

Biorefinery

Konversi Biomassa menjadi
Bioenergi, Biomaterial dan Biokimia

Arief Budiman, dkk.



GADJAH MADA UNIVERSITY PRESS

KATA PENGANTAR

Sebagai negara yang memiliki potensi biomassa melimpah, Indonesia diharapkan dapat memanfaatkannya secara optimal, guna memenuhi kebutuhan energi dan produk-produk kimia secara mandiri. Gagasan tersebut dapat diwujudkan mengingat banyaknya biomassa memiliki cabang-cabang pemanfaatan yang sangat luas. Konsep *biorefinery* dimunculkan untuk mengolah biomassa menjadi beragam produk turunan, sebagaimana analog dengan konsep *petroleum refinery* yang mengolah minyak bumi menjadi berbagai produk.

Sebelum biomassa secara spesifik dikonversi menjadi produk turunannya, pada umumnya biomassa dipersiapkan terlebih dahulu agar menjadi bahan baku antara (*platform*) tertentu. Beberapa *platform biorefinery* yang dibahas dalam buku ini adalah gula dan pati, minyak nabati, lignoselulosa, gas sintesis, biogas, serta minyak hasil pirolisis (*bio-oil*). Dari berbagai *platform* tersebut, dapat dihasilkan beragam senyawa kimia yang dapat digunakan, baik sebagai sumber energi, bahan baku industri, maupun kehidupan sehari-hari.

Buku *Biorefinery* ini ditulis dengan harapan pembaca mempunyai pengetahuan yang komprehensif dan terintegrasi mengenai pemanfaatan biomassa. Buku ini menyajikan informasi-informasi penting bagi para pembaca yang belum terlalu mengenal penggunaan biomassa dan memberikan uraian mengenai teknologi-teknologi yang terlibat di dalamnya. Pada Bab 1 dan 2 akan dibahas pengantar mengenai *biorefinery*, bahan baku, dan produk-produk *biorefinery*. Pada Bab 3 akan dipaparkan berbagai teknologi dan bahan baku antara dalam proses *biorefinery*. Pembahasan yang lebih dalam terkait produksi bioenergi, biomaterial, dan biokimia melalui *biorefinery* dapat dipelajari pada Bab 4–7. Sebagai pelengkap, akan dibahas pula aspek LCA dan ekonomi dari proses *biorefinery* dalam Bab 7–8.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu menyiapkan penyusunan buku ini: mahasiswa S1, S2, dan S3 yang tergabung dalam *Process System Engineering research group* (PSErg), jurusan Teknik Kimia FT UGM yang selalu memberi inspirasi dalam pengembangan energi terbarukan, dan kolega-kolega yang selalu mendukung sehingga buku ini bisa kami selesaikan. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Aitia Mulyawati Widiannita, M.Eng., Sangga Hadi Pratama, S.T., Indrayana Pratama, S.T., Baskoro Ajie, S.T., dan Resti Nurmala Dewi, S.T. yang telah membantu dalam mempersiapkan buku ini.

Akhir kata, kami ingin menyampaikan permohonan maaf jika dalam penyusunan buku *Biorefinery* ini masih banyak kekurangan. Masukan dan saran sangat kami harapkan agar edisi selanjutnya bisa lebih sempurna.

Penulis

KATA PENGANTAR EDITOR

Puji syukur terpanjat kepada Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberi daya dan upaya-Nya sehingga buku berjudul *Biorefinery: Konversi Biomassa menjadi Bioenergi, Biomaterial, dan Biokimia* dapat terselesaikan dengan baik dalam proses editorialnya.

Konsep *biorefinery* yang dihadirkan dalam buku ini berusaha memberikan pengetahuan mengenai tahapan untuk mengonversi biomassa menjadi sesuatu yang bermanfaat bagi manusia. Sebelum menjadi produk turunan yang dapat dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari, biomassa diproses terlebih dahulu menjadi bahan baku antara (*platform*) tertentu. Pembahasan mengenai *platform biorefinery* berupa gula dan pati, minyak nabati, lignoselulosa, gas sintesis, biogas, serta minyak hasil pirolisis (*bio-oil*).

Buku ini terdiri atas delapan bab dengan rincian (1) Pengantar, (2) Bahan Baku dan Produk *Biorefinery*, (3) Teknologi *Biorefinery*, (4) Sintesis dan Produksi Bioenergi, (5) Sintesis dan Produksi Biomaterial, (6) Sintesis dan Produksi *Biochemical*, (7) *Life Cycle Assessment*, serta (8) Aspek Ekonomi. Proses konversi biomassa akan dikupas secara sistematis dari Bab 1—6. Selebihnya, dalam Bab 7 dan 8 melengkapi proses *biorefinery* dari aspek LCA dan ekonominya.

Dengan demikian, buku ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai *biorefinery* melalui pemanfaatan biomassa untuk keberlangsungan hidup manusia. Hal ini, salah satunya, berkaitan dengan upaya *biorefinery* dalam mengatasi pemanasan global dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
KATA PENGANTAR EDITOR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
BAB 1 PENGANTAR	1
1.1 Konsep <i>Biorefinery</i>	1
1.2 Klasifikasi <i>Biorefinery</i>	3
1.2.1 Klasifikasi Berdasarkan <i>Platform</i>	3
1.2.2 Klasifikasi Berdasarkan Fase	9
1.2.3 Klasifikasi Berdasarkan Pendekatan	11
1.3 <i>Biorefinery vs. Petroleum Refinery</i>	12
Referensi.....	14
BAB 2 BAHAN BAKU DAN PRODUK <i>BIOREFINERY</i>	15
2.1 Limbah Pertanian	16
2.1.1 Sumber Limbah Biomassa	17
2.1.2 Skema Konversi Limbah Biomassa	18
2.1.3 Konversi Menjadi Sumber Energi	18
2.1.4 Konversi Menjadi Sumber Material.....	20
2.2 Biomassa Akuatik (Mikroalga) dan Residual Biogenik...	21
2.2.1 Konsep <i>Biorefinery</i> Mikroalga.....	22
2.2.2 <i>Biorefinery</i> Mikroalga untuk <i>Biofuel</i> Alga.....	23
2.3 Minyak Nabati, Terpentin, dan Lemak Hewan	26
2.3.1 <i>Biorefinery</i> Minyak Nabati.....	27

2.4	Produk Energi.....	28
2.4.1	Biodiesel	28
2.4.2	Bioetanol.....	28
2.4.3	Arang	29
2.5	Produk Material.....	29
2.5.1	Serat	29
2.5.2	Nano-material	29
2.6	Produk Bahan Kimia	30
2.6.1	Furfural	30
2.6.2	Asam Lemak	31
2.6.3	Karbohidrat	31
2.6.4	<i>Terpene</i>	31
	Referensi.....	32
BAB 3	TEKNOLOGI <i>BIOREFINERY</i>	35
3.1	<i>Biorefinery</i> Gula dan Pati	36
3.1.1	<i>Biorefinery</i> Gula.....	36
3.1.2	<i>Biorefinery</i> Pati	39
3.2	<i>Biorefinery</i> Minyak Nabati dan Minyak Alga	42
3.2.1	<i>Biorefinery</i> Minyak Nabati.....	42
3.2.2	<i>Biorefinery</i> Minyak Alga.....	45
3.3	<i>Biorefinery</i> Lignoselulosa.....	48
3.4	<i>Biorefinery</i> Gas Sintesis	51
3.5	<i>Biorefinery</i> Biogas.....	55
3.6	<i>Biorefinery</i> Minyak Pirolisis	57
	Referensi.....	59
BAB 4	SINTESIS DAN PRODUKSI BIOENERGI.....	61
4.1	Konversi Termokimia.....	62
4.1.1	Pembakaran.....	63
4.1.2	Gasifikasi	65
4.1.3	Pirolisis	67
4.1.4	Karbonisasi/torefaksi	68
4.1.5	<i>Liquefaction</i>	68

4.2	Konversi Biokimia	69
4.2.1	Fermentasi Alkohol.....	70
4.2.2	Fermentasi Aseton-Butanol.....	72
4.2.3	<i>Anaerobic Digestion</i>	72
4.3	Biomassa menjadi Bioenergi.....	74
4.3.1	Biomassa menjadi Biofuel	74
4.3.2	Biomassa menjadi Listrik	77
	Referensi.....	79
BAB 5	SINTESIS DAN PRODUKSI BIOMATERIAL	81
5.1	<i>BIOCHAR</i>	81
5.1.1	Teknologi Produksi <i>Biochar</i>	82
5.1.2	Kriteria Reaktor	83
5.2	Biokomposit	90
5.2.1	Klasifikasi	90
5.3	Biofiber.....	100
5.3.1	Ekstraksi Serat	103
5.3.2	Komposisi Kimia dari Serat.....	104
5.3.3	Struktur Serat	105
5.4	Bioplastik	107
5.4.1	Pendekatan Sintesis secara Biologis (SB) untuk Mengubah Biomassa menjadi Bioplastik	109
5.5	<i>Pulp and Paper</i>	111
5.5.1	Proses <i>Pulping</i>	112
5.5.2	<i>Pulping</i> secara Kimiawi.....	114
5.5.3	<i>Bleaching</i>	116
5.5.4	Pembuatan Kertas	117
	Referensi.....	119
BAB 6	SINTESIS DAN PRODUKSI <i>BIOCHEMICAL</i>	121
6.1	Pendahuluan	121
6.2	Proses Fermentasi Glukosa	125
6.2.1	<i>Platform</i> Asam Laktat.....	126
6.2.2	<i>Platform</i> Asam 3-hidroksipropionat	129
6.2.3	<i>Platform</i> Asam Glutamat	132

6.3	Transformasi Kimia Monosakarida.....	132
6.3.1	Dehidrasi Monosakarida.....	133
6.3.2	Oksidasi Monosakarida.....	142
6.4	Transformasi Kimia Disakarida: Sukrosa	144
6.4.1	Hidrolisis.....	144
6.4.2	Esterifikasi	144
6.4.3	Eterifikasi	144
6.4.4	<i>Glucosyl Shift</i>	145
6.4.5	Polimer.....	145
6.5	Reaksi <i>Group</i> Karboksi.....	146
6.5.1	Asam Lemak (<i>Fatty Acid</i>).....	146
6.5.2	<i>Fatty Amines</i>	148
6.5.3	<i>Fatty Alcohol</i>	151
6.6	Reaksi <i>Group Fatty Chain</i>	168
6.6.1	Epoksidasi.....	169
6.6.2	Pembukaan Cincin Turunan Asam Lemak Terepoksidasi	172
6.6.3	Hidroformilasi.....	173
6.6.4	Dimerisasi	176
6.6.5	<i>Oxidative Cleavage</i> dan Ozonolisis.....	177
6.6.6	Metatesis	178
6.7	Reaksi <i>Terpene</i>	181
6.7.1	<i>Pinene</i>	186
6.7.2	<i>Limonene</i>	192
6.7.3	<i>Carene</i>	195
6.7.4	<i>Camphene</i>	198
6.7.5	<i>Citral</i>	199
	Referensi.....	204
BAB 7	<i>LIFE CYCLE ASSESSMENT</i>	207
7.1	<i>LCA Sugar and Starch Biorefinery</i>	210
7.1.1	Tujuan dan Ruang Lingkup.....	210
7.1.2	Unit Fungsional	210
7.1.3	Batasan Sistem.....	210
7.1.4	Metodologi.....	214

7.1.5	Konsumsi dan Emisi	214
7.2	LCA <i>Biorefinery</i> Minyak Nabati	219
7.2.1	Metodologi	219
7.2.2	Perubahan Penggunaan Lahan Secara Tidak Langsung (<i>Indirect Land Use Change</i> , iLUC).....	220
7.2.3	<i>Life Cycle Impact Assessment</i> (LCIA).....	221
7.2.4	Hasil	221
7.2.5	Kesimpulan	223
7.3	LCA <i>Biorefinery</i> Minyak Alga	224
7.3.1	Tujuan dan Ruang Lingkup LCA	224
7.3.2	Tahapan Proses.....	226
7.3.3	Pembuangan dan <i>Recycle</i> Residu Biomassa Alga .	231
7.3.4	Kesimpulan	231
7.4	LCA <i>Biorefinery</i> Lignoselulosa.....	232
7.4.1	Tujuan dan Ruang Lingkup LCA Lignoselulosa ...	232
7.4.2	LCI Produksi Etanol	234
7.4.3	Hasil LCA pada Kerangka Waktu yang Berbeda...	236
7.4.4	Kesimpulan	238
7.5	LCA <i>Biorefinery</i> Gas Sintetis	239
7.5.1	Tujuan dan Ruang Lingkup.....	239
7.5.2	Unit Fungsional.....	240
7.5.3	Batasan Sistem.....	240
7.5.4	LCIA Listrik Gas Sintetis	241
7.5.5	Efek Penyerapan Karbon dari <i>Biochar</i>	241
7.5.6	Perbandingan EMisi GHG Listrik Gas Sintetis dengan Teknologi Listrik Lain.....	242
7.5.7	Kesimpulan	243
7.6	LCA <i>Biorefinery</i> Minyak Pirolisis.....	243
7.6.1	Tujuan dan Ruang Lingkup.....	243
7.6.2	Batasan Sistem dan Deskripsi Sistem Produk	244
7.6.3	Alokasi	244
7.6.4	Input dan Hasil Produksi Minyak Pirolisis (PyOil)	247
7.6.5	Kesimpulan	249
7.7	LCA <i>Biorefinery</i> Biogas	249

7.7.1	Sistem Pengelolaan Kotoran.....	250
7.7.2	Asumsi yang Digunakan untuk Inventori Emisi....	250
7.7.3	Hasil.....	252
7.7.4	Kesimpulan.....	256
	Referensi.....	257
BAB 8	ASPEK EKONOMI.....	259
	Referensi.....	270
	GLOSARIUM.....	271
	INDEKS.....	277
	TENTANG PENULIS.....	283

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Perbedaan <i>biorefinery</i> dan <i>petroleum refinery</i>	13
Tabel 2.1	Jenis tanaman dan limbah biomassa yang dihasilkan	18
Tabel 2.2	Jenis tanaman dan limbah biomassa yang dihasilkan	19
Tabel 2.3	Jenis tanaman dan limbah biomassa yang dihasilkan	20
Tabel 3.1	Kelebihan dan kekurangan beberapa metode hidrolisis	41
Tabel 3.2	Hasil minyak pada beberapa jenis tanaman dan mikroalga ...	45
Tabel 3.3	Berbagai teknologi gasifikasi	52
Tabel 4.1	Perbandingan metode konversi termokimia	63
Tabel 5.1	Teknologi dan distribusi produk konversi termokimia biomassa	89
Tabel 5.2	Suhu ekstrusi panas untuk bermacam-macam logam.....	95
Tabel 5.3	Daftar biofiber penting	101
Tabel 5.4	Ketersediaan dan komposisi biofiber	105
Tabel 5.5	Polimer untuk bioplastik di pasar	108
Tabel 6.1	Berbagai katalis produksi HMF dengan solven DMSO.....	136
Tabel 6.2	Produk turunan HMF sebagai pengganti petrokimia	137
Tabel 6.3	Metode oksidasi glukosa	143
Tabel 6.4	Komposisi asam lemak beberapa jenis minyak nabati.....	170
Tabel 6.5	Kelompok senyawa <i>terpenes</i> dan jumlah unit <i>isoprene</i>	184
Tabel 6.5	Kelompok senyawa <i>terpenes</i> dan jumlah unit <i>isoprene</i>	188
Tabel 6.7	Berbagai katalis yang dapat digunakan pada hidrogenasi <i>citral</i> (produksi <i>nerol</i> dan <i>geraniol</i>)	202
Tabel 6.8	Berbagai katalis yang dapat digunakan pada hidrogenasi <i>citral</i> (produksi <i>citronellal</i>)	202
Tabel 6.9	Berbagai katalis yang dapat digunakan pada hidrogenasi <i>citral</i> (produksi <i>citronellol</i>)	203

Tabel 7.1	Lima tahapan dalam daur hidup (<i>life cycle</i>) gula tebu beserta sumber datanya.....	212
Tabel 7.2	Subsistem dan asumsi utama.....	213
Tabel 7.3	Daftar kebutuhan sumber daya dan emisi dalam produksi 1 ton gula.....	215
Tabel 7.4	Kontribusi total subsistem. Unit fungsional didefinisikan 1 ton gula mentah yang diekspor.....	217
Tabel 7.5	Desain kultivasi mikroalga dan parameter operasional untuk memproduksi satu unit fungsional 104 MJ.....	227
Tabel 7.6	Parameter desain dan operasional pemanenan mikroalga untuk memproduksi satu unit fungsional (<i>functional unit</i> , f.u) menghasilkan 10 ⁴ MJ biodiesel mikroalga.....	229
Tabel 7.7	Parameter desain dan operasional ekstraksi lipid dan konversinya untuk menghasilkan satu unit fungsional (f.u) produksi 10 ⁴ MJ biodiesel mikroalga.....	230
Tabel 7.8	Parameter desain dan operasional ekstraksi lipid dan konversinya untuk menghasilkan satu unit fungsional (f.u) produksi 104 MJ biodiesel mikroalga.....	233
Tabel 7.9	Aliran material dan energi fasilitas konversi biokimia dan termokimia kapasitas 2.000 ton/hari (unit: kg/jam).....	234
Tabel 7.10	Kinerja teknik dari pabrik biokimia dan termokimia.....	237
Tabel 7.11	EAF untuk setiap bahan baku pada setiap tahapan.....	246
Tabel 7.12	Emisi GHG (CO ₂ ekuivalen) untuk minyak pirolisis stabil menggunakan alokasi <i>displacement</i> dengan unit fungsional 1 MJ minyak pirolisis stabil.....	247
Tabel 7.13	CED untuk minyak pirolisis menggunakan alokasi dengan unit fungsional 1 MJ.....	248
Tabel 7.14	Komposisi bahan kimia kotoran babi dalam padatan, cairan, dan <i>slurry</i> dari kandang hewan dalam rumah tangga dengan dan tanpa biogas (dalam g/kg berat basah).....	251
Tabel 7.15	Kandungan energi biogas, faktor efisiensi energi, dan emisi GHG selama pembakaran pada bahan bakar yang berbeda...	252
Tabel 7.16	Kontribusi peternakan biogas dan non-biogas terhadap potensi eutrofikasi air bersih selama pengelolaan pupuk, dari tempat penyimpanan sampai penerapannya, dalam kg P eq.....	254

Tabel 8.1	Capital investment skenario <i>Greenfield</i> dan skenario <i>Repurposing</i>	265
Tabel 8.2	Hasil analisis profitabilitas sistem CHP 1, 2, dan 3 untuk berbagai skenario.....	268

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Tujuan <i>biorefinery</i>	2
Gambar 1.2	Prinsip dasar <i>biorefinery</i>	2
Gambar 1.3	Skema <i>biorefinery</i> gula-lignin	4
Gambar 1.4	Skema Biorefinery lignoselulosa.....	7
Gambar 1.5	Skema <i>green-biorefinery</i>	8
Gambar 1.6	Skema <i>Whole-crop biorefinery</i>	10
Gambar 1.7	Skema <i>integrated biorefinery</i>	11
Gambar 2.1	Skema konversi limbah biomassa pertanian	19
Gambar 2.2	Skema <i>biorefinery</i> mikroalga yang bertujuan memproduksi omega-3 asam lemak, pakan ternak, dan biodiesel sebagai produk utama. Jika biogas/etanol diproduksi dibandingkan pakan ternak, nutrisi dapat berpotensi untuk di- <i>recycle</i> ...	22
Gambar 2.3	Berbagai jenis sumber bioenergi dari alga (mikro dan makroalga).....	23
Gambar 2.4	Skema <i>biorefinery</i> minyak nabati.....	27
Gambar 2.5	Skema proses produksi etanol dari sumber daya terbarukan.....	28
Gambar 2.6	Produksi LA dari <i>furfuryl alcohol</i>	30
Gambar 3.1	Skema <i>Biorefinery</i>	36
Gambar 3.2	Proses-proses dalam <i>Biorefinery</i> Gula	38
Gambar 3.3	Proses-proses dalam Biorefinery Pati (1).....	39
Gambar 3.4	Proses-proses dalam <i>Biorefinery</i> Pati (2)	40
Gambar 3.5	Proses-proses dalam <i>Biorefinery</i> Minyak Nabati	43
Gambar 3.6	Proses-proses dalam <i>Biorefinery</i> Minyak Nabati (2)	44
Gambar 3.7	Proses-proses dalam Biorefinery Minyak Alga.....	46
Gambar 3.8	Struktur α - <i>glucose</i> (a) dan β - <i>glucose</i> (b).....	48

Gambar 3.9	Proses-proses dalam <i>Biorefinery</i> Lignoselulosa (1)	49
Gambar 3.10	Proses-proses dalam <i>Biorefinery</i> Lignoselulosa (2)	50
Gambar 3.11	Proses-proses dalam <i>Biorefinery</i> Gas Sintesis (1)	53
Gambar 3.12	Proses-proses dalam <i>Biorefinery</i> Gas Sintesis (2)	54
Gambar 3.13	Proses-proses dalam <i>Biorefinery</i> Biogas	56
Gambar 4.1	Skema umum proses konversi biomassa termokimia untuk memproduksi bahan bakar, panas, dan <i>power</i>	66
Gambar 4.2	Skema umum proses termokimia dan biokimia untuk memproduksi bahan bakar, senyawa kimia, panas, dan <i>power</i>	71
Gambar 4.3	Mekanisme <i>Anaerobic Digestion</i>	73
Gambar 4.4	Konversi Biomassa menjadi energi dalam bentuk yang berbeda-beda	74
Gambar 4.5	Biomassa menjadi biofuel	76
Gambar 5.1	Skema sistem biochar	82
Gambar 5.2	Reaktor <i>fast pyrolysis</i> jenis <i>fluidized bed</i>	85
Gambar 5.3	Screw pyrolyser dengan heat carrier	86
Gambar 5.4	Gasifier berbeda yang sesuai untuk <i>co-production producer gas</i> dan <i>biochar</i>	88
Gambar 5.5	Skema proses <i>filament winding</i>	92
Gambar 5.6	Diagram proses <i>pultrusion</i>	93
Gambar 5.7	Ekstrusi melalui <i>die</i>	94
Gambar 5.8	Mesin <i>injection moulding</i>	96
Gambar 5.9	Proses resin <i>transfer moulding</i>	98
Gambar 5.10	Proses pembuatan SMC	99
Gambar 5.11	Struktur biofiber	100
Gambar 5.12	Sintesis secara biologis (SB), bioplastik, dan lingkungan	110
Gambar 5.13	Pembuatan produk kertas dari kayu dengan dua teknologi utama	111
Gambar 5.14	Skema <i>grinder</i>	113
Gambar 5.15	Sebuah chip refiner dengan satu disc berputar	113
Gambar 5.16	Sistem <i>cooking</i> kontinu	115
Gambar 5.17	Konfigurasi <i>cooking</i> sistem batch menggunakan dua digester dan tangki untuk cairan dan <i>pulp</i>	115

Gambar 5.18	Tahapan dalam <i>recovery</i> bahan kimia dan energi dalam proses <i>kraft</i>	116
Gambar 5.19	Plot sederhana mesin kertas	117
Gambar 6.1	Struktur <i>acetone</i> dan <i>propylene oxide</i>	122
Gambar 6.2	<i>Enantiomer</i> molekul 2-butanol	123
Gambar 6.3	<i>Enantiomer</i> molekul limonene.....	123
Gambar 6.4	Struktur senyawa <i>cis-trans</i> dan bukan <i>cis-trans</i>	123
Gambar 6.5	Struktur senyawa epoksid	124
Gambar 6.6	Contoh reaksi epoksidasi.....	124
Gambar 6.7	Contoh reaksi hidrogenasi.....	125
Gambar 6.8	Produk-produk fermentasi glukosa	126
Gambar 6.9	Produk-produk turunan asam laktat	127
Gambar 6.10	Produksi propilen glikol dari asam laktat dan laktat.....	129
Gambar 6.11	Reaksi kimia asam 3-hidroksipropionat menjadi produk turunannya.....	130
Gambar 6.12	Berbagai konversi asam glutamat menjadi produk-produk turunannya.....	133
Gambar 6.13	Produk-produk dehidrasi monosakarida	134
Gambar 6.14	Rute reaksi dehidrasi menjadi HMF	135
Gambar 6.15	Produk-produk turunan HMF.....	137
Gambar 6.16	Mekanisme reaksi pembentukan asam levulinat dari heksosa	140
Gambar 6.17	Produk turunan asam levulinat.....	141
Gambar 6.18	Jalur reaksi reduksi asam levulinat (2-metil tetrahidrofuran)	141
Gambar 6.19	Produk-produk hasil oksidasi glukosa	142
Gambar 6.20	Pembentukan isomaltulosa dan isomalt dari sukrosa	145
Gambar 6.21	Proses hidrolisis asam lemak	146
Gambar 6.22	Mekanisme sintesis <i>fatty amine</i> dari asam lemak	148
Gambar 6.23	Beberapa kemungkinan produk turunan gliserol	153
Gambar 6.24	Kemungkinan bentuk isomer poligliserol	154
Gambar 6.25	Sintesis PPD dengan hidrasi klorohidrin.....	156
Gambar 6.26	Metode hidrogenolisis oleh Dasari, dkk. dan kemungkinan produk samping yang dihasilkan.....	157
Gambar 6.27	Beberapa produk oksidasi gliserol	158

Gambar 6.28	Metode produksi gliseril karbonat	160
Gambar 6.29	Produksi monogliserida dengan pembukaan cincin glisidol.....	164
Gambar 6.30	Gliserolisis minyak nabati.....	166
Gambar 6.31	Berbagai metode sintesis gliserol formal	167
Gambar 6.32	Hidroformilasi, hidrokarboksilasi, dan reaksi Koch pada ikatan rangkap	174
Gambar 6.33	Metode dimerisasi <i>fatty derivative</i>	176
Gambar 6.34	Mekanisme reaksi <i>oxidative cleavage</i> dari ω -unsaturated <i>fatty compound</i>	178
Gambar 6.35	Mekanisme reaksi <i>oxidative cleavage</i> dari <i>internal unsaturated fatty compound</i>	178
Gambar 6.36	Mekanisme metatesis dengan katalis logam kompleks....	179
Gambar 6.37	Mekanisme reaksi homometatesis FAME.....	180
Gambar 6.38	Mekanisme reaksi metatesis silang pada FAME.....	180
Gambar 6.39	Metabolit sekunder tumbuhan.....	182
Gambar 6.40	Beberapa jenis <i>terpene</i> (unit isoprene ditunjukkan dengan garis merah muda dan dikelilingi garis).....	183
Gambar 6.41	Beberapa jenis <i>terpene</i> dengan unit isoprene siklis (unit isoprene ditunjukkan dengan garis merah muda).....	183
Gambar 6.42	Struktur isoprene	183
Gambar 6.43	Berbagai senyawa turunan <i>pinene</i>	186
Gambar 6.44	Berbagai produk reaksi isomerisasi α - <i>pinene</i>	187
Gambar 6.45	Berbagai senyawa turunan α - <i>pinene oxide</i>	188
Gambar 6.46	Epoksidasi α - <i>pinene</i> dengan katalis	189
Gambar 6.47	Berbagai senyawa turunan α - <i>pinene oxide</i>	190
Gambar 6.48	Berbagai senyawa hasil reaksi hidrasi α - <i>pinene</i>	191
Gambar 6.49	Berbagai senyawa hasil reaksi dehidroisomerisasi α - <i>pinen</i>	192
Gambar 6.50	Berbagai senyawa hasil reaksi isomerisasi <i>limonene</i>	193
Gambar 6.51	Berbagai senyawa hasil reaksi epoksidasi <i>limonene</i>	194
Gambar 6.52	Berbagai senyawa hasil reaksi isomerisasi <i>limonene oxide</i>	194
Gambar 6.53	Berbagai senyawa hasil reaksi dehidroisomerisasi <i>limonen</i>	195

Gambar 6.54	Berbagai senyawa hasil reaksi isomerisasi carene	196
Gambar 6.55	Berbagai senyawa hasil reaksi isomerisasi 3-carene oxide	197
Gambar 6.56	Berbagai senyawa hasil reaksi isomerisasi 2-carene oxide	197
Gambar 6.57	Berbagai senyawa hasil reaksi dehidroisomerisasi carene	198
Gambar 6.58	Berbagai senyawa hasil reaksi kondensasi aldol <i>citral</i>	200
Gambar 6.59	Berbagai senyawa hasil reaksi oksidasi Baeyer-Viliger...	200
Gambar 6.60	Berbagai senyawa hasil reaksi hidrogenasi <i>citral</i>	201
Gambar 7.1	Skema konsep dan aplikasi LCA.....	208
Gambar 7.2	Aliran proses daur hidup gula tebu	211
Gambar 7.2	Konsumsi energi primer dalam tahapan daur hidup.....	215
Gambar 7.4	Diagram dampak pemanasan global pada lima minyak nabati yang berbeda dengan mempertimbangkan iLUC..	222
Gambar 7.5	Diagram dampak pemanasan global pada lima minyak nabati yang berbeda tanpa mempertimbangkan iLUC.....	222
Gambar 7.6	Diagram penggunaan air irigasi pada lima minyak nabati yang berbeda	223
Gambar 7.7	Diagram okupasi lahan pada lima minyak nabati yang berbeda	223
Gambar 7.8	Batasan sistem LCA mikroalga.....	225
Gambar 7.9	Pilihan kultivasi mikroalga: a. <i>Open raceway pond</i> , b. <i>Annular PBR</i> , c. <i>Flat panel PBR</i> , dan d. <i>Tubular PBR</i>	226
Gambar 7.10	Batasan sistem dari siklus hidup pembangkitan listrik gas sintesis	240
Gambar 7.11	Dampak pemanasan global dari berbagai sumber dan teknologi listrik	242
Gambar 7.12	Batas sistem untuk LCA dengan beberapa input dan <i>co- product</i>	244
Gambar 7.13	Diagram alir proses untuk minyak pirolisis stabil termasuk input dan <i>co-product</i> yang signifikan.....	246
Gambar 7.14	Kontribusi sistem pengelolaan kotoran (a) non-biogas dan (b) biogas terhadap pemanasan global melalui siklus hidupnya	253

Gambar 7.15	Kontribusi peternakan dengan sistem pengelolaan kotoran biogas dan non-biogas yang berpotensi dalam penipisan bahan bakar fosil selama daur hidup pengelolaan kotoran.....	254
Gambar 7.16	Dampak relatif dari peternakan non-biogas dan biogas dalam empat kategori dampak	255
Gambar 8.1	Produksi minyak bumi dari tahun ke tahun.....	259
Gambar 8.2	Gambaran harga bioetanol dan biodiesel sebagai fungsi bahan baku	260