1.6234547	47.80	0.0065208	1.6540373
9.50	0.2546063	0.9130341	19.10	0.1060516	1.3568410	28.70	0.0423556	1.5470509	38.30	0.0166013	1.6239432	47.90	0.0064568	1.6542283
9.60	0.2523791	0.9196896	19.20	0.1050596	1.3598037	28.80	0.0419473	1.5482701	38.40	0.0164393	1.6244270	48.00	0.0063935	1.6544174
V <sub>max</sub> : 1.9966E-01														
K <sub>M</sub> : 2.0189E+00														
Error : 2.7224														



Lampiran 2. Hasil *Fitting* Menggunakan Model Michaelis – Menten Adsorpsi

Data 2<sup>[27]</sup>

t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)	t (jam)	C <sub>T</sub> (mol/Lt)	C <sub>B</sub> (mol/Lt)
0.00	1.6400000	0.2000000												
0.10	1.6277621	0.2375504	10.10	0.7695548	2.8708487	20.10	0.3637588	4.1159792	30.10	0.1719301	4.7045790	40.10	0.0812595	4.9827895
0.20	1.6156155	0.2748208	10.20	0.7638104	2.8884746	20.20	0.3610431	4.1243120	30.20	0.1706465	4.7085178	40.20	0.0806527	4.9846511
0.30	1.6035595	0.3118132	10.30	0.7581089	2.9059690	20.30	0.3583476	4.1325826	30.30	0.1693724	4.7124272	40.30	0.0800505	4.9864989
0.40	1.5915934	0.3485297	10.40	0.7524499	2.9233328	20.40	0.3556723	4.1407915	30.40	0.1681078	4.7163074	40.40	0.0794528	4.9883328
0.50	1.5797165	0.3849724	10.50	0.7468332	2.9405671	20.50	0.3530169	4.1489391	30.50	0.1668527	4.7201586	40.50	0.0788596	4.9901531
0.60	1.5679282	0.4211433	10.60	0.7412583	2.9576727	20.60	0.3503814	4.1570259	30.60	0.1656069	4.7239810	40.60	0.0782708	4.9919598
0.70	1.5562278	0.4570445	10.70	0.7357251	2.9746507	20.70	0.3477655	4.1650523	30.70	0.1643704	4.7277750	40.70	0.0776864	4.9937530
0.80	1.5446147	0.4926779	10.80	0.7302332	2.9915020	20.80	0.3451692	4.1730188	30.80	0.1631432	4.7315406	40.80	0.0771063	4.9955328
0.90	1.5330881	0.5280456	10.90	0.7247822	3.0082275	20.90	0.3425922	4.1809258	30.90	0.1619251	4.7352781	40.90	0.0765306	4.9972993
1.00	1.5216476	0.5631495	11.00	0.7193719	3.0248283	21.00	0.3400345	4.1887738	31.00	0.1607161	4.7389876	41.00	0.0759592	4.9990526
1.10	1.5102924	0.5979915	11.10	0.7140020	3.0413051	21.10	0.3374959	4.1965633	31.10	0.1595162	4.7426695	41.10	0.0753920	5.0007928
1.20	1.4990218	0.6325737	11.20	0.7086722	3.0576590	21.20	0.3349762	4.2042945	31.20	0.1583252	4.7463239	41.20	0.0748291	5.0025200
1.30	1.4878354	0.6668980	11.30	0.7033821	3.0738908	21.30	0.3324754	4.2119681	31.30	0.1571431	4.7499510	41.30	0.0742704	5.0042344
1.40	1.4767323	0.7009663	11.40	0.6981315	3.0900015	21.40	0.3299932	4.2195844	31.40	0.1559698	4.7535511	41.40	0.0737159	5.0059359
1.50	1.4657121	0.7347805	11.50	0.6929201	3.1059920	21.50	0.3275295	4.2271438	31.50	0.1548053	4.7571242	41.50	0.0731655	5.0076247
1.60	1.4547740	0.7683425	11.60	0.6877476	3.1218631	21.60	0.3250842	4.2346468	31.60	0.1536495	4.7606707	41.60	0.0726192	5.0093010
1.70	1.4439176	0.8016542	11.70	0.6826137	3.1376158	21.70	0.3226572	4.2420938	31.70	0.1525023	4.7641907	41.70	0.0720770	5.0109647
1.80	1.4331421	0.8347174	11.80	0.6775182	3.1532509	21.80	0.3202483	4.2494852	31.80	0.1513637	4.7676845	41.80	0.0715388	5.0126160
1.90	1.4224470	0.8675340	11.90	0.6724606	3.1687694	21.90	0.3178574	4.2568214	31.90	0.1502335	4.7711521	41.90	0.0710047	5.0142549
2.00	1.4118316	0.9001058	12.00	0.6674408	3.1841720	22.00	0.3154843	4.2641028	32.00	0.1491118	4.7745939	42.00	0.0704745	5.0158816
2.10	1.4012955	0.9324347	12.10	0.6624584	3.1994597	22.10	0.3131289	4.2713299	32.10	0.1479985	4.7780099	42.10	0.0699483	5.0174962
2.20	1.3908379	0.9645224	12.20	0.6575133	3.2146333	22.20	0.3107912	4.2785031	32.20	0.1468935	4.7814005	42.20	0.0694260	5.0190987













(lanjutan)

8.30	2.2011275	7.2207024	18.30	0.4636445	9.3815491	28.30	0.0976168	9.8367623	38.30	0.0205505	9.9326064	48.30	0.0043262	9.9527838
8.40	2.1671203	7.2629961	18.40	0.4564771	9.3904629	28.40	0.0961076	9.8386393	38.40	0.0202328	9.9330016	48.40	0.0042594	9.9528670
8.50	2.1336382	7.3046368	18.50	0.4494205	9.3992388	28.50	0.0946217	9.8404872	38.50	0.0199199	9.9333906	48.50	0.0041935	9.9529489
8.60	2.1006730	7.3456346	18.60	0.4424730	9.4078792	28.60	0.0931588	9.8423066	38.60	0.0196120	9.9337736	48.60	0.0041287	9.9530295
8.70	2.0682168	7.3859995	18.70	0.4356329	9.4163860	28.70	0.0917185	9.8440978	38.70	0.0193087	9.9341507	48.70	0.0040648	9.9531089
8.80	2.0362616	7.4257411	18.80	0.4288985	9.4247613	28.80	0.0903005	9.8458614	38.80	0.0190102	9.9345220	48.80	0.0040020	9.9531871
8.90	2.0047999	7.4648691	18.90	0.4222681	9.4330072	28.90	0.0889044	9.8475976	38.90	0.0187163	9.9348875	48.90	0.0039401	9.9532640
9.00	1.9738240	7.5033929	19.00	0.4157403	9.4411256	29.00	0.0875299	9.8493071	39.00	0.0184269	9.9352474	49.00	0.0038792	9.9533398
9.10	1.9433263	7.5413219	19.10	0.4093134	9.4491185	29.10	0.0861766	9.8509901	39.10	0.0181420	9.9356017	49.10	0.0038192	9.9534144
9.20	1.9132996	7.5786652	19.20	0.4029858	9.4569878	29.20	0.0848442	9.8526471	39.20	0.0178615	9.9359506	49.20	0.0037602	9.9534878
9.30	1.8837365	7.6154318	19.30	0.3967560	9.4647356	29.30	0.0835325	9.8542784	39.30	0.0175854	9.9362940	49.30	0.0037020	9.9535601
9.40	1.8546300	7.6516307	19.40	0.3906225	9.4723636	29.40	0.0822410	9.8558846	39.40	0.0173135	9.9366322	49.40	0.0036448	9.9536313
9.50	1.8259729	7.6872707	19.50	0.3845838	9.4798736	29.50	0.0809695	9.8574659	39.50	0.0170458	9.9369651	49.50	0.0035884	9.9537014
9.60	1.7977583	7.7223602	19.60	0.3786385	9.4872676	29.60	0.0797177	9.8590228	39.60	0.0167822	9.9372928	49.60	0.0035330	9.9537704
9.70	1.7699794	7.7569079	19.70	0.3727850	9.4945473	29.70	0.0784852	9.8605556	39.70	0.0165228	9.9376155	49.70	0.0034783	9.9538383
9.80	1.7426296	7.7909221	19.80	0.3670220	9.5017145	29.80	0.0772717	9.8620647	39.80	0.0162673	9.9379332	49.80	0.0034246	9.9539052
9.90	1.7157021	7.8244109	19.90	0.3613481	9.5087708	29.90	0.0760771	9.8635504	39.90	0.0160158	9.9382460	49.90	0.0033716	9.9539710
10.00	1.6891904	7.8573826	20.00	0.3557620	9.5157182	30.00	0.0749008	9.8650132	40.00	0.0157682	9.9385540	50.00	0.0033195	9.9540359
$V_{\max}$ : 4.635E+02				$K_S$ : 2.653E-04										
$K_M$ : 7.891E-01				$K_B$ : 1.394E+00										
Error : 0.3179														









(lanjutan)

8.30	0.9966833	3.1448663	18.30	0.4181543	4.8731170	28.30	0.1754304	5.5982107	38.30	0.0735984	5.9024152	48.30	0.0308766	6.0300387	
8.40	0.9880640	3.1706149	18.40	0.4145380	4.8839202	28.40	0.1739132	5.6027431	38.40	0.0729619	5.9043167	48.40	0.0306096	6.0308364	
8.50	0.9795192	3.1961409	18.50	0.4109529	4.8946300	28.50	0.1724091	5.6072363	38.50	0.0723309	5.9062017	48.50	0.0303449	6.0316272	
8.60	0.9710483	3.2214462	18.60	0.4073988	4.9052472	28.60	0.1709180	5.6116906	38.60	0.0717053	5.9080705	48.60	0.0300824	6.0324112	
8.70	0.9626507	3.2465326	18.70	0.4038755	4.9157725	28.70	0.1694398	5.6161065	38.70	0.0710851	5.9099231	48.70	0.0298222	6.0331885	
8.80	0.9543257	3.2714021	18.80	0.4003826	4.9262068	28.80	0.1679744	5.6204841	38.80	0.0704704	5.9117596	48.80	0.0295643	6.0339590	
8.90	0.9460726	3.2960566	18.90	0.3969199	4.9365509	28.90	0.1665217	5.6248239	38.90	0.0698609	5.9135803	48.90	0.0293086	6.0347228	
9.00	0.9378910	3.3204978	19.00	0.3934872	4.9468055	29.00	0.1650815	5.6291261	39.00	0.0692567	5.9153853	49.00	0.0290552	6.0354800	
9.10	0.9297801	3.3447277	19.10	0.3900842	4.9569715	29.10	0.1636538	5.6333912	39.10	0.0686577	5.9171746	49.10	0.0288039	6.0362307	
9.20	0.9217393	3.3687481	19.20	0.3867106	4.9670495	29.20	0.1622384	5.6376193	39.20	0.0680639	5.9189484	49.20	0.0285548	6.0369749	
9.30	0.9137680	3.3925607	19.30	0.3833661	4.9770404	29.30	0.1608353	5.6418109	39.30	0.0674753	5.9207069	49.30	0.0283078	6.0377126	
9.40	0.9058657	3.4161675	19.40	0.3800506	4.9869448	29.40	0.1594443	5.6459662	39.40	0.0668917	5.9224502	49.40	0.0280630	6.0384440	
9.50	0.8980317	3.4395701	19.50	0.3767638	4.9967637	29.50	0.1580653	5.6500856	39.50	0.0663132	5.9241785	49.50	0.0278203	6.0391690	
9.60	0.8902655	3.4627703	19.60	0.3735054	5.0064976	29.60	0.1566983	5.6541694	39.60	0.0657397	5.9258917	49.60	0.0275797	6.0398878	
9.70	0.8825664	3.4857699	19.70	0.3702752	5.0161473	29.70	0.1553431	5.6582178	39.70	0.0651711	5.9275902	49.70	0.0273411	6.0406003	
9.80	0.8749339	3.5085706	19.80	0.3670729	5.0257135	29.80	0.1539996	5.6622313	39.80	0.0646075	5.9292740	49.80	0.0271047	6.0413067	
9.90	0.8673674	3.5311742	19.90	0.3638983	5.0351971	29.90	0.1526677	5.6662100	39.90	0.0640487	5.9309432	49.90	0.0268703	6.0420070	
10.00	0.8598664	3.5535822	20.00	0.3607511	5.0445986	30.00	0.1513474	5.6701543	40.00	0.0634948	5.9325979	50.00	0.0266379	6.0427012	
V <sub>max</sub> : 1.135E+03				K <sub>S</sub> : 1.099E-04											
K <sub>M</sub> : 1.436E+00				K <sub>B</sub> : 1.000E-10											
Error : 6.9035															







(lanjutan)

8.30	1.0453892	1.6255981	18.30	0.4643979	2.5588731	28.30	0.2062624	2.9735280	38.30	0.0916038	3.1577093	48.30	0.0406809	3.2395090	
8.40	1.0369428	1.6391660	18.40	0.4606445	2.5649024	28.40	0.2045951	2.9762063	38.40	0.0908632	3.1588989	48.40	0.0403520	3.2400373	
8.50	1.0285646	1.6526243	18.50	0.4569213	2.5708830	28.50	0.2029412	2.9788630	38.50	0.0901287	3.1600788	48.50	0.0400258	3.2405613	
8.60	1.0202541	1.6659739	18.60	0.4532283	2.5768153	28.60	0.2013007	2.9814982	38.60	0.0894001	3.1612492	48.60	0.0397022	3.2410811	
8.70	1.0120107	1.6792158	18.70	0.4495651	2.5826997	28.70	0.1996735	2.9841121	38.70	0.0886773	3.1624102	48.70	0.0393812	3.2415967	
8.80	1.0038338	1.6923507	18.80	0.4459315	2.5885365	28.80	0.1980594	2.9867049	38.80	0.0879605	3.1635617	48.80	0.0390629	3.2421081	
8.90	0.9957230	1.7053795	18.90	0.4423273	2.5943262	28.90	0.1964583	2.9892767	38.90	0.0872494	3.1647040	48.90	0.0387471	3.2426154	
9.00	0.9876776	1.7183032	19.00	0.4387522	2.6000690	29.00	0.1948702	2.9918278	39.00	0.0865440	3.1658370	49.00	0.0384338	3.2431186	
9.10	0.9796973	1.7311224	19.10	0.4352059	2.6057655	29.10	0.1932950	2.9943582	39.10	0.0858444	3.1669608	49.10	0.0381231	3.2436177	
9.20	0.9717813	1.7438382	19.20	0.4316884	2.6114159	29.20	0.1917324	2.9968682	39.20	0.0851504	3.1680756	49.20	0.0378149	3.2441128	
9.30	0.9639293	1.7564513	19.30	0.4281992	2.6170207	29.30	0.1901825	2.9993579	39.30	0.0844620	3.1691814	49.30	0.0375092	3.2446038	
9.40	0.9561408	1.7689625	19.40	0.4247383	2.6225802	29.40	0.1886452	3.0018274	39.40	0.0837792	3.1702782	49.40	0.0372059	3.2450909	
9.50	0.9484151	1.7813727	19.50	0.4213053	2.6280947	29.50	0.1871202	3.0042770	39.50	0.0831020	3.1713662	49.50	0.0369052	3.2455741	
9.60	0.9407517	1.7936826	19.60	0.4179001	2.6335647	29.60	0.1856076	3.0067068	39.60	0.0824301	3.1724453	49.60	0.0366068	3.2460534	
9.70	0.9331503	1.8058932	19.70	0.4145223	2.6389905	29.70	0.1841072	3.0091170	39.70	0.0817638	3.1735158	49.70	0.0363109	3.2465288	
9.80	0.9256103	1.8180051	19.80	0.4111719	2.6443725	29.80	0.1826189	3.0115076	39.80	0.0811028	3.1745775	49.80	0.0360173	3.2470003	
9.90	0.9181312	1.8300192	19.90	0.4078486	2.6497110	29.90	0.1811427	3.0138790	39.90	0.0804471	3.1756307	49.90	0.0357261	3.2474680	
10.00	0.9107124	1.8419363	20.00	0.4045520	2.6550063	30.00	0.1796784	3.0162312	40.00	0.0797968	3.1766754	50.00	0.0354373	3.2479320	
V <sub>max</sub> : 1.382E+02				K <sub>S</sub> : 5.154E-04											
K <sub>M</sub> : 8.773E-01				K <sub>B</sub> : 8.610E-01											
Error : 2.2783															









(lanjutan)

7.70	0.2726860	0.7092239	17.30	0.1111761	1.1079052	26.90	0.0453268	1.2704516	36.50	0.0184798	1.3367225	46.10	0.0075342	1.3637413
7.80	0.2701494	0.7154854	17.40	0.1101419	1.1104581	27.00	0.0449052	1.2714925	36.60	0.0183079	1.3371469	46.20	0.0074641	1.3639143
7.90	0.2676364	0.7216887	17.50	0.1091173	1.1129872	27.10	0.0444874	1.2725236	36.70	0.0181376	1.3375673	46.30	0.0073947	1.3640857
8.00	0.2651468	0.7278342	17.60	0.1081023	1.1154929	27.20	0.0440736	1.2735452	36.80	0.0179689	1.3379838	46.40	0.0073259	1.3642555
8.10	0.2626804	0.7339226	17.70	0.1070966	1.1179752	27.30	0.0436636	1.2745572	36.90	0.0178017	1.3383964	46.50	0.0072578	1.3644237
8.20	0.2602368	0.7399544	17.80	0.1061004	1.1204344	27.40	0.0432574	1.2755599	37.00	0.0176361	1.3388052	46.60	0.0071902	1.3645903
8.30	0.2578160	0.7459300	17.90	0.1051134	1.1228708	27.50	0.0428550	1.2765532	37.10	0.0174720	1.3392101	46.70	0.0071234	1.3647555
8.40	0.2554178	0.7518500	18.00	0.1041356	1.1252844	27.60	0.0424564	1.2775373	37.20	0.0173095	1.3396113	46.80	0.0070571	1.3649190
8.50	0.2530418	0.7577150	18.10	0.1031669	1.1276757	27.70	0.0420614	1.2785122	37.30	0.0171485	1.3400088	46.90	0.0069914	1.3650811
8.60	0.2506879	0.7635255	18.20	0.1022072	1.1300447	27.80	0.0416701	1.2794780	37.40	0.0169890	1.3404026	47.00	0.0069264	1.3652416
8.70	0.2483560	0.7692818	18.30	0.1012564	1.1323916	27.90	0.0412825	1.2804349	37.50	0.0168309	1.3407927	47.10	0.0068620	1.3654007
8.80	0.2460457	0.7749847	18.40	0.1003145	1.1347167	28.00	0.0408985	1.2813829	37.60	0.0166743	1.3411792	47.20	0.0067981	1.3655582
8.90	0.2437569	0.7806345	18.50	0.0993813	1.1370202	28.10	0.0405180	1.2823220	37.70	0.0165192	1.3415621	47.30	0.0067349	1.3657144
9.00	0.2414894	0.7862317	18.60	0.0984568	1.1393023	28.20	0.0401411	1.2832524	37.80	0.0163656	1.3419414	47.40	0.0066722	1.3658690
9.10	0.2392430	0.7917769	18.70	0.0975409	1.1415631	28.30	0.0397677	1.2841742	37.90	0.0162133	1.3423172	47.50	0.0066102	1.3660222
9.20	0.2370175	0.7972704	18.80	0.0966335	1.1438029	28.40	0.0393977	1.2850874	38.00	0.0160625	1.3426895	47.60	0.0065487	1.3661740
9.30	0.2348127	0.8027129	18.90	0.0957346	1.1460219	28.50	0.0390312	1.2859920	38.10	0.0159131	1.3430584	47.70	0.0064878	1.3663244
9.40	0.2326284	0.8081048	19.00	0.0948440	1.1482202	28.60	0.0386682	1.2868883	38.20	0.0157650	1.3434238	47.80	0.0064274	1.3664734
9.50	0.2304644	0.8134465	19.10	0.0939618	1.1503981	28.70	0.0383084	1.2877762	38.30	0.0156184	1.3437858	47.90	0.0063676	1.3666210
9.60	0.2283206	0.8187385	19.20	0.0930877	1.1525557	28.80	0.0379521	1.2886559	38.40	0.0154731	1.3441444	48.00	0.0063084	1.3667672
V <sub>max</sub> : 8.208E+02				K <sub>S</sub> : 1.041E-04										
K <sub>M</sub> : 9.138E-01				K <sub>B</sub> : 2.098E-01										
Error : 2.1542														