

Arief Budiman, dkk.

MIKROALGA

Kultivasi, Pemanenan, Ekstraksi, dan Konversi Energi



GADJAH MADA UNIVERSITY PRESS

MIKROALGA:

Kultivasi, Pemanenan, Ekstraksi, dan Konversi Energi

Penulis:

Arief Budiman, Eko Agus Suyono,
Agustina Merdekawati, Yano Surya Pradana,
Hanifrahmawan Sudiby, Latifa Seniorita,
Fadilla Noor Rahma, Laras Prasakti,
Erlina Rosa Evasari

Penyunting Bahasa:

Monica

Proofreader:

Dewi

Desain Sampul:

Pram's

Tata letak isi:

Zendi

Penerbit:

Gajah Mada University Press
Anggota IKAPI

Ukuran: 15,5 x 23 cm; xx + 260 hlm

ISBN: 978-602-386-283-2

1906184-B2E

Redaksi:

Jl. Grafika No. 1 Bulaksumur
Yogyakarta 55281
Telp./Fax.: (0274) 561037
Ugmpress.ugm.ac.id gmupress@ugm.ac.id

Cetakan pertama: Juli 2019

2853.094.07.19

Hak Penerbitan ©2019 Gajah Mada University Press

Dilarang mengutip dan memperbanyak tanpa izin tertulis dari penerbit, sebagian atau seluruhnya dalam bentuk apapun, baik cetak, photoprint, microfilm, dan sebagainya

KATA PENGANTAR

Dalam rangka mengembangkan energi terbarukan berbasis *biofuel*, perlu dipilih sumber daya yang mampu menyediakan kapasitas produksi yang diinginkan, tetapi di sisi lain tidak mengganggu kepentingan pangan dan ketersediaan lahan. Mikroalga sebagai sumber *biofuel* generasi ketiga memenuhi kriteria tersebut dan memiliki potensi strategis untuk diterapkan di Indonesia. Pemanfaatan mikroalga pada umumnya dilakukan melalui kandungan lipid dan biomasanya. Pemanfaatan mikroalga secara umum diawali oleh proses kultivasi, pemanenan, ekstraksi kandungan lipid, dan konversi menjadi energi.

Sebagai negara yang memiliki potensi maritim yang masif, kultivasi mikroalga dalam jumlah yang besar bukanlah suatu hal yang mustahil. Menurut berbagai studi, mikroalga memiliki produktivitas yang lebih besar dibanding tanaman-tanaman sumber *biofuel* generasi 1 dan 2. Hal tersebut disebabkan untuk menghasilkan minyak nabati dalam jumlah sama, mikroalga membutuhkan lahan yang lebih sedikit. Selain kandungan lipidnya diekstraksi dan dikonversi menjadi biodiesel, residu biomassa mikroalga dapat diproses baik secara termokimia maupun biokimia untuk menjadi sumber energi.

Buku ini ditulis dengan harapan pembaca mempunyai wawasan terkait pemanfaatan mikroalga dari kultivasi hingga konversi menjadi energi. Selain itu, pada buku ini juga akan didiskusikan aspek ekonomi dan lingkungan dari pemanfaatan mikroalga, sehingga pembaca memperoleh informasi yang komprehensif. Pada Bab 1 sampai 5, dibahas seluk-beluk mikroalga secara umum serta metode untuk menyiapkan mikroalga

dari kultivasi hingga ekstraksi. Bab 6 akan secara khusus memaparkan konversi lipid mikroalga menjadi biodiesel, sedangkan pada Bab 7 dan 8 akan berbicara mengenai konversi residu mikroalga setelah diekstraksi, beserta dengan beberapa teknologi yang digunakan. Pada Bab 9 hingga 11 pembahasan akan beralih pada isu-isu non-proses dari pemanfaatan mikroalga, yaitu analisis siklus hidup (LCA), analisis ekonomi dan energi serta isu-isu ekologi terkait konversi mikroalga menjadi *biofuel*.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu menyiapkan penyusunan buku ini, 1) mahasiswa-mahasiswa S1, S2, dan S3 yang tergabung dalam *Process System Engineering Research Group* (PSErg), 2) Departemen Teknik Kimia FT UGM yang selalu memberi inspirasi dalam pengembangan energi terbarukan, dan 3) kolega-kolega yang selalu mendukung sehingga buku ini bisa kami selesaikan.

Terakhir kami ingin menyampaikan permohonan maaf jika dalam penyusunan buku ini masih banyak kekurangan. Tentunya, masukan dan saran sangat kami harapkan agar edisi selanjutnya bisa lebih sempurna.

Yogyakarta, Januari 2019

Penulis

Arief Budiman

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
BAB 1 PENGANTAR.....	1
1.1 Sumber Energi Fosil dan Energi Terbarukan.....	1
1.1.1 Sumber Energi Terbarukan.....	8
1.2 <i>Biofuel</i> Generasi 1, 2, dan 3.....	13
1.2.1 <i>Biofuel</i> Generasi Pertama (G1).....	14
1.2.2 <i>Biofuel</i> Generasi Kedua (G2).....	15
1.2.3 <i>Biofuel</i> Generasi Ketiga (G3).....	16
1.3 Sejarah Mikroalga.....	18
REFERENSI.....	29
BAB 2 <i>BIOFUEL</i>	31
2.1 Biodiesel.....	32
2.2 Bioetanol.....	36
2.3 <i>Bio-oil</i>	40
2.4 Biogas.....	43
2.5 Biometana.....	44
2.6 Biohidrogen.....	47
REFERENSI.....	49
BAB 3 KULTIVASI MIKROALGA.....	51
3.1 Klasifikasi Alga.....	51
3.1.1 Kelompok Utama Alga.....	51
3.1.1.1 Makroalga.....	51

	3.1.1.2	<i>Cyanobacteria</i>	51
	3.1.1.3	Mikroalga	52
	3.1.2	Kandungan Kimia Mikroalga	53
	3.1.2.1	Lemak.....	53
	3.1.2.2	Protein	54
	3.1.2.3	Karbohidrat	54
3.2		Kondisi Kultivasi Mikroalga.....	55
	3.2.1	Kultivasi <i>Phototrophic</i>	55
	3.2.2	Kultivasi <i>Heterotrophic</i>	56
	3.2.3	Kultivasi <i>Mixotrophic</i>	56
	3.2.4	Kultivasi <i>Photoheterotrophic</i>	57
3.3		Faktor-Faktor dalam Kultivasi Mikroalga.....	57
	3.3.1	Suhu	57
	3.3.2	Intensitas Cahaya	58
	3.3.3	Pencampuran.....	58
	3.3.4	Nutrisi	59
	3.3.5	Pertukaran Gas.....	59
3.4		Kultivasi dengan <i>Open Pond</i>	60
3.5		Kultivasi dengan <i>Photobioreactor</i>	61
	3.5.1	<i>Tubular PBR</i>	61
	3.5.2	<i>Helical PBR</i>	62
	3.5.3	<i>Airlift PBR</i>	62
	3.5.4	<i>Flat Plate PBR</i>	63
3.6		Kultivasi dengan Bioreaktor Membran.....	64
	3.6.1	<i>Biomass Retention Membrane Photobioreactor (BR-MPBR)</i>	65
	3.6.2	<i>Carbonation Membrane Photobioreactor (C-MPBR)</i>	70
		REFERENSI.....	72
BAB 4		PEMANENAN MIKROALGA.....	75
	4.1	<i>Screening</i>	77
	4.1.1	<i>Microstrainer</i>	77
	4.1.2	<i>Vibrating Screen Filters</i>	78
	4.2	<i>Thickening</i>	78
	4.2.1	Flokulasi.....	78
	4.3	Auto dan Bioflokulasi	80
	4.3.1	Autoflokulasi	80
	4.3.2	Bioflokulasi.....	80

4.4	Sedimentasi	81
4.5	Flotasi.....	82
	4.5.1 <i>Dissolved Air Flotation</i>	83
	4.5.2 <i>Dispersed Air Flotation</i>	84
4.6	<i>Electrical Based Process</i>	84
	4.6.1 Koagulasi Elektrolisis (<i>Electro Coagulation</i>).....	84
	4.6.2 Flotasi Elektrolisis (<i>Electro Flotation</i>).....	85
	4.6.3 Flokulasi Elektrolisis (<i>Electrolytic Flocculation</i>).....	86
4.7	<i>Dewatering</i>	87
	4.7.1 Filtrasi	87
	4.7.2 Sentrifugasi	88
	REFERENSI.....	91
BAB 5	EKSTRAKSI MIKROALGA MENJADI MINYAK ALGA DAN RESIDU MIKROALGA.....	93
5.1	Ekstraksi Mikroalga dengan Metode Mekanis.....	94
	5.1.1 <i>Bead Milling</i>	94
	5.1.2 <i>High Pressure Homogenization</i>	97
	5.1.3 <i>High Speed Homogenization</i>	98
	5.1.4 Ultrasonik.....	99
	5.1.5 <i>Microwave</i>	102
	5.1.6 <i>Pulsed Electric Field (PEF)</i>	105
5.2	Ekstraksi Mikroalga Metode Non-Mekanis (Kimiawi)	108
	5.2.1 Pelarut Kimia	108
	5.2.2 Ekstraksi Enzimatik	109
	5.2.3 Ekstraksi Superkritis.....	110
	REFERENSI.....	112
BAB 6	BIODIESEL MINYAK ALGA.....	119
6.1	Kandungan Lipid Mikroalga	120
6.2	Produksi Biodiesel secara Kimiawi.....	122
	6.2.1 Transesterifikasi	122
	6.2.1.1 Transesterifikasi dengan Katalis Basa	124
	6.2.1.2 Transesterifikasi dengan Katalis Asam.....	127
	6.2.2 Esterifikasi	130

6.3	Produksi Biodiesel secara Enzimatis.....	132
	REFERENSI.....	140
BAB 7	KONVERSI TERMOKIMIA RESIDU MIKROALGA...	141
7.1	Gasifikasi.....	142
7.1.1	Prinsip Gasifikasi	142
7.1.2	Proses Gasifikasi	143
7.1.3	Teknologi Gasifikasi	145
7.2	<i>Liquefaction</i>	148
7.3	Pirolisis.....	150
7.3.1	Prinsip Pirolisis	150
7.3.2	Jenis Pirolisis	151
7.3.3	Teknologi Pirolisis	152
7.4	Pembakaran Langsung (<i>Direct Combustion</i>).....	156
	REFERENSI.....	159
BAB 8	KONVERSI BOKIMIA RESIDU MIKROALGA.....	161
8.1	<i>Anaerobic Digestion</i>	162
8.1.1	Prinsip <i>Anaerobic Digestion</i>	162
8.1.2	Mekanisme <i>Anaerobic Digestion</i>	162
8.1.3	Faktor-Faktor yang Memengaruhi Proses <i>Anaerobic Digestion</i>	165
8.2	Fermentasi Menjadi Bioetanol	167
8.2.1	Prinsip Fermentasi Menjadi Etanol.....	167
8.2.2	Mekanisme Fermentasi Menjadi Etanol	167
8.3	Produksi Biohidrogen.....	169
8.3.1	Prinsip Produksi Biohidrogen.....	169
8.3.2	Mekanisme Produksi Biohidrogen.....	170
8.3.3	Faktor-Faktor yang Memengaruhi Proses Produksi Biohidrogen	172
	REFERENSI.....	174
BAB 9	<i>LIFE CYCLE ASSESSMENT</i>.....	177
9.1	Kultivasi Mikroalga	183
9.2	Ekstraksi Lipid	188
9.3	Biodiesel Mikroalga.....	190
9.4	Pirolisis Residu Mikroalga.....	190
	REFERENSI.....	195

BAB 10 ANALISIS EKONOMI DAN ANALISIS ENERGI	
<i>BIOFUEL</i> DARI MIKROALGA	197
10.1 Analisis Ekonomi	201
10.2 Analisis Energi	211
REFERENSI.....	218
BAB 11 ISU EKOLOGI KONVERSI MIKROALGA MENJADI	
<i>BIOFUEL</i>	219
REFERENSI.....	224
BAB 12 KEBIJAKAN PEMANFAATAN MIKROALGA DALAM	
MENDUKUNG OPTIMALISASI BAURAN ENERGI DI	
INDONESIA.....	225
12.1 <i>Coastal Line</i> Indonesia dan Potensi Mikroalga.....	225
12.2 Kebijakan-Kebijakan yang Relevan dengan	
Pemanfaatan Mikroalga.....	229
12.3 Posisi Mikroalga dalam Kerangka Kebijakan Energi	
Indonesia	238
12.4 Rekomendasi Kebijakan Optimalisasi Pemanfaatan	
Mikroalga dalam Mendukung Optimalisasi Bauran	
Energi	242
REFERENSI.....	245
GLOSARIUM.....	247
TENTANG PENULIS.....	253

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Produksi minyak bumi pada beberapa negara (%).....	2
Tabel 1.2	Fraksi-fraksi utama minyak bumi	3
Tabel 1.3	Cadangan batu bara dunia (<i>recoverable</i>).....	4
Tabel 1.4	Cadangan gas alam dunia.....	5
Tabel 1.5	Skenario energi terbarukan dunia pada 2040	9
Tabel 1.6	Kapasitas pembangkitan energi geotermal dunia pada 2040	9
Tabel 1.7	Keuntungan penggunaan <i>biofuel</i>	19
Tabel 1.8	Perbandingan beberapa sumber biodiesel	21
Tabel 2.1	Beberapa sifat teknis biodiesel.....	33
Tabel 2.2	Beberapa sifat teknis diesel	34
Tabel 2.3	Produksi <i>biofuel</i> di beberapa negara 2010–2014	35
Tabel 2.4	Produksi bahan bakar etanol dunia pada tahun 2013–2014 (miliar galon).....	40
Tabel 2.5	Komposisi <i>bio-oil</i>	41
Tabel 2.6	Sifat bahan bakar diesel, biodiesel, dan minyak pirolisis biomassa	42
Tabel 2.7	Gambaran sifat dan kinerja teknologi <i>upgrading</i> biogas	46
Tabel 3.1	Luas permukaan spesifik pada berbagai jenis kontaktor.....	70

Tabel 4.1	Beberapa metode pemanenan mikroalga.....	76
Tabel 4.2	Flokulan untuk pemanenan mikroalga	79
Tabel 4.3	Kombinasi mikroalga untuk metode bioflokulasi	81
Tabel 4.4	Berbagai jenis alat filter untuk pemanenan mikroalga	89
Tabel 4.5	Berbagai jenis alat sentrifugasi untuk pemanenan mikroalga.....	90
Tabel 5.1	Kandungan minyak pada beberapa mikroalga	93
Tabel 5.2	Kelebihan dan kekurangan metode ekstraksi <i>bead milling</i>	97
Tabel 5.3	Kelebihan dan kekurangan metode ekstraksi ultrasonik.....	102
Tabel 5.4	Kelebihan dan kekurangan metode ekstraksi <i>microwave</i>	105
Tabel 5.5	Parameter-parameter proses pada metode pemecahan sel secara mekanis	107
Tabel 5.6	Kelebihan dan kekurangan metode ekstraksi hidrolisis enzim	110
Tabel 6.1	Perbandingan berbagai metode imobilisasi lipase	135
Tabel 6.2	Perbandingan sumber lipase dan substrat terhadap <i>yield</i>	136
Tabel 6.3	Berbagai kondisi reaksi transesterifikasi enzimatis.....	137
Tabel 6.4	Perbandingan teknologi enzimatis dan kimiawi pada produksi biodiesel	139
Tabel 7.1	Perbandingan berbagai metode konversi termokimia .	142
Tabel 7.2	<i>Heating value</i> produk gasifikasi berdasarkan jenis medium.....	143
Tabel 9.1	Parameter dalam tahapan produksi <i>biofuel</i> mikroalga	182
Tabel 9.2	Emisi gas rumah kaca (g CO ₂ -e) untuk penggunaan bahan bakar 1 t km <i>articulated truck</i> , dengan produktivitas mikroalga 15 g m ⁻² d ⁻¹	184

Tabel 9.3	Emisi gas rumah kaca (g CO ₂ -e) untuk penggunaan bahan bakar 1 t km <i>articulated truck</i> , dengan produktivitas mikroalga 30 g m ⁻² d ⁻¹	185
Tabel 9.4	Dampak lingkungan dari kultivasi mikroalga <i>T.chui</i> ..	187
Tabel 9.5	Kebutuhan energi pemanenan dan pengeringan biomassa mikroalga.....	189
Tabel 9.6	Perbandingan dampak lingkungan dari empat skenario LCA	192
Tabel 10.1	Berbagai teknologi produksi <i>biofuel</i> dari mikroalga...	198
Tabel 10.2	Studi tekno-ekonomi produksi <i>biofuel</i> dari mikroalga	200
Tabel 10.3	Distribusi biaya pada <i>raceway ponds</i> , tubular, dan <i>flat panel</i> (dalam sen/cts Euro).....	201
Tabel 10.4	Volume air untuk memproduksi 1.000 kg biomassa mikroalga.....	204
Tabel 10.5	Harga alat produksi biodiesel mikroalga.....	205
Tabel 10.6	Komponen biaya sebagai fungsi <i>total equipment cost</i>	207
Tabel 10.7	Komponen dengan konsumsi energi utama pada produksi biodiesel mikroalga	211
Tabel 10.8	Kebutuhan energi beberapa proses ekstraksi lipid	214
Tabel 10.9	Persentase energi input produksi biodiesel mikroalga	215
Tabel 12.1	Produktivitas biodiesel mikroalga.....	228
Tabel 12.2	Penahapan kewajiban minimal pemanfaatan biodiesel sebagai campuran BBM	235
Tabel 12.3	Penahapan kewajiban minimal pemanfaatan bioetanol sebagai campuran BBM	235
Tabel 12.4	Penahapan kewajiban minimal pemanfaatan minyak nabati murni sebagai campuran BBM.....	236
Tabel 12.5	Hasil pemodelan pengembangan pembangkit listrik EBT tahun 2015–2050	241
Tabel 12.6	Penyediaan energi baru terbarukan dari sumber bioenergi.....	242

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Produksi minyak dunia.....	6
Gambar 1.2	Produksi gas alam dunia.....	7
Gambar 1.3	Produksi batu bara dunia	7
Gambar 1.4	Pola konsumsi energi dunia.....	8
Gambar 1.5	Pertumbuhan kapasitas <i>wind turbine</i> terpasang dunia.....	10
Gambar 1.6	Laju konsumsi berbagai jenis bahan bakar	12
Gambar 1.7	<i>Overview</i> proses konversi biomassa menjadi <i>biofuel</i>	13
Gambar 1.8	Berbagai bahan bakar untuk transportasi	20
Gambar 2.1	Suplai dan permintaan biodiesel di Eropa (miliar liter).....	36
Gambar 2.2	Tahap pertama proses pemurnian etanol	37
Gambar 2.3	Produksi etanol dunia pada tahun 2007 sampai 2014.....	39
Gambar 2.4	<i>Bio-oil</i>	40
Gambar 2.5	Pabrik biogas yang memanfaatkan kotoran sapi: 1. penyimpanan, 2. pompa, 3. pemanas internal, 4. digester, 5. pembakar, 6-8. <i>power generator</i>	44
Gambar 3.1	Skema aliran dari <i>raceway pond</i>	60
Gambar 3.2	Tubular <i>photobioreactor</i>	62
Gambar 3.3	Skema aliran di dalam <i>airlift photobioreactor</i>	63

Gambar 3.4	Skema MPBR skala laboratorium	65
Gambar 3.5	Ilustrasi dari skema operasi: a) PBR, b) BR-MPBR <i>submerged</i> , c). BR-MPBR <i>external</i>	67
Gambar 3.6	Performa PBR vs BR-MPBR sebagai hubungan <i>dillution rate</i> vs konsentrasi biomassa yang dihasilkan	68
Gambar 3.7	Performa PBR vs BR-MPBR sebagai hubungan <i>dillution rate</i> vs konsentrasi nutrisi/substrat minimum	69
Gambar 3.8	Performa PBR vs BR-MPBR sebagai hubungan <i>dillution rate</i> vs produktivitas biomassa	69
Gambar 4.1	Penampang <i>cross-sectional microstrainer</i>	78
Gambar 4.2	Penampang <i>lamella separator</i>	82
Gambar 4.3	<i>Dissolved air flotation</i>	83
Gambar 4.4	Skema proses flokulasi elektrolisis	86
Gambar 5.1	<i>Bead mill</i>	95
Gambar 5.2	<i>High pressure homogenizer</i>	98
Gambar 5.3	Skema diagram alat ultrasonik: (a) <i>high frequency focused ultrasound</i> , (b) <i>low frequency non-focused ultrasound</i>	99
Gambar 5.4	Skema alat ekstraksi <i>microwave</i>	103
Gambar 5.5	Operasi <i>pulsed electric field</i>	106
Gambar 5.6	Proses ekstraksi dengan pelarut kimia	108
Gambar 5.7	Skema diagram sistem ekstraksi superkritis CO ₂	111
Gambar 6.1	Diagram alir proses produksi biodiesel dari mikroalga.....	122
Gambar 6.2	Grafik hubungan antara pengaruh kadar air terhadap <i>yield</i> metil ester	130
Gambar 7.1	Tahap-tahap gasifikasi.....	144
Gambar 7.2	<i>Updraft moving bed reactor</i> untuk gasifikasi.....	145

Gambar 7.3	<i>Downdraft moving bed reactor</i> untuk gasifikasi	146
Gambar 7.4	<i>Bubbling fluidized-bed gasifier</i>	147
Gambar 7.5	<i>Entrained-flow gasifier</i>	148
Gambar 7.6	<i>Fixed-bed pyrolyzer</i>	153
Gambar 7.7	<i>Reaktor bubbling fluidized bed</i>	154
Gambar 7.8	<i>Reaktor circulating fluidized bed</i>	155
Gambar 7.9	<i>Ultrarapid pyrolyzer</i>	156
Gambar 7.10	Skema proses CHP untuk biomassa kayu	158
Gambar 8.1	Skema konversi biokimia	162
Gambar 8.2	Mekanisme <i>anaerobic digestion</i>	163
Gambar 8.3	Skema <i>indirect-photolysis</i>	170
Gambar 9.1	<i>System boundary</i> LCA biodiesel mikroalga (A)	180
Gambar 9.2	<i>System boundary</i> LCA biodiesel mikroalga (B).....	182
Gambar 9.3	<i>Life cycle energy input dan output</i> dari produksi 1 MJ biodiesel (tanpa alokasi <i>by-product</i>)	191
Gambar 10.1	Diagram blok proses produksi biodiesel dari mikroalga.....	198
Gambar 10.2	Diagram produksi biodiesel minyak alga skala industri.....	203
Gambar 10.3	Kebutuhan energi pada kultivasi dan pemanenan mikroalga.....	213
Gambar 12.1	Produksi minyak dan gas Indonesia	227