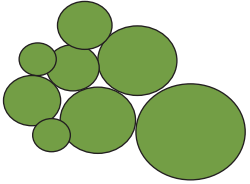


Mikroalga

Sumber Pangan & Energi Masa Depan



Penerbit & Percetakan
UPT UNDIP Press
SEMARANG

Hadiyanto
dan
Maulana Azim



MIKROALGA

SUMBER PANGAN DAN ENERGI MASA DEPAN

Edisi Pertama

Oleh:

Hadiyanto

dan

Maulana Azim

Address: Center of Biomass and Renewable Energy (C-BIORE)
Jurusan Teknik kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl Prof Soedarto, S.H. Tembalang Semarang 50275

Cetakan pertama 1 Desember 2012



Penerbit dan Percetakan
UPT UNDIP Press Semarang
ISBN: 978-602-097-298-3

KATA PENGANTAR

“On the arid lands there will spring up industrial colonies without smoke and without smokestacks; forests of glass tubes will extend over the plains and glass buildings will rise everywhere; inside of these will take place the photochemical processes that hitherto have been the guarded secret of the plants, but that will have been mastered by human industry which will know how to make them bear even more abundant fruit than nature (Giacomo Ciamician in Science 36 (2012))”

Sepenggal kutipan di atas merupakan dasar industri berdasarkan reaksi photosynthetis. Mikroalga merupakan mikroorganisme yang menggunakan prinsip photosynthetis untuk pertumbuhannya dalam menghasilkan biomasa. Saat ini mikroalga banyak dikembangkan dalam skala industry untuk menghasilkan produk-produk bernilai tinggi seperti bioenergi, farmasi maupun sumber pangan masa depan.

Buku yang berhasil kami susun ini menjelaskan bagaimana mikroalga mampu digunakan sebagai sumber energy dan pangan beserta metode untuk mengkultivasinya. Kultivasi dari mikroalga sangat tergantung pada jenis reaktor yang digunakan, sehingga buku ini juga menjelaskan dasar-dasar perancangan photobioreactor yang digunakan dalam kultivasi alga. Selain itu, pemanfaatan mikroalga untuk mengolah limbah juga diulas dalam buku ini.

Kami mengucapkan banyak terima kasih kepada segenap staf Center of Biomass and Renewable Energy (CBIORE) yang telah berkontribusi terhadap penyusunan buku ini. Secara khusus kami mengucapkan terima kasih kepada Ir Danny Soetrinanto, MEng dan Ganang Dwi, ST dalam kontribusinya untuk penerbitan buku ini.

Akhirnya kami mengucapkan selamat membaca dan dapat mengaplikasikan kultivasi mikroalga dalam dunia anda. Dan tentu tidak lupa kami harapkan kritik dan saran agar kami senantiasa rajin berbenah.

Semarang, 12 September 2012

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	I
PRAKATA	III
DAFTAR ISI.....	V
DAFTAR TABEL.....	VII
DAFTAR GAMBAR.....	IX
BAB I PENGENALAN MIKROALGA	1
Produk Energi	3
Produk Pangan dan Organik	5
Mikroalga untuk Pengolahan limbah	7
BAB II KULTIVASI MIKROALGA.....	9
Isolasi Mikroalga	9
Scale Up Mikroalga.....	13
Faktor Pertumbuhan	15
Masa Pertumbuhan Mikroalga.....	17
Kultivasi Mikroalga.....	19
BAB III PERANCANGAN POND	27
Jenis Jenis Photobioreaktor	27
Sirkulasi Pond.....	32
Konstruksi Pond Raceways	33
BAB IV PEMANENAN DAN PENGERINGAN MIKROALGA	41
Tahapan Pemanenan.....	41
Teknologi Pemanenan Mikroalgae	45

	Contoh Pemanenan Skala Industri	54
	Pengeringan Mikroalga.....	60
BAB V	IMOBILISASI MIKROALGAE	65
	Imobilisasi.....	66
	Metode Imobilisasi Mikroalga	66
	Aplikasi	67
	Konsep Bioreaktor untuk Imobilisasi Mikroalga	70
BAB VI	MIKROALGA SEBAGAI SUMBER BIOPRODUK	75
	Mikroalga sebagai Sumber Protein	77
	Mikroalga sebagai Sumber Vitamin	78
	Mikroalga sebagai Sumber Pigmen	79
	Mikroalga sebagai Sumber Pakan Alami	81
	Mikroalga sebagai Sumber Produk Bioplastik	82
BAB VII	MIKROALGA UNTUK BIOENERGI	85
	Biodisel dari Mikroalga.....	86
	Bioethanol dari Mikroalga	93
	Biogas dari Mikroalga	95
	Biohidrogen dari Mikroalga	96
	Industri Mikroalga Berbasis Bioenergi	97
BAB VIII	MIKROALGA UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH.....	99
	Pengurangan Kadar Nitrogen dan Phosphor.....	101
	Pengurangan Kadar Warna	103
	Pengurangan Kadar COD dan BOD	104
	Pengurangan Kadar Logam	105
	Studi Kasus	107
BAB IX	PENUTUP.....	109
DAFTAR		
PUSTAKA	115

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1.	Jenis Mikroalga untuk Biodisel	4
Tabel 1.2.	Kandungan Karbohidrat dan Protein dari Mikroalga	4
Tabel 1.3.	Contoh Mikroalga penghasil Karotenoid.....	6
Tabel 2.1.	Kelebihan dan Kelemahan beberapa Sistem Kultivasi	22
Tabel 2.2.	Bold Basal Medium	23
Tabel 2.3.	Larutan Trace Metal Bold Basal Medium	24
Tabel 2.4.	Sueoka (HSM) Medium	24
Tabel 2.5.	BG-11 Medium	25
Tabel 2.6.	Trace Metal BG-11 Medium	25
Tabel 3.1.	Perbandingan photobioreaktor sistem terbuka-Tertutup.....	28
Tabel 4.1.	Beberapa perbandingan Metode Pemanenan cara Mekanik...	43
Tabel 4.2.	Perbandingan pemanenan dengan Gravity Sedimentation	50
Tabel 4.3.	Perbandingan Pemanenan Mikroalga cara Flotasi	53
Tabel 4.4.	Perbandingan Pemanenan Mikroalga sistem Sentrifugasi.....	54
Tabel 4.5.	Cara Pemanenan pada Industri	55
Tabel 4.6.	Jenis Flokulan untuk Pemanenan	60
Tabel 5.1.	Imobilisasi Mikroalga Penyerap Logam	68
Tabel 6.1.	Perbandingan Karakteristik sumber protein	76

Tabel 6.2.	Karakteristik mikroalga	77
Tabel 6.3.	Perbandingan Mikroalga terhadap Makanan lain	78
Tabel 6.4.	Perbandingan Vitamin pada Hati, bayam dan Mikroalga	79
Tabel 6.5.	Perbandingan Parameter pakan dengan Spirulina platensis.....	81
Tabel 6.6.	Pengaruh Penambahan mikroalga pada Ikan	82
Tabel 6.7.	Manfaat Spirulina untuk beberapa jenis peliharaan	82
Tabel 7.1.	Perbandingan lahan dan produk Lipid	87
Tabel 7.2.	Mikroalga Penghasil Lipid	87
Tabel 7.3.	Viskositas dan panas pembakaran berbagai Minyak	89
Tabel 7.4.	Karakteristik biodisel dari mikroalga dan tanaman lain	89
Tabel 7.5.	Efisiensi beberapa Metode Ekstraksi	92
Tabel 7.6.	Potensi Produksi Bioethanol Mikroalga dan Tanaman Lain	94
Tabel 7.7	Kandungan Karbohidrat beberapa Mikroalga	94
Tabel 8.1.	Kandungan BOD dan Padatan Terlarut Limbah Cair	105
Tabel 8.2.	Kandungan POME Sebelum dan Sesudah Perombakan	107
Tabel 8.3.	POME sebelum dan sesudah digunakan kultivasi.....	108
Tabel 9.1.	Contoh Perusahaan pengembang Energi dari Mikroalga	112

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Bentuk sel Mikroalga	2
Gambar 2.1.	Strain Mikroalga dalam Cawan Petri	10
Gambar 2.2.	Contoh Pengembangan Mikroalga Skala Komersial	14
Gambar 2.3.	Grafik Pertumbuhan Mikroalga	17
Gambar 2.4.	Budidaya Mikroalga sistem Open Pond	19
Gambar 2.5.	Komponen Open pond photobioreaktor	20
Gambar 2.6.	Budidaya Mikroalga sistem tertutup	20
Gambar 2.7.	Komponen Closed Pond Photobioreaktor	21
Gambar 3.1.	Berbagai Macam Bentuk Open Pond	31
Gambar 3.2.	Perubahan Pola aliran air dengan baffle pada Pond	32
Gambar 3.3.	Desain Sirkulasi Air dengan Baffle dan paddle wheel	32
Gambar 3.4.	Sirkulasi dengan Paddle wheel	33
Gambar 3.5.	Penempatan Paddle Wheel yang direkomendasikan	33
Gambar 3.6.	Grafik Perbandingan ukuran Pond dan Luas Area.....	33
Gambar 3.7.	Pond Aliran Sirkuit dengan L/W Ideal	34
Gambar 3.8.	Cekungan dalam pond (Sump)	35
Gambar 3.9.	Kolam Intermediet Open Pond	37
Gambar 3.10.	Open Pond dengan paddle Wheel.....	38

Gambar 3.11.	Open Pond dengan Water Jet Pump.....	38
Gambar 3.12.	Open Pond dengan Air pump	39
Gambar 4.1.	Skema Pemanenan Mikroalga	59
Gambar 4.2.	Sistem Spray Dryer	61
Gambar 4.3.	Tray Dryer untuk Spirulina	62
Gambar 5.1.	Imobilisasi <i>Chlorella vulgaris</i> dalam matrix polimer	65
Gambar 5.2.	Diagram photobioreaktor hollow fiber	72
Gambar 6.1.	Spirulina platensis tablet untuk suplemen alami	75
Gambar 6.2.	Pewarna alami dari Mikroalga	80
Gambar 7.1.	Derivat produk biomass mikroalga berbasis bioenergi	85
Gambar 7.2.	Biodisel dari Mikroalga	88
Gambar 7.3.	Skema ekstraksi lipid dari biomass Mikroalga	91
Gambar 7.4.	Nilai Bakar hidrogen dan energi lain	97
Gambar 7.5.	Proses produksi bioethanol pabrik Algenol Amerika	98
Gambar 7.6.	Reaktor Mikroalga Algenol	98
Gambar 8.1.	Simbiosis Mikroalga dan Bakteri Pengurai	102
Gambar 9.1.	Kebutuhan Biodisel dan Bioethanol Dunia	111
Gambar 9.2.	Biorefinery Mikroalga	113
Gambar 9.3.	Integrasi gedung perkotaan dengan Mikroalga	115

Chapter 1

Pengenalan Mikroalga

Beberapa dekade belakangan ini dunia dilanda krisis energi, pangan, dan air. Kenaikan BBM karena semakin langkanya sumber minyak bumi, kekurangan pangan karena populasi manusia yang tak terkendali, dan krisis air yang bersumber dari masalah pencemaran lingkungan akibat pembuangan yang tidak terkontrol. Ketiga krisis ini mendorong banyak peneliti untuk melakukan langkah tepat bagaimana memecahkan persoalan tersebut.

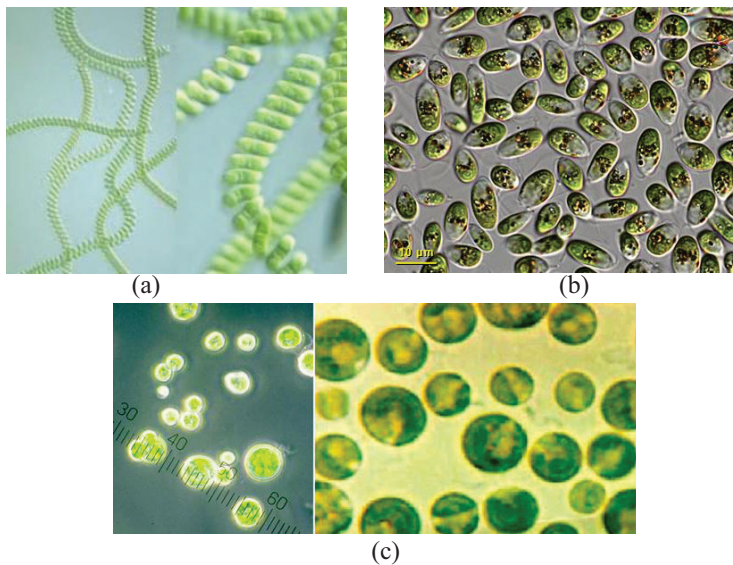
Salah satu solusi tepat yang diajukan untuk mengurai benang permasalahan itu adalah dengan memanfaatkan teknologi mikroalga. Mikroalga digadang-gadang mampu menyediakan stok pangan dan energi dalam waktu yang singkat, membutuhkan lahan yang tidak terlalu luas, dapat ditumbuhkan pada lahan non produktif, dan mudah diterapkan dalam kehidupan sehari-hari. Lebih jauh lagi, mikroalga dapat digunakan untuk mengolah limbah cair organik sehingga dihasilkan buangan limbah yang lebih aman dan dapat dengan mudah dinetralkan kembali oleh alam. Dalam penerapan yang lebih modern, mikroalga dapat diterapkan sekaligus untuk memecahkan ketiga batu permasalahan besar tersebut. Limbah cair organik akan lebih aman dibuang di lingkungan setelah digunakan sebagai medium mikroalga, sementara biomassa yang dihasilkan oleh mikroalga dapat difokuskan untuk pangan atau energi, sehingga sinergi antara pengolahan limbah cair dan produksi biomassa dapat berjalan dengan baik.

Mikroalga adalah sejenis makhluk hidup unisel berukuran antara 1 mikrometer sampai ratusan mikrometer yang memiliki klorofil, hidup di air tawar atau laut, membutuhkan karbon dioksida, beberapa nutrien dan cahaya untuk berfotosintesis. Mikroalga memiliki kinerja yang hampir sama dengan tumbuhan bersel banyak, akan tetapi tidak memiliki akar, daun, dan batang untuk berfotosintesis. Menurut beberapa peneliti, mikroalga diibaratkan sebagai pabrik kecil dalam ukuran sel mikro yang mengubah karbon dioksida

Pengenalan Mikroalga

menjadi material potensial seperti biofuel, pangan, dan biomaterial melalui energi matahari. (Chisti, 2007).

Keragaman mikroalga di dunia diperkirakan berada dalam kisaran jutaan species, sebagian besar belum dikenali dan belum bisa dikultivasi (dibiakkan sendiri). Diperkirakan 200,000-800,000 spesies hidup di alam, 35,000 spesies dapat dikenali, dan 15,000 komponen kimia penyusun biomas nya telah diketahui (Hadiyanto, et al. 2012). Sebagian besar mikroalga menghasilkan produk tertentu seperti karotenoid, antioksidan, enzim, polimer, peptida, asam lemak, hingga racun yang mematikan (Cardozo, et al. 2007).



Gambar 1.1. Bentuk sel mikroalga (a) *Spirulina platensis* (b) *Dunaliella salina* (c) *Chlorella vulgaris*
(sumber: www.algaeindustrymagazine, www.starcentral.mbl.edu)

Sejarah pemanfaatan mikroalga pertama kali dalam peradaban manusia masih belum jelas. Namun, Habib *et al* (2008) menyatakan bahwa mikroalga telah lama digunakan oleh suku aztec di pedalaman Meksiko. Hal ini diketahui oleh bangsa Spanyol ketika menjajah Meksiko, dan diketahui bahwa penduduk lokal memanfaatkan “makanan berwarna hijau biru” yang diperoleh dari danau setempat dan mengolahnya menjadi cake.

Lain halnya dengan orang Kanembu yang hidup di pesisir danau Chad. Mereka memperoleh alga basah dari lumpur yang terdapat di sekitar danau Chad dan

mengeringkannya dengan terik matahari. Alga yang kering kemudian dijual di pasar tradisional sebagai makanan sehari-hari, atau biasa disebut *dihe*. Dalam budaya orang Kanembu, wanita hamil yang mengkonsumsi *dihe* percaya bahwa makanan tersebut baik untuk keselamatan bayi mereka.

Borowitzka (2011), dalam website BEAM (Biotechnological and Environmental Application of Microalgae), menjelaskan sejarah budidaya mikroalga secara modern yakni diawali pada tahun 1890, budidaya mikroalga diperkenalkan pertama kali oleh Beijerinck dengan menggunakan jenis *Chlorella vulgaris*, dan dikembangkan oleh Warburg pada tahun 1900. Budidaya mikroalga mulai menjadi fokus penelitian pada tahun 1948 di Stanford (USA), Essen (Jerman) dan Tokyo. Sedangkan budidaya untuk komersialisasi dimulai pada tahun 1960 di Jepang dengan menggunakan mikroalga *Chlorella* dan pada tahun 1970 menggunakan jenis *Spirulina* di danau Texcoco Meksiko. Pada tahun 1977, Nippon Ink and Chemicals Inc, mendirikan pabrik *Spirulina* di Thailand, dan pada tahun 1980, sudah terdapat 46 pabrik budidaya mikroalga skala besar di Asia, dengan produksi rata-rata satu ton perbulan dengan hasil *Chlorella* yang paling mendominasi. Produk komersial ketiga adalah *Dunaliella salina*, sebagai sumber beta karotin, didirikan di Australia oleh Western Biotechnology Ltd dan Betatene Ltd pada tahun 1986.

Harun *et al*, (2010b) memaparkan beberapa produk yang dapat dihasilkan dari mikroalga, diantaranya:

1. Produk Energi

Mikroalga berpotensi sebagai sumber energi terbarukan karena memiliki kandungan yang dapat diolah menjadi beberapa jenis senyawa seperti biodiesel, bioethanol, dan methana.

a. Biodiesel

Biodiesel Mikroalga, dalam hal ini adalah tumbuhan yang memiliki kandungan lemak nabati, berpotensi untuk dijadikan sumber biodiesel. Dewasa ini para peneliti menghindari minyak nabati yang berasal dari sumber pangan. Salah satu sumber yang dapat diperbaharui, memiliki pertumbuhan lebih cepat dari tanaman lain, membutuhkan lahan dan air yang sedikit, adalah mikroalga. Kandungan lemak pada mikroalga juga memiliki kandungan lemak tak jenuh yang lebih rendah sehingga berpotensi sebagai pengganti minyak sayur. Namun demikian masih perlu dilakukan

Pengenalan Mikroalga

kajian dan penelitian lebih lanjut agar diperoleh bibit mikroalga yang memiliki kandungan lipid yang lebih tinggi, selain itu juga pupuk (nutrisi) yang dikonsumsi tidak terlalu memakan biaya produksi. Salah satu alternatifnya yakni dengan membudidayakan mikroalga pada limbah cair industri yang masih memiliki kandungan nutrisi sehingga dapat dimanfaatkan oleh mikroalga sebagai media pertumbuhannya.

Tabel 1.1. Jenis mikroalga untuk Biodiesel

Mikroalga	Kandungan lemak (lipid) berat kering
<i>Chlorella sp.</i>	28-32%
<i>Schizochytrium sp.</i>	50-77%
<i>Nannochloropsis sp.</i>	31-68%
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75%

(Chisti, 2007)

b. Bioethanol

Bioethanol dapat diproduksi dengan cara fermentasi maupun gasifikasi. Secara tradisional, bioethanol diproduksi dari tumbuhan jagung dan tebu. Akan tetapi seiring perkembangan jaman, hal ini menjadi kendala karena seiring krisis pangan dunia. Oleh sebab itu diperlukan sumber lain yang dapat menghasilkan bioethanol. Beberapa contoh mikroalga yang mengandung karbohidrat & protein tinggi terdapat pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2. Kandungan Karbohidrat dan Protein dari Mikroalga

Mikroalga	Karbohidrat (%)	Protein (%)
<i>Porphyridium cruentum</i>	40-57	28-39
<i>Prymnesium parvum</i>	25-33	28-45
<i>Spirogyra sp.</i>	33-64	49
<i>Dunaliella salina</i>	32	57

(Becker, 1994)

Mikroalga yang mengandung karbohidrat dan protein yang tinggi dapat dimanfaatkan sebagai produk bioethanol dengan metode fermentasi. Namun berdasarkan laporan para peneliti, produk bioethanol dari mikroalga masih dalam tahap pengembangan karena secara komersial masih belum memungkinkan serta teknologi yang digunakan masih kompleks.

2. Produk Pangan dan Organik

Mikroalga dapat digunakan dalam aplikasi yang lebih luas. Selain sebagai produk pangan, mikroalga juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan pangan, biopolimer penghasil plastik, sebagai suplement, obat-obatan, dan keperluan medis lainnya.

a. Omega 3

Mikroalga secara alami memiliki kandungan asam lemak omega-3 sehingga dapat dimanfaatkan untuk suplement bernilai tinggi (Handayani, et al 2011). Sumber omega-3 dapat ditemui dalam bentuk *eicosapentanoic acid* (EPA) dan *docosahexaenoic acid* (DHA). EPA secara umum digunakan untuk farmasi seperti obat migrain, jantung, asma, dan beberapa penyakit berbahaya lainnya. Jenis mikroalga penghasil EPA sebagai contoh adalah *Pavlova vidiris*, *Nannochloropsis sp.*

Sama halnya dengan EPA, DHA juga berperan penting dalam bidang medis. Berdasarkan laporan paramedis, DHA dapat digunakan untuk melawan kanker, AIDS, serangan jantung, menurunkan kolesterol, meningkatkan sistim imun, dan detoksifikasi (mengeluarkan racun) dari tubuh. Mikroalga yang tumbuh di air laut lebih dominan menghasilkan DHA. *Schizochytrium mangrove*, mikroalga air laut, dapat menghasilkan DHA 33-39% dari total asam lemak.

b. Klorofil

Klorofil secara medis berfungsi sebagai penawar pada organ hati, memperbaiki sel, dan meningkatkan haemoglobin dalam darah. Chlorofil juga dapat digunakan sebagai sumber pigmen pada kosmetik dan pangan. Salah satu mikroalga penghasil chlorofil tertinggi adalah *Chlorella sp.*

Mikroalga jenis *Spirulina platensis* dikenal luas sebagai suplement yang mengandung kadar protein tinggi hingga mencapai 68% dan kandungan vitamin lain. Kandungan protein ini lebih tinggi dari daging, kedelai, ikan, dan telur. Beberapa

Pengenalan Mikroalga

mikroalga lain yang mengandung protein tinggi seperti *Chlorella sp* juga dapat digunakan sebagai pakan alami untuk beberapa jenis udang tertentu. Selain itu mikroalga penghasil protein dapat digunakan untuk suplement pakan ternak yang berfungsi menurunkan lemak dan menambah kadar protein pada daging.

c. Karotenoid

Karotenoid dihasilkan dari beberapa jenis mikroalga seperti algae hijau biru.

Tabel 1.3. Beberapa contoh mikroalga yang menghasilkan senyawa karotenoid

Karotenoid	Fungsi	Species mikroalga
Beta karotein	-Nutrisi esensial yang diubah tubuh menjadi vitamin A - Antioksidan lemah, tapi efektif dalam menghambat oksigen tunggal. -Menstimulasi enzim-enzim untuk memperbaiki DNA yang rusak -Meningkatkan aktivitas sel-sel imun -Melindungi kornea mata dari sinar UV	<i>Dunaliella salina</i> , <i>Scenedesmus almeriensis</i> , <i>Soelastrella striolata</i>
Lutein	-Pigmentasi warna kuning dan hijau pada berbagai jenis makanan -Bersama dengan zeaxantin merupakan penyusun setengah karotenoid dalam retina mata -Melindungi mata dari degenerasi dan katarak -Dapat berperan dalam melawan kanker kolon	<i>Hematococcus pluvialis</i> , <i>Chlorella sorokiniana</i>
Zeaxanthin	Bersama dengan lutein merupakan jenis karotenoid satu-satunya dalam makula mata -Menyerap sinar biru yang membahayakan tubuh -Melindungi mata dari degenerasi dan katarak	<i>Scenedesmus almerientis</i>

Guedes, *et al*, (2011) dan Best, (2012)

Beberapa mikroalga mengakumulasi senyawa karotenoid dalam bentuk betakarotein, astaxanthin, dan canthaxanthin. Karotenoid ini memiliki fungsi penting sebagai antioksidan, penyedia vitamin A, dan pewarna alami. Secara umum, mikroalga penghasil karotenoid tersaji dalam Tabel 1.3.

3. Mikroalga untuk Pengolahan Limbah

Mikroalga dapat digunakan untuk pengolahan limbah organik. Secara teknis, mikroalga menyerap kandungan senyawa organik dan nutrisi yang masih tersisa dalam limbah, dan menghasilkan oksigen yang dapat menurunkan kadar COD dan BOD dalam limbah lewat bantuan bakteri pengurai zat organik (Hadiyanto et al, 2012a). Selain itu mikroalga dapat menyerap beberapa senyawa berbahaya yang terdapat dalam limbah. Berdasarkan laporan Harun *et al* (2010a), mikroalga jenis *Ascophyllum nodosum* secara efektif dapat memindahkan metal cadmium, nikel, dan seng dari limbah. *Fucus vesiculosus* dapat menyerap metal chromium (III), dan sebagainya.

Chapter 2

Kultivasi Mikroalga

Kultivasi mikroalga dapat juga disebut dengan pembudidayaan mikroalga, atau dapat pula disebut dengan kulturisasi. Kultivasi mikroalga bertujuan untuk meningkatkan atau memperbanyak jumlah sel mikroalga sehingga diperoleh biomassa sesuai dengan tujuan yang diinginkan.

1. Isolasi Mikroalga

Hal yang utama dari kultivasi adalah isolasi mikroalga dan penyeleksian yaitu untuk mendapatkan jenis alga yang cocok untuk dikultivasi dan dikembangkan dalam skala massal. Bibit baru harus diisolasi dalam berbagai kondisi lingkungan sehingga memiliki metabolisme yang fleksibel terhadap berbagai media.

a. Isolasi dari Alam

Alga dapat diisolasi dari berbagai jenis perairan di alam mulai dari air tawar sampai air payau, perairan pantai hingga air laut dengan salinitas tinggi dan bahkan di tanah lembab. Lebih jauh, pemilihan sampel secara luas harus dilakukan untuk mewakili semua keadaan lingkungan dan menghindari data yang sama. Penentuan lokasi alga dapat diketahui melalui kombinasi peta, sistem informasi geografis (SIG) dan analisa menggunakan peralatan. Ekosistem yang dipilih termasuk perairan (contoh : lautan, danau, sungai, kolam dan mata air, yang mana termasuk di dalamnya dalam kondisi salinitas tinggi, tawar, payau, asam lingkungan beralkali) dan lingkungan terestrial dengan berbagai jenis lokasi geografis dengan keanekaragaman genetik. Kumpulan jenis alga ini termasuk yang ada di area umum serta yang ada di sistem taman nasional. Dalam semua kasus, kepemilikan isolasi strain baru juga harus dipertimbangkan. Sampel seharusnya tidak hanya dalam satu waktu singkat tetapi juga dalam beberapa jangka waktu mengingat adanya perubahan musim lingkungan.

Kultivasi Mikroalga

Sebagai tambahan, diantara habitat perairan, jenis alga yang ditemukan planktonic (bergerak bebas) dan bentos (menempel di lingkungan). Alga plankton mungkin dapat digunakan didalam kultur untuk memperoleh biomass, dimana biomassa alga dapat diaplikasikan untuk berbagai macam aplikasi.

b. Teknik Isolasi

Untuk isolasi bibit baru dari habitat alam, kultivasi secara tradisional dapat digunakan untuk proses budidaya. Beberapa jenis alga perlu waktu berminggu-minggu hingga berbulan-bulan apabila diisolasi dengan metode tradisional. Untuk isolasi skala besar, penggunaan teknik isolasi otomatis kinerja tinggi dapat digunakan fluorescence – activated cell sorting (FACS), yang telah dipakai secara luas dalam industri. Selain itu diperlukan kesamaan morfologi saat membandingkan jenis alga. Strain baru juga dapat diidentifikasi berdasarkan metode molekular seperti perbandingan galur RNA, atau dengan penanda gen lainnya.



Gambar 2.1. Strain Mikroalga dalam cawan petri
(Sumber: www.algenist.com)

c. Kriteria dan Metode Pemeriksaan

Pemeriksaan yang bagus meliputi tiga bagian utama: fisiologi pertumbuhan, metabolisme produksi, dan kesegaran strain alga. Fisiologis pertumbuhan meliputi beberapa parameter seperti laju tumbuh spesifik maksimal, kerapatan sel maksimal, ambang batas lingkungan (suhu, pH, salinitas, kadar oksigen, kadar CO₂), dan

nutrisi yang dibutuhkan. Karena semua parameter yang dibutuhkan sangat berpengaruh, otomatisasi sistem pengembangan dan informasi semua parameter teraktual akan sangat membantu.

Pemeriksaan mengenai metabolisme produksi melibatkan pengaruh komposisi sel protein, lemak, dan karbohidrat, dan pengukuran produktivitas organisme sangat berguna untuk pengembangan mikroalga berbasis pangan maupun energi. Pemeriksaan yang dilakukan juga tergantung dengan cara-cara pembudidayaan strain dan jenis produk yang akan diinginkan. Sebagai contoh, pemeriksaan untuk produksi minyak memperhatikan profil asam lemaknya. Lebih jauh, banyak strain yang bermetabolisme ke dalam media tumbuh. Beberapa diantaranya menjajikan produk samping yang cukup bernilai, dan pendekatan-pendekatan baru dibutuhkan untuk pengembangan metode ini. Untuk kultivasi massal strain alga, penting untuk diperhatikan kesegaran strain tersebut, termasuk beberapa parameter berikut antara lain konsistensi budidaya, ketahanan strain, stabilitas pemasaran produk, kerentanan dari predator lain di lingkungan tersebut. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa hasil uji di laboratorium tidak selalu sama dengan hasil kultivasi di luar ruangan. Sehingga untuk menentukan ketahanan strain, simulasi budidaya skala kecil perlu dilakukan. Pengembangan skala kecil merupakan langkah penting untuk pengujian beribu-ribu jenis isolasi strain yang berbeda.

d. Koleksi Kultur sebagai Sumber Data

Pengoleksian kultur merupakan salah satu cara untuk melestarikan keanekaragaman habitat alam, melindungi bahan genetik dan sumber penyedia penelitian dasar. Saat ini, hanya ada beberapa pusat koleksi alga di Amerika Serikat dan negara lain. Mereka mengumpulkan ribuan strain mikroalga yang berbeda untuk mendukung penelitian dan industrialisasi mikroalga. Fungsi dari pusat koleksi tidak hanya terbatas sebagai tempat penyimpanan saja. Mereka juga mendukung program penelitian dalam menentukan karakteristik strain, cryopreservation, dan filogenik baik untuk kebutuhan sendiri maupun hubungannya dengan pihak luar.

Jumlah strain alga yang tersedia dari pusat koleksi seperti UTEX (The Culture Collection of Algae di University of Texas at Austin, Texas), sekitar 3000 strain, dan

Kultivasi Mikroalga

di CCMP (The Provasoli-Guillard National Center for Culture of Marine Phytoplankton at the Bigelow Laboratory for Ocean Sciences in West Boothbay Harbor, Maine) lebih dari 2500 strain. Bagaimanapun, karena banyaknya strain alga yang di kultur dalam beberapa dekade, banyak kultur asli yang hilang dikarenakan proses perkembangbiakan atau mengenai penggunaan nutrisi yang dipakai untuk alga. Untuk mendapatkan berbagai kegunaan dan ketahanan strain tersebut, dapat digunakan untuk kultur massal sebagai pembuatan biofuel maupun pangan, hal itu akan lebih bijak apabila mengisolasi strain baru yang langsung diambil dari lingkungan. Modifikasi strain dapat dilakukan untuk meningkatkan karakteristik mikroalga, seperti aklimasi, bahkan dapat digunakan sintesis modifikasi DNA, dan mutasi genetik, agar diperoleh strain mikroalga yang diinginkan.

Data yang ada pada pusat kultur alga dunia sangat berpotensi sebagai inti untuk pusat pengembangan penelitian mikroalga. Data- data yang ada harus mencakup beberapa aspek antara lain :

- Data strain : sitologi, biokimia, molekuler, dan hasil pemeriksaan
- Mutasi
- Plasmid dan fag
- Administrasi Strain (Jumlah koleksi, cadangan dll)
- Aplikasi praktis (Umum dan Industri)
- Nama Strain (Spesies, subspecies, taksonomi, referensi yang mendukung)
- Kondisi pertumbuhan (media, suhu, PH) , kondisi pencambahan
- Interaksi secara biologi (Simbiosis, patogenis, toksisitas)
- Data Omic (Genomic, transkriptomik, proteomik, metabolomik)
- Lingkungan dan riwayat strain (habitat khusus, pengkoleksi sebelumnya)

e. Karakteristik Algae

Kunci keberhasilan dalam menekan biaya produksi akan menjamin kestabilan kultur mikroalga dalam jangka waktu yang lama. Pertumbuhan yang cepat merupakan kunci utama untuk meningkatkan produktivitas dan meningkatkan kemampuan bertahan dari alga pencemar lain. Karakteristik lain seperti kemampuan tumbuh dengan

kerapatan sel yang tinggi dalam suatu kultur budidaya yang berkelanjutan dapat meningkatkan ketahanan sel dan juga dapat mengurangi kandungan air saat proses pemanenan. Serta kemampuan untuk memflokulasi ketika ada suatu penambahan bahan kimia dapat mengurangi biaya pemanenan sejauh hal tersebut masih dapat dikendalikan selama proses kultivasi.

2. Scale up Mikroalga

Secara umum budidaya mikroalga didasarkan pada tiga tahap. Tahap pertama dimulai dengan skala laboratorium / pembibitan, dilanjutkan pada skala semi massal, dan berakhir pada skala komersial (Chaumont, 1993 dan Kabinawa, 2006).

a. Skala laboratorium

Pada skala laboratorium, dilakukan kulturisasi mikroalga yang diperoleh dari beberapa laboratorium yang membudidayakan mikroalga jenis tunggal. Sebagai contoh laboratorium penyedia bibit adalah BBPBAP Jepara, BBPBAP Bogor, LIPI, dan sebagainya.

Pada tahap inokulasi (transfer ke medium yang lebih besar), mikroalga yang digunakan sebagai bibit harus benar-benar steril, memiliki kepekatan yang tinggi. Pada skala laboratorium, mikroalga ditempatkan pada erlenmeyer atau gelas kaca yang steril, dan benar-benar dijaga kondisi lingkungan seperti pH, intensitas cahaya, nutrien, dan pertumbuhannya.

b. Skala semi massal

Skala semi massal digunakan untuk mempersiapkan mikroalga ke skala komersial. Kabinawa (2006) menyarankan, pada fase ini sebaiknya kultur mikroalga dilakukan pada rumah kaca untuk menghindari kontaminasi dan air hujan. Pada tahap ini mikroalga akan beradaptasi ke lingkungan semi steril sebelum dijadikan skala komersial.

Kolam kultur berbentuk bulat dengan tinggi maksimum 50 cm, dan diameter antara 2-5 m, dengan jumlah kultur 10-15% dari total volume. Intensitas cahaya berada pada range 3500-5000 lux, dengan penambahan lampu TL sebagai back-up apabila terjadi mendung/hujan.

Pengadukan kultur dilakukan dengan kecepatan 50-60 cm/detik dengan durasi 2 jam pada pagi hari (08.00-10.00), (12.00-14.00) dan (16.00-18.00), untuk menghindari

Kultivasi Mikroalga

pengendapan, penyebaran nutrisi yang merata, dan pencahayaan yang seragam. Pada kurun waktu selama 6-10 hari, mikroalga sudah dapat dipindah ke skala komersial / skala pilot.

c. Skala komersial

Pada skala komersial, keberhasilan mikroalga tergantung pada cuaca luar, lingkungan dan kontaminan lain. Beberapa metode kultivasi skala komersial yang umum digunakan adalah open pond raceways (sistem bak terbuka), dan photobioreactor (sistem tertutup), dan masing-masing metode memiliki kelebihan serta kekurangan tersendiri.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam budidaya secara komersial adalah faktor kontaminan dari mikroorganisme atau mikroalga lain. Beberapa mikroalga dapat dimanipulasi keadaan lingkungannya untuk menghindari atau memperkecil kontaminan lain. Seperti contoh, *Spirulina platensis* dapat hidup di lingkungan ber pH dan salinitas yang tinggi. Kondisi ini menguntungkan bagi *Spirulina* dan dapat mematikan beberapa kontaminan mikroba lain. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah durasi pemanenan, serta peremajaan medium. Beberapa mikroalga hanya dapat digunakan pada rentang pemanenan 3 sampai 4 kali, untuk itu perlu dilakukan peremajaan atau pengurasan bak.



Gambar 2.2. Beberapa contoh pengembangan mikroalga skala komersial.

(www.algaeindustrymagazine.com)

3. Faktor Pertumbuhan

Faktor pertumbuhan mikroalga mempengaruhi hasil biomassa, maupun jenis produk yang diinginkan. Terkadang biomassa yang sedikit menghasilkan produk yang diinginkan dalam jumlah banyak, untuk itu diperlukan optimasi komposisi yang seimbang antara banyaknya biomassa dan banyaknya produk dalam biomassa mikroalga. Beberapa faktor pertumbuhan mikroalga yang dapat menaikkan laju pertumbuhan biomass di antaranya:

1. *Intensitas Cahaya*

Cahaya menjadi faktor penting dalam pertumbuhan mikroalga karena dibutuhkan dalam proses fotosintesis. Intensitas cahaya sering disebutkan dalam satuan $\text{microEinsteins/m}^2\text{s}$ atau setara dengan satu mol photons. Beberapa satuan lain seperti $\text{micromol/m}^2\text{s}$, Lux dan W/m^2 juga digunakan. Jeon *et al* (2005) melaporkan bahwa aktivitas fotosintesis naik seiring kenaikan intensitas cahaya. Hal ini menjadi penting apabila mikroalga dibiakkan dalam kedalaman tertentu, semakin dalam medium mikroalga, intensitas cahaya yang dibutuhkan juga semakin tinggi. Choochote *et al*, (2010) melaporkan bahwa *Chlorella* sp dapat tumbuh dalam keadaan maksimum pada kondisi intensitas cahaya 5000 lux.

Sebagian besar mikroalga tidak dapat tumbuh dengan baik dalam keadaan pencahayaan yang konstan, karena membutuhkan waktu istirahat untuk menyimpan makanan. Terkadang dilakukan manipulasi durasi pencahayaan light .dark (L/D) antara lain 16:8, 14:10 atau 12:12 waktu pencahayaan.

2. *Temperatur*

Temperatur menjadi parameter pertumbuhan mikroalgae yang cukup penting karena didasarkan pada tempat tumbuhnya, baik dalam iklim tropis maupun sub tropis. Sebagian besar algae dapat tumbuh pada suhu antara 15 sampai 40⁰C. Beberapa mikroalga dapat tumbuh subur pada kondisi suhu kisaran 24-26⁰C. Pada suhu di bawah 16⁰C, mikroalga masih dapat tumbuh dalam keadaan lambat. Namun pada suhu di atas 35⁰C, beberapa mikroalga dapat mati atau lysis (pecah). Studi tentang pengaruh temperatur dan growth rate mikroalga telah dilakukan oleh Goldman dan Carpenter (1974), dan dilaporkan bahwa kenaikan temperatur pada range tertentu dapat menaikkan growth rate mikroalga.

3. *Nutrien*

Nutrient adalah faktor penting dalam produksi biomass alga. Sebagian besar mikroalga membutuhkan makronutrien seperti karbon, (C), nitrogen (N), hidrogen (H), sulfur (S), kalium (K), magnesium (Mg), dan fosfor (P) Sedangkan mikronutrient digunakan untuk meningkatkan pertumbuhan sel dan metabolisme. Keberadaan mikronutrien tidak bisa diganti oleh zat lain. Kebutuhan mikronutrien juga berbeda beda berdasarkan habitat mikroalga (air laut, payau, tawar). Beberapa unsur mikronutrien di antaranya, zat besi (Fe), boron (B), mangan (Mn), vanadium (Va), silikon (Si), selenium (Se), cuprum (Cu), nikel (Ni), dan molybdinum (Mo).

4. *Oksigen*

Oksigen menjadi faktor peganggu dalam pertumbuhan alga. Oksigen dapat dihasilkan dari reaksi fotosintesis alga. Level oksigen terlarut dalam medium yang semakin tinggi dapat membahayakan proses fotosintesis (Lannan, 2011). Jika digunakan sistem budidaya bak terbuka (open pond), gas oksigen akan mudah teruap ke atmosfer. Sedangkan untuk kultur tertutup, gas oksigen dapat terakumulasi pada medium dan menjadikan racun (Graneli dan Salomon, 2010).

5. *Karbon Dioksida*

Karbon dioksida digunakan mikroalga untuk proses fotosintesis layaknya tumbuhan berklorofil lainnya. Uguw *et al* (2008) melakukan penelitian tentang transfer massa CO₂ pada medium mempengaruhi laju pertumbuhan mikroalga. Namun tingginya kadar CO₂ dalam medium juga dapat mempengaruhi pH. Kong *et al* (2010) melakukan penelitian tersebut dan mendapatkan hasil bahwa semakin tinggi kadar CO₂ di atas 33% dari komposisi udara normal, laju pertumbuhan mikroalga menjadi terhambat.

6. *pH*

Sebagian besar alga tumbuh pada kondisi pH normal antara 6 sampai 8. Akan tetapi beberapa alga jenis cyanobacteria seperti *Spirulina platensis* hanya dapat tumbuh pada kondisi alkali/basa. Sementara *Chlorella* secara umum dapat hidup dalam kondisi pH antara 7-8.

7. Salinitas

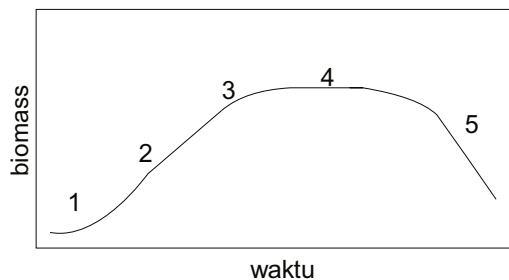
Mikroalga air laut umumnya rentan terhadap perubahan salinitas pada medium. *Dunaliella salina* dan *Spirulina platensis* adalah contoh mikroalga yang dapat tumbuh subur pada salinitas yang tinggi (Graneli dan Salomon, 2010).

8. Pengadukan

Pengadukan pada medium mikroalga dibutuhkan agar tidak terjadi pengendapan biomass, selain itu difungsikan untuk pencampuran nutrient, dan meningkatkan difusifitas gas CO₂. Beberapa metode pengadukan yang umum digunakan adalah bubling menggunakan udara (dapat membahayakan sel), dan paddle atau pengaduk otomatis. Beberapa mikroalga dapat tumbuh baik tanpa pengadukan jika konsentrasinya tidak terlalu pekat.

4. Masa Pertumbuhan Mikroalga

Masa pertumbuhan mikroalga dapat diukur berdasarkan biomas, maupun jumlah sel dalam mediumnya. Fase pertumbuhan mikroalga dapat digambarkan dengan grafik dalam keadaan mikroalga homogen, sistem batch (terakumulasi), dengan kondisi supply nutrient yang ditentukan di awal pembibitan (Becker, 1974). Diagram fase pertumbuhan mikroalga berdasarkan Fogg dan Thake (1987) adalah sebagai berikut:



Gambar 2.3. Grafik Pertumbuhan Mikroalga

1. Fase Lag

Fase lag adalah fase adaptasi mikroalga dalam medium baru. Pada tahap ini mikroalga membutuhkan waktu untuk menyesuaikan diri karena lingkungan inokulum (bibit) cenderung berbeda dari lingkungan sebelumnya. Selama masa

adaptasi, sel alga lebih sensitif terhadap nutrient, temperatur, dan kondisi yang berbeda dari kondisi aslinya. Sel alga dapat sewaktu waktu memiliki pertumbuhan sel yang semakin menurun, bahkan mati, apabila tidak dapat beradaptasi dengan baik.

2. Fase Eksponensial (*fase log*)

Pada fase ini kecepatan pertumbuhan mikroalga dapat dihitung berdasarkan kenaikan biomassa dan selisih waktu yang dibutuhkan. Kecepatan pertumbuhan (*growth rate*) adalah salah satu indikasi penting sel berhasil melalui fase adaptasi. Durasi fase eksponensial bergantung pada volume inokulum, kecepatan pertumbuhan, medium, dan kondisi lingkungan untuk mensupport pertumbuhan alga. Fase eksponensial ditandai dengan terjadinya periode pertumbuhan yang cepat, sel membelah dengan laju konstan, aktivitas metabolik konstan, dan keadaan pertumbuhan seimbang antara supply makanan dan kenaikan mikroalga. Pada fase ini dapat dilakukan pemanenan biomassa sehingga hasil yang didapatkan akan maksimum.

3. Penurunan Fase Log

Penurunan pertumbuhan secara umum dipengaruhi oleh biomassa yang telah mencapai tahap populasi maksimum, sehingga kebutuhan makanan pada medium menjadi berkurang. Selain itu fase penurunan pertumbuhan mikroalga dapat dipengaruhi oleh sumber cahaya, dan akumulasi oksigen yang dihasilkan dari reaksi fotosintesis. Akumulasi oksigen dapat mempengaruhi keasaman sel. Sedangkan jumlah sel yang semakin banyak dapat menghalangi cahaya masuk ke medium.

4. Fase Stasioner

Fase stasioner adalah fase di mana tidak ada lagi pertumbuhan mikroalga, atau kecepatan pertumbuhan (*growth rate*) menjadi nol. Pada fase ini, terjadi akumulasi racun akibat metabolisme mikroalga, kekurangan nutrisi, dan perubahan kondisi lingkungan. Jumlah sel mikroalga yang hidup sama dengan jumlah sel yang mati.

5. Fase Kematian

Pada fase ini jumlah sel mikroalga yang mati lebih banyak dari jumlah sel yang hidup. Nutrien semakin menipis (bahkan habis), cadangan makanan dalam tubuh sel menjadi berkurang, dan penumpukan racun semakin meningkat. Pada fase ini sel yang mati bahkan dapat lisis (pecah) dan larut ke dalam medium.

5. Kultivasi Mikroalga

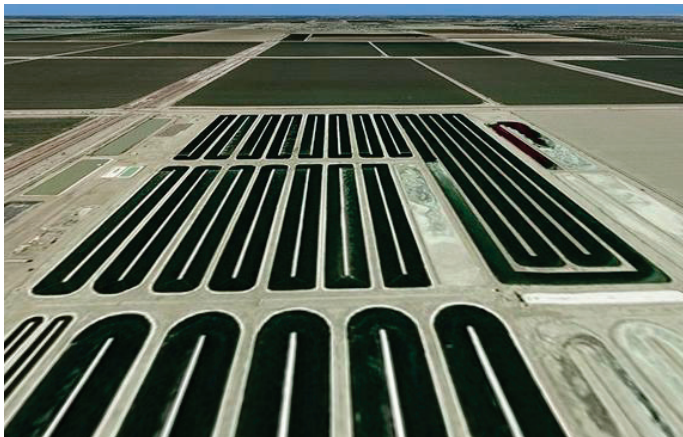
Beberapa metode kultivasi mikroalga dapat diterapkan sesuai dengan keinginan. Kultivasi ini dapat ditinjau dari berbagai segi seperti dari segi nutrisi, cara pemanenan, dan sistem pond yang ingin digunakan.

1. Sistem Kultivasi/budidaya

Kultivasi mikroalga dibedakan menjadi dua, open pond dan closed pond photobioreactor. Masing masing cara kultivasi memiliki kelebihan dan kekurangan ditinjau dari beberapa aspek seperti biaya investasi, kontaminasi dan sebagainya.

a. Open Pond

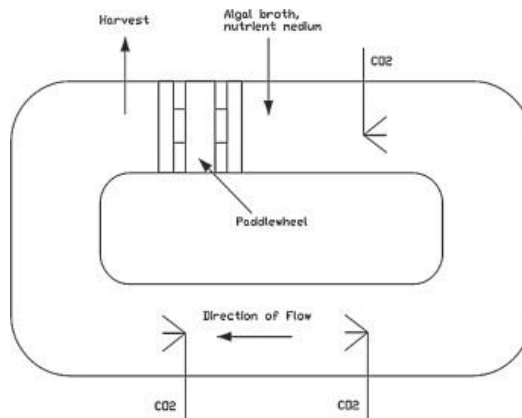
Sistem kultivasi open pond rentan terhadap serangan mikroalga dan protozoa asing. Akan tetapi tidak menutup kemungkinan digunakan untuk mikroalga jenis tertentu yang hidup pada lingkungan ekstrim seperti *Spirulina* yang dapat tumbuh pada alkalinitas yang tinggi, *Dunaliella* yang tumbuh pada salinitas yang tinggi, dan *Chlorella* yang tumbuh pada medium dengan nutrisi yang tinggi dan kompleks. Ditinjau dari produktivitas biomas, sistem open pond kurang efisien dibanding photobioreaktor sistem tertutup. Hal ini dikarenakan potensi evaporasi medium, temperatur yang fluktuatif, dan pengadukan yang kurang sempurna.



Gambar 2.4. Budidaya mikroalga sistem open pond.
(sumber: www.algaeindustrymagazine.com)

Kultivasi Mikroalga

Pada umumnya, kultivasi mikroalga secara komersial menggunakan metode open pond karena dipilih berdasarkan biaya investasinya yang murah. Di antara desain open pond lainnya, desain raceway lazim ditemui dalam industri pengolahan mikroalga. Sistem raceway ini ditujukan untuk menghindari sedimentasi biomas dan mempermudah pencampuran nutrisi dengan medium. Pond memiliki kedalaman 0.2-0.5 meter, dan medium diaduk menggunakan paddle wheel.



Gambar 2.5. Komponen Open Pond Photobioreactor

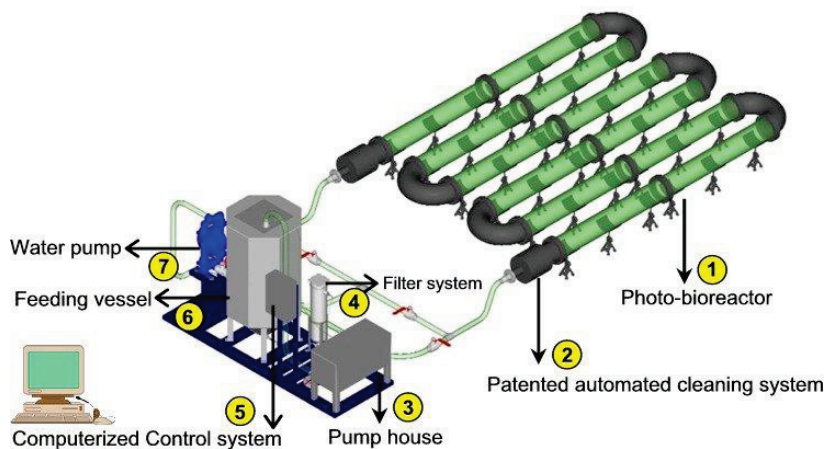
b. Closed Pond Photobioreactor

Sistem kultivasi ini lebih memiliki ketahanan terhadap kontaminasi bakteri dan algae lain dibanding sistem terbuka, sehingga spesies algae tunggal dapat terjaga dan menaikkan yield biomass.



Gambar 2.6. Budidaya mikroalga sistem tertutup / closed pond
(sumber: www.algaeindustrymagazine.com)

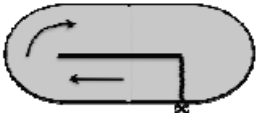
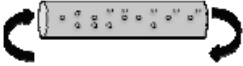
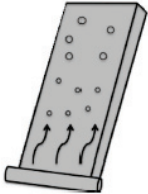

Closed pond biasanya didesain dalam bentuk tubular, plate, dan bentuk kolom. Sistem ini juga lebih fleksibel, reaktor dapat dioptimasi sesuai karakterisasi mikroalga. Parameter seperti pH, temperatur, konsentrasi CO₂ dan nutrisi dapat dikontrol dengan mudah. Kelemahan dari sistem ini adalah biaya yang tinggi apabila diterapkan dalam skala komersial dan kesukaran dalam proses scale up. Dalam skala kecil, luas area permukaan terhadap rasio volume dapat dengan mudah didapatkan. Akan tetapi jika skala desain dinaikkan, rasio antara volume dan luas permukaan cenderung menurun. Di lain hal, terjadinya akumulasi oksigen pada sistem tertutup juga dapat merugikan pertumbuhan mikroalga (Lannan, 2011).



Gambar 2.7. komponen closed pond photobioreactor
(sumber: www.algaestrain.com)

Beberapa metode kultivasi terkadang cocok dibiakkan pada kondisi lahan tertentu, atau mikroalga jenis tertentu, atau didasarkan pada kondisi iklim/pencahayaan. Beberapa metode terkadang cocok digunakan di satu tempat dan juga didasarkan pada aspek ekonominya, kemudahan dalam perawatan, efisiensi energi, dan biomas yang didapatkan.

Tabel. 2.1. Kelebihan dan Kelemahan beberapa Sistem Kultivasi

Sistem Budidaya	Kelebihan	Kekurangan
Open Pond 	Relatif murah Mudah dibersihkan Mudah perawatan Input energy rendah Dapat digunakan pada area non-agricultur	Kontrol kultur minim Mixing rendah waktu kultivasi yang lama Produktivitas rendah Mudah terkontaminasi
Tubular PBR 	Area permukaan pencahayaan luas Cocok untuk sistem luar ruangan Produktivitas biomas bagus	Membutuhkan area yang luas Fouling Dapat merubah pH, DO, dan CO2 Akumulasi oksigen
Flat PBR 	Relatif murah Mudah dibersihkan Cocok untuk cultur luar ruangan Konsumsi energi rendah Mengurangi akumulasi oksigen Biomas tinggi Akumulasi oksigen rendah	Area permukaan pencahayaan rendah Efisiensi fotosintesis rendah Kendala kontrol suhu Kendala scale-up
Kolom PBR 	Konsumsi energi rendah Transfer massa tinggi Pengadukan bagus Efisiensi fotosintesis tinggi	Area permukaan pencahayaan rendah Konstruksi material mudah rusak Mengakibatkan kematian pada beberapa jenis alga Biaya konstruksi dan operasi mahal Kendala scale-up

(Brennan dan Owende, 2009)

2. *Material Pond*

Material pond secara umum memiliki karakteristik: non toxic (inert dari bahan kimia), mudah dibersihkan, disterilkan, dan mudah diperoleh. Beberapa mikroalga tidak cocok pada material pond tertentu, untuk itu perlu diperhatikan material yang akan dipakai.

Beberapa material pond yang direkomendasikan di antaranya:

- Teflon (sangat mahal, biasa digunakan pada skala laboratorium)
- Polycarbonat (mahal dan dapat rusak jika dilakukan sterilisasi autoclave secara terus menerus)
- Polystyrene (murah, tidak bisa dilakukan sterilisasi autoclave)
- Gelas Borosilicate (dapat menghambat beberapa spesies mikroalga.)

(Probert dan Klaas, 1999)

3. *Medium Mikroalga*

Ada beberapa list medium yang digunakan untuk pertumbuhan mikroalga sesuai habitat dan jenisnya. Beberapa medium yang umum digunakan antara lain medium BBM (bold basal medium) untuk mikroalga hijau jenis air tawar, BG-11 untuk jenis mikroalga hijau biru jenis air laut, dan medium mikroalga hijau jenis air laut menggunakan medium HSM (high salt medium)/ Sueoka.

a. *Bold Basal Medium*

Tabel 2.2. Bold Basal Medium

Stock Nutrient	Kadar Nutrient	Penggunaan (untuk 1 liter)
KH_2PO_4	8.75gr/500ml	10 ml
$\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.25gr/500ml	10 ml
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3.75gr/500ml	10 ml
NaNO_3	12.5gr/500ml	10 ml
K_2HPO_4	3.75gr/500ml	10 ml
NaCl	1.25gr/500ml	10 ml
KOH	10gr/l	1 ml
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	4.98gr/l	1 ml
Larutan Trace Metal	Lihat list dibawah	1 ml
H_3BO_3	5.75gr/500ml	0.7ml

Tabel. 2.3.Larutan Trace metal BBM

Substrat	gr/l
H ₃ BO ₃	2.86
MnCl ₂ .4H ₂ O	1.81
ZnSO ₄ .7H ₂ O	0.222
NaMoO ₄ .2H ₂ O	0.390
CuSO ₄ .5H ₂ O	0.079
Co(NO ₃) ₂ .6.H ₂ O	0.0494

(Stein, J. 193)

b. Sueoka (HSM) Medium

Medium ini dapat digunakan untuk *Chlamydomonas* dan beberapa spesies lain seperti *Dunaliella salina* (Sueoka, *et al.*, 1967).

Tabel.2.4. Sueoka Medium

No	Stock Nutrient	Kadar Nutrien	Penggunaan (mL/L)
1	Beijerinck NaCl MgSO HO CaCl	5gr/500ml 0.2gr/500ml	50ml
2.	Phosphore K ₂ HPO ₄ KH ₂ PO ₄		50ml
3	Trace Metal H ₃ BO ₃ MnCl ₂ .4H ₂ O ZnCl ₂ NaMoO ₄ .2H ₂ O CuCl ₂ .2H ₂ O CoCl ₂ .6H ₂ O Na ₂ EDTA .2H ₂ O	92.76mg/500ml 207.69mg/500ml 1.64mg/500ml 79.89mg/500ml 0.006mg/500ml 1.30mg/500ml 150mg/500ml	1ml
	FeCl ₃ .6H ₂ O	79.89mg/500ml	

pH akhir medium adalah 6.8. Level pH dapat diatur menggunakan 1N HCl dan 1N NaOH. Perlu dilakukan autoclave dengan waktu 20 menit atau lebih jika penggunaan nutrient lebih dari 1 liter. Nutrien didiamkan selama semalam sebelum digunakan.

c. BG-11 Medium

Medium ini umum digunakan untuk jenis cyanobacteria, dan dapat ditambahkan larutan vitamin f/2 untuk beberapa spesies tertentu.

Tabel. 2.5. BG-11 Medium

Stock Nutrient	Kadar Nutrien	Penggunaan (mL/L)
NaNO ₃ (tidak digunakan untuk heterocytous spesies, ex: <i>Nostoc</i> , <i>Anabaena</i>)	150gr/L	10ml
K ₂ HPO ₄ .3H ₂ O / (K ₂ HPO ₄)	40gr/L / (30gr/L)	1ml
MgSO ₄ .7.H ₂ O	75gr/L	1ml
CaCl ₂ .2H ₂ O	36gr/L	1ml
Asam sitrat (dikombinasi dengan Besi sitrat)	6gr/L	1ml
Na ₂ EDTA.2H ₂ O	1gr/L	1ml
Na ₂ CO ₃	20gr/L	1ml
Larutan Trace Metal		1ml
F/2 vitamin		1ml

Tabel. 2.6. Susbrtat Trace Metal BG-11 Medium

Substrat	Trace	Stock	Substrat	Stock gr/l
Metal		gr/l	vitamin F/2	
H ₃ BO ₃		2.86	Vitamin B12	5mg/5ml H ₂ O terdistilasi
MnCl ₂ .4H ₂ O		1.81	Biotin	2mg/10ml H ₂ O terdistilasi
ZnSO ₄ .7H ₂ O		0.222		
NaMoO ₄ .2H ₂ O		0.390		
CuSO ₄ .5H ₂ O		0.079		
Co(NO ₃) ₂ .6.H ₂ O		0.0494		

(Rippka, *et al.* 1979)

Chapter 3

Perancangan Pond

Budidaya mikroalga terbagi dalam beberapa alternatif pilihan. Budidaya ini dapat dilakukan pada reaktor buatan yang disebut photobioreaktor, yakni reaktor yang memanfaatkan sumber cahaya sebagai sumber fotosintesis untuk pertumbuhan mikroalga.

Pada umumnya untuk skala massal, budidaya mikroalga menggunakan suatu kolam terbuka yang biasa disebut Open Pond. Open pond merupakan sistem kultivasi yang sangat lama digunakan. Pada awalnya, kolam atau pond sebenarnya digunakan sebagai media pengolahan limbah cair, dengan perkembangan saat ini pond diterapkan pada kultivasi mikroalga skala massal. Open Pond dapat dikategorikan ke dalam perairan alami seperti danau dan laguna serta kolam buatan atau kontainer yang terbuat dari bahan tertentu seperti PVC, semen, atau tanah liat. Open Pond atau biasa disebut juga bioreaktor kolam terbuka merupakan salah satu jenis bioreaktor yang paling murah dan mudah dikonstruksi apabila dibandingkan photobioreaktor tertutup, karena dari pencahayaan hanya menggunakan sinar matahari sebagai sumber cahaya mikroalga dalam melakukan fotosintesis.

Pemilihan jenis photobioreaktor sendiri sangat penting karena dapat menentukan hasil biomassa yang akan dihasilkan. Beberapa sistem budidaya yang umum digunakan yaitu kolam dangkal, kolam melingkar, dan kolam raceway dengan aliran sirkular menggunakan 1 pedal roda (paddle wheel). Kelemahan dari sistem open pond yaitu volume sistem kultur yang besar sehingga sinar matahari yang masuk tidak sepenuhnya dapat terserap oleh mikroalga di dasar kolam. Selanjutnya akibat kontak langsung dengan udara maka evaporasi cairan relative besar dan proses pengadukan tidak dapat maksimal sehingga terjadi pengendapan atau sedimentasi sel di dasar kolam. Permasalahan lain yang muncul dari sistem open pond yaitu adanya kontaminasi langsung dari lingkungan sekitar.

1. Jenis- Jenis Photobioreaktor

Pemilihan jenis photobioreaktor sangat perlu diperhatikan. Hal tersebut dapat berpengaruh pada tingkat produksi biomassa yang akan dihasilkan. Pada dasarnya ada dua jenis photobioreaktor, yaitu photobioreaktor tertutup dan photobioreaktor terbuka. Photobioreaktor tertutup mempunyai kondisi yang lebih terkontrol dibandingkan dengan photobioreaktor terbuka. Photobioreaktor sendiri merupakan sebuah bioreaktor dengan beberapa tipe sumber cahaya seperti sinar matahari (daylight lamp) , lampu fluorescent, atau led. Pada sistem tertutup juga memungkinkan pertumbuhan mikroalga semakin cepat karena adanya peningkatan konsentrasi karbondioksida, yang merupakan salah satu faktor penentu dalam kultivasi mikroalga. Photobioreaktor tertutup lainnya yaitu Quasi-closed system yang merupakan sebuah kolam yang ditutupi dengan bahan transparan (greenhouse) di semua bagian.

Tabel 3.1. Perbandingan photobioreaktor sistem terbuka maupun tertutup

Parameter	Open Pond	Photobioreaktor tertutup
Konstruksi	Sederhana, mudah	Lebih kompleks, jenis sesuai desain
Biaya	Biaya konstruksi Murah, biaya operasi lebih murah	Biaya konstruksi lebih mahal, biaya operasi juga lebih tinggi
Growt rate (g/m ² .day)	Rendah (10-25)	Sesuai jenis desain (1 – 500)
Konsentrasi biomassa (g/L)	Rendah (0.1 – 0.2)	Tinggi (2 – 8)
Proses kehilangan air	Tinggi	Rendah
Kontrol temperatur	Sulit	Mudah
Kontrol spesies mikroalga	Sulit	Mudah
Kontaminasi	Resiko tinggi	Resiko rendah
Penggunaan cahaya lampu	Sangat rendah	Sangat tinggi
Kehilangan CO ₂ ke atmosfer	Tinggi	Hampir tidak ada
Kebutuhan tempat	Luas	Kecil
Kedalaman/ diameter air (m)	0.3	0.1

Rasio luas permukaan : volume (m^2/m^3)	~6	60 – 400
Start-up	6 – 8 minggu	2 – 4 minggu
Cleaning	Mudah	Sulit

Pada bagian ini akan lebih dibahas mengenai photobioreaktor terbuka atau yang biasa disebut Open pond. Kolam terbuka atau Open pond merupakan sistem kultivasi mikroalga yang dilakukan di luar ruangan. Sistem seperti ini hanya cukup dibuat semacam kolam sirkuit, karena faktor pencahayaan didapat secara langsung dari sinar matahari, serta kebutuhan akan karbondioksida diambil dari lingkungan sekitar. Pada sistem kolam sirkuit, bibit mikroalga, media tumbuh (pada umumnya air), dan nutrisi dicampurkan secara langsung dalam kolam yang bergerak menyerupai aliran sirkuit. Aliran air dibuat dengan sistem pemompaan, sehingga mikroalga dan nutrisi tetap dapat tercampur dan tidak terjadi pengendapan mikroalga dan nutrisi yang ditambahkan didasar kolam. Kolam pada umumnya dibuat dangkal supaya mikroalga tetap dapat memperoleh sinar matahari, karena sinar matahari hanya dapat masuk pada kedalaman air yang terbatas. Variasi yang dapat diterapkan pada sistem Open Pond yaitu dengan memberikan atap transparan (green house) yang masih dapat ditembus sinar matahari untuk melindungi mikroalga dari kontaminasi luar seperti air hujan, kotoran yang terbawa angin dan lain-lain. Tetapi pada prakteknya, cara ini hanya dapat diaplikasikan pada kolam yang berukuran relatif kecil, dan belum dapat mengatasi beberapa masalah yang terjadi pada sistem terbuka.

Ada banyak tipe sistem kultivasi mikroalga sistem open pond, antara lain menurut ukuran, bentuk, bahan yang digunakan untuk konstruksi, jenis pengadukan, dan sudut inklinasi. Banyak desain konstruksi yang disarankan, tetapi ada empat desain utama yang dapat dikembangkan dan dioperasikan pada skala massal, yaitu:

1. Unstirred ponds

Yang termasuk jenis pond ini adalah danau dan kolam alami. Pond tanpa pengadukan merupakan salah satu jenis pond yang paling ekonomis diantara jenis metode kultivasi skala komersial yang lain. Jenis mikroalga yang dikembangkan yaitu

Perancangan Pond

Dunaliella salina. Mikroalga jenis ini dikembangkan untuk diambil β -karoten, dan banyak dikembangkan di Australia Barat dan Australia Selatan. Unstirred Ponds mempunyai luasan yang sangat besar dengan konstruksi yang sangat sederhana, tanpa penutup, dan mempunyai kedalaman kurang dari setengah meter. Untuk ukuran pond yang lebih kecil, dapat dimodifikasi dengan adanya pelapisan plastik di atas permukaan kolam. Unstirred open pond sangat terbatas untuk mikroalga yang mempunyai kemampuan tumbuh pada kondisi yang sangat sulit dan mampu bersaing dengan kontaminan lain yang tumbuh seperti protozoa, mikroalga lain, virus dan bakteri.

2. *Inclined ponds*

Inclined pond adalah tipe pond yang menggunakan pompa untuk menggerakkan aliran medium dari bawah ke atas. Beberapa peneliti menyatakan bahwa dengan sistem pond ini diperoleh produktivitas yang tinggi. Borowitzka (1999) melaporkan bahwa produksi *Chlorella* dapat mencapai 25gram/m/hari dalam kurun waktu setahun. Inclined pond secara luas digunakan di Republik Cheko untuk perkembangbiakan *Spirulina platensis*, *Chlorella* sp, dan *Scenedesmus* sp dengan produktivitas 18 sampai 25gram/m/hari (Setlik, *et al.*, 1970).

Keunggulan dari sistem ini adalah diantaranya: (1) didapatkan flow turbulen dengan kedalaman kultur yang relatif dangkal (kurang dari 1 cm) sehingga diperoleh konsentrasi sel mencapai 10gr/liter. (2) rasio volume dan permukaan relatif tinggi dibanding jenis pond lainnya (Richardmon, 1999). Sedangkan kelemahan dari pond ini diantaranya: (1) sedimentasi sel akan semakin tinggi jika dioperasikan pada turbulensi yang rendah, sehingga dimungkinkan masuknya kontaminan dan menurunnya produktivitas. (2) medium mudah terevaporasi, absorpsi CO₂ relatif rendah. (3) biaya pemompaan kultur yang semakin membengkak karena dioperasikan secara kontinyu. (Tredici, 2004). Pada sistem ini diperoleh produktivitas biomas yang relatif sama dengan metode pond lain. Akan tetapi dengan biaya operasional yang cukup tinggi, maintenance, dan konstruksinya, menjadikan pond ini tidak feasibel.

3. *Central pivot ponds*

Circular central pivot biasa juga disebut dengan Kultivasi sirkulasi. Umumnya sistem ini digunakan di negara Asia Tenggara untuk budidaya *Chlorella* sp (Lee, 2001). Sistem pond ini rekatif paling tua jika dibanding dengan sistem pond lain. Selain itu metode pond ini juga dapat digunakan untuk pengolahan limbah.



Gambar 3.1. Berbagai macam bentuk open pond. (a) unstirred pond, (b) central pivot pond, (c) inclined pond (d) raceway pond. (sumber: Tredici, 2004)

4. *Raceways ponds*

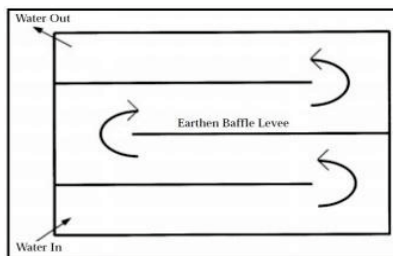
Kolam terbuka aliran sirkuit adalah paling sederhana untuk budidaya massal mikroalga. Dalam sistem ini, kolam dangkal biasanya sekitar 30-50cm, dan ganggang yang dibudidayakan dalam kondisi identik dengan lingkungan alami mereka. Kolam ini dirancang dalam konfigurasi raceway, di mana sebuah Paddle wheel berputar mencampur sel-sel alga dengan nutrien yang ditambahkan. Biasanya terbuat dari beton yang dibentuk, atau hanya cukup digali ke dalam tanah kemudian dilapisi dengan lapisan plastik untuk mencegah tanah menyerap cairan alga. Baffle dalam saluran mengatur aliran di sekitar putaran dan sering dioperasikan secara terus menerus. Untuk beberapa jenis mikroalga laut, air laut atau air dengan salinitas tinggi

Perancangan Pond

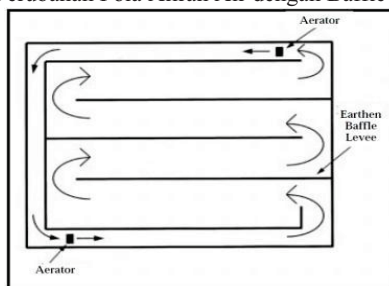
dapat digunakan sebagai medium tumbuh. Kolam dengan sistem terbuka, sering mengalami banyak kehilangan air karena penguapan. Dengan demikian, kolam terbuka tidak memudahkan mikroalga menyerap karbon dioksida secara efisien, dan produksi biomassa terbatas (Chisti, 2007). Produktivitas biomassa juga dibatasi oleh kontaminasi dari spesies alga lain yang tidak diinginkan serta organisme yang memakan ganggang. Selain itu, kondisi budaya yang optimal sulit untuk mempertahankan di kolam terbuka

2. Sirkulasi Pond

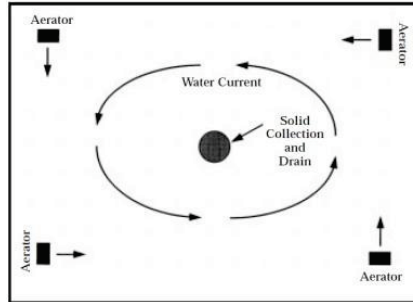
Dalam beberapa kasus perancangan kolam terbuka, perlu diperhatikan beberapa aspek termasuk salah satunya masalah sirkulasi air kolam. Sistem sirkulasi dapat berpengaruh langsung terhadap siklus udara yang masuk dalam kolam. Selain itu dengan mengetahui adanya sistem sirkulasi, dapat diketahui sistem persebaran nutrisi yang ditambahkan sehingga mikroalga tidak mengalami kekurangan maupun kelebihan nutrisi yang dapat menyebabkan terhambatnya pertumbuhan mikroalga dan adanya keracunan yang berefek pada kematian mikroalga. Beberapa model aliran sirkulasi open pond disajikan pada Gambar 3.2. sampai Gambar 3.5.



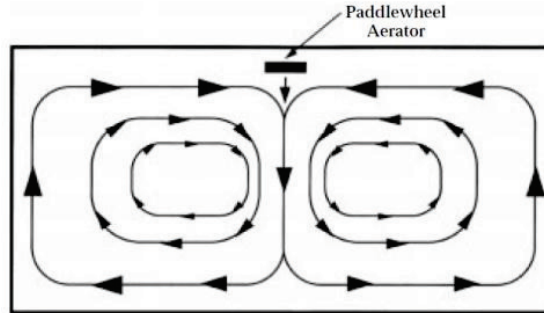
Gambar 3.2. Perubahan Pola Aliran Air dengan Baffle pada Pond



Gambar 3.3. Desain Water circulation pond dengan baffle dan aerator



Gambar 3.4. Paddlewheel aerator driven water circulation.



Gambar 3.5. Penempatan paddlewheel aerator yang direkomendasikan pada pond untuk memaksimalkan aerasi dan sirkulasi

3. Konstruksi Pond Raceway

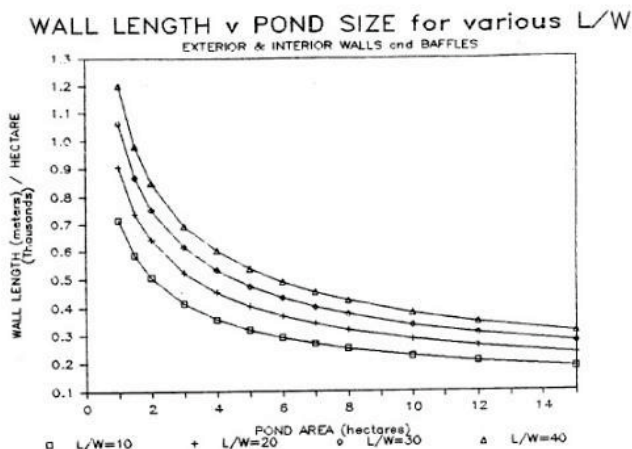
Salah satu tipe konstruksi open pond yang biasa digunakan untuk pembiakan mikroalga adalah jenis raceway. Beberapa komponen yang harus diperhatikan dalam konstruksi raceway adalah ukuran rasio panjang dan lebar pond, kecepatan paddle/kincir, kolam intermediet, dan sump.

a. Ukuran Pond dan Geometri

Pond kolam sirkuit merupakan salah satu cara pembudidayaan yang membutuhkan banyak sinar matahari, sehingga cukup membutuhkan luasan area

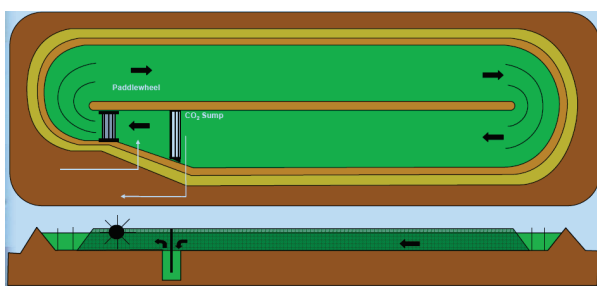
Perancangan Pond

yang besar. Oleh karena itu diperlukan suatu perhitungan luasan yang tepat sehingga dapat diperoleh hasil yang optimal.



Gambar 3.6. Grafik Perbandingan Ukuran Pond dan Luasan area pada berbagai rasio L/W (Wellsman dan Gosbel, 1987).

Dasar geometri dapat menentukan ukuran perancangan pond, aliran, dan rasio panjang dan lebar (L/W). Pemilihan dari ukuran dan bentuk pond dapat menentukan faktor ekonomi dan efek lain dalam sistem tersebut seperti pengadukan dan penyebaran udara dalam pond tersebut. Optimasi geometri secara sederhana dapat menunjukkan luasan pond dengan rasio L/W (length/wide, panjang/lebar) dalam Gambar 3.5. ditunjukkan perbandingan L/W dengan luasan pond.

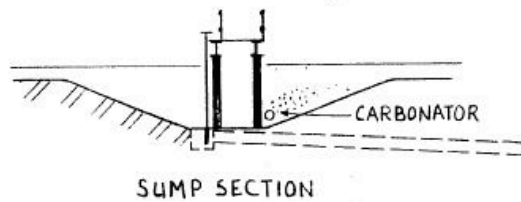


Gambar 3.7. Pond Aliran Sirkuit dengan L/W Ideal

Pemilihan rasio L/W harus memperhatikan luasan minimal area yang ada dan juga faktor lain yang mungkin dapat berpengaruh. Contoh Pond Aliran Sirkuit (Raceway Ponds) disajikan dalam Gambar 3.7.

b. Sump

Sump merupakan bagian yang dibuat lebih dalam pada kolam yang biasa digunakan untuk penambahan CO₂. Sump juga digunakan untuk mengurangi kecepatan aliran saat padatan inert dan komponen organik yang mengendap sudah terakumulasi dan harus dihilangkan. Untuk 8 hektar pond, kedalaman sump berkisar 1,5 meter akan mengakibatkan penyerapan CO₂ 95%. Kedalaman ini cukup untuk mencegah adanya pusaran air dan udara yang terjebak dalam saluran pipa. Desain untuk Sump tunggal yaitu dipasang menyilang sesuai dengan lebar saluran. Panjang dan lebar dari sump sendiri disesuaikan dengan besarnya padatan yang harus dihilangkan. Pada umumnya, desain panjang disesuaikan batas minimal yaitu berkisar 1 meter. Pipa distribusi CO₂ dipasang pada dasar akhir dari Sump, sehingga tidak akan terjadi dekomposisi padatan.



Gambar 3.8. cekungan dalam pond (disebut sump)

c. Mixing

Mixing merupakan bagian penting dalam pembuatan kolam raceway. Bagian ini berfungsi menaduk mikroalga agar tidak cepat mengendap, selain itu juga berfungsi sebagai pengaduk nutrisi, dan pengaduk bagian bagian sel mikroalga agar mendapat cahaya matahari yang seragam, dan sebagai pencampur udara agar lebih cepat terdifusi ke dalam medium. Salah satu tipe pengaduk yang cukup terkenal digunakan dalam kultivasi mikroalga adalah paddle wheel. Selain itu dapat juga digunakan tipe pengaduk lain seperti propeller, gas lifting, gas sparging, maupun pengadukan tradisional.

Perancangan Pond

Keunggulan paddle wheel dibanding jenis mixer pond lain di antaranya yaitu (1) mudah diaplikasikan untuk skala komersial dan tidak membutuhkan perawatan yang intens (2) tidak membahayakan sel alga sehingga meningkatkan efektivitas pemanenan (3) mudah didesain sesuai kebutuhan. Selain memiliki kelebihan, paddle wheel juga memiliki beberapa kelemahan diantaranya (1) biaya pembuatan yang relatif mahal, (2) panjang head (sirip) paddle secara aktual maksimum hanya 0.5 meter sehingga tidak dapat diaplikasikan untuk pond dengan area diatas 20 hektar. Secara umum, perhitungan kecepatan paddle wheel adalah sebagai berikut:

$$v = \frac{R^{67} S^5}{n}$$

v = kecepatan (meter/detik)

Rh = radius hidraulik, (meter)

s = slope hidraulik (head loss/unit panjang)

n = nilai kekasaran material pond

Jika kecepatan dan panjang channel sudah diketahui, persamaan dapat disederhanakan untuk mencari head loss

$$h_L = \frac{Lv^2 n^2}{R^{1.33}}$$

di mana **h_L** = head loss (meter)

L = panjang channel (meter)

Secara umum, nilai n adalah 0.010 untuk permukaan pond yang kasar, 0.014 untuk permukaan pond yang belum halus, 0.017-0.025 untuk permukaan yang cukup halus, 0.029 untuk permukaan yang halus. Sedangkan nilai 0.018 secara umum digunakan untuk kalkulasi head loss untuk pond skala besar. Pada umumnya efisiensi yang digunakan berkisar 70-75% untuk pompa sentrifugal dan 30-40% untuk tipe paddle wheel atau pompa airlift.

Power pompa juga dapat bergantung pada kedalaman pond. Jika pond yang digunakan semakin dalam, maka power pompa yang digunakan semakin besar (Wellsman dan Gosbel, 1987).

Untuk perhitungan power mixing, dapat dihitung dengan persamaan

$$P = \frac{9810 \cdot A \cdot v^3 \cdot n^2}{d^3 e}$$

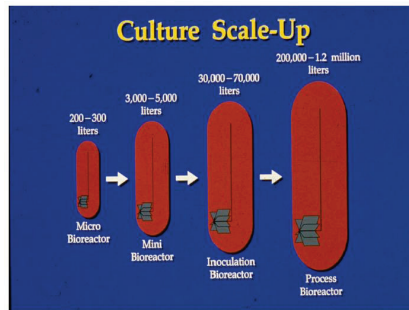
di mana **p** = power (watt)

A = pond area (meter²)

e = overall efisiensi sistem pengadukan

d. Kolam intermediet (perantara).

Kolam intermediet digunakan untuk scale up mikroalga dari skala mikro hingga skala komersial. Kolam intermediet dapat juga disebut kolam pembibitan. *Scale up* mikroalga dilakukan dari pond dengan ukuran 200-300 liter, dan bertahap sampai didapatkan volume yang diinginkan. Biasanya bibit yang digunakan untuk start up adalah berkisar 10-15%.



Gambar 3.9. Kolam intermediet open pond

e. Pertimbangan dalam desain open pond.

Terdapat beberapa pertimbangan dalam pembuatan desain open pond, di antaranya yaitu (1) Kolam dibangun secara beriringan atau dengan bentuk kolam sirkuit. (2) Pengadukan secara lambat sehingga menghasilkan gelombang yang

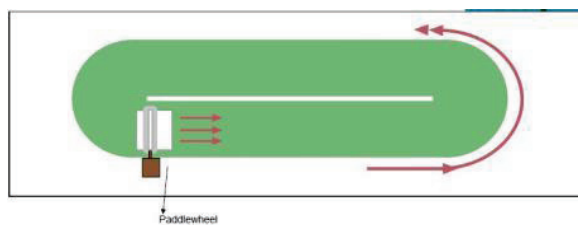
Perancangan Pond

kecil. (3) Untuk pengadukan dapat digunakan paddle wheel, water jet (pompa air), dan air pump (pompa air) (4) Dimensi untuk 100 ton air yaitu 50m x 5m x 0,4m Dalam sistem open pond, produktivitas *Spirulina* yang dapat dicapai 0,35g/Lt, sedangkan Luasan area yang dibutuhkan untuk kapasitas 100 ton air berkisar sampai dengan 250 m². Pemilihan dimensi open pond ini dapat menjadi alternatif dalam budidaya mikroalga, namun harus diingat bahwa resiko kontaminasi yang cukup tinggi, risiko sirkulasi udara yang rendah, dan pengadukan dengan efisiensi rendah. Selain itu semakin besar volume, maka resiko juga akan semakin besar.

1. Open pond dengan paddle wheel

Beberapa faktor yang dipertimbangkan untuk Open Pond menggunakan Paddle Wheel

- Pola pengadukan
- Material pelapis paddle wheel (anti air, tahan terhadap bahan kimia minimal 20 tahun, berwarna putih/abu-abu)
- Jenis kultivasi yang akan dilakukan
- Penanganan pengukuran dengan pH meter
- Penanganan penghitungan jumlah alga
- Saringan alga (opsional)
- Panel Sinar matahari (opsional)



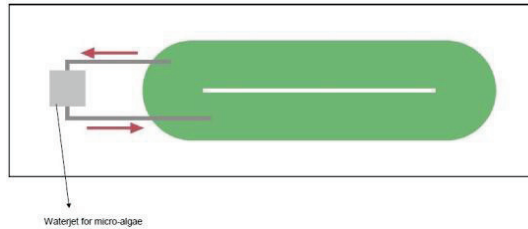
Gambar 3.10. open pond dengan paddle wheel.

2. Open pond dengan waterjet

Material yang dipertimbangkan untuk Open Pond menggunakan Waterjet (Pompa air)

- Mekanisme sirkulasi pompa air

- Material pelapis paddle wheel (anti air, tahan terhadap bahan kimia minimal 20 tahun, berwarna putih/abu-abu)
- Jenis kultivasi yang akan dilakukan
- Penanganan pengukuran dengan PH meter
- Penanganan penghitungan jumlah alga
- Saringan alga (opsional)
- Panel Sinar matahari (opsional)

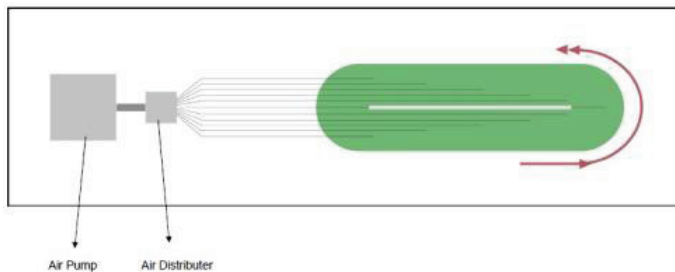


Gambar 3.11. Open pond dengan waterjet pump

3. Open pond dengan Airpump

Material yang dipertimbangkan untuk Open Pond menggunakan Airpump (Pompa Udara)

- Bebas minyak
- Material pelapis paddle wheel (anti air, tahan terhadap bahan kimia minimal 20 tahun, berwarna putih/abu-abu)
- Jenis kultivasi yang akan dilakukan
- Penanganan pengukuran dengan pH meter
- Penanganan penghitungan jumlah alga
- Saringan alga (opsional)
- Panel Sinar matahari (opsional)



Gambar 3.12. open pond dengan airpump

Chapter 4

Pemanenan dan Pengeringan Mikroalga

Kultivasi mikroalga secara praktis dapat digunakan dalam berbagai tujuan yang berbeda seperti untuk produksi hidrokarbon, protein, bahan farmasi, pengolahan limbah cair, konversi energi dan berbagai kombinasi dari tujuan-tujuan tersebut. Untuk mencapai tujuan itu, maka perlu dilakukan proses pemisahan yang berbeda pula. Mikroalga akan menghasilkan biomassa yang kemudian akan berbentuk endapan sel dalam jumlah banyak. Oleh karena itu proses pemisahan endapan sel mikroalga merupakan tahapan yang penting. Efisiensi dari proses pemisahan dengan air dan model pengeringan mikroalga bisa menjadi faktor yang mendasar dari segi kelayakan ekonomi sistem produksi mikroalga. Sebagai contoh, kombinasi proses kultivasi mikroalga untuk tujuan pengolahan air dan produksi protein, pemisahan memiliki dua tujuan yang harus dicapai, yaitu proses pengambilan mikroalga bebas air dan memperoleh biomassa dengan konsentrasi protein yang tinggi baik untuk standar pakan hewan (feed grade) maupun standar konsumsi manusia (food grade). Sebelum masuk mengenai masalah pemanenan alga, berikut akan disampaikan tahapan alga pada waktu proses pembibitan.

1. Tahapan Pemanenan

Pemisahan alga dari mediumnya merupakan masalah utama dalam suatu proses industri karena ukuran alga yang sangat kecil, pada alga eukariot bersel satu berkisar 3 - 30 μ m, dan jenis cyanobakteria berkisar 0,2 – 5 μ m. Pada umumnya kelarutan suatu kultur antara 200 – 600 mg/l, dan dibutuhkan volum air yang cukup banyak untuk pemrosesannya. Pengambilan kembali biomass alga berpengaruh 20 - 30% dari keseluruhan biaya produksi. Langkah-langkah pemanenan bukan hanya tentang biaya, tetapi juga sangat berpengaruh terhadap proses selanjutnya. Metode pemanenan alga yang sudah ada saat ini yaitu secara kimia, mekanik, operasi berbasis listrik dan dengan berbagai kombinasi dan urutan beberapa metode tersebut (Bernhardt dan Clasen, 1991; Kumar *et al.*,1981). Pemanenan secara biologi sedang diteliti lebih lanjut karena dapat mengurangi biaya pemanenan. Belum ada metode

Pemanenan dan Pengeringan Mikroalga

terbaik untuk pemanenan mikroalga, semua mempunyai kelebihan dan kelemahan masing-masing. Berikut akan disampaikan beberapa metode pemanenan mikroalga tersebut.

a. Cara Kimiawi

Flokulasi secara kimia sering dilakukan sebagai pretreatment awal untuk menaikkan ukuran partikel sebelum digunakan metode lain seperti flotasi. Polimer elektrolit dan sintesis sering ditambahkan untuk mengkoagulasi dan memflokulasi sel mikroalga (Bernhardt dan Clasen, 1991). Karena mempunyai muatan ion $+3$, kation besi alumunium, alumunium sulfat dan besi klorida sering digunakan sebagai ion penetral. Dengan pertimbangan proses selanjutnya, produksi bioproduk dari alga juga menggunakan logam garam untuk koagulasi dan flokulasi. Alumunium sulfat juga menunjukkan dapat menghambat aktifitas pembentukan metan dan pengasaman oleh bakteri dari cairan umpan (Cabirol *et al.*, 2003). Pengolahan dengan alumunium pada tanah juga dapat meningkatkan logam berat dan menyebabkan kekurangan fosfor pada tanaman (Bugbee dan Frink, 1985).

Polimer alam dapat digunakan sebagai flokulan untuk mengurangi masalah polusi tersebut, meskipun belum banyak penelitian tentang hal itu. Divakaran dan Sivasankara Pillai (2002) telah berhasil memflokulasi dan mengendapan alga dengan adanya penambahan chitosan. Kation pati juga diindikasikan dapat digunakan sebagai agen flokulasi (Pal *et al.*, 2005).

b. Cara Mekanik

Sentrifugasi mungkin adalah metode yang paling sering digunakan untuk proses *recovery* alga yang tersuspensi. Tenaga sentrifugal dimanfaatkan untuk pemisahan berdasarkan perbedaan massa jenis. Jenis pipa sentrifugal mudah dibersihkan dan disterilisasi dan cocok untuk semua jenis mikroalga, tetapi harus dipertimbangkan investasi awal serta biaya operasi yang tinggi (Shelef *et al.*, 1984). Teknologi sentrifugasi merupakan metode teraktual saat ini, tetapi masalah biaya menjadi kendala utama apabila digunakan untuk skala yang besar.

Metode filtrasi sering digunakan untuk pemanenan strain alga berfilamen. Dijelaskan bahwa kolam alga dengan laju aliran tinggi lebih mudah dipanen alga berfilamennya dengan saringan mikro untuk mempertahankan sel yang berukuran besar dan

mengeluarkan alga tak berfilamen yang berukuran lebih kecil (Vonshak and Richmond, 1988., Wood, 1987) . Penelitian lain mengungkapkan bahwa tidak dapat dipastikan jenis alga yang dominan dalam spesies tersebut (Hoffmann, 1998). Jenis alga berfilamen kurang cocok untuk aplikasi sebagai biofuel karena memiliki kandungan lemak yang sedikit (Mulbry *et al.*, 2008). Untuk jenis alga tersuspensi yang lebih kecil, filtrasi dengan aliran tangensial perlu dipertimbangkan karena lebih mudah ditangani dari pada filtrasi sistem dead-end, tetapi adanya penyumbatan (fouling) menyebabkan membran harus sering diganti sehingga cukup berpengaruh pada biaya (Uduman *et al.*, 2010), dan tenaga yang dibutuhkanpun cukup tinggi.

Pemanenan secara sedimentasi merupakan jenis pemanenan yang paling murah dan menghasilkan konsentrasi padatan sekitar 1,5% (Uduman *et al.*, 2010), tetapi karena adanya fluktuasi massa jenis sel mikroalga, kenyataannya sangat cukup sedikit perusahaan yang mengaplikasikan cara ini (Shen *et al.*, 2009). Dengan kecepatan pengendapan 0,1 – 2,6 cm/jam, sedimentasi cukup lambat dan banyak biomassa yang rusak selama proses pengendapan (Greenwell *et al.*, 2010).

Tabel 4.1. Beberapa perbandingan metode Pemanenan cara mekanik.

Metode	Konsentrasi padatan setelah pemanenan	Recoveri	Skala	Keuntungan	Kelemahan
Sentrifugasi	12-22%	>90%	Laboratorium	Teruji, konsentrasi padatan tinggi	Energi tinggi, biaya tinggi
Filtrasi tangensial	5-27%	70-90%	Laboratorium	Teruji, konsentrasi padatan tinggi	Fouling membran, biaya tinggi
Pengendapan gravitasi	0,5-3%	10-90%	Pilot plant	Biaya rendah	Lambat, kurang teruji
DAF	3-6%	50-90%	Pilot plant	Terbukti untuk skala massal	Membutuhkan flokulan tambahani

Sumber : Shelef *et al.* (1984), Shen *et al.* (2009), Greenwell *et al.* (2010), and Uduman *et al.* (2010).

Pemanenan dan Pengeringan Mikroalga

Dissolved air flotation (DAF) merupakan metode yang umum digunakan dalam pengolahan air limbah (Friedman *et al.*, 1977). Karena alga mengandung banyak air, DAF biasa lebih dipilih daripada metode sedimentasi. Keuntungan utama dari metode DAF yaitu telah terbukti dapat diaplikasikan untuk skala massal, tetapi memiliki kelemahan yaitu penggunaan flokulan akan berpengaruh kurang baik pada saat proses selanjutnya (Greenwell *et al.*, 2010; Hoffmann, 1998).

a. Cara berbasis Listrik

Metode pemisahan berdasarkan elektroporesisi mikroalga merupakan salah satu cara yang dapat digunakan. Sel alga dapat terkonsentrasi karena adanya aliran arus listrik (Kumar *et al.*, 1981). Keuntungan dari pendekatan cara ini yaitu tidak adanya penambahan bahan kimia, tetapi bagaimanapun juga perlu tenaga yang besar dan biaya kelistrikan yang tinggi membuat metode ini kurang menarik, apalagi untuk skala massal (Uduman *et al.*, 2010).

b. Cara Biologi

Alga diketahui terkadang dapat secara spontan terflokulasi tanpa ada penambahan bahan kimia (Sukenic dan Shelef, 1984). Pengembangan dan pengendalian cara ini dapat secara signifikan menekan biaya panen. Meskipun penggunaan istilah autoflokulasi dan bioflokulasi sering digunakan bergantian, tetapi keduanya menggambarkan fenomena yang berbeda.

Autiflokulasi terjadi karena level pH yang tinggi karena adanya konsumsi karbon dioksida terlarut dalam cairan alga. Peningkatan pH disebabkan ion kalsium dan fosfat yang jenuh. Jika ion kalsium berlebih, endapan kalsium phosphor akan bermuatan positif. Sel alga akan menjadi penyokong endapan padat tersebut dan merubahnya menjadi bermuatan netral (Lavoie dan de la Noüe, 1987). Autoflokulasi mungkin tidak dijumpai pada semua jenis air. Konsentrasi optimal untuk endapan kalsium phosphor pada pH 8,5-9 berkisar 3,1-6,2 mg/l phosphat dan 60-100 mg/l kalsium (Sukenic and Shelef, 1984). Masalah tersebut dapat diatasi dengan penambahan kapur dalam kolam open pond. Cara ini akan membawa nitrogen, phosphor dan pengurangan alga hingga diatas 90% (Nurdogan dan Oswald, 1995).

Bioflokulasi biasa diartikan adanya flokulasi karena biopolimer. Banyaknya fitoplankton yang mengendap berpengaruh dengan meningkatnya konsentrasi EPS (ekstraseluler polimer substrat) (Bhaskar dan Bhosle, 2005). Passow dan Alldredge (1995) melaporkan diatom yang terkontrol mengalami flokulasi massa sesaat setelah adanya peningkatan jumlah sel yang tertutup oleh biopolimer. Produksi EPS dilaporkan akan mengalami fase maksimal pada akhir fase tumbuh (Bhaskar dan Bhosle, 2005; Staats *et al.*, 1999), meskipun cahaya dan suhu juga cukup berpengaruh pada bioflokulasi (Wolfstein dan Stal, 2002). Pendekatan biologis lain yaitu flokulasi alga secara mikrobiologi. Yaitu dengan menambahkan agen mikroba pemflokulasi kedalam kultur alga (Lee *et al.*, 2008). Selain itu juga diumpangkan 0,1 gr/l asetat, glukosa atau gliserin dan diaduk selama 24 jam, maka akan didapatn recoveri sebesar 90 % dengan faktor konsentrasi 226. Penelitian lain menunjukkan adanya efisiensi flokulasi menggunakan mikroba tanah dari pada menggunakan aluminium sulfat atau policrilamida untuk proses pemanenan *Chlorella vulgaris* (Oh, *et al.*, 2001).

Cara biologi lain yaitu pemanenan menggunakan ikan planktivorous seperti tilapia. Proses kontrol eutrofikasi dilakukan pada kolam aliran sirkuit untuk menumbuhkan alga. Alga kemudian diumpangkan kedalam kolam ikan, dan kotoran ikan akan membentuk endapan yang kemudian dibawa ke permukaan pada sabuk konveyor untuk kemudian dimasukkan pada digester anaerobik (Brune *et al.*, 2007). Peneliti lain juga menggambarkan proses yang sama dengan mengumpangkan air yang kaya akan nutrisi melewati saringan berpori untuk menumbuhkan *Periphyton*. Kotoran dari tilapia yang dimasukkan pada alga tersebut, kemudian dikumpulkan pada kolom pengendap. Penurunan total fosfor dan nitrogen masing-masing sebesar 82% dan 23%.

2. Teknologi Pemanenan Mikroalga

Proses pemanenan mikroalga merupakan suatu proses pemisahan padatan – cairan. Pemisahan padatan-cairan dapat diklasifikasikan dalam dua jenis proses pemisahan. Pertama, cairan dibatasi dalam tangki penampung, sehingga hanya partikel yang dapat bergerak bebas dalam badan cairan. Yang termasuk jenis ini adalah sedimentasi dan flokulasi. Kedua, gerak partikel dibatasi media semipermeabel, sehingga cairan tetap dapat mengalir. Filtrasi dan

Pemanenan dan Pengeringan Mikroalga

Screening merupakan contoh dari jenis kedua tersebut. Salah satu faktor yang sangat berpengaruh dalam proses pemisahan yaitu adanya perbedaan massa jenis antara padatan dan cairan.

1. Filtrasi dan Screening

Filtrasi dan penyaringan merupakan proses pemisahan padatan dari cairan melewati media permeabel yang dapat ditembus suatu cairan dan menahan endapan yang berupa padatan. Pada proses pemisahan mikroalga, padatan dapat berupa sebagai biomassa yang mempunyai ukuran tertentu.

Penyaringan (Screening)

Prinsip dasar dari penyaringan yaitu melewatkan partikel melalui saringan berlubang dengan ukuran tertentu. Partikel yang lolos harus sesuai dengan ukuran saringan. Metode ini pada umumnya digunakan untuk pemisahan padat – padat, tetapi pada perkembangannya juga diaplikasikan pada pemisahan padat – cair. Untuk pemanenan mikroalga peralatan yang digunakan terdiri dari dua alat utama yaitu saringan mikro (mikrostrainers) dan filter getar.

Filtrasi

Proses filtrasi merupakan suatu proses dengan menggunakan adanya perbedaan tekanan yang mendorong suatu cairan melewati media penyaring. Besarnya perbedaan tekanan yang digunakan didasarkan pada tujuan penggunaan, misalnya secara gravitasi, tekanan vakum, maupun sentrifugal.

Dua tipe dasar filtrasi yang biasa digunakan :

1. Filtrasi pada permukaan (Surface Filter)

Pada filtrasi ini padatan akan terdeposisi membentuk cake pada lapisan permukaan tipis filter. Lama-kelamaan, cake tersebut akan mendekati lapisan permukaan, sehingga cake akan bergeser sendiri dan filter media hanya sebagai penyokong cake. Saat cake semakin banyak, maka aliran akan semakin tertahan. Dengan demikian perlu dibuat tekanan konstan agar laju alir umpan tidak mengalami hambatan.

2. *Filtrasi pada kedalaman (Deep Filter)*

Padatan akan terdeposisi diantara filter media. Permasalahan yang terjadi untuk pemisahan alga yaitu media tidak akan mampu untuk menahan semua alga yang cenderung lebih cepat berpindah, sehingga perlu sering dilakukan pencucian. Hasilnya ukuran filter semakin besar dan kandungan padatan biomass akan semakin berkurang. Bagaimanapun juga penelitian lebih lanjut tentang filtrasi yang efektif dan efisien masih terus dilakukan sehingga akan didapatkan keuntungan dan dapat mengurangi biaya dan energi. Pada pembahasan selanjutnya akan disampaikan beberapa peralatan Filtrasi untuk pemanenan alga.

Alat-alat Filtrasi

1. *Filter bertekanan*

Pada filter bertekanan, gaya dorong (driving force) filtrasi menggunakan tekanan cairan yang dipompa dan dikendalikan dengan tekanan gas pada tangki umpan. Filter bertekanan dapat mengolah umpan hingga mencapai 10% padatan. Filter bertekanan dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu plate and frame filter presses dan pressure vessels containing filter element.

Mekanisme kerja alat ini pada umumnya, pelat dan frame penekan dipasang secara berurutan. Pelat dapat berbentuk persegi maupun persegi panjang tergantung pada bentuk rongga frame, kemudian setelah bentuk plat dan frame sudah sesuai, diberi tekanan secara bersama-sama dengan alat hidrolis atau sekrup penekan. Pelat ditutupi dengan kain penyaring yang akan menahan jelly alga. Slurry akan dipompa melalui frame dan filtrate akan dialirkan dari pelat.

Jenis kedua dari Filter bertekanan yaitu adanya lapisan-lapisan penyaring dalam suatu tangki seperti, rotary drum pressure filter, cylindrical element filters, vertical tank vertical leaf filters, horizontal tank vertical leaf filters, and horizontal leaf filters.

2. *Filter vakum (Vacuum Filters)*

Pada filter vakum, gaya pendorong saat proses filtrasi diakibatkan karenan adanya tenaga penghisap dari sisi filtrat medium. Secara teori, kehilangan tekanan yang

Pemanenan dan Pengeringan Mikroalga

dijinkan untuk proses filtrasi vakum adalah 100 kPa, tetapi dalam prakteknya hanya terbatas pada 70 atau 80 kPa. Aplikasi vakum filter dimana proporsi dari partikel yang halus dalam umpan masuk rendah, maka relative lebih murah menggunakan filter vakum dibandingkan filter bertekanan karena dapat mengurangi kadar air lebih banyak. Lebih jauh, jenis filter ini dapat dikembangkan ke skala yang lebih besar yang dapat berguna untuk proses pencucian, pengeringan, dan proses lain yang diperlukan.

3. Saringan mikro (*Microstrainers*)

Saringan mikro tersusun atas sebuah rotari drum yang ditutup dengan saringan kain, baja, ataupun poliester. Cairan disemprotkan sehingga partikel-partikel dapat mengumpul melalui sudut tempat yang ditentukan. Microstariner cocok untuk kultivasi alga dalam skala besar. Keuntungan dari mikrostrainer antar lain : konstruksi sederhana, operasi mudah, biaya investasi yang rendah, gesekan karena adanya pergerakan cepat partikel dapat diabaikan, kebutuhan energy rendah dan rasio filtrasi tinggi.

Masalah yang dihadapi yaitu tidak semua jenis padatan dapat disaring dan sulitnya penanganan fluktuasi padatan. Persoalan tersebut dapat diatasi dengan memvariasikan kecepatan putaran. Permasalahan lain yaitu adanya kemungkinan munculnya bakteri dan mikroalga lain dalam saringan kain tersebut. Pertumbuhan tersebut dapat dihambat dengan penyinaran sinar ultraviolet. Bagaimanapun juga, penggunaan mikrostrainer perlu adanya pencucian secara berkala.

Mikrostrainer digunakan secara luas untuk menghilangkan partikel dari keluaran limbah. dan mengurangi adanya alga dalam air. Mikrostrainer cocok digunakan untuk mikroalga yang memiliki sel besar (*Spirulina* sp.), dan kurang efektif untuk mengurangi mikroalga bersel kecil (*Scenedesmus*; *Chlorella*). Tetapi permasalahan tersebut dapat diatasi dengan memodifikasi mikrostrainer menjadi rotating microstrainer dengan pencucian balik secara kontinyu.

4. *Vibrating Screen Filters*

Vibrating Screen Filter atau saringan getar banyak digunakan untuk kebutuhan industri seperti industri kertas dan industri makanan. Tetapi dalam perkembangannya juga dapat digunakan mengurangi konsentrasi sampah perkotaan. Pemanfaatan vibrating screen biasa digunakan untuk memisahkan *Spirulina*. Selain itu vibrating screen juga dapat diaplikasikan untuk pemisahan *Coelastrum*. Pemanenan secara kontinyu dapat meningkatkan total padatan tersuspensi hingga 5-6 %. Sedangkan pemanenan secara diskontinyu dapat meningkatkan total padatan tersuspensi hingga 7-8%.

5. *Cartridge Filters*

Jenis saringan ini dipilih karena penggunaannya yang mudah dan dapat di ganti sewaktu-waktu. Bahan cartridge terbuat dari bahan kertas, kain, ataupun membran yang mempunyai ukuran pori hingga 0,2 μ m. Suspensi mikroalga dapat dipompa, disedot, maupun memanfaatkan gaya gravitasi turun melewati saringan. Untuk menjaga ketahanan cartridge dan frekuensi penggantianannya, saringan cartridge harus selalu dibatasi agar padatan yang terkandung dalam cairan kurang dari 0,01% berat.

6. *Cross Flow Ultra Filtration (SUF)*

Ultra filtrasi aliran silang dikembangkan oleh Israel Desalination Engineering (Zarchin Process) Ltd. Sistem ini mengadopsi dari sistem pengolahan limbah alga, bekerja sama dengan Technion Environmental Research Center yang bertujuan untuk menghasilkan produksi alga konsentrasi tinggi dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber protein. Dengan sistem ini, konsentrasi alga yang dihasilkan dapat mencapai 20 kali lipat, tetapi energy yang diperlukan cukup tinggi, sehingga metode ini masih kurang ekonomis.

7. *Magnetic Separation*

High Gradient Magnetic Filtration (HGMF) digunakan untuk menghilangkan partikel tersuspensi dan menghilangkan logam berat dari limbah. Metode ini didasarkan karena adanya partikel magnetik (biasanya Fe_3O_4) pada larutan. Partikel bermagnet tersebut mengalami koagulasi dengan alga dan kemudian larutan tersebut melewati

Pemanenan dan Pengeringan Mikroalga

kolom magnetik pada saringan berpori yang mana alga akan tertahan. Bitton, *et al.*(1974) melaporkan bahwa efisiensi yang dihasilkan dari metode ini antara 55 – 94 %, percobaan ini dilakukan di danau Florida Amerika Serikat dengan menggunakan alum sebagai flokulan dan filter magnetik komersial. Pada percobaan, didapatkan hasil bahwa alga yang terambil diatas 90% dengan 5-13 ppm $FeCl_3$ sebagai flokulan utama dan 500-1200 ppm magnet Fe_3O_4 sebagai bibit magnet yang dilakukan pada skala laboratorium dan kolam pond. Estimasi biaya untuk skala komersial tidak dijelaskan lebih lanjut.

2. Gravity Sedimentation

Pengendapan secara gravitasi merupakan salah satu proses pemisahan padat – cair dimana umpan yang tersuspensi dipisahkan antara slurry dengan konsentrasi tinggi dan air keluaran yang jernih. Untuk mengurangi partikel mikroalga yang dapat mengendap secara cepat, pengendapan gravitasi memberikan hasil lebih bagus. Bagaimanapun untuk menghilangkan partikel dengan diameter lebih kecil dari ukuran mikron dan untuk keperluan praktis, flokulasi harus dilakukan agar ukuran partikel memungkinkan untuk dilakukan pengendapan.

Tabel 4.2. Perbandingan pemanenan dengan Gravity Sedimentation

Peralatan	Konsentrasi akhir	Kebutuhan energy	Kehandalan	Ukuran alga yang direkomendasikan
Bak Klarifikasi	0,5 – 3	Sangat rendah	Kurang baik	A + B
Bak Sedimentasi tipe Lamella	1,5	Sangat rendah	Cukup baik	A + B
Bak Sedimentasi dengan Flokulasi	1,5	Tinggi	Baik	A + B

Keterangan A = tipe alga yang berukuran sangat kecil; *Chlorella* B = tipe alga yang menggumpal ; *Coelastrom*; *Microactinium*

Proses Sedimentasi pada umumnya dibagi menjadi a) klarifikasi dimana kejernihan pada lairan atas merupakan hal yang diutamakan dan umpan yang masuk biasa diencerkan dan b) proses pengentalan dimana ketebalan lapisan bawah adalah tujuan utama dan umpan slurry biasa mempunyai konsentrasi tinggi. (Svarovsky,

1979). Proses yang pertama disarankan untuk digunakan pada pemisahan alga (Mohn 1980), sedangkan proses yang kedua lebih ditujukan untuk proses pengonsentrasian bubur alga.

a. Flotasi

Flotasi adalah pemisahan secara gravitasi yang didasarkan adanya penambahan udara atau gelembung gas pada partikel padatan yang kemudian dibawa ke permukaan cairan dan mengapung sehingga dapat di ambil bagian yang terapung. Keberhasilan dari proses flotasi tergantung pada ketidakstabilan partikel tersuspensi. Semakin tidak stabil maka semakin tinggi kontak partikel udara. Proses flotasi dikelompokkan berdasarkan produksi gelembungnya yaitu antar lain : Dissolved air flotation (DAF), electrolytic flotation dan dispersed air flotation (Svarovsky 1979).

1. Dissolved air Flotation (DAF)

Produksi gelembung udara pada DAF didasarkan pada tingginya kelarutan udara dalam air sebagai fungsi tekanan. Hal tersebut dapat dicapai dengan tiga cara : Saturasi pada tekanan atmosferik dan flotasi tekanan vakum, saturasi dibawah tekanan statis dan saturasi pada tekanan diatas atmosferik dan flotasi dibawah kondisi atmosferik (Svarovsky 1979).

Pemisahan alga dengan DAF dapat dilakukan dengan cara flokulasi. Keluaran bak klarifikasi tergantung pada parameter operasional seperti : kecepatan recycle, tekanan udara tangki, waktu tinggal hidrolik dan kecepatan flotasi partikel (Bare *et al.*, 1975, Sandbank *et al.*, 1979), sedangkan konsentrasi slurry tergantung pada kecepatan skimmer dan ketinggian permukaan air (Moraine, *et al.*, 1980)

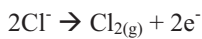
Kolam alga yang mengandung banyak spesies alga dapat berhasil diklarifikasi dengan peralatan DAF dan tercatat konsentrasi alga mencapai 6%. Konsentrasi alga masih dapat ditingkatkan dengan adanya flotasi tahap kedua (Bare *et al.*, 1975, Friedman *et al.*, 1977, Moraine, *et al.*, 1980, Viviers dan Briers 1982). Sekilas nampak bahwa parameter operasional untuk DAF ditentukan oleh kehandalan metode pemisahan alga yang tinggi, tetapi dosis flokulan yang optimal harus ditentukan untuk tiap operasi agar mendapatkan hasil yang maksimal. Koopman dan Lincoln (1983) meneliti

Pemanenan dan Pengeringan Mikroalga

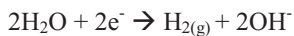
mengenai autoflokulasi alga, dengan flokulasi menggunakan alum atau polimer C-3, didapatkan alga yang dapat dihilangkan mencapai 80 – 90 % pada bak flotasi dengan laju alir 2m/jam, dengan konsentrasi alga terflotasi lebih dari 6% padatan. Bagaimanapun, fenomena autoflokulasi terbatas pada konsentrasi oksigen terlarut diatas 16mg/l dan tidak sesuai untuk konsentrasi rendah.

2. *Electroflotasi*

Pada metode ini, gelembung gas terbentuk dari proses elektrolisi. Reaksi ada anoda sebagai berikut :



dan reaksi pada katoda adalah



Klorin yang terbentuk terlarut dalam air dan bereaksi dengan komponen-komponen kimia. Gas hidrogen dengan kelarutan rendah didalam air akan mengapungkan flok alga. Beda potensial dibutuhkan untuk menjaga kebutuhan arus untuk pergantian gelembung setaiiap saat dan juga tergantung pada konduktivitas elektrik dari umpan larutan.

Pada penelitian skala meja, Contreras *et al* (1981) menjelaskan metode electrolytic sangat efisien karena flokulasi alga menggunakan hidroksida selama elektrolisis menyebabkan presipitasi $\text{Mg}(\text{OH})_2$ dan flokulasi lanjutan. Untuk mendapatkan klarifikasi yang bagus, flokulasi menggunakan alum harus diikuti dengan elektrofotasi secara simultan, walaupun metode ini memerlukan waktu tinggal yang lebih singkat (Sandbank *et al.*, 1974).

Jenis mikroalga yang dapat dipanen dengan metode ini dapat mencapai 5% padatan float alga. Dekantasi setelah 24 jam dapat meningkatkan konsentrasi padatan hingga 7-8% (Shelef *et al.*, 1977; Sandbank, 1979). Energy yang dibutuhkan dengan metode elektrofotasi cukup tinggi, tetapi secara umum untuk unit skala kecil dengan luas 5m^2 atau lebih kecil, biaya operasi elektrofotasi lebih murah dibandingkan unit DAF.

3. *Dispersed Air Flotation*

Proses ini menggunakan gelembung-gelembung besar dengan diameter 1 mm, yang didapatkan dari kombinasi agitasi dengan injeksi udara (flotasi buih / froth flotation) atau dengan penggelembungan udara melewati media berpori (flotasi busa / foam flotation). Selektivitas proses berdasarkan kebasahan relatif permukaan padatan. Hanya partikel yang mempunyai afinitas tertentu yang dapat muncul ke permukaan bersama gelembung udara. Kebasahan dan pembuihan dapat dikendalikan dengan tiga jenis reagen kimia : a) Pembuih b) Agen lapisan permukaan aktif yang dapat mengendalikan kebasahan permukaan dengan variasi sudut kontak dan komponen elektrokinetik c) Modifikasi dengan pengaturan pH. Proses flotasi untuk pemanenan alga dapat dikontrol dengan pengaturan pH. Titik kritis pH berkisar pada level 4 dan dapat diubah sesuai dengan karakteristik permukaan alga.

Tabel 4.3.Perbandingan pemanenan mikroalga secara flotasi

Peralatan		Konsentrasi akhir %TSS	Kebutuhan energy	Kehandalan	Ukuran alga yang direkomendasikan
Dissolved Flotation	Air	1 – 6	Tinggi	Sangat baik	A + B
Electroflotasi		3 – 5	Sangat tinggi	Sangat baik	A + B
Dispersed Flotation	Air	Un.	Un.	Rendah	Un.

ket :

A = tipe alga yang berukuran sangat kecil; *Chlorella*

B = tipe alga yang menggumpal ; *Coelastrom*; *Microactinium*

Un= Unknown (tidak diketahui)

b. Sentrifugasi

Proses pemisahan sentrifugal merupakan pemisahan dengan menggunakan tenaga sentrifugal sehingga membuat padatan berpindah dari cairannya. Peralatan sentrifugasi dibagi menjadi (hydrocyclone) dan sedimenting centrifuges. Pemisahan sentrifugal menggunakan prinsip dimana objek diputar secara horizontal pada jarak

Pemanenan dan Pengeringan Mikroalga

tertentu. Apabila objek berotasi di dalam tabung atau silinder yang berisi campuran cairan dan partikel, maka campuran tersebut dapat bergerak menuju pusat rotasi, namun hal tersebut tidak terjadi karena adanya gaya yang berlawanan yang menuju kearah dinding luar silinder atau tabung, gaya tersebut adalah gaya sentrifugasi. Gaya inilah yang menyebabkan partikel-partikel menuju dinding tabung dan terakumulasi membentuk endapan.

Tabel 4.4. Perbandingan pemanenan mikroalga dengan sistem sentrifugasi

Peralatan	Konsentrasi akhir %TSS	Kebutuhan energy	Kehandalan	Ukuran alga yang direkomendasikan
Self-cleaning plate centrifuge	12 – 22	Sangat tinggi	Sangat baik	A + B
Nozzle centrifuge	2 – 15	Sangat tinggi	Baik	A + B
Hydrocyclone	0,4	Sangat tinggi	Rendah	B
Decanter	22	Sangat tinggi	Cukup	A + B

Ket :

A = tipe alga yang berukuran sangat kecil; *Chlorella*

B = tipe alga yang menggumpal ; *Coelastrum*; *Microactinium*

3. Contoh Pemanenan Skala Industri

Beberapa industri memilih menggunakan alat pemanen secara mekanik sementara yang lain masih terfokus pada cara biologis. Beberapa perusahaan bahkan mencoba mencari jalan lain untuk memotong tahapan pemisahan alga.

a. Pemanen Mekanis

Salah satu perusahaan “Alga to Energy” (A2E) menggunakan suatu alat pemanen yang biasa disebut Pemanen Shepherd. Pemanen tersebut menggunakan belt atau sebuk yang berjalan secara kontinyu melalui kutur alga dan sabuk tersebut menggunakan sistem vakum. Sabuk yang bergerak, mengumpulkan alga yang siap dipanen dengan sistem vakum sehingga alga akan terikut dalam sistem vakum

sebelum sabuk tersebut melewatkan kultur alga lagi. Patent tersebut tidak secara langsung membahas penggunaan dalam sistem pengolahan air limbah, tetapi disebutkan pula untuk budidaya alga skala massal menggunakan beberapa infrastruktur tambahan seperti fasilitas pengolahan limbah.

Algaventure System, Inc. juga menggunakan pemanenan sabuk kontinu dengan ekstraksi kapiler. Desain ini menggunakan sabuk primer untuk mengumpulkan alga dan sabuk kapiler sekunder yang terbuat dari polimer absorben. Sabuk sekunder kontak dengan bagian dasar sabuk primer sehingga air akan terserap dari alga. Biomassa kering di sabuk primer dikumpulkan dan oleh sabuk sekunder dikompresi untuk mengurangi kadar air sebelum sabuk sekunder kontak lagi dengan sabuk primer. Paten ini juga tidak membahas penggunaan alat panen pada sistem pengolahan limbah, tetapi perusahaan juga menjelaskan adanya potensi untuk limbah.

MBD Energy Australia menggunakan pabrik pengolah limbah batu bara dan mencakup kolam sirkuit untuk produksi mikroalga. Perusahaan ini berkolaborasi dengan Evodos Jerman untuk menggunakan pemisahannya. Pemisah Evodos yaitu sebuah sentrifuge yang dapat menghilangkan padatan dari konsentrasinya. Rakitan bagian dalam terbuat dari piringan yang melengkung tetapi bersifat fleksibel. Bagian tersebut dapat dilepas dan diputar dari bentuk lengkung menjadi lurus dan padatan alga tidak terjepit didalam piringan.

Scipio Biofuels mengembangkan alga pada reaktor tubular tertutup. Pemanenan secara kontinu menggunakan sentrifuge kecepatan rendah. Sebuah ruangan melingkar dengan dinding kasar terus berputar yang memaksa sel alga tetap pada dinding tersebut. Karena gumpalan atau sel alga yang besar tidak dapat melewati dinding kasar itu, sehingga sel yang berukuran kecil juga terhambat pada dinding tersebut. Sebuah pisau tipis kemudian melewati dinding tersebut untuk mengelupas gumpalan alga yang menempel. Paten ini juga tidak menjelaskan penggunaan untuk pengolahan limbah. Beberapa perbandingan cara pemanenan mikroalga yang digunakan beberapa industri ditunjukkan pada tabel 4.5.

Pemanenan dan Pengeringan Mikroalga

Tabel 4.5. Cara Pemanenan pada Industri

Cara Produksi	Cara Pemanenan	Perusahaan	Skala
Open Ponds			
Kolam Sirkuit	Fraksinasi busa, kavitasi gelembung	Kai Bioenergy	Tidak terlampir
Kolam Terapung	Pengeluaran air dari kolam	Blue Marble Energy	Produksi jangka pendek
Kolam Terbuka	Flokulasi, DAF	Honeywell's UOP	Laboratorium
Proses 2 tahap : Umpan CSTR & PFR tanpa pencahayaan	Sabuk vakum	Algae to Energy (A2E)	Pabrik percontohan
Proses 2 tahap : CSTR ke PFR	Flokulasi diikuti pengendapan, DAF	General Atomic	Pabrik kecil (6000 gal pond), dikembangkan 40 acre
Kolam Sirkuit	Autoflokulasi, sentrifugasi	Seamibiotic	Pabrik Percontohan (1/2 acre)
Kolam Sirkuit	Flokulasi diikuti pengendapan, DAF	Aurora Algae	Pabrik Percontohan (1 acre)
Kolam sirkuit tanah disambung dengan kolam mati	Pengendapan gravitasi	Aquatic Energy	Pabrik percontohan (2 acre)
Proses 2 tahap : Reaktor tertutup ke Kolam terbuka	Pengendapan gravitasi diikuti sentrifugasi	HR Biopetroleum	Pabrik percontohan (6 acre)
Kolam sirkuit	Sabuk pengangkut ; skimmer	PetroAlgae	Demo (40 acre)
Kolam Sirkuit	Ekstraksi sel aktif	Phycal	Demo (40 acre)
Kolam terbuka	Ikan Planktivorous	LiveFuels	Demo (45 acre)
Kolam terbuka <i>Spirulina</i>	Filtrasi	Cyanotech	Pabrik (90 acre)

CEP (kolam sirkuit)	Sabuk miring untuk penampung kotoran ikan	Kent BioEnergy	Pabrik (160 acre)
Closed Pond			
Reaktor tubular	Tak dispesifikasikan	A2BE Carbon Capture	Laboratorium
Sistem OMEGA NASA	Osmosis lanjut	Algae Systems	Laboratorium
Panel datar dengan reaktor tubular		Bionavitas	Laboratorium
Reaktor tertutup dengan lampu dalam	Gangguan gelembung kavitasi diikuti penyaringan	Origin Oil	Reaktor Laboratorium; Metode ekstraksi , pabrik percontohan (300 gal/men)
Reaktor tubular	Sentrifugasi dengan dinding kasar	Scipio Biofuels	Laboratorium
Reaktor Tubular	Tak dispesifikasikan	Sunrise Ridge Algae	Laboratorium
Reaktor Tubular spiral	Tak dispesifikasikan	Texas Clean Fuels	Laboratorium
Reaktor panel bergelombang	Tak dispesifikasikan	Joule Unlimited	Laboratorium
Rumahkaca tertutup	-	Algenol	Pabrik percontohan
Reaktor Tabung dengan balok lampu	Flokulasi induksi	Saphire Energy	Pabrik percontohan
Reaktor tubular	Kolam pusaran air diikuti sentrifugasi	Solix Biofuel	Pabrik percontohan (2 acre)
Desain Hibrid			
Kolam Sirkuit	Konsentrasi slurry hingga 10-	Genifuel	Tidak terlampir

Pemanenan dan Pengeringan Mikroalga

Tertutup	20%		
Kolam tertutup	Sentrifugasi evodos	MBD Energy	Percontohan kecil
Kolam tertutup (Budidaya jangka pendek)	Sabuk ekstraksi kapiler	Algaeventure Systems	Pabrik percontohan
Single system (galur tertutup)	Flokulasi	Diversified Energy	Demo (40 acre)

Reaktor Biofilm

Biofilm pada lembaran poliester	Spray dengan tekanan air	Greenshift	Pabrik percontohan
Biofilm dalam terusan terbuka	Spray dengan tekanan air	SBAE Industries	Pabrik percontohan
Biofilm pada putaran kontaktor	Kumpulan biofilm terfragmentasi	Algaewheel	Pabrik percontohan (100.000 gal/hari)
Scrubber berserabut untuk alga berfilamen	Serabut vakum atau mekanik	Aquafiber Technology	Pabrik (75 MGD)
Scrubber berserabut untuk alga berfilamen	Serabut mekanik	Hydromentia	Pabrik (mencapai 30 MGD)

Lain-lain

Tidak dispesifikasikan	Tidak ada	Synthetic Genomics	Laboratorium
Fermentasi Heterotrop	Tidak dispesifikasikan	Solazyme	Fermentasi skala demo

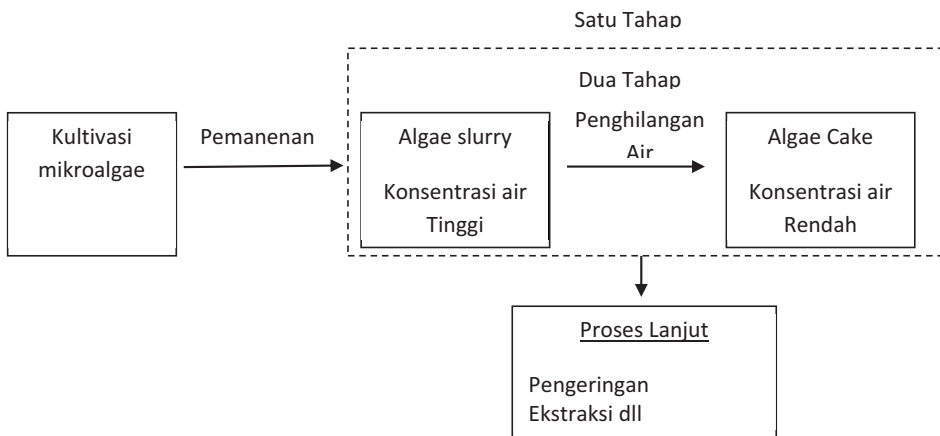
Sumber dari Christenson, dan Sims, (2011)

Secara umum, teknologi pemisahan Pada proses pemanenan mikroalga, terjadi beberapa tahapan. Pertama endapan mikroalga masih mengandung banyak air yang berbentuk algae slurry (lumpur alga) harus dikurangi kadar airnya (dewatering) hingga membentuk Jeli algae (algae cake). Kedua, alga yang telah berbentuk jeli alga yang mengandung sedikit air, untuk dilakukan proses lanjut seperti pengeringan, ekstraksi dan lain-lain.

a. Cara Flokulasi

Penambahan suatu bahan kimia dalam kultivasi mikroalga merupakan salah satu cara untuk mendorong alga mengalami flokulasi. Hal tersebut merupakan salah satu tahapan proses dalam teknologi pemisahan seperti halnya pengendapan (sedimentation), pengapungan (flotation), penyaringan (filtration) dan sentrifugasi (centrifugation).

Tahapan pemanenan mikroalga:



Gambar 4.1. Skema pemanenan mikroalga.(diadaptasi dari Shelef, et al., 1984)

Jenis bahan kimia yang digunakan dalam flokulasi mikroalga secara luas dibagi kedalam dua kelompok, yang pertama agen anorganik (inorganic agents) termasuk ion logam polivalen (polyvalent metal ions) seperti Al^{3+} dan Fe^{3+} . Untuk pengolahan air dan air limbah pada umumnya digunakan Lime ($Ca(OH)_2$). Kedua, Polimer organik termasuk didalamnya anion, kation dan non-ion. Polimer tersebut pada umumnya lebih dikenal sebagai Polielektrolit, termasuk juga jenis polimer nonionik, polimer sintetis dan juga polimer alam. Contoh untuk polimer sintetis antara lain : polyacrylate, polyethylene amine, polyvinyl alcohol, polystyrene sulfanate, polyvinyl pyridium. Sedangkan untuk polimer alam sebagai contoh yaitu : alginat dan chitosan. Berbagai jenis flokulan yang akan pengaruhnya terhadap kondisi operasi, nilai pH, dan dosis disajikan dalam tabel .

Tabel 4.6. Beberapa jenis flokulan untuk pemanenan

Flokulan	Tipe	Dosis optimal (mg/L)	pH Optimal
Alum $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	Ion logam polivalen	80 – 250	5,3 – 5,6
Ferric sulfat	Ion logam polivalen	50 – 90	3,0 – 9,0
Lime	Endapan hidroksi logam bermuatan positif	500 – 700	10,5 – 11,5
Polimer kation	-	-	-
Puriflok	-	35	3,5
Zetay 51	Poliethilen amine	10	>9
Dow 21M	Poliethilen amine	10	4 – 7
Dow C31	Poliamine	1 – 5	2 – 4
Chitosan	Polimer diasetilasi kitin	100	8,4

Sumber: Shelef, *et al.*, (1984)

4. Pengeringan Mikroalga

Tahapan akhir dalam proses pengolahan alga yaitu proses pengeringan untuk penghilangan air slurry sehingga kadar air tinggal 12 – 15 %. Pengeringan atau dehidrasi yaitu mengkonversi biomassa alga ke dalam produk yang lebih stabil untuk disimpan. Proses dehidrasi merupakan permasalahan utama karena menyumbang 70 – 75% biaya proses (Mohn, 1978). Jenis pengeringan berbeda-beda tergantung pada investasi biaya dan kebutuhan energi. Pemilihan metode pengeringan tergantung juga pada skala operasi dan juga peruntukan suatu produk alga tersebut. Kebanyakan metode pengeringan digunakan untuk pengolahan air limbah dan tidak semua dapat diterapkan pada pengeringan alga, terutama ketika hal tersebut diperuntukkan sebagai umpan.

Pada tahap ini masih belum dapat diketahui secara pasti jenis pengeringan yang sesuai untuk masing-masing alga. Sekilas akan disampaikan beberapa metode utama pengeringan.

1. *Flash Drying*

Flash drying merupakan metode pengeringan secara cepat dalam mengurangi kandungan air dengan cara menyemprotkan ataupun menginjeksikan campuran material kering dan basah ke dalam aliran gas panas. Flash drying lebih banyak digunakan untuk pengeringan lumpur pada pengolahan air limbah, namun dapat juga digunakan untuk mengeringkan biomassa mikroalga dengan efisien.

2. *Rotary Dryers*

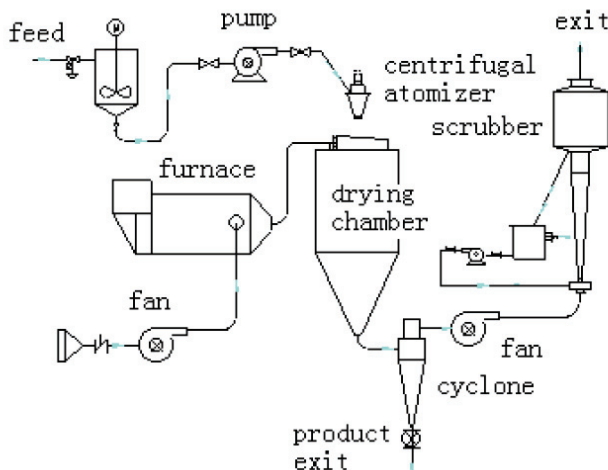
Pengering rotary menggunakan silinder yang berputar untuk menggerakkan material yang akan dikeringkan dari satu tempat ke tempat lainnya dengan gravitasi. Banyak perbedaan pengering yang dikembangkan untuk kebutuhan industri, termasuk jenis pemanas langsung yang mana material akan kontak langsung dengan gas pemanas. Sedangkan pemanasan tak langsung, dimana gas pemanas dipisahkan dari material yang akan dikeringkan menggunakan suatu sekat. Pengering rotary kiln dan pengering drum merupakan jenis yang paling banyak digunakan untuk pengeringan lumpur limbah cair. Sedangkan untuk pengeringan alga, lebih cocok apabila menggunakan pengering drum. Pengeringan alga menggunakan pengering drum mempunyai keuntungan ganda yaitu sampel yang lebih steril dan dapat memecah dinding sel. Mohn, (1978) mencoba membandingkan penggunaan spray drying dan drum drying untuk pengeringan alga. Pengeringan menggunakan drum drying lebih disarankan karena lebih baik dalam hal daya serap, energi yang dibutuhkan lebih kecil, dan investasi yang lebih murah. Konsentrasi alga yang didapatkan mencapai 25% kering.

3. *Spray Drying*

Sistem spray drying hampir sama dengan flash drying, keduanya sama-sama terjadi proses pengeringan secara cepat (Shelef, *et al.*, 1984). Spray drying melibatkan atomisasi cairan, pencampuran gas/ droplet dan pengeringan dari droplet cair. Droplet yang sudah dikabutkan biasa disemprotkan turun kedalam kolom vertikal melewati aliran gas panas. Pengeringan akan selesai dalam beberapa detik. Produk hasil dapat diambil di dasar kolom dan aliran gas dikeluarkan melewati pemisah debu

Pemanenan dan Pengeringan Mikroalga

cyclon. Spray drying sangat cocok apabila biomassa alga digunakan sebagai makanan manusia (food grade). Tetapi metode ini cukup mahal dari segi biaya.



Gambar 4.2. Sistem spray dryer.
(Sumber: Mujumdar, 2004)

4. Metode pengeringan panas lain

Cross-flow Air Drying (Pengeringan dengan aliran udara silang)

Metode pengeringan ini pertama diuji di CFRRI, Mysore, India (Becker & Venkataraman, 1982). Padatan *Spirulina* yang mengandung 55 – 60% kandungan air dikeringkan pada suhu 62⁰C selama 14 jam dengan blok pengering. Ketebalan jelly alga sekitar 2-3mm memberikan hasil produk yang baik dengan kandungan air 4-8%. Proses ini lebih murah dibandingkan drum drying dan lebih cepat dari pada pengeringan matahari. Pada metod ini, dinding sel *Chlorella* dan *Scenedemus* tidak dapat dipecah.

Vacuum Shelf-Drying (Pengeringan vakum)

Vacuum Shelf Drying merupakan metode lain pengeringan alga. *Spirulina* dikeringkan menggunakan vacuum shelf dryer pada suhu 50 – 65⁰C dan tekanan 0,06 atmosfer. Kandungan air akhir yang didapatkan 4%. Metode ini membutuhkan modal awal dan biaya operasi yang tinggi.



Gambar 4.2. Tray Dryer untuk *Spirulina*
Dryer dari bekas pemanggang roti yang telah dimodifikasi
Sumber : www.neoalgae.com

5. Sun Drying (Pengerinan matahari)

Pengerinan dengan bantuan sinar matahari merupakan metode yang paling tua untuk penyediaan bahan pangan dan sampai saat ini masih digunakan terutama pada negara berkembang. Sun drying dilakukan dengan memanfaatkan radiasi sinar matahari secara langsung. Kelemahan metode ini yaitu dengan adanya pemanasan langsung akan membuat degradasi klorofil pada biomassa alga, yang akan menyebabkan adanya perubahan warna pada produk. Disisi lain radiasi secara langsung akan menyebabkan pemanasan berlebih pada biomassa alga . Metode ini sangat bergantung pada kondisi cuaca. Pada proses radiasi tidak langsung, pemanasan berlebih dapat dicegah dan laju pengerinan lebih tinggi tetapi produk akhir yang dihasilkan kurang menarik.

Pengerinan sinar matahari tidak disarankan untuk penyediaan produk alga untuk konsumsi manusia karena proses pengerinan yang lambat, sehingga moisture contentnya masih tinggi.

Chapter 5

Imobilisasi Mikroalga

Mikroalga dikenal sebagai tumbuhan mikro yang dapat diaplikasikan dalam berbagai aspek mulai dari pangan, energi, pengobatan, dan pengolahan limbah. Akan tetapi teknologi mikroalga masih memiliki kelemahan yakni di bagian pemanenan biomas yang masih sering menjadi kendala, dan terkadang dapat membengkakkan biaya operasi. Permasalahan ini mendorong banyak peneliti untuk melakukan riset tentang teknologi mikroalga yang lebih baik.

Salah satu teknologi mikroalga yang menarik untuk diikuti adalah teknologi imobilisasi mikroalga. Teknologi imobilisasi biasa digunakan untuk enzim. Namun Park *et al* (1966) memperkenalkan metode imobilisasi dengan sel mikroalga dengan menggunakan jenis *Chlorella*. Penelitian tentang imobilisasi mikroalga terus berlanjut, hingga pada tahun 1969, Hiller dan park melaporkan bahwa mikroalga jenis *Anacystis nidulans*, *Pirpyridium cruentum* dan *Chlorella pyrenoidosa* dapat diimobilisasi pada glutaraldehid pada penelitian antara hubungan intensitas cahaya dan produksi oksigen dari mikroalga.



Gambar 5.1. Imobilisasi *Chlorella vulgaris* dalam matrix polimer untuk pengolahan limbah

Sumber: <http://www.bashanfoundation.org>

Sedangkan teknologi imobilisasi mikroalga untuk aplikasi pengolahan limbah cair pertama kali diperkenalkan oleh Chevalier dan Prof de la Noue (1985) di Universitas Laval, Quebec, Canada, untuk menghilangkan kadar nitrogen dan posphor pada limbah cair. Dan

Imobilisasi Mikroalga

akhirnya pada tahun 1990, sebagian besar peneliti melaporkan kajian tentang aplikasi imobilisasi mikroalga untuk treatment logam pada limbah cair.

1. Imobilisasi

Imobilisasi sel didefinisikan sebagai sel yang dipertahankan pergerakannya baik secara natural atau disengaja dalam fase cair dan dalam sistem tertentu dalam suatu matriks sehingga sebagian besar pergerakannya berkurang namun masih dapat memperlihatkan aktifitas katalitiknya serta dapat digunakan berulang ulang. Teknik imobilisasi ini dapat dilakukan pada enzim maupun sel mikroba. Berbeda dengan metode *entrapment* (penjeratan), metode imobilisasi tidak hanya terjerat pada matriks pembungkus, namun sel dapat terabsorb ke dalam material support (matriks) nya.

Salah satu kelebihan metode imobilisasi adalah didapatkannya densitas kultur yang lebih tinggi dengan tidak membutuhkan banyak tempat dan medium seperti air jika dibanding dengan kultur cara biasa. Selain itu kelebihan imobilisasi sel yaitu:

- a. Imobilisasi sel dapat memberikan stabilitas sel yang lebih baik
- b. Imobilisasi sel dapat digunakan pada sistem aliran kontinyu
- c. Pemanenan biomas menjadi lebih mudah

Selain memiliki kelebihan, imobilisasi sel juga memiliki kelemahan di antaranya:

- a. Ongkos untuk bahan matrik menjadi tinggi bila diaplikasikan dalam skala komersial
- b. Transfer massa yang kurang baik
- c. Kehilangan aktifitas selama imobilisasi
- d. Perubahan karakteristik

(Mallick, 2002)

2. Metode Imobilisasi Mikroalga

Dalam laporannya, Mallick (2002) memaparkan beberapa metode imobilisasi yang cocok diterapkan untuk mikroalga, yaitu:

a) *Covalent Binding*

Metode ini sering digunakan pada imobilisasi enzim, namun sedikit peneliti yang melaporkan penggunaannya pada sel. Beberapa cara memasukkan sel ke dalam matrik

pembungkus di antaranya adalah cara diazotation, amino bond, schiff's base formation, metode alkilasi dan sebagainya. Kelemahan dari metode ini adalah pada sel yang digunakan akan mengalami perubahan karakterisasi sel. Persiapan pelekat matrik juga terkadang menjadi kendala sehingga dapat menurunkan kinerja matrik.

b) Adsorption

Metode ini menggunakan proses penyerapan reversibel. Perbedaan antara penggunaan sel dan enzim pada metode ini adalah pada sel yang diikat menggunakan sekat multipoint sehingga lebih kuat terhadap sorbent.

c) Entrapment

Metode entrapment ini terdiri atas penjeratan komponen aktif secara fisik pada film, gel, fiber, coating dan enkapsulasi. Metode ini dapat digunakan dengan cara mencampur sel dengan polimer matrik sehingga dihasilkan struktur yang dapat menjerat sel. Kelebihan dari metode ini adalah didapatkannya area permukaan yang lebih luas antara substrat dan sel, dengan volume yang lebih kecil dan kecenderungan imobilisasi yang simultan. Kelemahan metode ini terletak pada ketidaktifan sel selama mikroenkapsulasi sehingga dibutuhkan konsentrasi sel yang lebih tinggi.

d) Imobilisasi afinitas

Metode ini didasarkan pada prinsip afinitas kromatografi. Imobilisasi afinitas ini tidak dipengaruhi reaksi kimia antara matrik dan sel kecuali untuk material absorbent. Selain itu, harus diperhatikan struktur matrik yang dapat mengikat permukaan sel. Metode ini biasanya digunakan untuk sel yang memiliki karakteristik yang sensitif.

3. Aplikasi

Aplikasi mikroalga yang terimobilisasi hampir sama dengan aplikasi mikroalga secara umum. Akan tetapi imobilisasi mikroalga lebih mengacu pada efisiensi penggunaan biomass yang terjerat sehingga dapat dipanen dengan lebih mudah.

a) Produk Bernilai Tinggi

Beberapa peneliti melaporkan bahwa teknik imobilisasi mikroalga berperan penting dalam produktivitas sel alga. Produksi hidrogen dari alga *Anabaena* dapat ditingkatkan tiga kali lipat dengan bantuan imobilisasi. Brouers dan Hall (1986) memaparkan pengaruh kenaikan produksi ammonia dan hidrokarbon dengan spesies *Mastigocladus laminosus* dan *Botryococcus* sp., dengan teknik imobilisasi. Santos-

Imobilisasi Mikroalga

Rosa *et al* (1989) juga melaporkan kenaikan produksi amonia dari alga *Chlamidomonas reinhardtii* yang diimobilisasi pada Barium-alginat. Sementara Leon dan Galvan (1995) mempelajari pengaruh produksi gliserol pada *C.reinhardtii* yang diimobilisasi pada Ca-alginat. Perbandingan produksinya rata-rata 7gr/L dibandingkan tanpa imobilisasi 4g/L.

b) Pengurangan Logam

Dalam perkembangan teknologi mikroalga, aplikasi pengurangan logam dan radionuklida menggunakan imobilisasi mikroalga pada limbah menjadi hal yang cukup menarik bagi para peneliti. Lebih jauh lagi mikroalga berpotensi dalam proses *recover* element penting seperti emas, perak, dan uranium.

Tabel 5.1. Imobilisasi Mikroalga Penyerap Logam

Jenis Alga	Tipe treatment	Matrix imobilisasi	Nama logam
<i>Chlorella homosphaera</i>	Batch	Alginat	Cd, Zn, dan Au
<i>Chlorella vulgaris</i>	Batch	Alginat	Cu, Ni, dan Fe
<i>Synechococcus sp. PCC7942</i>	PBR	Silika	Cu, Ni, Pb, dan Cd
<i>Chlorella vulgaris, dan Anabaena doliolum</i>	Batch	Alginat, karaginan, kitosan	Ni dan Cr
<i>Scenedesmus acutus</i>	FBR, PBR	Polyurethan, karaginan	k- Cd, Cr, dan Zn

(sumber: Guisan, 2006)

c) Treatment N dan P

Banyak peneliti yang melaporkan penggunaan mikroalga sebagai treatment Nitrogen (N) dan Phosphor (P) pada limbah dengan teknologi imobilisasi. Sebagian besar peneliti melaporkan bahwa teknik imobilisasi lebih efisien dalam menyerap kadar N dan P di banding alga tanpa diimobilisasi. Meskipun demikian, Jeanfils dan Thomas (1986) memaparkan bahwa mikroalga yang diimobilisasi tidak berdampak besar dalam penyerapan kadar N dan P. Mereka mengobservasi *Scenedesmus obliquus* yang diimobilisasi dengan alginat, dan dilaporkan bahwa penyerapan nitrit tidak dipengaruhi oleh faktor imobilisasi, melainkan dari faktor lamanya kultur mikroalga. Hal ini bertolak belakang dengan penelitian Megharaj. *et al.*, (1992) yang menyatakan

bahwa lamanya umur mikroalga yang terimobilisasi tidak berpengaruh dalam penyerapan nitrogen maupun phosphor. Mereka melakukan eksperimen dengan *Chlorella emersonii* yang diimobilisasi dengan alginat pada kultur batch untuk pengambilan kadar phosphor. Dari penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa phosphor dapat terserap lima kali lebih cepat pada fase eksponensial dibanding mikroalga tanpa diimobilisasi pada fase stasioner.

Mallick dan Rai (1994) melaporkan tingginya efisiensi penyerapan N dan P pada *Chlorella* dan *Anabaena* yang diimobilisasi dibanding sel yang bebas. Sementara Vilchez dan Vega (1994) menemukan bahwa *C. reinhardtii* secara efisien dan stabil dapat menurunkan kadar nitrogen yang terkandung dalam limbah. Beberapa faktor yang berpengaruh dalam penyerapan nitrogen dan phosphor dengan menggunakan mikroalga yang diimobilisasi adalah konsentrasi matrik, temperatur, pH, dan loading sel.

Perkembangan teknologi pengolahan limbah dengan imobilisasi mikroalga juga sampai pada desain reaktor yang digunakan. Sawayama *et al* (1998) telah membuat desain photobioreaktor tubular dengan mikroalga cyanobacteria termofil, *Phorpiridium laminosum*, yang diimobilisasi pada selulosa hollow fiber. Penyerapan nitrat dan phosphat dilakukan pada suhu 43⁰C dengan medium limbah. Pengolahan limbah dengan menggunakan mikroalga cyanobacteria termofil memiliki kelebihan karena meminimalisasi kontaminasi.

Perkembangan penelitian terbaru adalah dari de-Bashan *et al* (2004). Mereka mengembangkan sistem co-imobilisasi kombinasi antara mikroalga dan bakteri. Mikroalga yang digunakan berupa *Chlorella vulgaris* atau *Chlorella sorokiniana* dan bakteri *Azospirillum brasilense* untuk mengolah limbah kota (selokan) yang mengandung nitrat dan phosphat. Bakteri *A. brasilense* dapat meningkatkan pertumbuhan, pigmen, kandungan lipid, dan ukuran sel jika diimobilisasikan pada matrix alginat yang kecil. Metode ini juga dapat menyerap kandungan nitrat dan phosphor secara signifikan dibandingkan imobilisasi mikroalga saja. Hasil efisiensi 100% ammonium, 15% nitrat, dan 36% phosphor selama enam hari. Sedangkan dengan imobilisasi jenis mikroalga saja didapatkan 75% ammonium, 6% nitrat, dan 19% phosphor.

4. Konsep Bioreaktor untuk Imobilisasi Mikroalga

Pada beberapa tahun yang lalu para peneliti hanya fokus pada teknik imobilisasi dan karakter dari sistem imobilisasi untuk mikroalga. Seiring meluasnya aplikasi imobilisasi mikroalga, maka kebutuhan akan penelitian bioreaktor juga semakin meningkat. Mallick (2002) menjelaskan beberapa konsep bioreaktor untuk imobilisasi mikroalga.

a) *Fluidized Bed- Bioreactor (FBR)*

Dalam konsep bioproses, proses operasi membutuhkan waktu tinggal yang lebih cepat. Oleh sebab itu lebih cocok jika metode ini menggunakan sistem fluidized bed. Pada umumnya, katalis yang digunakan harus berukuran kecil agar bisa terfluidisasi, selain itu juga harus stabil penggunaannya untuk jangka waktu yang lama. Travieso *et al.* (1992) memaparkan desain reaktor fluidized bed dengan material kolom flexiglass volume 1 liter dan diameter internal 5.3 cm. Kolom bioreaktor diisi dengan pelet mikroalga yang telah diimobilisasi dengan diameter 5 mm. ketinggian bagian dalam penopang kolom adalah 24 cm, dan waktu retensi selama 8 jam. Efek fluidisasi diperoleh pada aerasi 10.8 liter/menit. Pada percobaan diperoleh hasil bahwa *Chlorella vulgaris* yang telah diimobilisasi lebih efisien dalam pengolahan limbah dibanding dengan menggunakan *Chlorella kessleri*.

Garbisu *et al.* (1993) juga melakukan penelitian menggunakan bioreaktor fluidized bed untuk penyerapan phosphor dengan menggunakan imobilisasi cyanobacteria *Phorpiridium laminosum* dalam sistem batch maupun kontinyu. Dalam penelitian tersebut digunakan tiga tipe fluidized bed, yakni desain funnel, tipe kolom, dan bed dalam gelas erlenmeyer. Bioreaktor dioperasikan pada intensitas cahaya $100 \mu\text{mol photon m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ dan suhu 45°C dengan dilakukan kontrol pada bagian bawahnya menggunakan waterbath. Pada penelitian ini diperoleh hasil bahwa efisiensi untuk penyerapan phosphor kurang efisien. Akan tetapi penelitian ini dapat dijadikan rujukan sebagai bagian kemungkinan dalam penelitian lanjutan yang berpotensi.

Berbeda dengan peneliti lain, Canizares *et al* (1993), yang melaporkan bahwa Cyanobacteria *Spirulina maxima* yang dibiakkan pada bioreaktor fluidized bed dengan medium swine dapat menyerap ammonium-nitrogen sebanyak 90% dengan konsentrasi limbah pada pengenceran 25 dan 50%.

b) *Packed Bed Bioreaktor*

Ada beberapa inovasi desain bioreaktor, termasuk packed bed horizontal dan kolom ganda. Robinson *et al* (1989) mendesain reaktor packed bed skala kecil dengan kolom khromatografi *Pharmacia* K9/30. Dimensi kolom memiliki panjang 30 cm dan diameter internal 0.9 cm. packing reaktor berasal dari 400 alga yang telah diimobilisasi dari jenis *Chlorella emersonii* dengan matrix kalsium alginat. Operasi packed berada pada temperatur kamar dengan tujuan untuk menyerap kadar phosphor. Beberapa peneliti lain juga melakukan penelitian tentang penyerapan nutrisi pada reaktor packed bed. Gil dan Serra (1993) melakukan penelitian dengan menggunakan photobioreaktor skala laboratorium dengan packing *Phorpiridium uncinatum* yang diimobilisasi pada foam polyvinyl. Pada kondisi optimum operasi, diperoleh hasil bahwa 90% supply nitrat pada influen (50 mg/l) telah dapat diserap oleh alga dengan waktu tinggal 3-4 jam.

Tam dan Wong (2000) melakukan penelitian tentang penyerapan nitrat dan phosphor pada reaktor packed bed yang terbuat dari kolom PVC dengan menggunakan lima algal bead yang memiliki konsentrasi 4 sampai 20 bead/ml. Didapatkan hasil bahwa kadar $\text{NH}_4 + \text{-N}$ (30mg/l) dapat diserap tanpa sisa dan 95% kadar PO_4^{3-} (5.5mg/l) dapat terserap dengan baik selama 24 jam.

c) *Bioreaktor Parallel plate (PPR)*

Bioreaktor ini pertama kali diperkenalkan pada tahun 1972 dengan nama 'Reinberg' oleh Texas Instrumen. Terdapat beberapa desain variasi dari reaktor tersebut, akan tetapi secara umum bagian bawahnya dibangkitkan oleh tenaga elektroda.

Salah satu contoh penggunaan bioreaktor parallel plate adalah pada penelitian pemanfaatan mikroalga *Chlorella* untuk menurunkan kadar nitrogen dan phosphor pada limbah domestik. Pada penelitian tersebut digunakan bioreaktor dengan material dari polyethylen, kontrol suhu 20°C , dengan instalasi sistem bubling udara dan tanpa penambahan cahaya. Dari penelitian ini diperoleh hasil efisiensi pengurangan nitrogen 60.7% dan phosphor 84%. (Zhang, *et al.* 2012)

d) *Bioreaktor Air-lift*

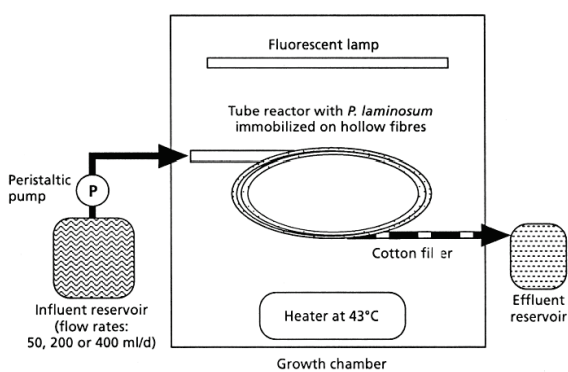
Reaktor ini cocok digunakan untuk skala laboratorium dan termasuk tipe terbaru dalam teknologi fermentasi. Pada reaktor ini content diaduk dengan cara pneumatik

Imobilisasi Mikroalga

oleh udara atau gas lain yang diinjeksi ke dalam reaktor. Aliran ini juga memiliki fungsi transfer gas pada medium. Vilchez dan Vega (1995) mempelajari efisiensi penyerapan nitrit oleh *Chlamydomonas reinhardtii* yang diimobilisasi dengan kalsium alginat dengan menggunakan reaktor air lift sistem kontinyu dan diskontinyu. Pada sistem diskontinyu diperoleh hasil efisiensi penyerapan nitrit 90 mikro mol / jam dengan menggunakan loading rate 90 mikro gram klorofil/ gram gel setelah delapan hari. Sementara dengan menggunakan sistem kontinyu diperoleh hasil 120 mikro mol/jam selama 21 hari. Pada penelitian ini disimpulkan bahwa sistem kontinyu lebih baik digunakan. Dan kelemahan dari metode ini tidak bagus jika digunakan pada skala komersial.

e) Bioreaktor Hollow Fiber

Salah satu kendala ketika menggunakan material gel pada sistem bioreaktor adalah stabilitas kinerja yang kurang baik seperti masalah struktur reaktor yang cenderung tidak awet. Sebagai contoh hal ini terungkap ketika Robinson (1998) melakukan penelitian dengan menggunakan reaktor packed bed skala kecil dan melaporkan bahwa perawatan sel alginat pada reaktor cenderung sukar.



Gambar 5.2 Diagram photobioreaktor hollow fiber

Sumber: Sawayama, *et al.*, 1998

Sistem bioreaktor hollow fiber memiliki banyak ukuran. Robinson (1998) melakukan penelitian tentang pengurangan kadar phosphor dengan menggunakan alga yang telah diimobilisasi. Penelitian tahap pertama diperoleh bahwa kadar phosphat dapat diserap seiring kenaikan waktu dan waktu setling pada reaktor.

Sawayama *et al* (1998) juga melakukan penelitian menggunakan reaktor hollow fiber dengan material reaktor dari PVC dan strain cyanobacteria termofilik *Phorpiridium laminosum*. Desain reaktor seperti pada Gambar 5.2. sebelum diinokulasi, tube bioreaktor disterilisasi dengan 1% larutan natrium hipochlorit dan dibilas dengan air distilasi. Imobilisasi dengan bioreaktor hollow fiber ini bagus digunakan untuk mengurangi kadar Phosphorus dibandingkan imobilisasi kitosan.

Chapter 6

Mikroalga sebagai Sumber Bioproduk

Beberapa dekade terakhir, dunia mengalami gejala krisis pangan, energi, dan air bersih. Banyak negara besar mengalami penurunan angka pendapatan, sementara populasi penduduk semakin meningkat. Krisis di Eropa, Amerika, dan beberapa negara belahan lain memberikan dampak secara tidak langsung kepada kebutuhan pangan dunia. Harga pangan semakin naik seiring kenaikan beberapa bahan baku lainnya. Hal ini juga pernah terjadi di era perang dunia, di mana harga kebutuhan pokok melambung tinggi. Akhirnya para peneliti berbondong-bondong melakukan eksperimen di bidang pangan yang dapat disediakan secara murah dan massal.

Salah satu sumber pangan yang dapat dijadikan solusi dari masalah tersebut adalah protein sel tunggal yang berasal dari fungi, yeast, bakteri, maupun mikroalga. Pada bab ini akan difokuskan pada pembahasan mikroalga sebagai penyedia protein. Lebih jauh lagi, mikroalga sebenarnya tidak tepat jika dirujuk sebagai penyedia protein sel tunggal, karena biomasnya yang memiliki lebih banyak senyawa pangan selain protein seperti pigmen, lipid, karbohidrat, vitamin dan mineral.



Gambar 6.1. *Spirulina platensis* tablet untuk suplemen alami
Sumber: www.neoalgae.com

Mikroalga Sebagai Sumber Bioproduk

Mikroalga sebagai stok pangan sebenarnya sudah lama digunakan oleh bangsa China. Mikroalga yang digunakan umumnya adalah *Arthospira*, *Nostoc*, dan *Aphanizamenon* lebih dari 2000 tahun yang lalu. Diketahui juga bahwa bangsa Aztec telah mengkonsumsi *Spirulina* pada abad 14-16. Produksi mikroalga sebagai stok pangan mulai digalakkan besar besaran ketika perang dunia kedua, di mana Jepang, Amerika, dan Jerman waktu itu sedang menghadapi krisis. (Potvin, dan Zhang, 2010).

Tabel 6.1. Perbandingan Karakteristik sumber protein dari beberapa jenis sel

Sistem	Karakteristik						
	Molekuler			Operasional			
	Ukuran	Sensitivitas	Yield	Waktu Produksi	Biaya kultivasi	Biaya scale-up	Biaya simpan
Bakteri	N/A	Medium	Medium	Cepat	Medium	Tinggi	Rendah
Yeast	N/A	Medium	Tinggi	Medium	Medium	Tinggi	Rendah
Insect	Terbatas	Tinggi	Medium-Tinggi	Lama	Tinggi	Tinggi	Tinggi
Mamalia	Terbatas	Tinggi	Medium-Tinggi	Lama	Tinggi	Tinggi	Tinggi
Plant cell	Tak terbatas	N/A	Tinggi	Lama	Rendah	Sangat rendah	Rendah
Mikroalga uniseluler	Tak terbatas	Rendah	Rendah	cepat	rendah	rendah	Rendah

(Potvin dan Zhang, 2010)

Sampai saat ini mikroalga masih digunakan oleh masyarakat sebagai sumber protein, vitamin, dan mineral, serta diantaranya digunakan sebagai obat-obatan yang lebih dikenal sebagai pangan fungsional. Dibandingkan dengan sumber lain seperti yeast maupun fungi, mikroalga memiliki keunggulan di aspek keamanannya. Jika di bandingkan dengan protein bersel tunggal yang bersumber dari mamalia, mikroalga lebih unggul di bidang efisiensi produksinya, lebih mudah dalam operasional. Perbandingan protein sel tunggal yang dihasilkan dari beberapa sumber tersaji pada tabel 6.1.

Mikroalga yang sering dibudidayakan adalah alga hijau jenis *Chlorella sp*, *Scenedesmus obliquus*, alga merah seperti *Dunaliella Salina* dan jenis cyanobacteria *Spirulina sp*. *Chlorella sp* sebagai contoh berbentuk spherical, eukariotik, uniseluler dengan diameter 5-10 mikrometer. *Scenedesmus* hampir sama dengan *Chlorella* namun terdiri dari 4 koloni sel. *Spirulina* memiliki sifat fotosintesis, berbentuk spiral, dan multisel, dengan ukuran

panjang 0.5mm. *Spirulina* diklasifikasikan dalam cyanobacteria yakni bakteri yang memiliki klorofil.

Tabel 6.2. Karakteristik beberapa mikroalga

Mikroalga	Protein	karbohidrat	Lipid
<i>Anabaena cylindria</i>	43-56	25-30	4-7
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	62	23	3
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglena gracilis</i>	39-61	14-18	14-20
<i>Spirulina platensis</i>	46-63	8-14	4-9
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	13-16	6-7
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11

(Becker, 2007)

Mikroalga sebagai sumber protein maupun sebagai sumber pangan telah lama diketahui, dan berdasarkan informasi serta penelitian para ahli, mikroalga yang berbasis pangan tidak memberi efek negatif bagi tubuh meski dikonsumsi secara rutin dalam jangka waktu lama maupun singkat. Beberapa mikroalga bahkan digunakan sebagai sumber obat-obatan, dan dimanfaatkan dalam industri farmasi. Dalam beberapa tahun belakangan, beberapa industri farmasi telah banyak memanfaatkan mikroalga berbasis farmasi untuk keperluan tertentu. Sebagai contoh adalah mikroalga jenis *Isochrysis galbana* dapat digunakan sebagai sumber bioaktif untuk penyembuhan penyakit tuberkolosis (Prakash dan Bhimba, 2004). Mikroalga sebagai sumber vitamin juga dapat diaplikasikan dalam skala besar. *Dunaliella salina* adalah mikroalga merah yang memiliki kandungan beta karotin yang tinggi. beta karotin digunakan sebagai obat peredam nyeri kanker payudara, sebagai obat mata, pencegah penyakit kulit yang mudah iritasi bila terkena sinar matahari, sebagai pencegah penyakit bronkitis, peredam nyeri ketika melahirkan dan sebagainya.

1. Mikroalgae sebagai Sumber Protein

Dalam kurun dekade belakangan ini mikroalga dapat dijumpai di pasaran dalam bentuk tablet, kapsul, minuman kaleng, permen, dan dicampur dalam pangan lain untuk meningkatkan nilai nutrisinya. Mikroalga yang sering dijumpai adalah dari jenis *Arthosiphira*, *Chlorella*, *D.salina*, dan *A phanizomenon flos-aquae*.

Mikroalga Sebagai Sumber Bioproduk

Arthospira digunakan sebagai pangan karena nilai nutrisi dari proteinnya yang cukup tinggi. Lebih jauh lagi, mikroalga ini memiliki senyawa yang dapat menyetatkan tubuh. Diantaranya adalah: mengurangi risiko hiperlipidemia, hipertensi, menjaga dari penyakit gagal ginjal, meningkatkan kinerja lactobasilus dalam tubuh. Salah satu produsen *Arthospira* terbesar di dunia adalah Hainan Simai Enterprising yang terletak di provinsi Hainan di China dengan produksi 200 ton bubuk *Spirulina*. Produksi ini hampir mencapai 10% dari pasar *Spirulina* di dunia. Sedangkan plant terbesar *Arthospira* terletak di Calipatria, Amerika, dengan area produksi 440,000 m².

Produksi mikroalga sebagai pangan terbesar lainnya adalah dari jenis *Chlorella* dengan lebih dari 70 produsen di dunia. *Chlorella* digunakan sebagai sumber pangan karena kaya akan protein, selain itu juga dapat digunakan sebagai senyawa aditif. Salah satu produsen *Chlorella* terbesar adalah Taiwan *Chlorella* Manufacturing and Co, dengan produk 400 ton biomas kering per tahun. Produsen besar lainnya adalah Klotze, Jerman, dengan produksi antara 130-150 ton per tahun menggunakan sistem pembiakan photobioreaktor.

Tabel 6.3. Perbandingan mikroalga terhadap makanan lain

Nama spesies	Protein	Karbohidrat	Lipid
Bakteri	47-86	2-36	1-39
Kapang	13-61	25-69	1-30
Telur	49	3	45
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Spirulina platensis</i>	46-70	8-14	4-9
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22

(sumber: Panggabean, 1998)

2. Mikroalga sebagai Sumber Vitamin

Selain menjanjikan sebagai sumber pangan, mikroalga juga dapat digunakan sebagai sumber vitamin yang baik digunakan sebagai asupan tambahan yang diperlukan oleh tubuh. Salah satu mikroalga yang dapat mensintesis senyawa alami menjadi sumber vitamin adalah jenis *Spirulina*, *Nanochloropsis*, *Chlorella*, dan beberapa jenis mikroalga lainnya.

Berdasarkan penelitian Durmaz, (2007), *Nanochloropsis* dapat dimanfaatkan sebagai sumber vitamin E dengan memodifikasi kondisi pertumbuhannya. *Nanochloropsis oculata* adalah mikroalga air laut uniseluler dari kelas *Eustigmato phycae*. Mikroalga lain seperti *Spirulina* juga dapat menyediakan vitamin B12.

Tabel 6.4. Perbandingan komponen vitamin pada hati, bayam dan mikroalga

Vitamin	Rekomendasi	Hati sapi	Bayam	1	2	3
Vitamin A	1.7	360	130	225	230	480
Thiamin	1.5	3	0.9	44	8	10
Riboflavin	2.0	29	1.8	37	36.6	36
Pyridoxine	2.5	7	1.8	3	2.5	23
Cobalmin	0.005	0.65	-	7	0.4	0.02
Vitamin C	50	310	470	80	20	-
Vitamin E	30	10	-	120	-	-
Biotin	-	1	0.07	0.3	0.2	0.15
Asam folat	0.6	2.9	0.7	0.4	0.7	-

Ket: basis sampel dalam (mg/kg), rekomendasi (mg/hari) 1=*Spirulina platensis*, 2=*Scenedesmus obliquus* 3=*Chlorella phyronoidosa* Sumber : Becker, (1994)

3. Mikroalga sebagai Sumber Pigmen

Mikroalga merupakan sumber pigmen alami yang aman digunakan sebagai zat aditif maupun dalam kosmetik. Beberapa mikroalga dapat menghasilkan pigmen selain dari pigmen hijau yang dihasilkan dari proses fotosintesis. Beberapa pigmen yang umum digunakan dalam industri adalah klorofil, phycobiliprotein dan karotenoid.

Klorofil dapat dijumpai di hampir semua mikroalga, dan tersusun atas lebih dari satu jenis klorofil, seperti klorofil-a, klorofil-b, klorofil-c, -d dan -e. klorofil-a adalah klorofil primer yang hampir dijumpai di sebagian besar mikroalga, dan merupakan satu satunya klorofil yang dimiliki mikroalga jenis cyanobacteria serta rhodophyta.

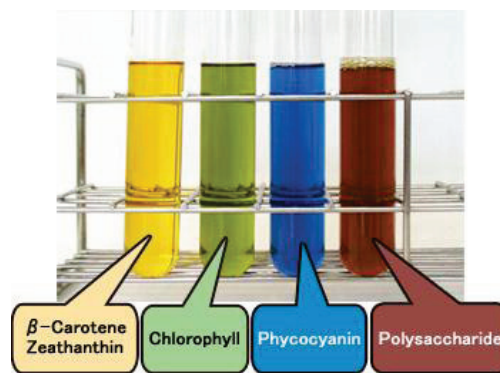
Selain dapat digunakan sebagai pewarna pada farmasi, senyawa turunan dari klorofil juga dapat digunakan sebagai produk kesehatan. (Ferruzi dan Blakeslee, 2007). Penelitian dari *Netherlands Cohort Study* menyatakan bahwa dengan mengkonsumsi klorofil dapat menurunkan risiko terkena kanker (Balder *et al*, 2006).

Sumber pigmen lainnya adalah fikosianin. Fikosianin merupakan pigmen biru yang kebanyakan ditemui pada jenis cyanobacteria. Lebih jauh lagi, fikosianin dapat dimanfaatkan sebagai antioksidan, anti-kanker, dan pewarna pada industri farmasi, permen, soft drink, kosmetik, dan beberapa industri berbasis bioteknologi lainnya. Biaya untuk ekstraksi fikosianin diperkirakan mencapai 0.13 US\$ per mg untuk skala food grade. Sedangkan untuk skala analitis mencapai 15 US\$ per mg. Banyak metode ekstraksi yang dapat digunakan untuk memisahkan fikosianin dari biomasnya. Proses yang biasa digunakan adalah dengan

Mikroalga Sebagai Sumber Bioproduk

ekstraksi menggunakan solven air, bahan kimia, maupun dengan pemisahan menggunakan membran.

Beta karotin juga merupakan pigmen alami yang sering dimanfaatkan dalam range yang lebih luas. Pigmen kuning kemerahan ini biasa dijumpai pada buah buahan, dan sayuran. Sedangkan pada mikroalga, beta karotin dapat ditemukan pada beberapa spesies dari alga merah seperti *Dunaliella Salina* yang dapat menghasilkan betakarotin sampai 17% berat kering.



Gambar 6.2. pewarna alami dari mikroalga

(sumber: <http://www.dlt-spl.co.jp>)

Beta karotin dari mikroalga ini dapat dimanfaatkan dalam tiga kategori yakni dalam industri farmasi, industri pangan, dan industri kosmetik (termasuk dalam jenis fine chemical). Beta karotin alami memiliki kandungan karotenoid yang kompleks dan nutrisi esensial dibandingkan dengan beta karotin buatan. Beta karotin dapat dikonsumsi dalam kuantitas yang lebih banyak. (Olson, dan Krinsky, 1995). Lebih jauh lagi, beta karotin dalam pemanfaatannya sebagai pewarna memiliki range yang sangat luas. Beta karotin dapat meningkatkan penampilan produk pangan dan minuman seperti margarin, keju, jus, makanan kalengan, dan sebagainya. Salah satu produsen *Dunaliella* terbesar di dunia adalah Parry's agro Ltd di India untuk skala farmasi. Perusahaan lain yang memproduksi *Dunaliella* adalah ABC Biotech Ltd di Tamil, Nadu.

Trend pewarna alami atau pigmen dari mikroalga diprediksi terus berkembang seiring permintaan pasar. Penggunaan dan manfaatnya sangat dibutuhkan dalam beberapa industri seperti industri farmasi yang membutuhkan spesifikasi yang lebih ketat. Dibandingkan dengan sumber pigmen dari jamur, bakteri, atau yeast, pigmen dari mikroalga memiliki

keunggulan dalam efisiensi biaya produksi, dan lebih aman digunakan. (Dufosse, *et al.*, 2005).

4. Mikroalga sebagai sumber Pakan Alami

Mikroalga merupakan sumber pakan alami yang populer bagi peternak unggas, pembudidaya ikan, dan sapi. Beberapa jenis mikroalga dapat dimanfaatkan sebagai suplemen yang dicampurkan pada pelet atau makanan ternak lainnya. Kulpys, *et al.* (2009) melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan *Spirulina platensis* terhadap produktivitas dan kandungan susu sapi. Selama 90 hari dilakukan uji coba penambahan *Spirulina* dengan dosis 200 gram diperoleh hasil sapi menjadi lebih gemuk 8.5-11%, dengan produktivitas susu 29 kg/ hari tanpa penambahan alga, menjadi 36 lt/hari.

Tabel 6.5. Perbandingan parameter eksperimen pakan dengan *Spirulina platensis*

Index	Control	Experimen
Rata2 yield/hari (kg)	28	34
Rata2 lemak dalam susu (%)	4.19	4.16
Rata2 protein dalam susu (%)	3.17	3.18
Rata2 laktosa dalam susu (%)	4.79	4.83
Total yield dalam 90 hari	2520	3060
Penggunaan spirulina utk 1 sapi (kg)	-	18

Sumber: Kulpys, *et al.* (2009)

Ginzberg, *et al.* (2000) melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan mikroalga jenis *Porphyridium sp.*, yang merupakan jenis alga merah. Dari penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa mikroalga yang ditambahkan pada pakan dapat menurunkan kadar kolesterol dan dapat memodifikasi komposisi asam lemak pada kuning telur. Mikroalga tersebut mengandung polisakarida sebesar 70% dan mengandung beberapa PUFA seperti arachidonic dan eicosapentaenoic. Dosis mikroalga sebesar 10% diberikan pada makanan ayam selama variabel waktu 0 hari, 10 hari, dan 20 hari. Dari penelitian diperoleh hasil peningkatan kandungan asam linoleat 29% dan asam arachidonic 24% pada kuning telur. Sedangkan pada level kolesterol darah diperoleh penurunan sebesar 28%.

Mikroalga Sebagai Sumber Bioproduk

Mikroalga juga dapat digunakan sebagai sumber pakan alami untuk budidaya perikanan, baik untuk sumber makanan atau untuk ikan hias. Badwy, *et al.* (2008) mempelajari pengaruh penambahan mikroalga *Chlorella* sp. dan *Scenedesmus* sp. pada ikan, diperoleh bahwa penambahan alga berat kering pada pakan ikan mempengaruhi kadar protein, lemak, dan berat pada ikan Nile Tilapia.

Tabel 6.6. Pengaruh penambahan mikroalga pada ikan

Items	Treatments								
	Control (0.0%)	<i>Chlorella</i> sp				<i>Scenedesmus</i> spp			
		10%	25%	50%	75%	10%	25%	50%	75%
Berat kering	21.85 ± 0.05 ^c	22.88 ± 0.05 ^c	23.05 ± 0.12 ^c	24.16 ± 0.18 ^b	22.21 ± 0.12 ^c	23.26 ± 0.09 ^c	23.97 ± 0.09 ^b	25.11 ± 0.25 ^a	23.04 ± 0.14 ^c
Crude protein	62.24 ± 1.13 ^c	62.51 ± 1.08 ^c	63.33 ± 0.95 ^{bc}	65.52 ± 0.64 ^a	60.00 ± 0.82 ^c	62.70 ± 1.22 ^{bc}	63.70 ± 0.96 ^b	66.00 ± 1.32 ^a	61.14 ± 2.12 ^d
Crude Fat	15.92 ± 0.10 ^c	15.69 ± 0.06 ^c	15.92 ± 0.09 ^c	13.83 ± 0.09 ^d	17.42 ± 0.08 ^a	15.63 ± 0.04 ^c	15.77 ± 0.14 ^c	12.56 ± 0.16 ^c	16.80 ± 0.18 ^b
Abu	18.50 ± 0.04 ^e	18.79 ± 0.04 ^d	19.08 ± 0.10 ^c	18.11 ± 0.08 ^f	20.25 ± 0.12 ^a	19.01 ± 0.04 ^c	18.66 ± 0.07 ^{dc}	18.24 ± 0.06 ^f	19.50 ± 0.06 ^b
Gross energy	515.0 ± 1.01 ^{ab}	513.0 ± 0.62 ^{abcd}	514.3 ± 0.70 ^{abc}	510.5 ± 1.05 ^d	512.4 ± 0.49 ^{bcd}	512.1 ± 0.59 ^{cd}	515.8 ± 0.15 ^a	504.0 ± 0.69 ^e	513.9 ± 1.66 ^{abc}

Sumber: Badwy, *et al.*, (2008)

Selain itu Mikroalga juga dapat digunakan sebagai suplemen bagi hewan peliharaan. Seperti yang diinformasikan dalam situs *Spirulina*source.com, *Spirulina platensis* dapat digunakan untuk beberapa hewan peliharaan seperti pada tabel 6.7.

Tabel 6.7. Manfaat Spirulina untuk beberapa jenis hewan peliharaan

Hewan Peliharaan	Manfaat
Burung	Meningkatkan kualitas bulu, warna bulu, fertilitas, meningkatkan sistem imunitas
Kucing	Menyehatkan kulit, mencegah penyakit kanker dan infeksi viral
Anjing	Menyehatkan kulit, mencegah penyakit dermatitis, meningkatkan daya tubuh
Unggas	Menurunkan risiko kematian

Sumber: www.spirulinaresource.com

5. Mikroalga sebagai sumber Produk Bioplastik

Kecenderungan mikroalga sebagai bahan pembuatan bioplastik diperkirakan akan meningkat seiring semakin mahalnya minyak bumi. Bioplastik atau plastik organik adalah plastik yang terbuat dari sumber biomassa seperti minyak nabati, tepung jagung, dan tepung lainnya. Umumnya plastik terbuat dari bahan petrokimia. Bioplastik yang berasal dari biomassa memiliki dua keuntungan. Di satu sisi dapat menurunkan kadar karbon dioksida, di sisi lainnya dapat mengurangi kebutuhan akan bahan bakar fosil.

Alga merupakan stok bahan baku yang cocok digunakan sebagai biomassa penghasil bioplastik. Beberapa keuntungannya di antaranya yield yang tinggi, dan kemampuan tumbuhnya yang mudah di lingkungan. Bioplastik dari alga pada umumnya terbuat dari produk samping pembuatan biofuel dari alga. Beberapa tipe dari bioplastik di antaranya biopolimer dari organisme hidu, yaitu polimer yang dihasilkan berasal dari pemrosesan selulosa, protein, dan tepung. Contoh lain adalah polimerisasi dari Molekul organik. Produk ini umumnya terbuat dari asam laktat dan trigliserida, dan dapat dipolimerisasi sehingga sifatnya biodegradable.

Beberapa plastik yang dapat diproduksi dari alga diantaranya:

a. Hybrid Plastic

Produk ini adalah pencampuran dari biomass alga dan petroleum seperti polyuretha dan polietilen. Penggunaan biomassa dari alga dapat mengurangi kebutuhan petroleum dan meningkatkan kemampuan sifat biodegradable. Alga hijau berfilamen seperti *Chlado phorales* merupakan jenis alga yang cocok digunakan pada pembuatan plastik hybrid ini.

b. Plastik berbasis Selulosa

Bioplastik yang paling umum digunakan adalah berasal dari selulosa, seperti daun pisang, daun jati, dan beberapa jenis dedaunan lain yang dapat dimanfaatkan sebagai packaging. Beberapa jenis alga yang telah diekstrak untuk kebutuhan minyaknya, menghasilkan sisa selulosa yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan pembuatan bioplastik.

c. Poly-lactic-Acid (PLA)

Asam laktat umumnya diproduksi dengan cara fermentasi dan dipolimerisasi untuk menghasilkan asam polilaktat. Asam laktat ini dapat diproduksi dari biomassa alga menggunakan fermentasi.

Mikroalga Sebagai Sumber Bioproduk

d. Bio-polietilen

Biopolietilen adalah polimer yang berasal dari ethanol. Selama ini ethanol diproduksi dari sumber gas alam atau petrolium. Selain itu ethanol juga dapat diproduksi dari fermentasi biomassa alga. Namun ditinjau dari segi ekonomi, produksi ethanol dari alga masih belum menguntungkan. Beberapa industri yang sedang mengembangkan industri plastik berbasis biomassa alga diantaranya adalah:

a. Dow Chemical

Dow Chemical masih melakukan riset skala kecil untuk menghasilkan bio-polietilene dari mikroalga dengan mitra kerja Algenol Amerika. Etanol yang diperoleh dari mikroalga akan digunakan sebagai bahan baku pembuatan Dow Plastic.

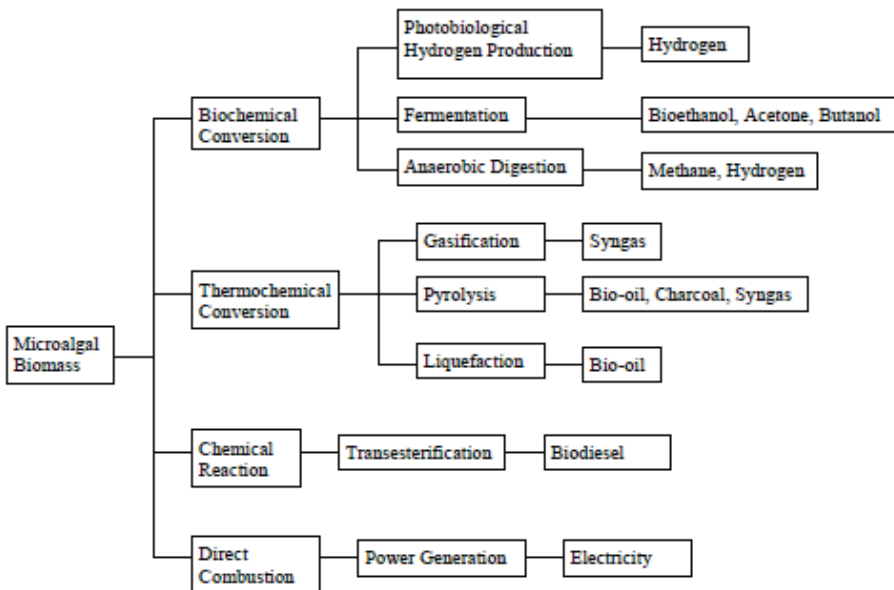
b. Ceroplast

Ceroplast merupakan produsen berbasis pangan terutama menghasilkan produk tepung seperti jagung, tapioka, kanji, dan kentang. Ceroplast hybrid plastic adalah merupakan proyek penelitian bioplastik hibrid campuran antara material alga dan poliolefin.

Chapter 7 | Mikroalga untuk Bioenergi

Mikroalga memiliki potensi sebagai bahan baku penghasil energi. Tidak dipungkiri bahwa pertumbuhan mikroalga lebih cepat dari beberapa tumbuhan lain yang dapat menghasilkan minyak, seperti jagung, kedelai, kelapa sawit, dan bunga matahari. Selain itu mikroalga tidak membutuhkan banyak lahan dan air untuk pertumbuhannya. Lebih jauh lagi, mikroalga tidak menghasilkan limbah yang berdampak buruk bagi lingkungan sehingga tidak mempengaruhi kualitas air yang telah digunakan sebagai pertumbuhannya.

Biomass dari mikroalga dapat diolah menjadi beberapa turunan produk bioenergi seperti biodiesel (cara transesterifikasi), bioethanol (C_2H_6O) (cara fermentasi), biobutanol ($C_4H_{10}O$), maupun SVO (Straight Vegetable Oil) di mana minyak yang dihasilkan dari mikroalga langsung digunakan untuk mesin diesel yang telah dimodifikasi.



Gambar 7.1. Derivat Produk Biomass Mikroalga Berbasis Bioenergi

Mikroalga untuk Bioenergi

Berdasarkan skema Gambar 7.1. terlihat bahwa mikroalga dapat dijadikan sebagai produk bioenergi yang cukup beragam. Biomasa dari mikroalga dapat diolah dalam bentuk bioethanol, biobutanol melalui proses fermentasi. Biomasa mikroalga yang kering juga dapat diolah menggunakan anaerobic digestion sehingga menghasilkan senyawa metana dan hidrogen. Selain itu mikroalga yang kaya akan kandungan lipid dapat diproses lebih lanjut menjadi biodiesel dengan menggunakan proses transesterifikasi. Sedangkan proses langsung dari penggunaan biomassa kering mikroalga adalah dengan cara pembakaran langsung sehingga menghasilkan panas dan dapat digunakan untuk mesin generator. Beberapa contoh produsen penghasil algae sebagai bioenergi di dunia di antaranya:

- Algae Floating Systems, Inc
- Algae Fuel (California)
- Algae Fuel System (California)
- Algal Oil Diesel, LLP (Oregon)
- Algoil Industries, Inc
- Cellana (Shell & HR Biopetroleum)
- Sap pHire Energy (dibiayai Bill Gates)
- Solix Biofuels (Colorado)
- Valcent (Texas)

(Demazel, 2008)

1. Biodiesel dari Mikroalga

Salah satu produksi energi dari tanaman adalah biodiesel. Biodiesel memiliki keunggulan dibanding diesel dari minyak bumi. Biodiesel dapat digunakan secara luas pada mesin diesel, tanpa perlu banyak modifikasi. Biodiesel dapat dicampur dengan diesel konvensional dengan berbagai rasio.

Alga penghasil biofel, atau disebut sebagai algae fuel adalah biofuel generas ketiga setelah ditemukannya teknologi generasi kedua, biofuel dari tanaman penghasil lipid. Alga dapat memproduksi energi 20 sampai 100 kali lipat dibanding tumbuhan tingkat tinggi lain.

Tabel 7.1. Perbandingan lahan dan Produksi Lipid

Komoditas	Yield minyak	Area Lahan (ha)
Jagung	172	1540
Kedelai	446	594
Kanola	1190	223
Jarak	1892	140
Kelapa	2689	99
Kelapa sawit	5950	45
Mikroalga	136900	2

(Sumber: Chisti, 2007)

Berdasarkan Tabel 7.1, mikroalga merupakan sumber biodiesel yang paling berpotensi dibanding tumbuhan lain. Mikroalga secara umum memproduksi biomasa dua kali lipat selama 24 jam. Sedangkan penggandaan biomassa selama fase eksponensial dapat dicapai dalam waktu 3.5 jam.

Kandungan minyak dalam biomassa kering mikroalga dapat mencapai 80% berat. Namun secara umum mikroalga menghasilkan lipid dalam range 20-50%. Produktivitas lipid dan produktivitas biomassa harus sesuai. Produktivitas lipid adalah massa lipid yang diproduksi per unit volume dari broth mikroalga per hari. Beberapa mikroalga memiliki kandungan lipid yang tinggi namun pertumbuhannya lambat.

Tabel 7.2. Mikroalga Penghasil Lipid

Mikroalga	Kandungan Minyak (% berat kering)
<i>Dunaliella salina</i>	25-75
<i>Chlorella sp</i>	28-32
<i>Cryphocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca sp</i>	16-37
<i>Dunaliella promolecta</i>	23
<i>Isochrysis sp.</i>	25-33

(Sumber Chisti, 2007)

Tidak semua mikroalga penghasil lipid layak untuk digunakan sebagai biodiesel. Mikroalga memproduksi banyak jenis lipid, hidrokarbon dan jenis minyak kompleks lainnya.

Mikroalga untuk Bioenergi

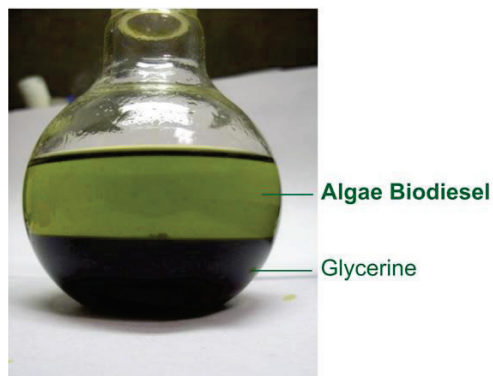
Dengan menggunakan mikroalga untuk memproduksi biodiesel tidak akan mengganggu stock pangan.

Mikroalga yang dibiakkan secara heterotrof memiliki potensi yang tinggi sebagai penghasil lipid untuk biodiesel dengan menggunakan sumber karbon seperti gula, dan sitrat. Akan tetapi produksi secara heterotrof tidak efisien dibanding mikroalga dengan metode fotosintesis.

1. Faktor yang Mempengaruhi Lipid Mikroalga

Kandungan lipid dalam mikroalga dapat meningkat menjadi dua atau tiga kali lipat ketika lingkungan pertumbuhan mikroalga dalam keadaan kekurangan nutrisi atau kondisi limit(stress). Kualitas asam lemak dan komposisinya juga berbeda beda dipengaruhi oleh keadaan fisiologis dan kondisi pertumbuhannya (Geouveia, 2011).

Faktor kimia yang mempengaruhi mikroalga penghasil lipid adalah nutrisi (nitrogen, phosphor, sulfur, silicon), pH, salinitas, dan komposisi nutriennya. Widjaja *et al* (2009) melaporkan bahwa nitrogen berperan penting dalam pembentukan lipid mikroalga. Pengurangan kadar nitrogen dalam medium pertumbuhan mikroalga dapat meningkatkan kadar lipid, akan tetapi hal ini juga dapat menurunkan laju pertumbuhannya. Selain itu Wijanarko (2011) juga melaporkan bahwa nitrogen dalam bentuk NO_3 mempengaruhi kandungan lipid sedangkan nitrogen dalam bentuk NH_3 mempengaruhi kandungan protein.



Gambar 7.2. Biodisel dari mikroalga
(sumber www.algaeorbiofuels.com)

Faktor fisika yang mempengaruhi pertumbuhan alga adalah temperatur, dan intensitas cahaya. Komposisi kejenuhan asam lemak dapat dipengaruhi oleh suhu. Jika suhu saat pembiakan rendah, makan asam lemak yang terbentuk semakin tidak jenuh, dan sebaliknya. Intensitas cahaya yang rendah juga dapat mempengaruhi kepolaran kandungan lipid. Semakin rendah intensitas cahaya, maka lipid yang terbentuk cenderung ke arah triakilslerida.

Tabel 7.3. Viskositas dan harga Panas pembakaran Berbagai Minyak

Minyak	Viskositas	Panas Pembakaran
Kelapa sawit	38	38.30
Canola	33	38.52
Jagung	31	-
Mikroalga	36.6	38.72

Sumber: Gouveia, (2011)

Selain faktor fisik dan kimia, waktu pemanenan biomas dapat juga mempengaruhi hasil lipid yang diinginkan. Peningkatan TAG (triakilslerid) terjadi ketika fase stasioner. Umur pertumbuhan juga dapat mempengaruhi kandungan lipid dalam biomas. Semakin lama masa pengkulturan, asam lemak yang terbentuk adalah jenuh dan berbentuk mono-unsaturated sementara PUFA semakin sedikit. (Liang, *et al.* 2006).

Tabel 7.4. Karakteristik Biodiesel dari Mikroalga dan Tanaman

Parameter	Biodiesel mikroalga	Disel Petroleum	Standar ASTM
Densitas (kg/l)	0.864	0.838	0.86-0.90
Viskositas (mm ² /s, cSt pada 40 ^o C)	5.2	1.9-4.1	3.5-5.0
Titik didih (C ^o)	115	75	Min 100
Titik Beku (C ^o)	-12	-50 sampai 10	-
Nilai asam (mg KOH/g)	0.374	Max 0.5	Max 0.5
Nilai pembakaran (MJ/kg)	41	40-45	-
H/C ratio	1.81	1.81	-

(Sumber: Gouveia, 2011)

2. Ekstraksi Lipid

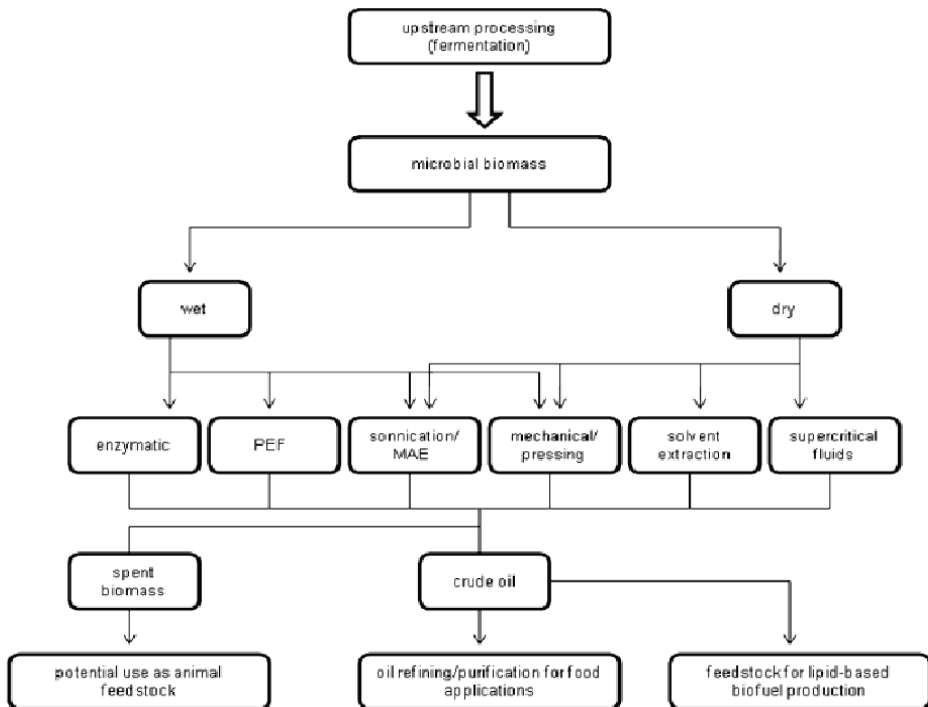
Selain pengembangan kandungan lipid dalam mikroalga dan kecepatan pertumbuhannya, proses ekstraksi kandungan bioenergi, seperti lipid, dalam mikroalga perlu diperhatikan. Beberapa metode konvensional hanya dapat mengambil kandungan lipid dalam mikroalga dalam jumlah kecil. Di lain hal, banyak peneliti yang mengkaji beberapa metode ekstraksi tersebut.

Metode pengambilan lipid dari mikroalga biasanya dibedakan menjadi dua, gangguan dinding sel dan metode ekstraksi solven. Namun seiring perkembangan jaman, beberapa metode ini dapat dikombinasi dan bermacam macam.

Beberapa metode gangguan dinding sel (*cell disruption*) yang umum ditemui adalah metode mekanik dan metode menggunakan solven. Pada metode mekanik, dinding sel mikroalga dipecah dengan menggunakan tekanan fisik dan minyak diambil secara langsung. Metode ini juga dapat dikombinasikan dengan metode pelarutan menggunakan solven. Solven dapat melarutkan lipid dalam sel. Solven yang biasa digunakan adalah heksan.

Metode mekanik lain yang dapat digunakan untuk ekstraksi adalah dengan menggunakan metode penggilingan. Metode ini bergantung kepada kontak antara bead dan biomas, jumlah ukuran dan komposisi bead dan kekuatan dinding sel. Metode bead mill pada umumnya digunakan bersamaan dengan solven untuk merecover minyak, dan akan menjadi lebih efektif serta membutuhkan energi lebih rendah jika produk yang terekstrak dapat dipisahkan dengan mudah. Lebih spesifik lagi, biomas yang digunakan pada metode ini adalah 100 sampai 200g/L.

Metode dengan menggunakan enzim juga dapat diterapkan untuk mengambil lipid dari sel mikroalga. Enzim dapat digunakan sebagai zat penghidrolisis dinding sel untuk melepaskan lipid. Lipid ini kemudian dialirkan ke dalam solven yang cocok. Enzim juga dapat dikombinasikan dengan metode mekanik seperti *sonnication*, menggunakan energi suara, sehingga ekstraksi menjadi lebih cepat dan yield yang dihasilkan lebih tinggi. *Sonnication* sendiri mampu meningkatkan proses ekstraksi. Proses ini disebut dengan kavitasi.



Gambar 7.3. Skema ekstraksi lipid dari biomas mikroalga basah dan kering.

Ket: MAE=microwave assisted extraction, PEF=pulsed electronic field
(Sumber: Mercer dan Armenta, 2011)

Metode kavitasi didasarkan pada gelombang ultrasonik yang menciptakan gelembung pada solven, gelembung tersebut meletus dekat dengan dinding sel mikroalga, menghasilkan guncangan kuat sehingga senyawa dalam sel akan keluar dan larut dalam solven.

Solven seperti benzen, hexane dan siklohexane sering digunakan dalam metode ini. Dinding sel terdegradasi dan minyak tereskrak ke dalam solven. Metode ini cenderung feasibel (sebagai contoh digunakan untuk *Botryococcus braunii*) tanpa merusak dinding sel selama solven yang digunakan tidak beracun. Salah satu metode yang paling terkenal untuk penerapan mikroalga adalah metode Bligh dan Dyer, yakni dengan menggunakan kombinasi methanol, chloroform dan air. Namun kendala dalam metode ini adalah kesukarannya dalam penerapan skala besar karena solven yang semakin banyak terakumulasi.

Tabel. 7.5. Efisiensi Beberapa Metode Ekstraksi

Metode ekstraksi	Organisme	% Minyak terambil	Asam lemak (dlm % minyak terambil)
Solvent/saponification	<i>Porphyridium cruentum</i>	59.5	EPA-79.5
Bligh dan dyer	<i>Spirulina maxima</i>	5.5	GLA-73
Bligh dan dyer (kering)	<i>Chlorella vulgaris</i>	52.5	N/A
Wet milling	<i>Scenedesmus dimorphus</i>	25.3	-
Bead-beater	<i>Chlorella protothenides</i>	18.8	N/A
Soxlet	<i>Chlorella protothenides</i>	5.6	N/A
Sonikasi	<i>Chlorella protothenides</i>	10.7	N/A
Solvent/transesterifikasi	<i>Botryococcus braunii</i>	12.1	Oleat – 56.3

Sumber : Mercer dan Armenta, (2011)

Bahan baku (raw material) yang diproses untuk diambil lipidnya dapat dibedakan menjadi dua macam, biomas dalam bentuk basah dan kering. Kedua pemilihan jenis ini dapat didasarkan dari efisiensi yield lipid yang diperoleh maupun dari aspek ekonominya. Secara umum yield dari biomas kering lebih tinggi kadar lipidnya akan tetapi membutuhkan waktu dan biaya yang lebih tinggi.

Dari Tabel 7.5. terlihat beberapa metode ekstraksi lipid dari beberapa jenis mikroalga. Sejauh ini metode solven memiliki efisiensi ekstraksi tertinggi di banding beberapa metode lainnya. Namun jika dilakukan scale up dalam skala pabrik harus dibutuhkan biaya yang lebih untuk merecover solven yang telah digunakan untuk mengekstrak lipid.

3. Direct Transesterification

Direct transesterification atau transesterifikasi secara langsung, dan biasa dikenal sebagai transesterifikasi *insitu* adalah salah satu metode alternatif yang digunakan untuk menghasilkan biodisel dari mikroalga penghasil lipid tanpa mengekstrak terlebih dahulu lipidnya. Metode ini menjadi menarik diaplikasikan mengingat biaya ekstraksi lipid dari mikroalga dapat dihindari, sehingga biomassa yang diproses dari pemanenan baik berupa biomas basah maupun kering, dapat langsung diproses untuk menghasilkan biodiesel.

Metode sederhana dari esterifikasi secara langsung adalah dengan mencampurkan biomassa ke dalam methanol dan solven dengan penambahan katalis kemudian direaksikan pada suhu dan waktu tertentu. Hasil reaksi kemudian

dipisahkan dari campurannya berupa bagian bawah yang mengandung sisa biomassa dan air, bagian atas berupa gliserol dan FAME (fatty acid methyl ester) atau biasa disebut biodiesel, yang bercampur dengan solven. Untuk menghilangkan solven dari biodieselnnya, dapat dilakukan dengan cara distilasi.

2. Bioethanol dari Mikroalga

Bioethanol merupakan produk bioenergy yang umum digunakan di masyarakat. Selama ini bioethanol diproduksi dari fermentasi alkohol dengan bahan baku jagung, shorgum, singkong, dan gula tebu. Pati yang terekstrak kemudian dicampur dengan air dan dipanaskan secara bertahap. Pati kemudian dihidrolisis dengan yeast *Sacharomyces cereviseae* atau *Zymomonas mobilis*. *S. cerevisiae* adalah organisme yang paling umum digunakan sebagai yeast produksi ethanol dari glukosa.

Mikroalga juga berpotensi sebagai penghasil bioethanol karena beberapa jenis spesiesnya memiliki kandungan pati. Mikroalga ini dapat diproduksi melalui dua proses, fermentasi gelap maupun menggunakan yeast.

Fermentasi gelap (dark fermentation) dilakukan dengan cara anaerobik di mana mikroalga sendiri yang mengkonsumsi pati yang terkandung dalam medium pertumbuhannya. Sedangkan fermentasi yeast adalah fermentasi yang umum dilakukan di industri besar dan dapat menghasilkan yield yang lebih tinggi.

Beberapa mikroalga berpotensi sebagai bahan baku bioethanol. Diperkirakan bahwa mikroalga menghasilkan 46,760-140,290 liter ethanol/ha. Hasil ini lebih tinggi dibandingkan beberapa sumber tumbuhan lain. Matsumoto *et al*, (2003) melaporkan bahwa lebih dari 76 jenis mikroalga air laut memiliki kandungan karbohidrat 40-53%.

Hirano *et al*. (1997) melaporkan tentang penggunaan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* dengan kandungan pati sebesar 37% menjadi bioethanol dengan proses fermentasi dan menghasilkan konversi sebesar 65%. Ueda *et al* juga melaporkan bahwa beberapa jenis mikroalga seperti *Chlorella sp*, *Dunaillella*, *Chlamydomonas*, *Scenefesmus*, dan *Spirulina* memiliki kandungan pati lebih dari 50% dan berpotensi sebagai bahan baku pembuatan bioethanol.

Tabel. 7.6. Potensi Produksi Bioethanol dari Mikroalga dan Tanaman lain

Sumber	Potensi Produksi Ethanol (L/ha)
Singkong	3310
Shorgum manis	3050-4070
Jagung	3460-4020
Tebu	6,190-75.00
Mikroalga	46,760-140.290

Sumber: Gouveia, 2011

Harun *et al* (2010a) mempelajari mikroalga jenis *Chlorocum* sp sebagai feedstock pembuatan ethanol. Pada penelitian tersebut dilaporkan bahwa cell disruption mempengaruhi yield. Produktivitas maksimum adalah 38% (w/w). Harun juga menyatakan bahwa biomas harus diolah menjadi gula sederhana sebelum dilakukan fermentasi. Hasil 7.2gr/l bioethanol tertinggi didapatkan dengan memfermentasikan 15gr/l mikroalga pada suhu 140⁰C menggunakan asam sulfat 1% (v/v) selama 30 menit. Sementara hasil lain diperoleh 52% berat (gr ethanol/gr mikroalga) didapatkan dari 10gr/l mikroalga dan 3% (v/v) asam sulfat pada suhu 160⁰C selama 15 menit.

Tabel 7.7. Kandungan Karbohidrat beberapa Mikroalga

Mikroalga	Karbohidrat (% berat kering)
<i>Dunaliella salina</i>	32
<i>Tetraselmis maculate</i>	15
<i>Spirogyra</i> sp.	33-64
<i>Chlorella vulgaris</i>	12-17
<i>Scenedesmus obliquus</i>	10-17
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	17
<i>Anabaena cylindrical</i>	25-30

Sumber: Gouveia, 2011

Faktor yang mempengaruhi produksi bioethanol dari mikroalga adalah temperatur, pre-treatment dengan menggunakan asam, dan volume mikroalga yang direaksikan. Harun dan Danquah (2011) melaporkan bahwa pre treatment biomas menggunakan asam adalah penting sebelum dilakukan fermentasi. Sedangkan He *et al*, (2010) menyatakan bahwa dengan penambahan zat besi ke dalam medium pertumbuhan mikroalga dapat meningkatkan kandungan karbohidrat. Douskova, et al. (2008) menyatakan bahwa dengan pengurangan

kandungan phosphor, nitrogen dan sulfur dapat meningkatkan kandungan pati dalam biomas masing masing 83%, 50%, dan 33%.

Keunggulan penggunaan mikroalga sebagai bioenergi berbasis bioethanol di banding berbasis lipid adalah mikroalga tidak perlu dilakukan pengeringan sehingga tidak membutuhkan banyak biaya dan lebih mudah dilakukan karena fermentasi bioethanol di lakukan dalam medium yang membutuhkan air. Selain itu untuk scale up nya, mikroalga bioethanol lebih mudah dilakukan karena dewasa ini sudah banyak perusahaan penghasil bioethanol.

3. Biogas dari Mikroalga

Material organik seperti limbah cair kelapa sawit, maupun sampah organik dapat digunakan sebagai biogas melalui perombakan anorganik dengan bantuan beberapa campuran bakteri yang menghidrolisis biopolimer organik (seperti karbohidrat, lemak, dan protein) menjadi monomer dan dikonversi menjadi gas yang kaya akan methana dengan proses fermentasi. Biogas memiliki kandungan 50-70% CH₄ dan karbon dikosida 25-50% serta beberapa impuritas lain seperti H₂S.

Mikroalga memiliki potensi sebagai penghasil biogas karena juga mengandung senyawa karbohidrat, protein, dan lemak. Biofuel berbasis biogas ini lebih murah karena tidak membutuhkan proses pengeringan, ekstraksi dan perubahan senyawa menjadi biofuel seperti kasus lipid.

Beberapa peneliti melaporkan potensi mikroalga sebagai penghasil biogas. Sialve *et al.* (2009) melaporkan bahwa methana terkandung dalam biogas dari mikroalga adalah 7-13%, lebih tinggi jika dibanding dengan maizena. Sementara peneliti lain memberikan paparan tentang penggunaan beberapa jenis mikroalga secara nyata dapat dimanfaatkan sebagai biogas dengan produksi 180.4mg/g hari dari biomassa dengan menggunakan proses anaerobik dua tahap di mana hasil methana mencapai 65%.

Beberapa faktor yang mempengaruhi produksi biogas dari mikroalga di antaranya adalah pada proses perombakan, dan kandungan biomassa mikroalga. Mussnug *et al* (2010) menjelaskan bahwa beberapa jenis mikroalga seperti *Spirulina platensis*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Dunaliella salina* dan beberapa jenis mikroalga lain yang dijadikan sebagai raw

Mikroalga untuk Bioenergi

material memiliki produksi biogas yang berbeda beda. *Chlamidomonas reinhardtii* merupakan mikroalga penghasil biogas tertinggi dengan hasil 587ml/gram volatil solid.

Selain itu, produksi biogas dari mikroalga juga perlu diperhatikan seperti substrat harus dipekatan dan dihindari proses pengeringan. Transportasi biomas basah sebagai raw material juga perlu diperhatikan untuk mengurangi biaya. Untuk itu diperlukan proses integrasi antara reaktor biodigester dan kolam kultivasi mikroalga. Integrasi tersebut akan lebih efisien jika diterapkan dalam limbah cair organik di mana mikroalga tumbuh dalam limbah cair dengan kondisi yang tidak terkontrol.

4. Bio-Hidrogen dari Mikroalga

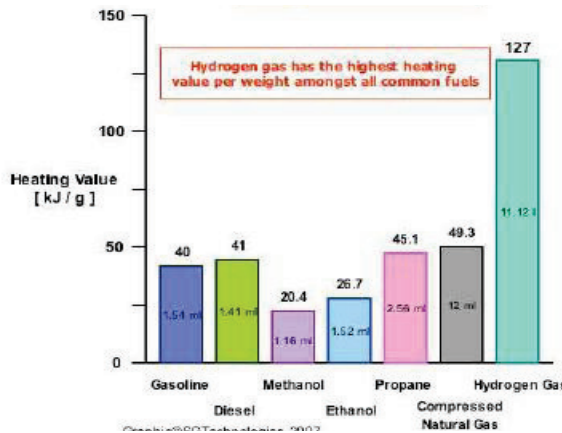
Hidrogen dapat diproduksi dari beberapa sumber energi termasuk minyak bumi dari gas alam dan batu bara. Namun dari bahan baku tersebut membutuhkan input energi yang tinggi dan menghasilkan produk samping seperti karbon monoksida dan gas rumah kaca. Sumber renewable energi seperti radiasi solar, biomas dan angin, dapat dimanfaatkan untuk memproduksi hidrogen via proses elektrolisis atau proses reforming lain.

Biohidrogen adalah hidrogen yang diproduksi dengan bantuan organisme biologis. Mikroorganisme seperti alga dan bakteri menghasilkan gas pada temperatur yang relatif rendah, berbeda dengan industri pada umumnya yang membutuhkan suhu tinggi.

Menurut Demazel (2008), sejarah produksi hidrogen dari alga dimulai ketika pada tahun 1939, Hans Gaffron, peneliti Jerman mengobservasi mikroalga *Chlamydomonas reinhardtii* yang sewaktu waktu dapat memproduksi oksigen dan hidrogen. Gaffron belum meneliti lebih jauh kenapa hal itu bisa terjadi. Hingga tahun 1977, Anastasios Mells, peneliti dari universitas California, melaporkan bahwa sulfur yang diberikan pada medium mikroalga dapat mempengaruhi produksi oksigen menjadi hidrogen. Enzim pada mikroalga, hidrogenase, berperan penting dalam produksi tersebut. Saat hidrogenase kehilangan fungsinya, maka mikroalga menghasilkan oksigen. Kekurangan jumlah sulfur pada medium dapat mempengaruhi produksi oksigen, dan meningkatkan enzim hidrogenase. Hidrogen memiliki nilai bakar yang tinggi jika dibandingkan senyawa bioenergi lain.

Sedangkan mikroalga jenis cyanobacteria dapat memproduksi hidrogen dengan kondisi anaerob tanpa cahaya dengan bantuan enzim hidrogenase atau dengan cahaya

berbantuan katalis hidrogenase. Sedangkan alga hijau, hidrogen diproduksi secara fotosintesis dengan kemampuannya menyerap sumber energi matahari untuk menghasilkan hidrogen dari air.



Gambar 7.4. Perbandingan nilai bakar hidrogen dengan energi lain
(Sumber: Demazel, 2008)

Secara real, cyanobacteria merupakan mikroalga yang paling berpotensi sebagai penghasil hidrogen jika dibandingkan alga hijau. Cyanobacteria membutuhkan udara, air, dan mineral garam dengan cahaya sebagai sumber energi dan kebutuhan nutrisi yang lebih simpel jika dibanding alga hijau.

5. Industri Mikroalga berbasis Bioenergi.

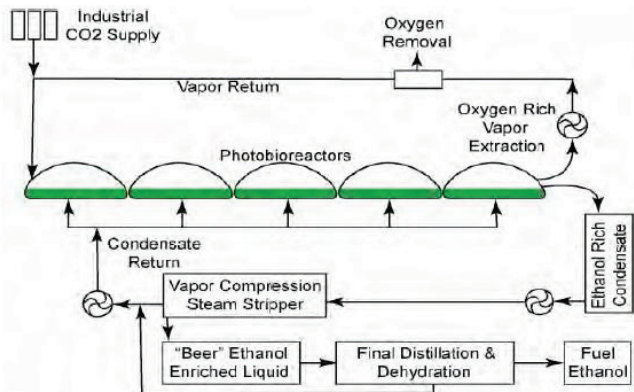
Algenol adalah produsen bioethanol dari mikroalga yang terletak di Texas dan Florida, Amerika Serikat. Hal yang menarik dari industri ini adalah bioethanol dihasilkan secara langsung oleh algae jenis cyanobacteria tanpa pemrosesan lanjut seperti pemanenan, pengeringan, atau fermentasi.

Cyanobacteria hybrid hidup dalam medium air laut, menyerap nutrisi, karbon dioksida, dan cahaya matahari. Hasil samping dari produksi ini berupa air tawar dan oksigen. Algenol mengklaim dapat memproduksi 6000 galon bioethanol per hektar per tahun dengan harga jual pergalon sekitar tiga dolar Amerika.

Namun demikian algenol masih dalam tahap produksi scale up dan masih menggandeng beberapa industri lain seperti Dow Chemical untuk mengembangkan industri

Mikroalga untuk Bioenergi

bioethanol dari mikroalga ini untuk lebih feasible. Hasil dari mikroalga yang diproses dengan klaim metode algaetech ini dapat diblending untuk keperluan DowChemical seperti pembuatan plastik dan sebagainya.



Gambar 7.5. proses produksi bioethanol pabrik Algenol Amerika
Sumber: www.Algenol.com.

Algae dikultivasi dalam bak tertutup oleh plastik polyethylene dengan tujuan untuk menangkap gas yang menguap. Bioethanol dihasilkan oleh algae hybrid, terdifusi keluar bersama dengan produk oksigen dan ditampung ketika malam hari saat terjadi proses kondensasi gas secara alami. bioethanol dipisahkan dari oksigen.



Gambar 7.6. Reaktor Mikroalga Algenol.
Sumber: <http://www.naplesnews.com>

Chapter 8

Mikroalga untuk Pengolahan Limbah

Mikroalga dapat dimanfaatkan pada untuk bidang teknologi yang lebih luas, tidak hanya sebagai penyedia produk biomassa dalam bentuk pangan atau energi. lebih dari itu, mikroalga dapat digunakan untuk pengolahan limbah organik cair, terutama ditujukan untuk menurunkan kandungan COD, nitrogen-posphor, pengurangan warna dan pengurangan logam berat.

Sistem pengolahan limbah secara biologis ini telah lama diterapkan. Beberapa metode yang dapat ditemui adalah dengan menggunakan jenis bakteri, jamur, dan mikroalga. Penggunaan fungi atau jamur pada pengolahan limbah cair pada umumnya digunakan untuk penyerapan warna. Eaton *et al* (1980) melakukan penelitian tentang dekolorisasi pada limbah cair industri keju menggunakan jamur white-rot dengan efisiensi antara 60-80%. Namun pada penelitian lanjutan yang dilakukan Gokcay dan Dilek (1994), dilaporkan bahwa penggunaan jamur untuk limbah tersebut belum layak jika ditinjau dari segi ekonomis karena jamur masih membutuhkan banyak substrat gula tambahan. Mikroorganisme lain yang masih memiliki potensi sebagai agen pengolah limbah organik adalah dengan menggunakan mikroalga. Lee *et al* (1978) melakukan penelitian pengolahan limbah cair industri kertas menggunakan mikroalga dengan efisiensi antara 50-80% tergantung pada masa inkubasinya. Aziz dan Ng (1988, 1993) juga melaporkan bahwa mikroalga dapat menurunkan kadar warna pada limbah industri tekstil dengan efisiensi mencapai 95%.

Dari segi ekonomi, mikroalga yang dibiakkan pada limbah dapat mengurangi biaya penambahan nutrisi sintesis jika diinginkan sebuah produk biomas tertentu, seperti pembiayaan *Spirulina* sp. pada limbah cair kelapa sawit untuk produk berprotein tinggi skala feed grade. Atau dengan mengganti strain mikroalga tertentu, akan didapatkan beberapa produk seperti lipid sebagai feedstock biodisel, dan sebagainya.

Secara umum, keunggulan penggunaan mikroalga untuk pengolahan limbah adalah:

1. Kebutuhan energi lebih rendah

Pengolahan limbah secara tradisional memiliki biaya operasional yang tinggi. Biasanya limbah industri diolah dengan cara aerasi untuk meningkatkan aktifitas bakteri aerob sehingga dapat mengkonsumsi komponen organik yang ada pada limbah. Total konsumsi energi untuk pengolahan limbah secara aerasi adalah 45-75% dari keseluruhan biaya operasional pabrik. Berbeda dengan mikroalga, mikroalga dapat berfotosintesis di dalam cairan limbah organik dan menghasilkan oksigen sebagai produk reaksinya sehingga dapat memberikan supply oksigen pada bakteri aerob untuk mempercepat penguraian.

Selain itu mikroalga juga dapat menyerap sumber nutrisi (nitrogen dan pospor) yang masih terkandung dalam limbah sehingga kebutuhan nutrisi tambahan masih dapat ditekan. Sebagai perbandingan, untuk menurunkan kadar BOD sebesar 1kg, dibutuhkan energi senilai 1kWh dalam proses aerasi, dan memberi imbas hasil karbon dioksida sebesar 1kg dari generator (Oswald, 2003). Bertolak belakang dengan mikroalga, dengan teknologi mikroalga untuk menurunkan 1kg BOD tidak membutuhkan energi input dan biomas yang dihasilkan juga dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik sebesar 1 kWh (Oswald, 2003).

2. Pengurangan emisi gas rumah kaca

Limbah cair organik merupakan limbah penghasil emisi gas rumah kaca karena dapat menghasilkan senyawa karbon dioksida dan metana. Kedua senyawa ini berpotensi sebagai ancaman pada atmosfer sehingga dapat meningkatkan aktifitas global warming. Indonesia merupakan negara agraris dengan banyak industri olahan hasil perkebunan seperti kelapa sawit, tebu dan sebagainya. Dengan menggunakan teknologi mikroalga, limbah cair yang mengandung sumber karbon dioksida ini dapat ditekan dan dihasilkan buangan berupa gas oksigen dengan reaksi fotosintesis.

3. Biaya operasi cenderung lebih murah dibanding metode konvensional

Penggunaan bakteri dan fungi cenderung lebih mahal karena ongkos penambahan nutrisi sintesis dan supply aerasi. Mikroalga dapat mengambil sumber nutrisi yang terdapat pada limbah cair dengan sedikit modifikasi perbandingan C:N:P nya, selain

itu pertumbuhannya relatif lebih cepat dan perkembangbiakannya cenderung lebih mudah.

4. *Mengurangi terbentuknya sludge*

Pada pengolahan cara tradisional, kendala umum yang dijumpai adalah terpenduknya sludge atau endapan dan terkadang semakin bermasalah apabila sludge terakumulasi. Teknologi mikroalga tidak menghasilkan sludge yang terakumulasi melainkan berupa biomas yang dapat dimanfaatkan kembali untuk beberapa keperluan seperti untuk makanan ternak, kompos, atau dirubah menjadi produk renewable energy. Selain itu teknologi pengolahan dengan mikroalga tidak membutuhkan banyak zat kimia sehingga hasil buangan ke lingkungan akan lebih aman.

5. *Menghasilkan biomas yang bermanfaat.*

Biomass yang dihasilkan dari pengolahan limbah dapat dimanfaatkan untuk tujuan lainnya. Hal ini berbeda apabila digunakan metode konvensional atau dengan menggunakan jamur. Sebagai contoh, C-BIORE UNDIP telah melaporkan penelitian terkini tentang pengolahan limbah cair kelapa sawit dan dihasilkan produk biomass berbasis protein tinggi yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan terkan. Selain itu potensi integrasi penggunaan limbah untuk media pertumbuhan alga masih tinggi, sehingga dimungkinkan dapat menghasilkan biomass berbasis energi dengan produktifitas yang lebih tinggi.

Pada bab ini akan dibahas beberapa contoh penggunaan mikroalga untuk diaplikasikan pada limbah cair organik, diantaranya:

1. Pengurangan kadar Nitrogen dan Pospbor

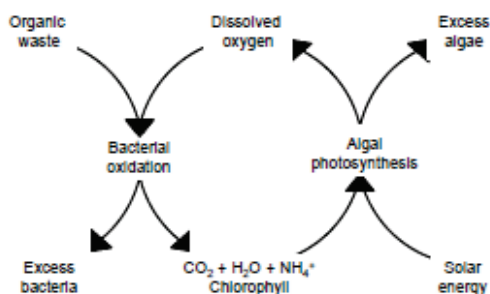
Limbah domestik maupun limbah industri pengolahan hasil perkebunan mengandung konsentrasi nutrisi baik dalam bentuk organik maupun anorganik. Jika limbah tersebut dilepas ke lingkungan seperti sungai atau danau, dapat menurunkan kadar oksigen, atau bahkan dapat menyebabkan eutrofikasi. Jika kadar oksigen dalam air menjadi sedikit, hal ini akan mempengaruhi kualitas air, mempengaruhi kehidupan biotik hewan yang hidup seperti ikan hingga ujungnya akan mengakibatkan krisis biodiversity.

Terdapat beberapa metode untuk mengolah limbah, seperti pengolahan konvensional. Pengolahan tahap awal dilakukan untuk menyaring partikel sedimentasi, tahap kedua

Mikroalga untuk Pengolahan Limbah

dilakukan untuk menurunkan kadar BOD dengan cara mengoksidasi komponen organik dan ammonium. Pada tahap kedua ini diterapkan beberapa metode seperti penambahan lumpur aktif, maupun cara aerasi. Mekanisme pengolahan ini dilakukan oleh protozoa dan bakteri. Bakteri mendegradasi senyawa organik, sedangkan protozoa berfungsi sebagai pemakan bakteri. Hasil akhirnya berupa konversi karbon dioksida dan air.

Teknologi pengolahan mikroalga untuk menurunkan kadar nitrogen dan phosphor pertama kali dikembangkan pada tahun 1950an di Kalifornia oleh William Oswald. Kinerja mikroalga dalam limbah adalah mengasimilasi nitrogen untuk pertumbuhan dan mensupply oksigen untuk pertumbuhan bakteri. Bakteri ini yang akan mendegradasi senyawa organik yang ada pada limbah. proses ini hampir sama penggunaannya dalam lumpur aktif.



Gambar 8.1. Simbiosis antara mikroalga dan bakteri pengurai

Meskipun limbah mengandung banyak nutrisi, mikroalga belum tentu dapat berkembang biak dengan baik. Pertumbuhan mikroalga secara umum ditentukan oleh cahaya dan sumber karbon.

Pengurangan kadar phosphor dalam medium limbah dapat dilakukan oleh mikroalga. Mikroalga membutuhkan phosphor untuk memproduksi phospholipid, ATP, dan asam nucleat. Alga mengasimilasi phosphor sebagai ortho phosphor anorganik, baik dalam bentuk $H_2PO_4^-$ or HPO_4^{2-} . Phosphor organik tersebut diubah menjadi ortho phosphor lewat proses fotosintesis pada permukaan sel, dan hal ini terjadi ketika ortho phosphor berada dalam supply yang sedikit. Meskipun demikian, mikroalga dapat mengasimilasi phosphor dalam keadaan eksek di mana pada nantinya akan disimpan dalam sel dalam bentuk polipospat. Secara umum kadar posphor dalam mikroalga berbeda beda tergantung dari

supply konsentrasinya. Seperti contoh kadar 1 mg P dalam 1 gram alga basis kering dengan supply konsentrasi 0.1mg P/l, atau supply 5mg P/l menghasilkan 100mg P dalam 1 gram alga basis kering. Rata – rata sel alga mengandung 13mg P pergram alga basis berat. Sedangkan alga yang dikultivasi dalam limbah yang mengandung kadar phosphor yang tinggi dapat menyerap phosphor sebanyak 10 - 20 mg P/l , lebih tinggi dari jumlah phosphor yang dibutuhkan sel untuk tumbuh.

Nitrogen merupakan unsur terpenting untuk mikroalga setelah sumber karbon, dan dapat menyumbang 10% dari total berat biomassa. Nitrogen banyak terdapat pada limbah organik dalam berbagai bentuk senyawa. Sedangkan mikroalga dapat menyerap senyawa nitrogen dalam bentuk ammonium (NH_4^+) dan nitrat (NO_3^-). Ammonium merupakan senyawa yang lebih disukai mikroalga. Akan tetapi kadar ammonium yang tinggi pada medium tidak dianjurkan karena dapat menyebabkan terjadinya racun. Sumber ammonium dan nitrat ini juga dapat diambil dari senyawa urea dan nitrit. Akan tetapi penggunaan nitrit dalam konsentrasi tinggi dapat mengganggu pembiakan alga (Larsdoter, 2006).

2. Pengurangan kadar warna

Kadar warna pada limbah dapat dikurangi dengan memanfaatkan teknologi mikroalga. Berdasarkan penelitian Lim *et al* (2010), limbah cair industri tekstil batik dapat diolah menggunakan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris*. Limbah tekstik memiliki karakteristik konsentrasi warna yang pekat, salinitas yang tinggi, temperatur tinggi, dan kadar COD yang tinggi. Limbah ini dapat menjadi racun apabila dibuang ke lingkungan. Lim melaporkan bahwa *Chlorella vulgaris* dapat mengurangi warna pada limbah dengan efisiensi sebesar 41.8 - 50.0%, pengurangan COD sebesar 38.3-62.3%, kadar $\text{NH}_4\text{-N}$ 44.4-45.1% dan $\text{PO}_4\text{-P}$ sebesar 33.1-33.3%. Kultivasi dilakukan dengan sistem HRAP (high rate algae ponds). Kultivasi menggunakan medium limbah yang ditambah nutrien sintetis dapat meningkatkan biomassa akan tetapi tidak dapat menaikkan efisiensi pengurangan warna atau polutan lain.

Penelitian lain tentang penyerapan warna pada limbah juga telah dilakukan oleh Dilek *et al* (1999) untuk aplikasi limbah cair industri kertas. Efisiensi penyerapan warna yang dihasilkan mencapai 80% dengan waktu inkubasi selama 30 hari dengan kondisi 24 jam pecahaya. Selain itu juga dilaporkan bahwa kandungan total carbon dan lignin dapat dikurangi secara signifikan.

Mikroalga untuk Pengolahan Limbah

Mekanisme penyerapan warna biasanya berdasarkan metode biosorpsi. Proses biosorpsi meliputi dua fase; fase padat (biosorbent, adsorbent, material biologis) dan fase cair (solven, biasa digunakan adalah air) yang mengandung spesies terlarut untuk menyerap warna (adsorbat, metal/pewarna). Proses penyerapan berlangsung hingga mencapai kesetimbangan antara jumlah penyerap (adsorbat) dan jumlah zat yang terserap. Adsorbent ini dapat diambil dari jenis mikroalga, dan plankton air tawar/ laut.

Biosorpsi memiliki keunggulan dibandingkan teknik tradisional (Volesky, 1999). Beberapa diantaranya adalah:

- a. Selektif : kinerja sorbent berbeda tergantung dari faktor, seperti: tipe biomasa, campuran pada larutan, treatment fisio-kimia.
- b. Regeneratif : biosorbent mikroalga dapat digunakan secara terus menerus
- c. Tidak menghasilkan sludge

3. Pengurangan kadar COD dan BOD

Kadar BOD dan COD pada limbah cair dapat dikurangi menggunakan teknologi mikroalga. BOD merupakan ukuran jumlah oksigen yang dibutuhkan bakteri untuk mengurai senyawa organik. Jika BOD yang terkandung dalam limbah terlalu tinggi, diindikasikan bahwa kandungan nitrat dan phosphor yang terkandung dalam media terlalu tinggi. Parameter yang hampir sama dengan BOD adalah COD. COD merupakan ukuran jumlah oksigen yang dibutuhkan air untuk dioksidasi.

Mikroalga dapat melakukan simbiosis dengan bakteri pengurai BOD yakni mikroalga memperoleh karbon dioksida dari bakteri pengurai, sementara bakteri memperoleh sumber oksigen dari mikroalga untuk tetap bertahan hidup dalam limbah organik. Selain itu mikroalga juga dapat menyerap kandungan nitrogen serta posphor dalam limbah sehingga secara tidak langsung dapat mengurangi kandungan COD dalam limbah.

Tabel 8.1. Contoh kandungan BOD dan padatan terlarut pada limbah cair:

Limbah	BOD (kg/ton produk)	Padatan terlarut total (kg/ton produk)
Limbah domestik	0.025 (kg/hari/orang)	0.022 (kg/hari/orang)
Industri rumahan	5.3	2.2
Industri yeast	125	18.7
Industri tepung dan glukosa	13.4	9.7
Industri pengalengan sayuran dan buah-buahan	12.5	4.3
Industri tekstil	30-314	55-196
Industri kertas	4-130	11.5-26
Industri minuman	2.5-220	1.3-257
Industri penyamakan	48-86	85-155

4. Pengurangan Kadar Logam

Teknologi mikrolaga untuk pemrosesan pengurangan kadar logam pada limbah memiliki metode yang hampir sama dengan metode pengurangan warna, yakni metode biosorpsi. Logam berat dalam limbah dapat menjadi masalah serius jika tidak ditangani dengan benar. Logam berat tidak dapat terdegradasi secara alami, untuk itu diperlukan penanganan khusus pada limbah sebelum dibuang ke lingkungan / alam.

Salah satu studi penelitian tentang penggunaan mikroalga untuk menangani logam berat dilakukan oleh Travieso *et al* (1992). Pada laporan tersebut disebutkan bahwa dengan menggunakan mikroalga yang diimobilisasi dengan Kappa-karaginan maupun poliurethan diperoleh hasil penyerapan logam seng, kromium, dan kuning yang cukup baik dengan seiring dengan lamanya waktu kultivasi

Penyerapan logam berat dapat juga dilakukan oleh sel mikroorganisme baik yang masih hidup maupun yang telah mati. Dengan penggunaan sel hidup terkadang dapat menimbulkan masalah seperti sel tidak dapat bertahan pada lingkungan yang terlalu beracun, membutuhkan nutrien dan terkadang malah dapat meningkatkan nilai BOD dan COD dalam limbah. Biasanya digunakan sel yang telah dikeringkan untuk menyerap logam pada

Mikroalga untuk Pengolahan Limbah

limbah, sel yang telah mati tidak membutuhkan perlakuan yang tinggi dan lebih murah. Lebih jauh lagi, biomas yang telah mati dapat diregenerasi dan digunakan kembali.

Sebagai contoh aplikasi penggunaan biomas kering *Chlorella vulgaris* dapat digunakan untuk penyerapan Pb pada *single stage batch reactor* dengan konsentrasi 25-200mg/L. fenomena penyerapan divariasi pada pH dan temperatur yang berbeda beda. Holand dan Volesky juga melaporkan bahwa penyerapan Pb dan Ni dapat dilakukan dengan penambahan biomas dari mikroalga air laut. Sedangkan penyerapan multi logam diteliti oleh peneliti lain dengan menggunakan brown algae, *Ascophyllum nodosum* dengan menggunakan dua jenis logam sekaligus (Cu+Zn), (Cu + Cd), atau (Zn + Cd). Pada penelitian tersebut dinyatakan bahwa multi logam dapat menghambat penyerapan logam lain. Penelitian lain tentang penyerapan Cr (IV) dapat menggunakan algae hijau *Spirogyra*. Sedangkan dengan algae *Sargassum* sp (Chromo phyta) digunakan untuk penyerapan ion Cu.

Variabel yang berpengaruh terhadap penyerapan logam di antaranya: level pH, kecepatan pengadukan, waktu penyerapan, suhu, kondisi kesetimbangan dan konsentrasi logam yang terdapat pada limbah. Sedangkan peneliti lain melaporkan bahwa temperatur tidak berpengaruh terhadap kecepatan penyerapan logam pada suhu 20-35⁰C. Namun demikian, pH adalah faktor yang paling dominan dalam proses.

5. Studi Kasus

Contoh studi kasus pengolahan limbah kelapa sawit menggunakan teknologi mikroalga. Limbah cair kelapa sawit memiliki karakteristik kadar COD dan BOD yang tinggi. Selain itu limbah cair tersebut memiliki potensi yang tinggi sebagai polutan air yang membahayakan lingkungan.

POME (palm oil mill effluent) memiliki kadar COD dan BOD tinggi, selain itu memiliki warna yang cenderung hitam keruh karena mengandung senyawa tanin dan padatan terlarut yang tinggi. Akan tetapi limbah ini masih mengandung unsur nitrogen dan phosphor yang tinggi sehingga berpotensi sebagai medium pertumbuhan algae.

Pengolahan limbah cair kelapa sawit pada umumnya menggunakan sistem open pond anaerob dengan menggunakan lumpur aktif dan diendapkan melalui empat kolam retensi. Namun hasil akhir limbah ini masih memiliki kadar COD dan BOD yang terkadang masih

belum memenuhi standar baku mutu limbah. POME yang sudah diolah dengan metode anaerob inilah yang cocok digunakan sebagai medium pertumbuhan mikroalga. Karakteristik limbah cair kelapa sawit (POME) tersaji sebagai berikut:

Tabel 8.2. Kandungan POME sebelum dan sesudah proses perombakan

Parameter	POME	POMED
pH	3.91-4.9	4-6
COD	83356	21227.5
TSS	49233.57	4798.5
Total N	1494.66	456
NH ₃ -N	50.42	34.2
PO ₄ -P	315.36	68.4
Rasio C:N:P	99.12: 4.74:1.0	116.37: 6.67:1.0

Sumber: Habib *et al*, 2003 & 1998

Berdasarkan penelitian dilaporkan bahwa limbah cair kelapa sawit yang sudah terdigestasi dapat digunakan sebanyak 20% konsentrasi volume sebagai medium berkembangkan mikroalga *Spirulina* sp, dengan penambahan nutrisi sintesis sebesar 0.6gr/l NaHCO₃, 25 ppm urea, dan 10 ppm TSP. Biomassa *Spirulina* dapat digunakan sebagai sumber protein untuk makanan ternak, dan effluent dari medium dapat menurunkan kadar COD dari 400 ppm menjadi 150ppm. Dapat juga digunakan penambahan POME sebesar 50% volume akan tetapi perkembangbiakan mikroalga menjadi terganggu karena warna pada POME dapat menghambat masuknya cahaya ke dalam medium sehingga dapat mengganggu reaksi fotosintesis mikroalga.

Penelitian lain tentang penggunaan mikroalga sebagai penghilang kadar N dan P pada POME telah dilakukan oleh Habib *et al* (2005) dengan menggunakan mikroalga *Chlorella vulgaris* sebagai makanan *Moina micrura*. Dari penelitian diperoleh hasil bahwa *Chlorella* dapat tumbuh baik pada konsentrasi 10%- 20% POMED dengan kandungan *Chlorella vulgaris* rata-rata paling tinggi mengandung karbohidrat, diikuti kandungan protein dan lipid.

Sedangkan mengenai medium POME (10% volume) mengalami penurunan seperti yang tersaji dalam Tabel 8.3. Pada penelitian tersebut, parameter-parameter limbah dapat berkurang karena keberadaan mikroalga *Chlorella vulgaris*. Berdasarkan literatur, mikroalga

Mikroalga untuk Pengolahan Limbah

membutuhkan sumber karbon, nitrogen, phosphor dan unsur mikronutrien lain seperti kalium, besi, magnesium, untuk melakukan proses fotosintesis. Mikroalga menyerap karbon, nitrogen, dan phosphor dengan rasio 56:9:1. Sedangkan kadar COD berkurang seiring aktivitas mikroalga yang menghasilkan oksigen dari proses fotosintesis. Oksigen yang dihasilkan ini akan digunakan oleh bakteri terlarut untuk mendegradasi senyawa organik yang ada dalam limbah.

Tabel 8.3. kandungan limbah cair kelapa sawit sebelum dan sesudah digunakan kultivasi mikroalga

Parameter	Sebelum digunakan sebagai medium	Setelah digunakan sebagai medium
pH	6.9	7.3
DO	3.8	3.7
COD	2179.5	180.6
Padatan total	975.7	75.4
Padatan terlarut total	524.5	32.2
Nitrogen total	118.6	10.6
Nitrogen amoniak	8.9	0.6
Ortho phosphor	17.9	1.5

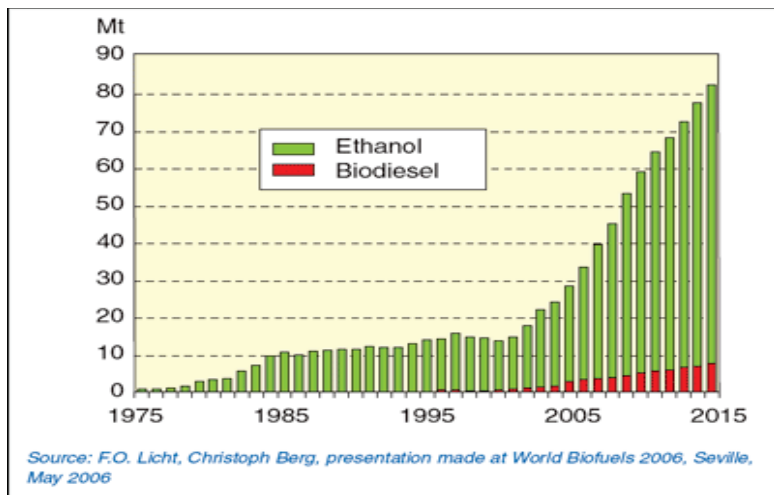
(Habib *et al*, 2005)

Chapter 9

Penutup

Trend teknologi mikroalga diyakini akan tetap eksis di masa mendatang, bahkan dapat bertahan sampai 25-30 tahun kedepan. Penerapan teknologi mikroalga termasuk luas dan tergolong dalam teknologi yang ramah lingkungan. Lebih j jauh lagi, teknologi mikroalga akan terus berkembang, bahkan teknologi transgenik mikroalga masih terbuka lebar bagi para peneliti untuk terus menggali potensi mikroalga, baik seagai sumber pangan, energi terbarukan, atau untuk pengolahan limbah.

Semakin banyaknya perusahaan yang bermunculan baru-baru ini mengindikasikan bahwa teknologi mikroalga memiliki potensi yang bagus. Sebagai contoh, beberapa perusahaan menghasilkan mikroalga yang difokuskan untuk energi, sementara ini masih didominasi oleh negara Amerika.



Gambar 9.1. kebutuhan biodiesel dan bioethanol dunia

Sumber: www.dupontelastomers.com

Penutup

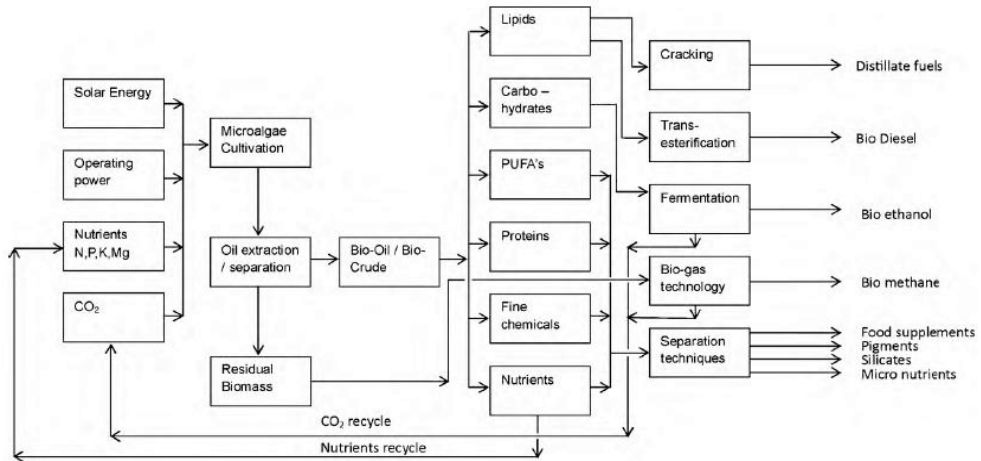
Tabel 9.1. Contoh Perusahaan pengembang Energi dari Mikroalga

Contoh perusahaan	Region	Fokus dan Strategi
LiveFuels, Kalifornia	USA	Fokus kepada konversi alga secara langsung bentuk biodisel atau etanol.
OriginOil Inc, Kalifornia	USA	Pengembangan teknologi mikroalga untuk petroleum.
Petrosun, Arizona	USA	Memulai produksi alga sejak tahun 2007 dengan fokus
Neste Oil, Helsinki	Eropa	Produksi alga 170.000 ton biodisel per tahun.
Ingrepro, Belanda	Eropa	Perusahaan bioteknologi yang berfokus pada produksi alga skala komersial
Seamibiotic, Israel	Medireania	Didirikain tahun 2003, produksi alga untuk kesehatan, fine chemical dan biofuel.
Aquaflow Selandia Baru	Binomic, Selandia Baru	Didirikan tahun 2007, fokus kepada kultivasi alga yang dibiakkan dalam limbah cair, purifikasi limbah. Target menjadi perusahaan dunia pertama yang memproduksi biofuel dari alga liar yang dipanen dari udara terbuka.
Solazyme, Inc. Francisco	San USA	Didirikan tahun 2005, perusahaan berbasis bioteknologi yang berfokus kepada produksi minyak alga, biofuel, dan <i>green chemical</i> . Operasional produksi dengan heterotrof, diklaim 100 kali lebih tinggi dibanding produksi secara alami.
Cellena, Hawaii	USA	Perusahaan patungan antara Biopetroleum dan Shell. Perusahaan tersebut mengumumkan dapat mengekstrak minyak dari alga tanpa bahan kimia atau pressing.

Sumber: Singh, dan Gu, 2010.

Ditinjau dari sisi biorefinery, mikroalga juga berpotensi tidak hanya sebagai energy stock yang menjanjikan di masa depan, namun lebih jauh lagi dapat pula dimanipulasi

sebagai reaktor mikro yang mampu menghasilkan beberapa jenis produk unggulan sesuai keinginan.



Gambar 9.2. Biorefinery Mikroalga

Sumber : Singh, dan Gu, 2010.

Dilihat dari skema biorefinery Gambar 9.2. terlihat bahwa mikroalga dapat memproduksi berbagai macam produk olahan sesuai keinginan. Akhir kata, seiring menuanya bumi ini, krisis yang timbul dalam kehidupan kita akan semakin terakumulasi dan kompleks, tidak hanya pangan, energi, tapi juga isu lingkungan seperti masalah limbah cair, bahkan global warming. Bisa jadi duapuluh tahun ke depan, hampir semua industri pengolah minyak dan gas yang mengambil sumber minyak bumi akan beralih fungsi menjadi perusahaan pengolah mikroalga, sebuah mikrobioreaktor yang mampu menghasilkan minyak bumi yang dapat diperbaharui. Bisa jadi di masa depan, efek rumah kaca dapat ditanggulangi dengan mikroalga.

1. Potensi Mikroalga selain Pangan dan Energi

Bicara tentang teknologi mikroalga, maka kita juga harus membicarakan bagian aspek ekonomis, sustainability, dan feasibility teknologi tersebut. Dalam beberapa bab sebelumnya, telah diterangkan mengenai beberapa Teknologi mikroalga yang memungkinkan dapat diterapkan dalam skala komersial selain pangan dan energi seperti untuk pengolahan limbah,

Penutup

dan sumber bioproduk lain. Dalam hal ini, spesifikasi teknologi yang memungkinkan untuk diterapkan dalam skala industri adalah sebagai berikut:

1.1. Mikroalga sebagai Pembersih Udara

Tidak dipungkiri bahwa mikroalga dapat tumbuh dengan cepat jika berada pada kondisi optimum. Hal ini yang memungkinkan mikroalga sebagai salah satu sel utama yang dapat menyerap gas karbon dioksida dalam jumlah yang banyak. Pada Gambar 9.3. terlihat bagaimana konstruksi gedung yang diintegrasikan dengan mikroalga untuk menyerap gas karbon dioksida di perkotaan. Lebih jauh lagi teknologi mikroalga dimungkinkan untuk diterapkan dalam produksi oksigen bersih. Gagasan menarik ini juga mungkin untuk diterapkan dalam ruangan bagi perokok untuk membersihkan asap rokok dengan menjerapnya menggunakan mikroalga.

Dalam skala industri, cerobong asap penghasil polusi udara, dapat dibersihkan dengan memanfaatkan mikroalga sebagai *agen pembersih asap CO₂* sehingga pada nantinya efek rumah kaca dapat diturunkan dengan bertahap.

Dalam skala yang lebih spesifik, mikroalga dapat digunakan untuk menangkap gas karbon dioksida dalam teknologi produksi biogas, di mana selama ini biaya pemurnian methana dan karbon dioksida dalam biogas masih tergolong mahal.

1.2. Mikroalga sebagai Sumber Biosemen

Mikroalga sebagai sumber biosemen bukan hal mustahil. Selama ini biaya pembuatan semen masih mahal mengingat semen yang diproses harus menggunakan suhu tinggi berada pada kisaran 1000⁰C. Dessy, *et al.* (2011) memberikan paparan mengenai teknologi mikroalga untuk menghasilkan biosemen, di mana pada nantinya diharapkan konsumsi energi lebih rendah, dan emisi yang dihasilkan juga tergolong rendah. Konsep mikroalga ini mengacu pada terbentuknya kalsium karbonat (CaCO₃) dari reaksi mikroalga.

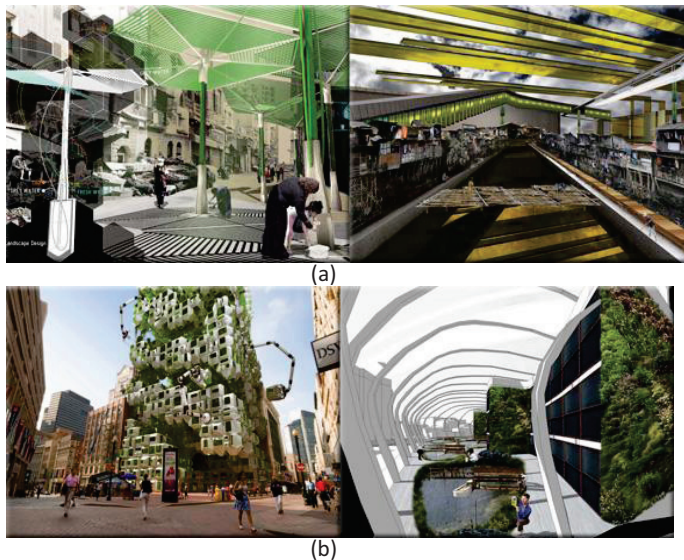
1.3. Mikroalga sebagai Pupuk Organik

Mikroalga mengandung sumber karbon nitrogen dan phosphor. Hal ini yang memungkinkan dapat meningkatkan unsur hara dalam tanah apabila digunakan sebagai sumber pupuk organik. Hal yang menarik dari teknologi mikroalga ini adalah dapat dimanfaatkannya strain mikroalga jenis tertentu dalam limbah pupuk

industri pupuk seperti urea-amonia untuk menyerap senyawa nitrit dan senyawa kimia lain yang tidak dapat direcovery dengan teknologi pada umumnya, sehingga pada nantinya blending antara pupuk sintetis dan organik.

2. Masa Depan Teknologi Mikroalga

Teknologi mikroalga berkembang seiring dengan naiknya dampak global warming, kebutuhan energi, pangan, dan air bersih di dunia. Beberapa tahun belakangan ini banyak industri berbasis mikroalga yang mulai bermunculan untuk menghasilkan produk atau memanfaatkan teknologi mikroalga untuk kepentingan tertentu. Sebagai contoh Algaetech Malaysia, Solazyme Amerika, Algenol Amerika, Neoalgae Indonesia, NREL Belanda, dan beberapa industri berbasis pangan, energi atau industri jasa pengolah limbah dengan memanfaatkan teknologi mikroalgae seperti Tirtatech Engineering, selain dapat mengolah air limbah, biomass yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan lain seperti contoh pengolahan limbah cair kelapa sawit, biomassa yang dihasilkan dapat digunakan untuk pangan.



Gambar 9.3. Integrasi gedung perkotaan menggunakan teknologi mikroalga (a) desain restore: Symbiosis within a community. By ArquitectonicaGEO: C. Zavesky, R. Conover et al. Project Bio-Slum, Jakarta, Indonesia. oleh Tolga Hazan. (b) Eco-Pod: Pre-Cycled Modular Algae Bioreactor, Boston. Squared Design Lab: & Höweler+Yoon. Urban Algae Bio-Fuel Production and Eco-Community in Kosovo. By Arben & Diana Jashari.

(Sumber: www.algaeindustrymagazine.com)

Penutup

Dengan memanfaatkan mikroalga, maka emisi gas rumah kaca dapat dikurangi, karena secara umum mikroalga membutuhkan sumber karbon dioksida untuk berkembang biak. Di samping itu, biomas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk kepentingan lainnya.

Harmonisasi ini pada nantinya dapat diwujudkan dalam desain gedung, perkantoran, maupun perumahan di berbagai negara. Beberapa desainer menggambarkan teknologi mikroalga yang diintegrasikan dalam desain gedung “green building zero emission.”

Harmonisasi masa depan teknologi mikroalga memungkinkan diterapkan dalam wilayah perkantoran yang ramai, wilayah perumahan padat penduduk, atau wilayah perindustrian yang menghasilkan gas karbon dioksida dalam jumlah tinggi. Dalam hal ini biomas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai sumber penerangan, dan sebagainya.

Daftar Pustaka

- Aziz MA, Ng WJ.1988.Algae pond treatment of industrial wastewaters. *Proc 2nd International Association on Water Pollution Research and Control*.Asian Conference on Water Pollution Control pp: 519-525
- Aziz MA, Ng WJ.1993.Industrial wastewater treatment using an activated algae-reactor. *Wat Sci Tech.* 28(7), 71-76
- Badwy, TM, Ibrahim, EM, and Zeinhom, MM. 2008. Partial replacement of fish meal with dried microalgae (*Chlorella spp* and *Scenedesmus sp*) in Nile Tilapia (*Oreochromis Niloticus*) Diets. *8th international Symposium on Tilapia in aquaculture*. Pp: 801-811
- Balder, HF., Vogel, J., Jansen, MC., Weijenberg, MP., Van den Brandt, PA., Westenbrink, S., Van der Meer, R., dan Goldbohm, RA. 2006. Heme and chlorophyll intake and risk of colorectal cancer in the Netherlands cohort study. *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention*.15,717-725.
- Bare, WFR. Jones, NB. and Middlebrooks EJ.1975. Algae removal USING dissolved air flotation. *J. Water Poll. Control Fed.* 47, 153-169.
- Becker E.W. 1994.Oil production. In: Baddiley, *et al.*, editors. *Microalgae: biotechnology and microbiology*. Cambridge University Press;
- Becker, E.W. 2007. Micro-algae as source of protein. *Biotechnology Advances* .25,207-210.
- Becker, W.E., Venkataraman L.V., Khanun P.M.1976. Effect of different methods of processing on the protein efficiency ratio of the green algal *Scenedesmus acutus*. *duration Report Int.* 14(3).
- Bernhardt H, dan Clasen J. 1991 Flocculation of micro-organisms. *Aqua- J Water Supply: Res Technol*.40,76–87.
- Best, Ben. Phytochemicals as Nutraceuticals. diakses tgl 2 April 2012 <http://www.benbest.com/nutraceut/phytochemicals.html#carotenoids>
- Bitton, G., Mitchell, R. De Latour, C., Maxwell, E.1974. Phosphate Removal by magnetic filtration, *Water, Res.* 8, 107.
- Bhaskar PV, Bhosle NB. 2005.Microbial extracellular polymeric substances in marine biogeochemical processes. *Curr Sci*.88,45–53.

Daftar Pustaka

- Borowitzka, MA. 1996. Closed algal photobioreactor: design consideration for large-scale systems. *Journal of Marine Biotechnology*. 4,185-191.
- Borowitzka, Michael. A. (2011). Biotechnological and Environmental Application of Microalgae. Diakses tanggal 1 April 2012. <http://www.bsb.murdoch.edu.au/groups/beam/BEAMHOME.html>
- Brennan, Liam dan Owende, Philip. 2009. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Brouers M, Hall DO. 1986 Ammonia and hydrogen production by immobilized cyanobacteria. *J Biotechnol*. 3,307–321.
- Brune DE, Collier JA, Schwedler TE, Eversole AG. 2007. Controlled eutrophication system and process. United States patent US 7258790.
- Bugbee GJ, Frink CR. 1985. Alum sludge as a soil amendment: effects on soil properties and plant growth. New Haven, (CT): The Connecticut Agricultural Experiment Station;. Nov. Bulletin: 827.
- Cabirol N, Barragán EJ, Durán A, Noyola A. 2003. Effect of aluminium and sulphate on anaerobic digestion of sludge from wastewater enhanced primary treatment. *Water Sci Technol*.48,235–40.
- Canizares RO., Dominguez AR., Rivas L., Montes MC., Travieso L., Benitez F.1993. Free and immobilized cultures of *Spirulina maxima* of swine waste treatment. *Biotechnol Lett*. 15, 321–326.
- Cardozo, AP., Bersano, JGF. dan Amaral, WJA. 2007. Composition, Density and Biomass of Zooplankton in Culture Ponds of *Litopenaeus Vannamei* (Decapoda:Penaidae) in Southern Brazil. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*. 11(1), 13-20.
- Chaumont, Daniel. 1993. Biotechnology of algal biomass production: A Review of Systems for Outdoor Mass Culture. *Journal of Applied Phycology*. 5,593-604.
- Chevalier P, and De la Noüe J. 1985. Wastewater nutrient removal with microalgae immobilized in carrageenan. *Enzyme Microb Technol*.7,621–624.
- Chisti, Yusuf.2007. Biodiesel from Microalgae. *Biotechnology Advances*.25,294-306
- Choochote, W., Paiboonsin, K., Ruangpan, S., Phauruang, A.2010. Effects of Urea and Light Intensity on the Growth of *Chlorella* sp. *The 8th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology*.

- Contreras. 1981. A highly efficient electrolytic method for microalgae flocculation from aqueous cultures. *Biotech. Bioengineer.* 23, 1165-1168.
- Danquah MK, Ang L, Uduman N, Moheimani N, Forde GM. 2009. Dewatering of microalgal culture for biodiesel production: exploring polymer flocculation and tangential flow filtration. *J Chem Technol Biotechnol.* 84, 1078-83.
- de- Bashan, LE., Hernnandez., JP., Morey, T., and Bashan, Y. 2004. Microalgae growth-promoting bacteria as “helpers” for microalgae: a novel approach for removing ammonium and phosphorus from municipal wastewater. *Water Res.* 38, 466-474.
- Demazel, Delphine. 2008. Use of Algae as an Energy. Source. http://www.folkecenter.net/mediafiles/folkecenter/pdf/Report_algae.pdf. diakses tanggal 1 Februari 2012.
- Dessy A., Handayani, NA, dan Hadiyanto. 2011. An overview of biocement production from microalgae. *Internat. J. Sci. and Eng. Vol. 2 (2)*, 30-33.
- Dilek, FB., Taplamachoglu, HM., Tarlan, E. 1999. Colour and AOX removal from pulping effluents by algae. *Appl Microbiotechnol.* 52, 585-591.
- Divakaran R, Sivasankara Pillai VN. 2002. Flocculation of algae using chitosan. *J Appl Phycol* 14, 419-22.
- Douskova, I., Doucha, J., Machat, J., Novak, P., Umysova, D., Vitova, M., dan Zachleder, V. 2008. Microalgae as a means for converting flue gas CO₂ into biomass with a high content of starch. *Bioenergy: challenges and opportunities international conference and exhibition on bioenergy*. Guimarães, Portugal, April 6th-9th
- Dufosse, L., Galaup, P., Yaron, Anina., Shoshana, M.A., Blanc, P., Murthy, KNC., dan Ravishankar, G.A. 2005. Microorganisms and microalgae as source of pigments for food use: a scientific oddity or an industrial reality?. *Trend in Food Science & Technology.* 16, 389-406.
- Durmaz, Yasar. 2007. Vitamin E (α -tocopherol) production by marine microalgae *Nannochloropsis oculata* (Eustigmatophyceae) in nitrogen limitation. *Aquaculture.* 272, 717-722.
- Eaton D, Chang H.M., and Kirk, T.K. 1980. Fungal decolorization of kraft bleach effluents. *TAPPI.* 63, 103-106.
- Ferruzi, M.G., & Blakeslee, J. 2007. Digestion, absorption, and cancer preventive activity of dietary chlorophyll derivatives. *Nutrition Research.* 27, 1-12.

Daftar Pustaka

- Fogg, GE. & Thake, B. 1987. *Algae cultures and Phytoplankton Ecology*, 3rd ed. Wisconsin, University Wisconsin Press, Madison.
- Friedman AA, Peaks DA, Nichols RL. 1977. Algae separation from oxidation pond effluents. *J Water Pollut Control Fed.*49,111-9.
- Friedman, AA., Peaks, DA. & Nichols, RL.1977. Algae separation from oxidation pond effluents. *J. Water Poll. Control. Fed.* 49, 111-119.
- Garbisu C, Hall DO, Serra JL. 1993 Removal of phosphate by foam-immobilized *Phormidium laminosum*. *J Chem Technol Biotechnol.* 57, 181-189.
- Gil JM., & Serra JL. 1993 Nitrate removal by immobilized cells of *Phormidium uncinatum* in batch culture and a continuous-flow photobioreactor. *Appl Microbiol Biotechnol* .39, 782-787.
- Ginzberg, A., Cohen, M., Sod-Moriah, U., Shany, S., Rosenshtrauch, A., and Arad, S. 2000. Chickens fed with biomass of the red microalgae *Porphyridium* sp. have reduced blood cholesterol level and modified fatty acid composition in egg yolk. *Journal of Applied Phycology.* 12, 325-330.
- Gokcay CF., dan Dilek, FB. 1994. Treatment of effluents from hemphased pulp and paper industry II. Biological treatability of pulping effluents. *Water Sci. Technol.* 29 (9), 161-163
- Goldman, JC., and Carpenter, EJ. 1974. A Kinetic Approach to the Effect of Temperature on Algal Growth. *Limnol. Oceanogr.*19, 756-766.
- Gouveia, Luisa. 2011. *Microalgae as a Feedstock for Biofuels*. Springer brief in microbiology.
- Graneli, Enda., & Salomon, PS.2010. Factor Influenceing Allelopathy And Toxicity in *Prymnesium parvum*. *Journal of The American Water Resources Association.*46,1
- Greenwell HC, Laurens LML, Shields RJ, Lovitt RW, FlynnKJ.2010. Placingmicroalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. *J R Soc Interface.*7,703-26.
- Guedes, AC., Amaro, HM., & Malcata, FX.2011. Microalgae as Sources of Carotenoids. *Mar Drugs.* (9), 625-644
- Guisan, Jose.M. 2006. *Immobilization of Enzymes and Cells*. Humana Press, Totowa: New Jersey.373-391.

- Habib, M.A.B., Parvin, M., Huntington, T.C., Hasan, M.R. 2008. *A Review On Culture, Production and Use of Spirulina as Food for Humans and Feeds for Domestic Animals and Fish*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISSN 2070-6065.
- Habib, MAB., Yusoff, FM., Phang, SM., Kamarudin, MS. and Mohamed, S. 1998. Chemical characteristics and essential nutrients of agro industrial effluents in Malaysia. *Asian Fisheries Science* .11(3), 279-286.
- Habib, MAB., Yusoff, FM., Phang, SM., Kamarudin, MS. and Mohamed, S. 2003. Growth and Nutritional Values of *Molina micrura* Fed on *Chlorella vulgaris* Grown in Digested Palm Oil Mill Effluent. *Asian Fisheries Science* .16, 107-119.
- Hadiyanto, M.M.A.Nur and G.D. Hartanto. 2012a. Cultivation of *Chlorella* sp. as Biofuel Sources in Palm Oil Mill Effluent (POME). *Int. Journal of Renewable Energy Development* 1 (2) 2012: 45-49
- Hadiyanto; Widayat; Kumoro, Andri Cahyo. 2012b. Potency of Microalgae as Biodiesel Source in Indonesia. *International Journal of Renewable Energy Development* . 1(1), 23-27
- Hadiyanto, Sumarno, Rufaida Nur Rostika and Noer Abyor Handayani. 2012c. Biofixation of Carbon dioxide by *Chlamydomonas* sp. in a Tubular Photobioreactor. *International Journal of Renewable Energy Development* . 1(1), 10-14
- Hadiyanto dan Marcelinus Christwardana. 2012d. APLIKASI FITOREMEDIASI LIMBAH JAMU DAN PEMANFAATANNYA UNTUK PRODUKSI PROTEIN. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 10(1): 129-134
- Noer Abyor Handayani, and Dessy Ariyanti, and H. Hadiyanto .2011. Potential Production of Polyunsaturated Fatty Acids from Microalgae. *International Journal of Science and Engineering*, 2 (1). pp. 13-16. ISSN 20865023
- Harun, R., dan Danquah, MK. 2011 Influence of acid pre-treatment on microalgael biomass for ethanol production. *Process Biochem.* 46,304–309
- Harun, R., Danquah, MK., dan Forde, G.M. 2010a. Microbial biomass as a fermentation feedstock for bioethanol production. *J Chem Technol Biotechnol* 85:199–203
- Harun, R., Singh, M., Forde, G.M., Danquah, MK., 2010b. Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14, 1037-1047.

Daftar Pustaka

- He, H., Feng, C., Huashou, L., Wenzhou, X., Yongjun, L., dan Yue, J. 2010. Effect of iron on growth, biochemical composition and paralytic shellfish poisoning toxins production of *Alexandrium tamarense*. *Harmful Algae* .9,98–104.
- Hiller UW., Park RB. 1969 Photosynthetic light reactions in chemically fixed *Anacystis nidulans*, *Chlorella pyrenoidosa* and *Phormidium cruentum*. *Physiol Plant*. 44, 535–539.
- Hirano, A., Ryohei, U., Shin H., dan Yasuyuki, O. 1997. CO₂ fixation and ethanol production with microalgael photosynthesis and intracellular anaerobic fermentation. *Energy*. 22(2–3),137–42.
- Hoffmann JP. 1998. Wastewater treatment with suspended and nonsuspended algae. *J Phycol*.34,757–63.
- Jeanfils J, Thomas D. 1986 Culture and nitrite uptake in immobilized *Scenedesmus obliquus*. *Appl Microbiol Biotechnol* .24, 417–422.
- Jeon MW, Ali MB, Hahn EJ, Paek KY.2005.Effect of photon flux density on the morphology, photosynthesis, and growth of a CAM orchid, *Doritaenopsis* during post-micropropagation acclimatization. *Plant Growth Regul* .45,139–147
- Kabinawa, I.N.K. 2006. *Spirulina; Ganggang Penggempur Aneka Penyakit*.Penerbit Agromania. Jakarta.
- Kong, QX, Li, L., Martinez, B., Chen, P., and Ruan, R.2010.Culture of Microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* in Wastewater for Biomass Feedstock Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 160, 9-18,
- Koopman, B.L. and Lincoln E.P.1983.Autoflotation of algae from high rate pond effluent, *Agricul. Wastes*.5,231-246.
- Kulpys, J., Paulauskas, E., Pilipavičius, V., dan Stankevičius, R. 2009. Influence of cyanobacteria *Arthospira* (*Spirulina*) *platensis* biomass additives towards the body condition of lactation cows and biochemical milk indexes. *Agronomy Research* .7 (2), 823-835.
- Kumar H, Yadava P, Gaur J. 1981.Electrical flocculation of the unicellular green alga *Chlorella vulgaris* *Beijerinck*. *Aquat Bot*.11,187–95.
- Lam, MK., & Lee KT.2011. Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): Win–win strategies toward better environmental protection. *Journal of Biotechnology Advances* 29.

- Lannan, Eric. 2011. *Scale-up of Algae Growth System to Cleanse Wastewater and Produce Oils for Biodiesel Production*. Master Thesis. Rochester Institute of Technology. Rochester, New York.
- Larsdotter, Karin. 2006. *Microalgae for phosphorus removal from wastewater in a Nordic climate*. A doctoral thesis from the School of Biotechnology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. ISBN: 91-7178-288-5
- Lavoie A, de la Noüe J. 1987. Harvesting of *Scenedesmus obliquus* in wastewaters: auto or bioflocculation? *Biotechnol Bioeng*;30:852–9.
- Lee AK, Lewis DM, Ashman PJ. 2008. Microbial flocculation, a potentially low-cost harvesting technique for marine microalgae for the production of biodiesel. *J Appl Phycol*.21,559–67.
- Lee, EGH., Mueller, JC., dan Walden CC. 1978. Decolorization of bleached kraft mill effluents by algae. *TAPPI*. 61(7), 59-62
- Lee, YK. 2001. Microalgal mass culture systems and methods: Their limitation and potential. *Journal of applied phycology*. 13, 307-315.
- Leon R, Galvan F. 1995 Glycerol photoproduction by free and calcium-entrapped cells of *Chlamydomonas reinhardtii*. *J Biotechnol* .42, 61–67.
- Liang Y, Beardall J, Heraud P. 2006. Changes in growth, chlorophyll fluorescence and fatty acid composition with culture age in batch cultures of *Phaeodactylum tricornutum* and *Chaetoceros muelleri* (Bacillariophyceae). *Bot Mar*. 49,165–173.
- Lim, SL., Chu, WL., Phang, SM. 2010. Use of *Chlorella vulgaris* for bioremediation of textile wastewater. *Journal of Bioresource Technology*. 101,7314–7322.
- Mallick N, Rai LC. 1994. Removal of inorganic ions from wastewater by immobilized microalgae. *World J Microbiol Biotechnol* .10, 439–443.
- Mallick, Nirupama. 2002. Biotechnological Potential of Immobilized algae for wastewater N,P, and Metal Removal: A Review. *Biometals* .15, 377-390.
- Matsumoto, M., Hiroko, Y., Nobukazu, S., Hiroshi, O., & Tadashi, M .2003. Saccharification of marine microalgae using marine bacteria for ethanol production. *Appl Bioch Biotech*
- McGarry, MG. 1970. Algae flocculation with aluminium sulphate and polyelectrolytes. *J. Water. Poll. Control Fed*. 42,191

Daftar Pustaka

- Megharaj M, Pearson HW, Venkateswarlu K. 1992 Removal of nitrogen and phosphorus by immobilized cells of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus bijugatus* isolated from soil. *Enzyme Microb Technol.*14, 656–658.
- Mercer, Paula., dan Armenta, Robert. R. 2011. Development in Oil Extraction from Microalgae: Review Article. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*
- Mohn H.F. 1978. Improved Technologies for Harvesting and Processing of Microalgae and their impact on production costs. *Arch. Hydrobiol. Bech. Ergebn. Lemnol.* Vol. 11 p. 228.
- Moraine R., Shelef G., Sandbank E., Bar Moshe Z. & Schwarbard L. 1980.Recovery of sewage born algae: Flocculation and centrifugation techniques. In *Algae Biomass*, G. Shelef & C.J. Solder (eds) Elsevier/ North Holland
- Mulbry W, Kondrad S, Buyer J. 2008.Treatment of dairy and swine manure effluents using freshwater algae: fatty acid content and composition of algal biomass at different manure loading rates. *J Appl Phycol.*20,1079–85.
- Mujumdar, S.A. 2004. *Guide to Industrial drying: principles, equipment, and new development.*IWSID, Mumbay, India.
- Mussnug, J.H., Klassen, V., Schlüter, A., dan Kruse, O. 2010. Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept. *J Biotechnol* .150,51–56.
- Nurdogan Y, Oswald WJ. 1995.Enhanced nutrient removal in high-rate ponds. *Water Sci Technol* .31,33–43.
- Oh HM, Lee SJ, Park MH, Kim HS, Kim HC, Yoon JH. 2001. Harvesting of *Chlorella vulgaris* using a bioflocculant from *Paenibacillus* sp. AM49. *Biotechnol Lett.*23,1229–34.
- Olson, J. A., dan Krinsky, N. I. 1995. Introduction. The colorful, fascinating world of the carotenoids: Important physiologic modulators. *FASEB Journal.* 9, 1547–1550.
- Oswald, WJ., 2003.My sixty years in applied algology. *Journal of Applied Phycology.* 15, 99-106.
- Pal S, Mal D, Singh R. 2005.Cationic starch: an effective flocculating agent. *Carbohydr Polym.*59,417–23.
- Panggabean, LMG. 1998. Microalgae: alternatif pangan dan bahan industri di masa mendatang. *Oseana*, Vol XXIII, nomor 1, 1998: 19-26. ISSN 0216-1877.

- Park RB, Kelly J, Drury S, Sauer K. 1966 The Hill reaction of chloroplasts isolated from glutaryldehyde-fixed spinach leaves. *Proc Natl Acad Sci USA* .55, 1056–1062.
- Passow U, Alldredge AL. 1995. Aggregation of a diatom bloom in a mesocosm: the role of transparent exopolymer particles (TEP). *Deep Sea Res Part II: Top Stud Oceanogr.*42,99–109.
- Potvin, Gabriel dan Zhang, Zisheng. 2010. Strategies for high level recombinant protein expression in transgenic microalgae: A review. *Biotechnology Advance* 28, 910-918.
- Prakash, S., dan Bhimba, B.V.2004. Pharmaceutical development of novel microalgael comounds for Mdr *Mycobacterium tuberculosis*. *Natural product radiance* .4 (4)., 264-269
- Probert, Ian dan Klass, Christine. 1999. Microalgae Culturing. Practical Notes from the Culturing Short Course held in Caen. Diakses tanggal 2 April 2012. <http://ina.tmsoc.org/CODENET/culturenotes.htm>
- Rippka, R., Deruelles, J., Waterbury, J., Herdman, M., and Stanier, R. 1979. Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria. *J. Gen. Microbiol* . 111, 1-61
- Robinson PK, Reeve JO, Goulding KH. 1989 Phosphorus uptake kinetics of immobilized *Chlorella* in batch and continuous-flow culture. *Enzyme Microb Technol* 11, 590–596.
- Robinson PK. 1998 Immobilized algal technology for wastewater treatment purposes. In: Wong Y-S, Tam NFY, eds. *Wastewater Treatment with Algae*. Berlin: Springer-Verlag & Landes Bioscience; 1–16.
- Sandbank E., Shelef G. and Wachs A.M. 1974.Improved electroflotation for the removal of suspended solids from algae pond effluents. *Water Res* . 8, 587- 592
- Sandbank E., Shelef G. and Wachs AM. 1974.Improved electroflotation for the removal of suspended solids from algae pond effluents. *Water Res* . 8, 587- 592
- Santos-Rosa F, Galvan F, Vega JM. 1989. Photoproduction of ammonium by *Chlamydomonas reinhardtii* cells immobilized in barium alginate: A reactor feasibility study. *Appl Microbiol Biotechnol* 32, 285–290.
- Sawayama S, Rao KK, Hall DO. 1998. Nitrate and phosphate removal from water by *Phormidium laminosum* immobilized on hallow fibres in a photobioreactor. *Appl Microbiol Biotechnol* .49, 463–468.

Daftar Pustaka

- Shelef G., Sukenik A, dan Green M. 1984. Microalgae harvesting and Processing: A Literature Review. Technion Research and Development Foundation Ltd. Israel.
- Shen Y, Yuan W, Pei ZJ, Wu Q, Mao E. 2009. Microalgae mass production methods. *Trans ASABE*.52,1275–87.
- Sialve, B., Bernet, N., dan Bernard, O. 2009. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgae biodiesel sustainable. *Biotechnol Adv* 27,409–416
- Singh, Jasvinder dan Gu, Sai. 2010. Commercialization potential of microalgae for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Review*.14:2596-2610.
- Staats N, De Winder B, Stal L, Mur L.1999. Isolation and characterization of extracellular polysaccharides from the epipelagic diatoms *Cylindrotheca closterium* and *Navicula salinarum*. *Eur J Phycol*.34,161–169.
- Stein, J. 1973. (Ed.) *Handbook of Phycological methods. Culture methods and growth measurements*. Cambridge University Press. 448 pp.
- Sueoka, N., Chiang, K. S. and Kates, J. R. 1967. Deoxyribonucleic acid replication in meiosis of *Chlamydomonas reinhardtii*. I. Isotopic transfer experiments with a strain producing eight zoospores. *J. Mol. Biol.* 25, 44-67.
- Sukenik A, Shelef G. 1984. Algal autoflocculation-verification and proposed mechanism. *Biotechnol Bioeng*.26,142–7.
- Svarovsky L. 1979. Advanced in solid-liquid separation II sedimentation, centrifugation and flotation. *Chemical Engineering* July 16,43-105
- Tam NFY, Wong YS. 2000. Effect of immobilized microalgae bead concentrations on wastewater nutrient removal. *Environ Pollution*. 107, 145–151.
- Travieso L, Benitez F, Dupeiron R. 1992. Sewage treatment using immobilized microalgae. *Bioresource Technol*. 40, 183–187.
- Tredici MR. 2004. Mass production of microalgae: photobioreactors. In: *Microalgae culture*. (Richmon, A.ed) Blackwell science Ltd, oxford, 178-214.
- Uduman N, Qi Y, Danquah MK, Forde GM, Hoadley A. 2010. Dewatering of microalgae cultures: a major bottleneck to algae-based fuels. *J Renew Sustain Energy*.2,012701.
- Ugwu, CU., Aoyagi, H., dan Uchiyama, H. 2008. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*. 99, 4021-4028.
- Vilchez C, Vega JM. 1994. Nitrate uptake by *Chlamydomonas reinhardtii* cells immobilized in calcium alginate. *Appl Microbiol Biotechnol* 41, 137–141.

- Vilchez C, Vega JM. 1995 Nitrate uptake by immobilized *Chlamydomonas reinhardtii* cells growing in airlift reactors. *Enzyme Microb Technol* 17, 386–390.
- Viviers, JMP. and Briers, JS.1982.Harvesting of algae grown on sewage. *Water SA*. 8,178-186
- Volesky, B. 1999. Biosorption for the next century , *Biohydrometallurgy and the Environment Toward the Mining of the 21st Century*, Internat. Biohydrometallurgy Symposium Proceedings, 1999, volume B, Ballester, A. & Amils, R. (eds.) Elsevier Sciences, Amsterdam, The Netherlands : pp.161-170.
- Vonshak A, Richmond A. 1988. Mass production of the blue-green alga *Spirulina*: an overview. *Biomass*.15(4),233–47.
- Welssman, JC, dan Goebel, RP.1987. Design and Analysis of Microalgae Open Pond Systems for the Purposes of Producing Fuels.Solar Research Energy Institute, USA.
- Widjaja, Arief., Chien, Chou-Chang, and Ju, Yi-Hsu. 2009. Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. *Jour of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* .40,13–20
- Wijanarko, Anondho. 2011. Effect of the Presence of Subtitued Urea and also Ammonia as Nitrogen Source in Cultivated Medium on *Chlorella*'s Lipid Content. Department of Chemical Engineering Universitas Indonesia. Unpublished Journal.
- Wolfstein K, Stal LJ. 2002.Production of extracellular polymeric substances (EPS) by benthic diatoms: effect of irradiance and temperature. *Mar Ecol Prog Ser*.236,13–22.
- Wood A. 1987. A simple wastewater treatment system incorporating the selective cultivation of a filamentous algae. *Water Sci Technol*.19,1251–4.
- www.algaeorbiofuels.com Diakses tanggal 5 Agustus 2012
- www.algaeindustrymagazine.com Diakses tanggal 10 September 2012
- www.algaestrain.com Diakses tanggal 5 Agustus 2012
- www.algenist.com. Diakses tanggal 4 Agustus 2012.
- www.algenol.com diakses tanggal 15 Agustus 2012
- www.bashanfoundation.org Diakses tanggal 5 Agustus 2012
- www.dlt-spl.co.jp. Diakses tanggal 9 September 2012
- www.dupontelastomers.com Diakses tanggal 5 Agustus 2012
- www.iimsam.org/images/growthtech.pdf . Diakses tanggal 5 Agustus 2012
- www.naplesnews.com Diakses tanggal 5 Agustus 2012
- www.neoalgae.com Diakses tanggal 5 Agustus 2012
- www.spirulinasource.com Diakses tanggal 5 Agustus 2012

Daftar Pustaka

www.starcentral.com Diakses tanggal 9 September 2012

www.unep.or.jp/ietc/publications/techpublications/techpub-15/2-4/4-2-3.asp. Diakses tanggal 12 Mei 2012.

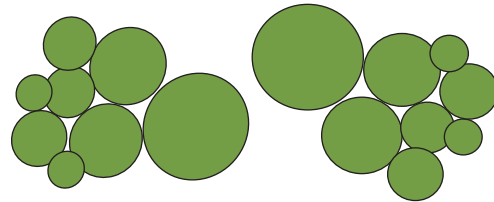
Zhang, Endong., Wang, Bing., Ning, Shuxiang., Sun, Huichao., Yang, Baoling., Jin, Mei., dan Hou, Lin. 2012. Ammonia-nitrogen and orthophosphate removal by immobilized *Chlorella* sp. isolated from municipal wastewater for potential use in tertiary treatment. African Journal of Biotechnology Vol. 11(24), pp. 6529-6534.



Dr Hadiyanto lahir di Pemalang, 28 Oktober 1975. Pendidikan S1 ditempuh di Jurusan Teknik Kimia UNDIP (1998) dan dilanjutkan studi S2 di Food and Bioprocess Engineering, Wageningen University, Netherlands (2003) dan S3 di departemen yang sama di Wageningen university pada tahun 2007. Pengalaman penelitiannya dilanjutkan dengan 2 tahun postdoctoral di Process Intensification group, TUDELFT Netherlands (2007-2009).

Berbagai penelitian telah dilakukan dengan grant dari Hibah DIKTI (Hibah bersaing, Kompetensi, Strategi Nasional, Hibah kerjasama internasional), Deptan (KKP3T), DIPA UNDIP dan kerjasama Internasional yang tertuang dalam publikasi di jurnal nasional dan internasional. Saat ini Hadiyanto tercatat sebagai anggota organisasi profesi di nasional (PATPI, Indonesian Biotechnology Consortium, BKK-PII) dan forum internasional (Sustainable Energy and Environment-SEE Forum). Dr Hadiyanto juga saat ini menduduki ketua Center of Biomass and Renewable Energy (CBIORE) dan sebagai editor in chief international journal of Renewable Energy Development (IJRED) dengan ISSN : 2252-4940.

*Setiap sel mikroalga
adalah mikroreaktor alam
yang menghasilkan
pangan, energi,
dan produk bernilai tinggi*



Maulana Azim, atau nama asli Muhamad Maulana Azimatun Nur, lahir di Semarang, 29 Oktober 1988. Dia adalah alumnus teknik kimia UNDIP, dan saat ini sedang menyelesaikan studi magister di fakultas yang sama. Karir kerja dimulai di C-BIORE (Center of Biomass and Renewable Energy) UNDIP, kemudian bekerja di Maris Project Netherland Site Indonesia menangani

proyek *Spirulina* yang dibiakkan pada limbah cair kelapa sawit, dan sekarang dipercaya menjadi bagian komisaris Neoalgae, perusahaan patungan yang bergerak di bidang produksi mikroalga. Karir kepenulisan dirintis sejak SMA, menjadi staff majalah sekolah. Ketika kuliah, Maulana Azim aktif di beberapa organisasi kampus, dan pernah ditunjuk sebagai pemimpin redaksi majalah Science Online (SOL) Forum Studi Teknik. Selain itu beberapa cernya pernah dimuat di majalah nasional.