

**EVALUASI KINERJA FOTOBIOREAKTOR KOLOM  
GELEMBUNG SKALA MENENGAH UNTUK  
PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella sp.* MELALUI  
PENGATURAN KERAPATAN FLUKS CAHAYA**

**SKRIPSI**

Oleh :

**INDAH PERMATA SYAHRI**

**04 04 06 030 6**



**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GENAP 2007/2008**

**EVALUASI KINERJA FOTOBIOREAKTOR KOLOM  
GELEMBUNG SKALA MENENGAH UNTUK  
PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella sp.* MELALUI  
PENGATURAN KERAPATAN FLUKS CAHAYA**

**SKRIPSI**

Oleh :

**INDAH PERMATA SYAHRI**

**04 04 06 030 6**



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN  
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GENAP 2007/2008**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

**EVALUASI KINERJA FOTOBIOREAKTOR KOLOM GELEMBUNG  
SKALA MENENGAH UNTUK PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella sp.*  
MELALUI PENGATURAN KERAPATAN FLUKS CAHAYA**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 27 Juni 2008

(Indah Permata Syahri)

NPM. 04 04 06 030 6

# PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

**EVALUASI KINERJA FOTOBIOREAKTOR KOLOM GELEMBUNG  
SKALA MENENGAH UNTUK PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella sp.*  
MELALUI PENGATURAN KERAPATAN FLUKS CAHAYA**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 9 Juli 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 9 Juli 2008

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng

NIP. 132 058 695

Ir. Dianursanti, MT

NIP. 132 165 710

## UCAPAN TERIMA KASIH

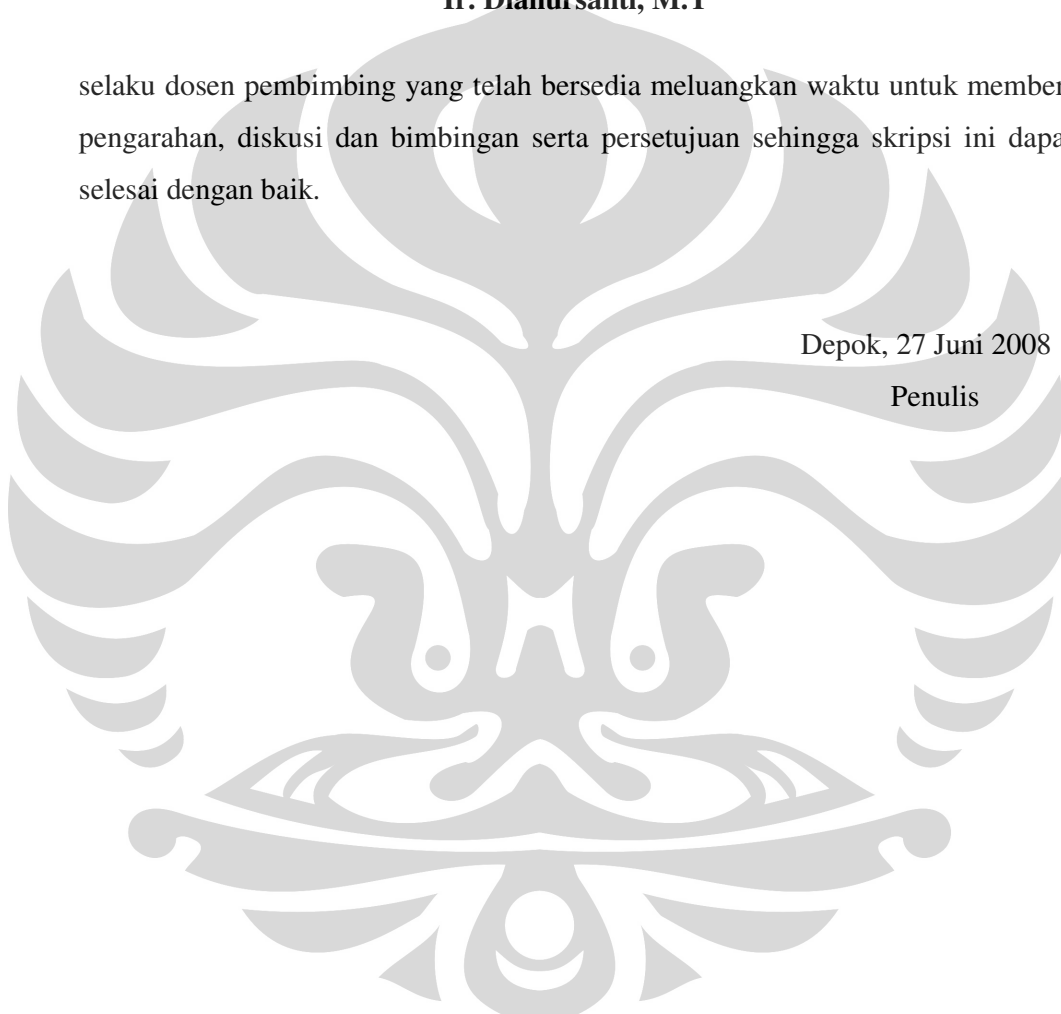
Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

**Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng**  
**Ir. Dianursanti, M.T**

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.

Depok, 27 Juni 2008

Penulis



Indah Permata Syahri  
NPM 04 04 06 030 6  
Departemen Teknik Kimia

Dosen Pembimbing :  
I. Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng  
II. Ir. Dianursanti, MT

**EVALUASI KINERJA FOTOBIOREAKTOR KOLOM GELEMBUNG SKALA  
MENENGAH UNTUK PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella sp.* MELALUI  
PENGATURAN KERAPATAN FLUKS CAHAYA**

**ABSTRAK**

Proses reduksi CO<sub>2</sub> yang terlepas bebas di atmosfer dapat dilakukan dengan berbagai cara yaitu kimiawi, elektrokimia, dan biologi. Salah satu alternatif yang dapat digunakan dalam proses reduksi ini adalah dengan memanfaatkan CO<sub>2</sub> tersebut untuk fiksasi CO<sub>2</sub> sehingga menghasilkan biomassa dengan menggunakan mikroalga yang mampu berfotosintesis. Pemanfaatan mikroalga ini dilakukan karena proses ini ramah lingkungan. Salah satu mikroalga yang banyak terdapat di Indonesia adalah *Chlorella sp.* Pemilihan mikroalga ini didasarkan pada kemampuan bertahan hidup dan juga kandungan biomasanya yang cukup besar.

Fotobioreaktor berbentuk *plate* skala laboratorium telah terbukti dapat digunakan untuk produksi biomassa *Chlorella sp.* dan optimasi produksi biomassa *Chlorella sp.* tersebut terletak pada proses pencahayaan. Metode pencahayaan yang dipilih akan mempengaruhi proses fotosintesis untuk produksi biomassa *Chlorella sp.* Pencahayaan alterasi (pengaturan kerapatan fluks cahaya) adalah pencahayaan yang digunakan dalam penelitian kali ini. Pencahayaan alterasi sendiri merupakan pengembangan dari sistem pencahayaan kontinu di mana intensitas cahaya akan ditingkatkan seiring dengan peningkatan jumlah inokulum (sel) yang sedang dikultivasi.

Fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dengan volume 18 Liter akan digunakan sebagai tempat kultivasi. Sedangkan jenis mikroalga yang digunakan adalah jenis *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang telah dikultivasi dalam medium *Benneck*. *Chlorella vulgaris* Buitenzorg ini akan diberikan pencahayaan alterasi selama proses penelitian dengan temperatur dan tekanan operasi 29°C dan 1 atm, sebagai pembanding dilakukan pencahayaan kontinu dengan jumlah inokulum yang sama. Udara yang mengandung CO<sub>2</sub> sebesar 5% dialirkan ke dalam reaktor sebagai *carbon source*. Pengambilan data dilakukan setiap 4 jam sekali.

Evaluasi yang dilakukan menghasilkan kecepatan superfisial yang sesuai untuk kultivasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yaitu 15,66 m/jam. Uji produksi yang dilakukan dengan memanfaatkan nilai kecepatan superfisial ini menunjukkan bahwa fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah ini mampu memproduksi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan baik, namun waktu kultivasi yang dibutuhkan lebih besar dibandingkan dengan skala laboratorium. Oleh karena itu, dibutuhkan pengoptimalan proses lebih lanjut untuk memperoleh hasil produksi biomassa yang maksimum.

**Kata kunci : *Chlorella sp.*, fotobioreaktor, alterasi, biomassa**

Indah Permata Syahri  
NPM 04 04 06 030 6  
Chemical Engineering Department

Counsellor :  
I. Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng  
II. Ir. Dianursanti, MT

**CAPABILITY'S EVALUATION OF MID-SCALE BUBBLE COLUMN  
PHOTOBIOREACTOR FOR BIOMASSA PRODUCTION OF *Chlorella sp.* BY  
CONTROLLING LIGHTING INTENSITY**

**ABSTRACT**

Reduction process on CO<sub>2</sub> which is released freely in the atmosphere can be done by many ways, such as chemical, electrochemical, and biological method. One of the alternative method used on this reduction process is using microalgae which is able to photosynthesize for fixating CO<sub>2</sub> and producing biomass. This method is also environmental friendly. One of the microalgae which is grown a lot in Indonesia is *Chlorella sp.* The selection of *Chlorella sp.* is based on the resistance and large biomass content.

Laboratory scale plate bubble column photobioreactor has been proven well to produce *Chlorella vulgaris* Buitenzorg biomass about 0.016 g/dm<sup>3</sup>. Lighting method which is chosen, will affect photosynthesis process for producing *Chlorella vulgaris* Buitenzorg biomass. Alteration lighting (controlling lighting intensity) is lighting method used in this research. This method has been proven to increase biomass product about 1,61 times than constant lighting. Alteration lighting itself is developed from constant lighting system which lighting intensity will be increased when the amount of inoculum cell increase.

Mid-scale bubble column photobioreactor (18 dm<sup>3</sup>) will be used for cultivating place. The type of microalgae for this research is *Chlorella vulgaris* Buitenzorg which has been cultivated in *Benneck* medium. *Chlorella vulgaris* Buitenzorg will be illuminated by alteration lighting, with temperature and pressure operation at 29°C and 1 atm. As the comparison, *Chlorella vulgaris* Buitenzorg is cultivated by constant lighting with the same amount of inoculum. Air which is rich of 5% CO<sub>2</sub> is flowed into the reactor as carbon source. Collecting data will be every 4 hours.

Evaluation of mid-scale bubble column photobioreactor gives superficial velocity 15,66 m/hour. Cultivation of *Chlorella vulgaris* Buitenzorg which has done using this superficial velocity shows that mid-scale bubble column photobioreactor performs well to produce biomass though gives higher cultivation time than laboratory scale bubble column photobioreactor. Process optimization is needed to get maximum biomass production.

**Kata kunci : *Chlorella sp.*, photobioreactor, alteration, biomass**

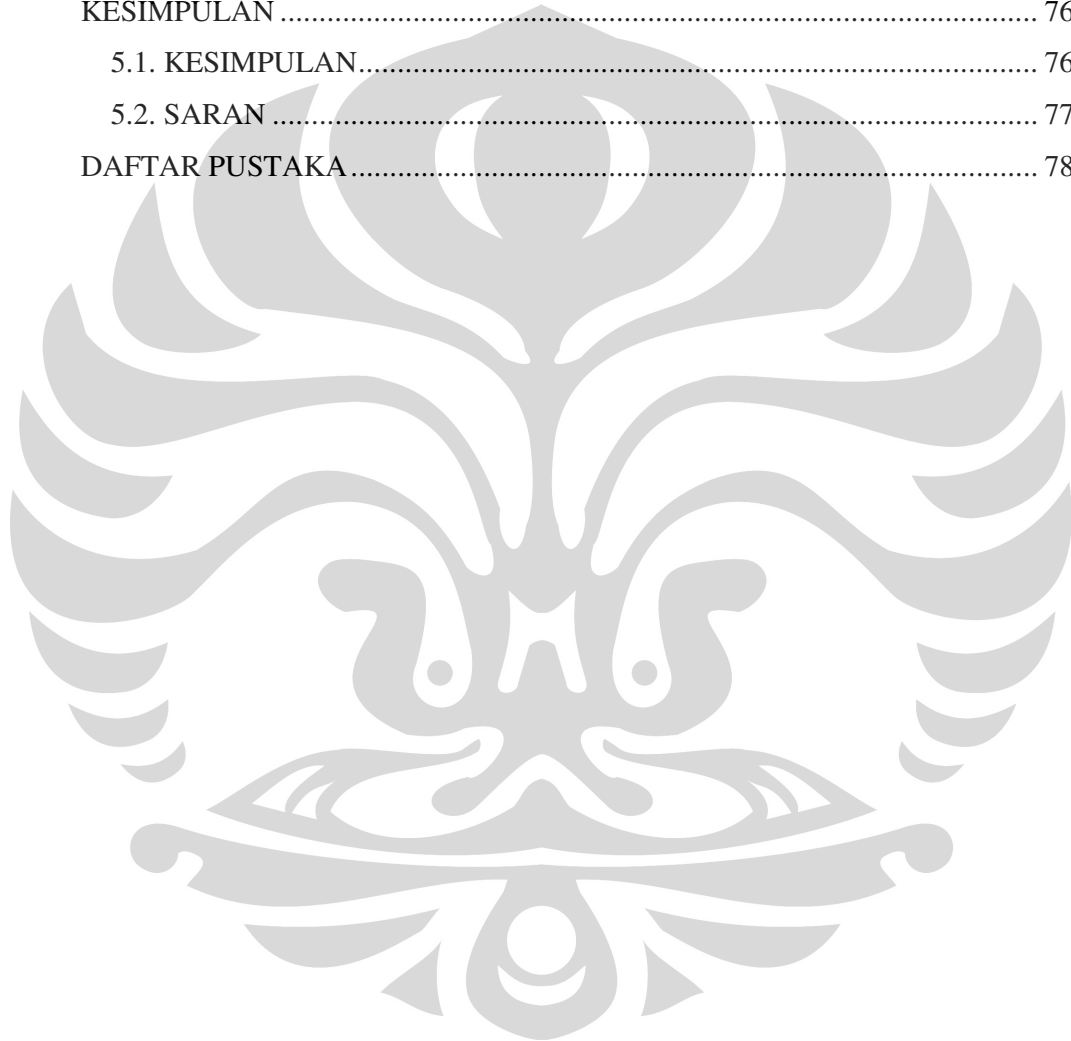
## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMBUNG.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI .....	ii
PENGESAHAN .....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1. LATAR BELAKANG MASALAH .....	1
1.2. RUMUSAN MASALAH .....	4
1.3. TUJUAN PENELITIAN .....	4
1.4. BATASAN MASALAH .....	4
1.5. SISTEMATIKA PENULISAN .....	4
BAB II.....	6
TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1. PEMANASAN GLOBAL.....	6
2.2. MIKROALGA <i>Chlorella</i> sp. ....	9
2.2.1. Pertumbuhan dan Perkembangan Sel <i>Chlorella</i> sp. ....	13
2.2.2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan <i>Chlorella</i> sp. ....	14
2.2.3. Kandungan Biomassa <i>Chlorella</i> sp. ....	19
2.2.4. Manfaat <i>Chlorella</i> sp. dalam Bidang Kesehatan .....	20
2.3. FOTOSINTESIS MIKROALGA HIJAU .....	22
2.3.1. Komponen Fotosintesis Mikroalga Hijau <i>Chlorella</i> sp. ....	23
2.3.2. Reaksi Fotosintesis.....	26
2.3.3. Fotosintesis Mikroalga Hijau <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg .....	31



2.3.4. Faktor yang Mempengaruhi Fotosintesis .....	32
2.4. FOTOBIOREAKTOR.....	33
2.4.1. Peranan Fotobioreaktor .....	34
2.4.2. Jenis Fotobioreaktor .....	35
2.4.3. Fotobioreaktor Kolom Gelembung .....	39
2.5. PROSES <i>SCALE-UP</i> .....	40
2.5.1. Kesamaan Geometri, Dinamika, dan Kinematika.....	40
2.5.2. <i>Shear</i> .....	41
2.5.3. <i>Scale-up</i> Bioreaktor.....	41
BAB III .....	43
METODE PENELITIAN.....	43
3.1. DIAGRAM ALIR PENELITIAN.....	43
3.2. ALAT DAN BAHAN PENELITIAN.....	44
3.2.1. Alat Penelitian.....	45
3.2.2. Bahan Penelitian.....	46
3.3. VARIABEL PENELITIAN.....	46
3.3.1. Variabel Bebas .....	46
3.3.2. Variabel Terikat .....	46
3.4. PROSEDUR PENELITIAN .....	46
3.4.1. Studi Literatur .....	46
3.4.2. Perhitungan Awal <i>Scale-up</i> .....	47
3.4.3. Desain Alat dan Rangkaian Proses.....	47
3.4.4. Uji Hidrodinamika.....	47
3.4.5. Uji Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg .....	47
BAB IV .....	53
HASIL DAN PEMBAHASAN .....	53
4.1. PERHITUNGAN AWAL <i>SCALE-UP</i> .....	53
4.2. EVALUASI DESAIN ALAT YANG DIGUNAKAN .....	56
4.3. UJI HIDRODINAMIKA.....	58
4.4. UJI PRODUKSI BIOMASSA <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg DALAM FOTOBIOREAKTOR KOLOM GELEMBUNG SKALA MENENGAH DENGAN PENCAHAYAAN ALTERASI .....	60

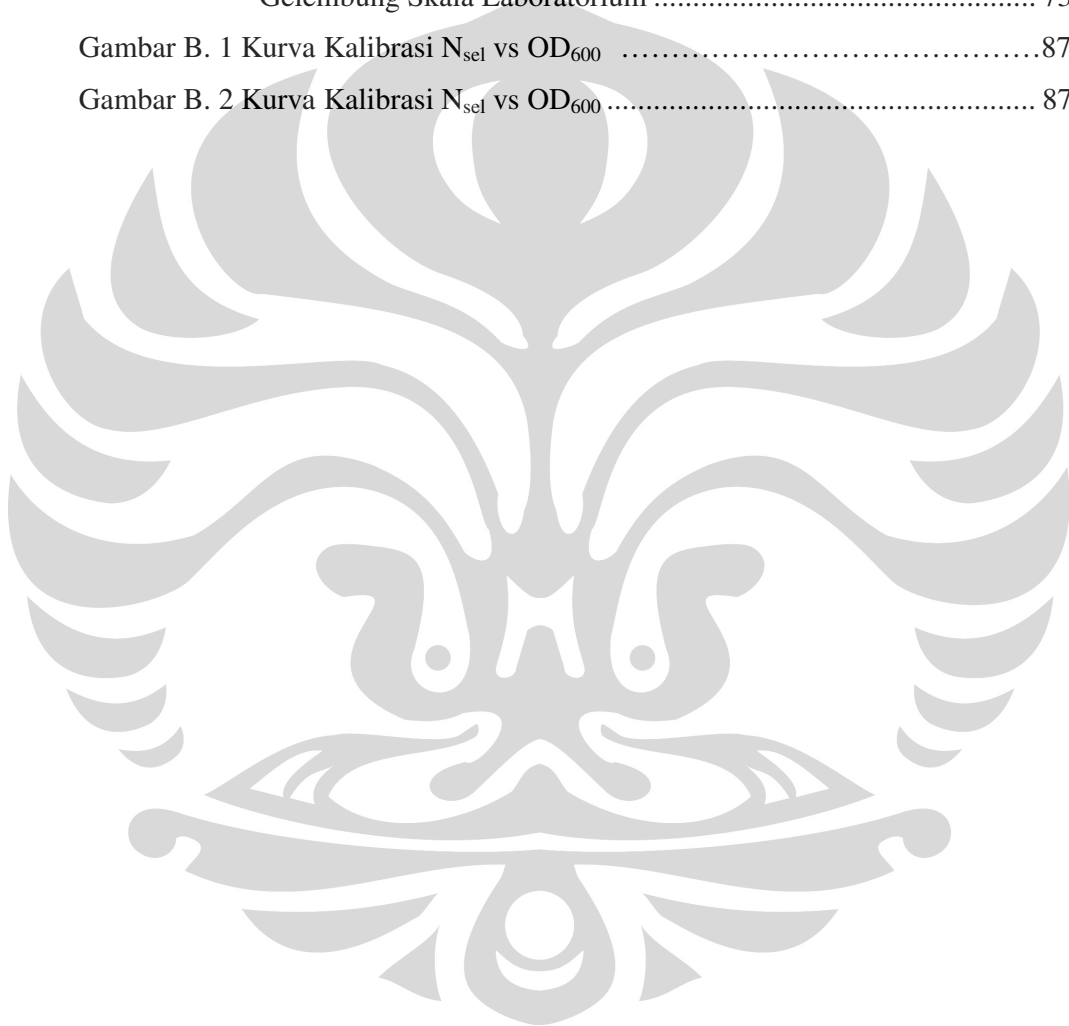
4.4.1. Produksi Biomassa (X) <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg Menggunakan Pencahaya-an Alterasi.....	63
4.4.2. Kandungan [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] dalam Medium Kultur.....	69
4.4.3. Konsumsi Energi Cahaya .....	72
4.5. TINJAUAN EKONOMI.....	75
BAB V .....	76
KESIMPULAN .....	76
5.1. KESIMPULAN.....	76
5.2. SARAN .....	77
DAFTAR PUSTAKA.....	78



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Fosil <i>Chlorella sp.</i> Zaman <i>Precambrian</i> .....	9
Gambar 2.2 (a) Sel-sel <i>Chlorella sp.</i> (b) Koloni <i>Chlorella sp.</i> .....	11
Gambar 2.3 Struktur Sel <i>Chlorella sp.</i> .....	11
Gambar 2.4 Kurva Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> pada Medium Terbatas .....	13
Gambar 2.5 Nilai $I_{\mu_{max,opt}}$ pada berbagai berat kering sel (X).....	17
Gambar 2.6 (a) Struktur klorofil a ; (b) Struktur klorofil b .....	24
Gambar 2.7 Daya Absorbansi untuk Tiap Klorofil .....	24
Gambar 2.8 Membran Tilakoid.....	25
Gambar 2.9 Sketsa Reaksi Terang.....	27
Gambar 2.10 Siklus Calvin .....	29
Gambar 2.11 (a) Fotobioreaktor sistem terbuka (b) Fotobioreaktor sistem tertutup.....	37
Gambar 2.12 Fotobioreaktor Kolom Gelembung.....	39
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	43
Gambar 3. 2 Rangkaian Alat.....	48
Gambar 4.1 Sketsa Dimensi Fotobioreaktor Kolom Gelembung : (a) Skala Menengah; (b) Skala Laboratorium.....	57
Gambar 4.2 Proses pembiakkan ( <i>pre-culture</i> ) <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg.....	62
Gambar 4.3 Proses <i>running</i> produksi biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg...	63
Gambar 4.4 Atas : Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg dengan Perlakuan Pencahayaan Alterasi; Bawah : Intensitas yang Digunakan dalam Perlakuan Pencahayaan Alterasi.....	64
Gambar 4.5 Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg dengan Perlakuan Pencahayaan Berbeda.....	65
Gambar 4.6 Kurva Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg dengan Perlakuan Pencahayaan yang Berbeda.....	66
Gambar 4.7 Pengaruh Perbesaran Fotobioreaktor Kolom Gelembung terhadap Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg (A) Perlakuan Pencahayaan Alterasi; (B) Perlakuan Pencahayaan Kontinu .....	67

Gambar 4. 8 Pengaruh Kondisi Pencahayaan terhadap nilai pH dan $[HCO_3^-]$ yang terdapat dalam Kultur : (a) Pencahayaan Alterasi; (b) Pencahayaan Kontinu .....	71
Gambar 4. 9 Intensitas Cahaya yang Digunakan untuk Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg : (a) Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah; (b) Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Laboratorium .....	73
Gambar B. 1 Kurva Kalibrasi $N_{sel}$ vs $OD_{600}$ .....	87
Gambar B. 2 Kurva Kalibrasi $N_{sel}$ vs $OD_{600}$ .....	87



## DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Kontribusi Gas sebagai Sumber Emisi Global .....	2
Tabel 1. 2 Komposisi Umum <i>Chlorella sp.</i> .....	2
Tabel 2.1 Perbandingan Komposisi Nutrisi Medium Pembiakan <i>Chlorella vulgaris</i> .....	15
Tabel 2. 2 Komposisi Umum <i>Chlorella sp.</i> .....	19
Tabel 2. 3 Kandungan Vitamin (mg/100 mg) .....	20
Tabel 2. 4 Kandungan Mineral (mg/100 mg).....	20
Tabel 2. 5 Perbandingan Beberapa Nilai Fotobioreaktor .....	38
Tabel 4. 1 Korelasi Nilai $U_g$ dengan Volume yang Digunakan pada Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah .....	59
Tabel 4. 2 Pengaruh Pencahayaan terhadap Hasil Akhir Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg .....	68
Tabel 4. 3 Pengaruh Kondisi Pencahayaan terhadap Energi Cahaya untuk Produksi Biomassa .....	74

## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A .....	80
DATA HASIL PENELITIAN.....	80
LAMPIRAN B .....	87
KURVA KALIBRASI.....	87
LAMPIRAN C .....	88
CONTOH DAN HASIL PERHITUNGAN $[\text{HCO}_3^-]$ .....	88
LAMPIRAN D .....	91
CONTOH DAN HASIL PERHITUNGAN $E_x$ DAN $\eta_{bp}$ .....	91
LAMPIRAN E.....	96
PROSEDUR STERILISASI PERALATAN .....	96
LAMPIRAN F.....	97
PROSEDUR PEMBUATAN MEDIUM <i>BENNECK</i> .....	97

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

Bab ini akan menjelaskan mengenai latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

### **1.1. LATAR BELAKANG MASALAH**

Pemanasan global yang sedang berlangsung sekarang ini, berdampak pada perubahan kondisi iklim di seluruh bagian bumi. Perubahan iklim itu mengakibatkan naiknya permukaan air laut, timbulnya kekeringan dan banjir akibat munculnya El-Nino dan La-Nina. Proses alam ini mempengaruhi pola curah hujan, temperatur rata-rata, dan kelembaban. Bencana inilah yang tengah dihadapi oleh negara-negara tropis di seluruh dunia, khususnya Indonesia. Beberapa bulan belakangan, Indonesia disinggahi oleh berbagai bencana yaitu banjir di berbagai daerah karena tingginya curah hujan dan air laut pasang, tanah longsor, dan kemarau yang berkepanjangan. Pemanasan global yang terjadi merupakan salah satu pemicu terjadinya bencana-bencana tersebut.

Pemanasan global yang memicu terjadinya perubahan iklim ini sebagian besar disebabkan karena merebaknya gas rumah kaca yang memerangkap sinar matahari yang menembus atmosfer masuk ke permukaan bumi. Gas rumah kaca merupakan kumpulan gas yang sedikitnya terdiri dari gas CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub> (Wikipedia, 2007). Selain menimbulkan berbagai bencana alam, kondisi suhu bumi yang tidak nyaman ini membuat sistem yang selama ini berada dalam siklus yang seimbang terganggu.

**Tabel 1. 1** Kontribusi Gas sebagai Sumber Emisi Global (Kantor Menteri Negara KLH, 1990)

Gas	Kontribusi	Sumber Emisi Global	Persentase (%)
CO <sub>2</sub>	45-50%	Batu Bara	29
		Minyak Bumi	29
		Gas Alam	11
		Penggundulan Hutan	20
		Lainnya	10
CH <sub>4</sub>	10-20%		

Berbagai penelitian untuk mereduksi gas rumah kaca, khususnya CO<sub>2</sub> telah banyak dilakukan. Beberapa metode pendekatan yang digunakan antara lain secara kimiawi, elektrokimia, dan biologi. Salah satunya dengan memanfaatkan CO<sub>2</sub> sebagai bahan berguna dalam fotosintesis mikroalga yang dapat menghasilkan senyawa karbon atau biomassa, seperti polisakarida, protein, atau lipid (Dianursanti, Anondho Wijanarko, and Bayu Vrigan, 2004).

Salah satu jenis mikroalga yang banyak terdapat di Indonesia adalah *Chlorella sp.* Pemilihan mikroalga ini didasarkan pada kemampuannya bertahan hidup dan komposisi biomasnya yang memiliki nilai protein yang cukup tinggi yang dapat dijadikan sebagai bahan pangan alternatif. Kandungan protein dalam *Chlorella sp.* jauh lebih banyak dibandingkan dengan biji-bijian dan kacang-kacangan. Protein dalam *Chlorella sp.* terdiri dari asam amino esensial yang sangat dibutuhkan oleh tubuh karena tubuh manusia tidak dapat membuatnya (Sargowo dan Ratnawati, 2005). Komposisi biomassa *Chlorella vulgaris* dapat dilihat pada Tabel 1.2.

**Tabel 1. 2** Komposisi Umum *Chlorella sp.* (Lee and Rosenbaum, 1987; Steenblock, 1989; Kastono, 1991)

Komposisi	Kandungan (persentase)
Kelembaban	3,6
Protein	60,5
Lemak	11
Karbohidrat	20,1
Serat	0,2
Abu	4,6
Kalori	421 kkal/100 gram



Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, produksi biomassa *Chlorella sp.* dapat dilakukan dalam fotobioreaktor kolom gelembung berbentuk *plate* skala laboratorium. Produksi biomassa *Chlorella sp.* maksimum dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium dapat mencapai 16 mg/dm<sup>3</sup> (berat kering) (Andika, 2005). Optimasi produksi biomassa *Chlorella sp.* tersebut terletak pada proses pencahayaan. Pencahayaan juga merupakan salah satu faktor penting dalam proses produksi biomassa *Chlorella sp.* karena dapat mempercepat pertumbuhan sel dalam jangka waktu yang pendek. Setelah diteliti ternyata terdapat beberapa alternatif pencahayaan yang dapat dilakukan yaitu pencahayaan kontinu, fotoperiodisitas, dan alterasi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa laju pertumbuhan maksimum di dapat dari sistem pencahayaan alterasi (Suryadi, 2004). Penelitian lanjutan menyatakan bahwa produksi biomassa *Chlorella sp.* dapat dilakukan dengan metode pencahayaan alterasi, yang menghasilkan biomassa 60% lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinu dengan menggunakan fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium (Andika, 2005). Dalam hal ini, yang dimaksud dengan pencahayaan alterasi adalah metode pencahayaan di mana intensitas pencahayaan akan terus ditingkatkan seiring dengan meningkatnya jumlah sel dalam suatu fotobioreaktor. Perlakuan ini dilakukan karena laju pembelahan mikroalga ini cukup cepat yaitu satu sel akan membelah menjadi empat sel dalam waktu 4-14 jam (Surawiria, 1987).

Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya dengan menggunakan fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah (dengan volume 18 dm<sup>3</sup>) yang merupakan pengembangan dari fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium (dengan volume 250 cm<sup>3</sup>) yang sebelumnya digunakan untuk produksi biomassa *Chlorella sp.* Evaluasi akan dilakukan pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dengan melakukan proses kultivasi untuk produksi biomassa *Chlorella sp.* menggunakan metode pengaturan kerapatan fluks cahaya (alterasi). Hasil yang diperoleh diharapkan dapat dijadikan sebagai acuan untuk proses optimasi lebih lanjut dalam proses produksi biomassa *Chlorella sp.* untuk skala besar, baik dalam ruang lingkup Universitas Indonesia (dengan memanfaatkan danau atau setu yang ada di dalam lingkungan Universitas Indonesia) maupun seluruh Indonesia.

## 1.2. RUMUSAN MASALAH

Rumusan masalah dalam penelitian kali ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh rangkaian alat dan proses pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah terhadap produksi biomassa *Chlorella sp.*?
2. Bagaimana pengaruh kecepatan superfisial yang diperoleh terhadap produksi biomassa *Chlorella sp.*?
3. Bagaimana pengaruh pencahayaan alterasi terhadap produksi biomassa *Chlorella sp.* dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah?

## 1.3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengevaluasi kinerja fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah yang digunakan untuk produksi biomassa *Chlorella sp.*
2. Mengetahui pengaruh kecepatan superfisial terhadap produksi biomassa *Chlorella sp.*
3. Meningkatkan produksi biomassa *Chlorella sp.* dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah menggunakan metode pencahayaan alterasi.

## 1.4. BATASAN MASALAH

Batasan masalah dalam penelitian kali ini adalah :

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Bioproses Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
2. Mikroalga yang digunakan adalah *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang berasal dari koleksi kultur Sub Balai Penelitian Perikanan Air Tawar Depok, Dinas Kelautan dan Perikanan.
3. Jenis medium yang digunakan adalah medium *Benneck*.
4. Produksi biomassa dalam penelitian ini baru terbatas pada peningkatan jumlah sel kering yang diperoleh.

## 1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penulisan makalah skripsi ini adalah sebagai berikut :

**BAB I           PENDAHULUAN**

Bab ini terdiri atas penjelasan mengenai latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

**BAB II           TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini menjelaskan mengenai teori umum yang akan digunakan dalam penelitian ini antara lain, mengenai pemanasan global, mikroalga hijau *Chlorella sp.*, proses fotosintesis mikroalga dan fotobioreaktor.

**BAB III          METODE PENELITIAN**

Bab ini berisi penjelasan tentang diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, variabel penelitian, prosedur penelitian, serta metode perhitungan data hasil observasi yang akan digunakan dalam penelitian.

**BAB IV          HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi tentang penelitian, pembahasan, dan analisis hasil penelitian.

**BAB V           KESIMPULAN**

Bab ini berisi kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian yang dituliskan dalam makalah skripsi ini.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini akan dibahas mengenai tinjauan pustaka yang akan digunakan sebagai referensi dalam penelitian yang akan dilakukan. Beberapa topik yang akan diuraikan antara lain mengenai pemanasan global, mikroalga *Chlorella sp.*, fotosíntesis mikroalga hijau, dan fotobioreaktor.

#### **2.1. PEMANASAN GLOBAL**

Saat ini telah terjadi peningkatan suhu udara dunia akibat terjadinya pemanasan global. Gejala alam ini mulai diteliti secara aktif mulai dekade tahun 1980-an dan hasilnya sangat mengejutkan para ahli lingkungan karena dampak yang dkuatirkan kini telah menjadi kenyataan.

Karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan beberapa jenis gas lainnya ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , CFC), sisa pembakaran bahan bakar minyak bumi telah menempati atmosfer bumi dan seolah menciptakan “dinding kaca” yang menjebak panas sinar matahari tertahan di permukaan bumi, fenomena ini dikenal sebagai efek rumah kaca.

Para ahli cuaca internasional memperkirakan bahwa planet bumi bakal mengalami kenaikan suhu rata-rata  $3,5^\circ\text{C}$  memasuki abad mendatang sebagai efek akumulasi penumpukan gas tersebut (Kompas, Mei 2007). Akibat yang muncul cukup mencemaskan antara lain meliputi, kenaikan permukaan laut akibat proses pencairan es di kutub, perubahan pola angin, meningkatnya badai atmosferik, bertambahnya populasi dan jenis organisme penyebab penyakit yang berdampak pada kesehatan, perubahan pola curah hujan dan siklus hidrologi serta perubahan ekosistem hutan, daratan dan ekosistem lainnya.

Para pakar lingkungan dunia selama bertahun-tahun telah mencoba mengumpulkan bukti-bukti ilmiah yang dapat menjelaskan fenomena alam ini, dan hasilnya cukup mengejutkan yaitu berupa (Cendrawasih pos, Mei 2007) :

#### **a. Iklim mulai tidak stabil**

Pada Juni 1998, di Tibet terjadi gelombang udara panas, temperatur berkisar 25°C selama 23 hari, kejadian ini belum pernah terjadi sebelumnya.

Kawasan Liberia, Eropa Timur dan Amerika Utara yang dikenal udaranya sangat membekukan tulang kini mulai menghangat.

Sementara Kairo pada Agustus 1998 tercatat suhu udara menembus angka 41°C.

Pada Agustus 1998, di Sidney Australia terjadi badai besar disertai hujan dengan curah hujan mencapai tiga kali ukuran normal.

Sementara di Indonesia, Meksiko, dan Spanyol terjadi musim kering berkepanjangan akibat dipicu oleh badai tropis yang berujung pada terbakarnya hutan dengan luasan kumulatif mencapai jutaan hektar.

#### **b. Naiknya permukaan air laut**

Di kawasan kepulauan Bermuda Amerika Tengah dilaporkan bahwa air laut telah meluap melampaui batas air payau dan memusnahkan area hutan bakau di kawasan tersebut.

Sementara di Fiji terjadi penyusutan garis pantai sepanjang 15 cm/tahun selama 90 tahun terakhir ini.

Berdasarkan hasil penelitian IPCC (1990) permukaan air laut telah naik sekitar 10-20 cm pada masa abad terakhir ini. Bila angka kenaikan permukaan air laut ini sampai menyentuh kisaran angka 20-50 cm maka habitat di daerah pantai akan mengalami gangguan bahkan musnah.

Sedangkan peningkatan sebesar 1 meter diprediksi akan mampu mengusir puluhan juta orang akibat terendamnya kota dan desa di kawasan pesisir, lahan pertanian produktif akan hancur terendam dan persediaan air tawar akan tercemar.

#### **c. Gangguan ekologis**

Mempergunakan simulasi komputer, Professor Chris Thomas dari Universitas Leeds Inggris memperkirakan lebih dari sejuta *species* akan terancam punah pada tahun 2050, sedangkan *species* yang masih bertahan tidak akan lagi memiliki habitat yang nyaman, sementara sebagian lainnya harus bermigrasi cukup jauh untuk memperoleh tempat hidup yang sesuai

guna mendukung kehidupannya. Simulasi ini diperkirakan cukup akurat mengingat sebuah penelitian di California dilaporkan kupu-kupu jenis *Edith Checkerspot* telah mulai menghilang seiring naiknya suhu udara di kawasan tersebut.

Sementara itu populasi penguin jenis Adeline di Antartika berkurang 33% dalam masa 25 tahun terakhir akibat surutnya permukaan lautan es.

Tim peneliti dari Kanada melaporkan bahwa jumlah rusa kutub *Peary* menurun drastis jumlahnya dari 24.000 pada tahun 1961 menjadi hanya sekitar 1.000 pada tahun 1997 akibat perubahan iklim yang cukup ekstrim.

#### **d. Penyebaran berbagai penyakit**

Peningkatan suhu udara ternyata juga mulai memicu munculnya beberapa serangan penyakit yang sebelumnya belum pernah ada pada daerah tertentu.

Di kawasan pegunungan Andes Kolumbia-Amerika Tengah dengan ketinggian 1.000-2.195 m dari permukaan laut, dilaporkan muncul nyamuk penyebab penyakit malaria, demam berdarah dan demam kuning.

Pada tahun 1997 di Papua, penyakit malaria terdeteksi untuk pertama kalinya pada pemukiman di ketinggian 2.100 m dari permukaan laut.

Perlu dilakukan tindakan menyeluruh disertai komitmen yang kuat untuk pertama menghentikan meluasnya wabah bencana ini. Secara sederhana tindakan yang bisa dilakukan adalah (Cenderawasih pos, Mei 2007) :

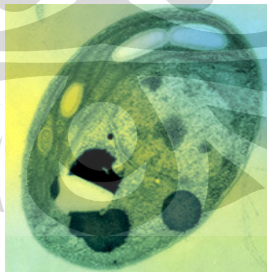
- a. Pengembangan etika hemat energi dan ramah lingkungan. Budaya penghematan energi terutama yang terkait dengan energi yang dihasilkan dari bahan fosil (BBM) harus benar-benar dilaksanakan dengan penuh kesadaran. Dalam bidang transportasi misalnya pemakaian kendaraan bermotor yang boros bahan bakar hendaknya semakin dikurangi yang juga dibarengi dengan upaya perancangan peraturan secara ketat untuk mengurangi pencemaran udara dalam berbagai bentuk.
- b. Substitusi bahan bakar penggunaan gas alam dalam aktivitas rumah tangga maupun industri ternyata berperan cukup nyata dalam mengurangi tingkat emisi gas rumah kaca. Gas alam menghasilkan CO<sub>2</sub> ternyata 40% lebih rendah dibanding batu bara dan 25% lebih rendah dari pada minyak bumi sehingga dengan menukar sumber bahan bakar bisa mengurangi tingkat emisi gas CO<sub>2</sub>.

- c. Pelestarian hutan dan reboisasi keberadaan hutan ternyata berfungsi luar biasa dalam menyerap gas CO<sub>2</sub> sehingga dapat memperlambat penimbunan gas-gas rumah kaca. Penelitian menunjukkan bahwa untuk menyerap 10% emisi CO<sub>2</sub> yang ada di atmosfer saat ini diperlukan upaya penanaman setidaknya pada area seluas negara Turki. Seandainya saja setiap jiwa di Papua menanam satu batang pohon maka setidaknya ada sekitar 2.000 Ha hutan baru yang akan mampu menyerap sekitar 200.000 ton karbon.

Oleh karena itu, dibutuhkan langkah konkret untuk bersama-sama mengurangi emisi sehingga pemanasan global dapat dihindari sedikit demi sedikit.

## 2.2. MIKROALGA *Chlorella sp.*

*Chlorella sp.* merupakan mikroalga yang termasuk dalam golongan alga hijau (*Chlorophyta*) dengan bentuk tubuh bulat, bulat lonjong dengan garis tengah sel antara 2-8  $\mu$ m (<http://www.chlorella-world.com/yaeyama.html>). Nama *Chlorella* berasal dari bahasa Yunani yaitu 'chloros' yang berarti hijau dan 'ella' yang berarti kecil. Tumbuhan ini telah ada sejak 2,5 miliar juta tahun yang lalu tetapi baru ditemukan pada akhir abad ke-19 oleh seorang sarjana mikrobiologi berkebangsaan Belanda bernama Beyerink (<http://www.tuberose.com>). Hal ini dibuktikan dengan adanya penemuan fosil *Chlorella sp.* dari zaman precambrian (<http://www.chlorella-microalgae.htm>).



**Gambar 2. 1** Fosil *Chlorella sp.* Zaman Precambrian (<http://www.canceractive.com-images-chlorella.jpg.htm>)

Walaupun *Chlorella sp.* telah ada sejak dahulu tetapi sifat genetik yang dimilikinya tidak mengalami perubahan. Hal ini dikarenakan beberapa sebab yaitu (<http://www.Chlorella-microalgae.htm>) :

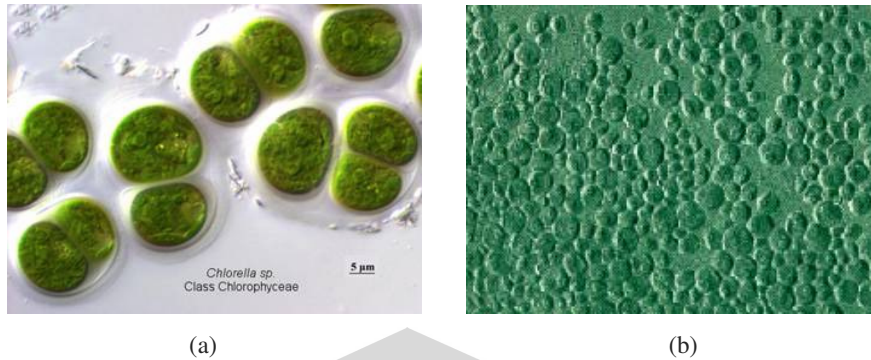
1. Kesatuan sifat genetiknya terlindung oleh dinding sel yang kuat sehingga dapat stabil dari pengaruh luar.
2. *Chlorella sp.* hanya membutuhkan cahaya dan nutrisi sederhana untuk dapat berfotosintesis dan berproduksi secara cepat.
3. Memiliki daya dan mekanisme perbaikan DNA yang tinggi untuk beradaptasi dalam lingkungannya yang baru.

Ditinjau dari taksonominya *Chlorella sp.* memiliki klasifikasi sebagai berikut (<http://www.merops.sanger.ac.uk/egibin/speccard?sp=sp001794&type=P>):

Superkingdom	Eukaryota
Kingdom	Viridiplantae
Subkingdom	Phycobionta
Filum	Chlorophyta
Kelas	Trebouxiophyceae
Ordo	Chlorellales
Famili	Chlorellaceae
Genus	Chlorella

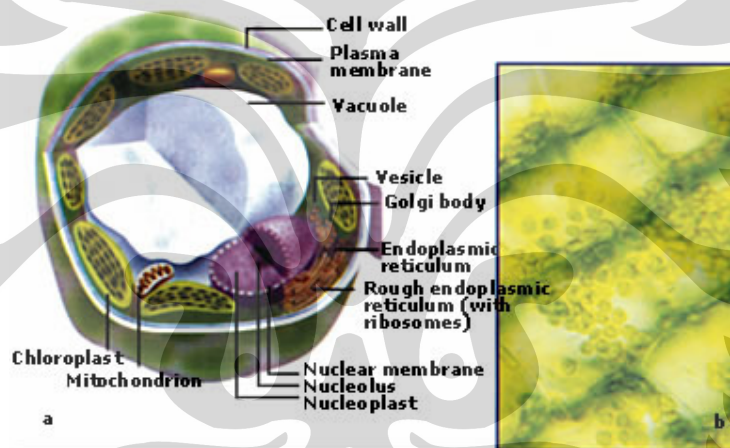
*Chlorella sp.* merupakan tumbuhan yang belum mempunyai akar, batang, dan daun yang sebenarnya, tetapi sudah memiliki klorofil sehingga bersifat autotrof atau dapat mensintesis makanan sendiri melalui reaksi fotosintesis dengan bantuan energi dari cahaya matahari. Mikroalga ini berkembangbiak dengan pembelahan sel dan dengan pembentukan spora. Meskipun demikian waktu generasinya sangat cepat (<http://www.chlorella-world.com/yaeyama.html>). *Chlorella sp.* hidup secara berkoloni dalam jumlah besar. Habitatnya adalah air atau di tempat basah, sebagai epifit atau sebagai endofit (<http://www.Bebas.vlsm.org/>). Bahkan beberapa jenis bersimbiosis dengan jamur membentuk lumut kerak (*Lichenes*) atau hidup di antara jaringan Hydra.





**Gambar 2. 2** (a) Sel-sel *Chlorella sp.* ([http://www.energiaverde.com.br-parceiros\\_clip\\_image003.jpg.htm](http://www.energiaverde.com.br-parceiros_clip_image003.jpg.htm)) (b) Koloni *Chlorella sp.* ([http://www.ppo.be-images-104\\_1B.jpg.htm](http://www.ppo.be-images-104_1B.jpg.htm))

Secara umum struktur *Chlorella sp.* dapat dilihat pada Gambar 2.3 :



**Gambar 2. 3** Struktur Sel *Chlorella sp.* ([http://www.harunyahya.com-books-science-miracle\\_in\\_cell-images\\_cell-79.jpg.htm](http://www.harunyahya.com-books-science-miracle_in_cell-images_cell-79.jpg.htm))

Dari gambar di atas dapat dipaparkan beberapa bagian sel yang sangat penting dalam keberlanjutan kehidupan *Chlorella sp.* tersebut, yaitu :

#### a. Kloroplas

Kloroplas merupakan jaringan berbentuk cangkir atau lonceng yang terletak di tepi sel. Kloroplas terdiri dari lamella fotosintetik dan diselubungi oleh suatu membran ganda. Jaringan ini berperan penting dalam proses fiksasi CO<sub>2</sub> karena mengandung biomassa yang dapat menyerap energi cahaya untuk digunakan dalam reaksi fotosintesis

(<http://www.chem.mtu.edu/~drshonna/cm4710/lectures/chapter2.pdf>).

## **b. Dinding Sel**

Dinding sel mengandung serat yang dapat dikonsumsi oleh manusia sebagai makanan sehat serta tersusun dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Dinding sel ini berfungsi untuk melindungi bagian dalam sel dari pengaruh luar (Wirosaputro, 2002).

## **c. Inti Sel (Nukleus)**

Inti sel adalah suatu struktur berukuran besar yang dikelilingi oleh sitoplasma dan dilindungi oleh sebuah membran (<http://www.chem.mtu.edu/~drshonna/cm4710/lectures/chapter2.pdf>). Inti sel ini berperan dalam mengatur seluruh aktivitas sel seperti berfotosintesis dan berkembangbiak. Sebuah inti sel memiliki inti di dalamnya yang berukuran lebih kecil disebut nukleolus. Nukleolus sangat kecil dan terbentuk dari kumpulan RNA (*Ribo Nucleic Acid*) sehingga berperan dalam sintesis protein dalam sel (Wirosaputro, 2002).

Selain nukleolus, inti sel juga mempunyai jaringan-jaringan halus yang berada dalam cairan inti yang mengandung gen yang disebut dengan benang kromatin. Berfungsi sebagai pembawa informasi genetik dari sel induk kepada sel anak pada saat berkembangbiak (Wirosaputro, 2002).

## **d. Mitokondria**

Mitokondria merupakan organel sel yang sangat kompleks dan terdiri atas struktur berbentuk seperti cerutu. Struktur-struktur kecil tersebut tersusun dari protein dan lipid yang membentuk suatu sel yang stabil dan keras. Dinding mitokondria berlapis dua dan lapisan dalamnya memiliki banyak lekukan. Struktur ini berguna untuk memperluas bidang permukaan penyerapan oksigen dalam proses respirasi sel.

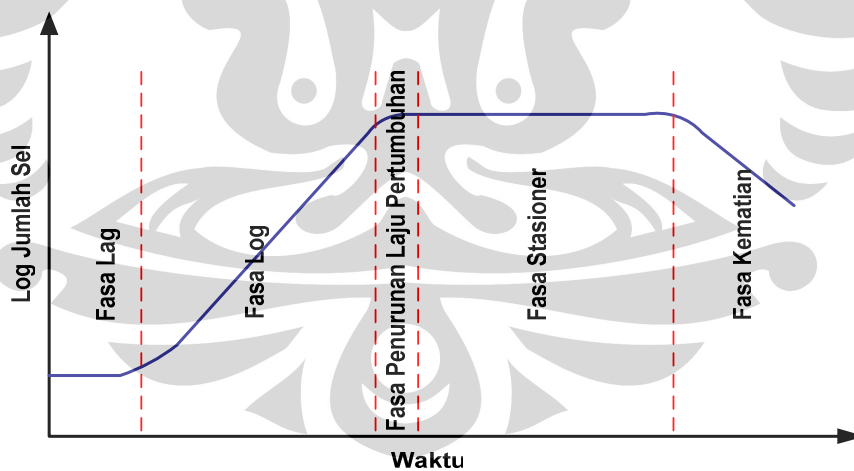
Mitokondria berfungsi sebagai pusat pembangkit tenaga sel dengan menghasilkan ATP sebagai sumber energi. Selain itu mitokondria berperan penting dalam proses respirasi sel dan tempat pemecahan molekul protein dan lemak kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana yang selanjutnya digunakan sebagai sumber energi (<http://www.chem.mtu.edu/~drshonna/cm4710/lectures/chapter2.pdf>).

#### e. Vakuola

Vakuola merupakan tempat pembuangan (ekskresi) dari zat-zat yang tidak diperlukan lagi oleh sel. Zat-zat ini akan tertimbun di dalam vakuola sehingga ukuran dari vakuola pada sel semakin lama akan semakin besar (<http://www.chem.mtu.edu/~drshonna/cm4710/lectures/chapter2.pdf>).

#### 2.2.1. Pertumbuhan dan Perkembangan Sel *Chlorella sp.*

*Chlorella sp.* Mempunyai waktu generasi yang sangat cepat. Oleh karena itu, dalam waktu yang relatif singkat, perbanyakan sel akan terjadi secara cepat, terutama jika tersedianya cahaya dan sumber energi yang cukup. Umumnya perbanyakan sel terjadi dalam waktu 4-14 jam, tergantung pada lingkungan pendukungnya (Surawiria, 1987). Apabila sejumlah kecil *Chlorella sp.* diinokulasikan dalam medium kultur terbatas dan jumlah *Chlorella sp.* dihitung sebagai fungsi waktu, maka pola pertumbuhan berdasarkan jumlah sel dapat dikelompokkan menjadi 5 fasa yaitu fasa tunda, fasa eksponensial, fasa penurunan laju pertumbuhan, fasa stasioner, dan fasa kematian (Fogg, 1975).



**Gambar 2. 4** Kurva Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada Medium Terbatas (Wirosaputro, 2002)

##### a. Fasa Tunda

Fasa tunda adalah fasa penyesuaian dengan lingkungan yang baru sebelum memulai pembiakkan (pembelahan). Pada masa penyesuaian ini, sel kekurangan metabolit dan enzim akibat keadaan yang tidak menguntungkan

dalam pembiakan sebelumnya. Pada fasa ini tidak terjadi penambahan jumlah sel.

b. Fasa Pertumbuhan Logaritmik

Pada fasa ini, sel berada dalam keadaan stabil dan melakukan pembelahan dengan cepat. Oleh karena itu, jumlah sel akan bertambah dengan kecepatan konstan. Bahan sel baru terbentuk dengan laju tetap, akan tetapi bahan-bahan tersebut bersifat katalitik dan massa bertambah secara eksponensial. Hal ini bergantung dari satu dua hal terjadi, yaitu kalau tidak satu atau lebih zat makanan dalam pembenihan habis maka tentu hasil metabolisme beracun akan tertimbun dan menghambat pertumbuhan.

c. Fasa Penurunan Laju Pertumbuhan

Selama fasa ini, laju pertumbuhan sel menurun akibat adanya kompetisi yang tinggi dalam media hidup, dan zat makanan yang tersedia dalam media tidak mencukupi kebutuhan populasi yang bertambah dengan cepat pada fasa eksponensial. Akibatnya hanya sebagian dari populasi yang mendapatkan cukup nutrisi untuk tubuh dan membelah.

d. Fasa Stasioner

Fasa stasioner adalah fasa pemberhentian pertumbuhan. Hal ini disebabkan oleh habisnya nutrisi dalam medium atau karena menumpuknya hasil metabolisme yang beracun sehingga mengakibatkan pertumbuhan berhenti. Dalam kebanyakan kasus, pergantian sel terjadi dalam fasa stasioner, di mana adanya kehilangan sel yang lambat karena kematian yang diimbangi dengan pembentukan sel-sel yang baru melalui pembelahan. Bila hal ini terjadi, maka jumlah sel akan bertambah secara lambat, meskipun jumlah sel hidup tetap.

e. Fasa Kematian

Pada fasa ini jumlah populasi menurun. Jumlah sel yang mati per satuan waktu perlahan-lahan bertambah dan kecepatan sel-sel yang mati menjadi konstan.

### 2.2.2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan *Chlorella sp.*

Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi pertumbuhan *Chlorella sp.*, yaitu :

### a. Jenis Medium

Medium pembiakan sangat berpengaruh dalam pertumbuhan *Chlorella sp.* Apabila asupan nutrisi dari medium tidak cukup, maka laju pertumbuhannya akan terhambat. Oleh karena itu, medium pembiakannya harus memiliki berbagai nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangannya sehingga komposisi dari medium yang diberikan harus sesuai.

Medium yang diperlukan untuk perkembangan *Chlorella sp.* relatif lebih sederhana dan hanya memerlukan jenis nutrisi yang lebih sedikit dibandingkan dengan medium untuk jenis alga lainnya. Ada beberapa medium yang biasanya digunakan untuk membiakan *Chlorella sp.* yaitu Benneck, Detmer, Pupuk Komersial, dan Walne. Komposisi untuk masing-masing medium ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2. 1** Perbandingan Komposisi Nutrisi Medium Pembiakan *Chlorella vulgaris* (Wirosaputro, 2002)

Nutrisi	Benneck	Detmer	Pupuk Komersial	Walne
MgSO <sub>4</sub>	100 mg/L	550 mg/L	-	-
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	200 mg/L	250 mg/L	-	-
NaNO <sub>3</sub>	500 mg/L	-	-	100 mg/L
FeCl <sub>3</sub>	3-5 mg/L	-	-	1,3 mg/L
KCl	-	250 mg/L	40 mg/L	-
Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	1000 mg/L	-	-
CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	800 mg/L	-
Na <sub>2</sub> EDTA	-	-	-	45 mg/L
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	-	-	-	33,6 mg/L
TSP	-	-	15 mg/L	-
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	-	-	-	20 mg/L
MnCl <sub>2</sub>	-	-	-	0,36 mg/L

### b. Pencahayaan

Cahaya berperan penting dalam pertumbuhan dan perkembangan mikroalga hijau *Chlorella sp.* Cahaya berfungsi sebagai sumber energi untuk pertumbuhan dan fotosintesis cahaya yang baik bagi *Chlorella sp.* untuk melakukan fotosintesis berkisar 2-3 klux (Wirosaputro, 2002).

Terdapat tiga jenis pencahayaan yaitu pencahayaan kontinu, terang gelap (fotoperiodesitas), dan alterasi.

### **1. *Pencahayaan Kontinu***

Pada pencahayaan ini, *Chlorella sp.* diiluminasi dengan cahaya tampak (370-900 nm) secara terus-menerus sampai mencapai fasa stasioner. Menurut penelitian yang telah dilakukan, pencahayaan ini menghasilkan laju pertumbuhan yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan pencahayaan terang gelap.

### **2. *Pencahayaan Terang Gelap (Fotoperiodesitas)***

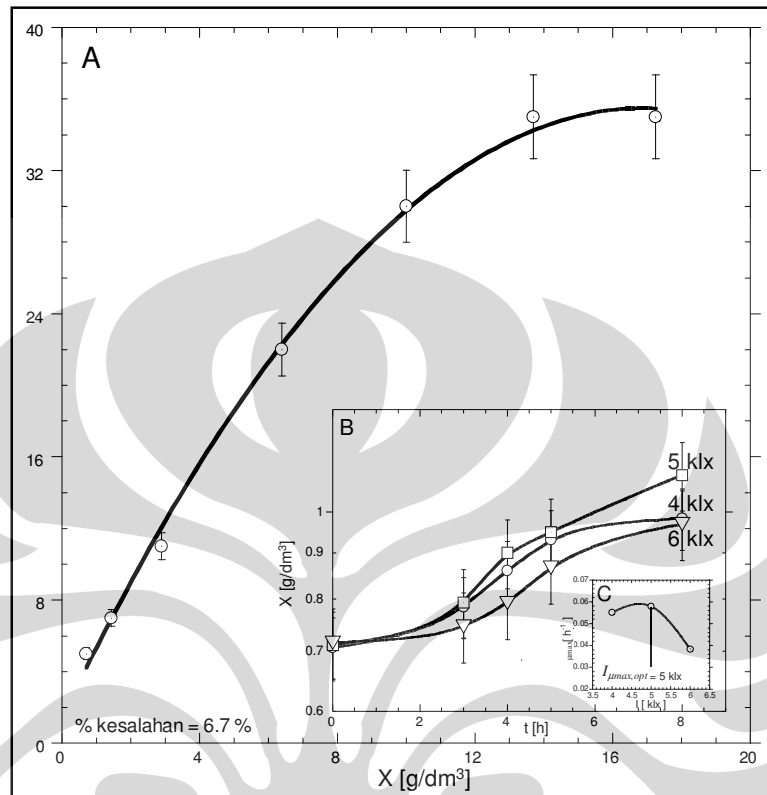
Proses ini didasarkan pada siklus kondisi alami (periode cahaya matahari) dimana *Chlorella sp.* diiluminasi dengan cahaya tampak dengan mengatur kondisi terang selama 8 jam dan kondisi gelap selama 6 jam. Dari penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa efisiensi cahaya yang digunakan lebih besar dibandingkan pencahayaan kontinu namun laju pertumbuhan yang dihasilkan masih di bawah pencahayaan kontinu.

### **3. *Pencahayaan Alterasi***

Perlakuan pencahayaan alterasi didasarkan pada semakin banyak jumlah sel biomassa dari *Chlorella sp.* maka kultur akan semakin pekat, sehingga cahaya yang diberikan tidak lagi diterima secara merata oleh semua sel (terbatas pada sel yang ada di depan sumber cahaya). Pencahayaan ini merupakan modifikasi dari pencahayaan kontinu di mana pencahayaan yang diberikan merupakan fungsi dari jumlah sel yang ada pada medium. Semakin banyak jumlah sel *Chlorella sp.* maka intensitas pencahayaan yang dilakukan akan semakin besar. Usaha ini telah dibuktikan dapat meningkatkan laju pertumbuhan optimal dan menghasilkan biomassa dengan jumlah yang lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinu tanpa alterasi pada *Cyanobacterium A. Cylindrica* (Wijanarko, 2003).

Dengan metode ini diharapkan laju pertumbuhan dari mikroorganisme dan kemampuan pengikatan karbondioksida akan dapat terus dipertahankan hingga pertumbuhannya mencapai titik optimal. Jumlah intensitas optimum bagi pertumbuhan *Chlorella sp.* dengan jumlah biomassa tertentu disebut dengan  $I_{\mu_{max,opt}}$ . Nilai  $I_{\mu_{max,opt}}$  untuk nilai X yang bervariasi telah diketahui melalui penelitian sebelumnya di Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang dilakukan oleh Sang Made Kresna

Andika. Hubungan antara biomassa *Chlorella vulgaris* ( $X$ ) dengan  $I_{\mu_{max,opt}}$  dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2. 5 Nilai  $I_{\mu_{max,opt}}$  pada berbagai berat kering sel ( $X$ ) (Kresna, Sang Made, 2004)

Kurva ini akan menjadi acuan pada tahap alterasi pencahayaan di mana pencahayaan akan menggunakan  $I_{\mu_{max,opt}}$  dan akan selalu ditingkatkan sesuai dengan perkembangan jumlah biomassa ( $X$ ) selama masa kultivasi.

### c. Kondisi Operasi

Dalam proses kultivasi *Chlorella sp.* digunakan beberapa kondisi operasi yaitu konsentrasi CO<sub>2</sub>, temperatur operasi, pH, dan laju alir baik untuk udara dan CO<sub>2</sub>.

#### 1. Konsentrasi

Dalam proses fotosintesis, CO<sub>2</sub> merupakan unsur paling penting. Tersedianya CO<sub>2</sub> yang cukup dalam media akan memperlancar proses fotosintesis yang akan berimbas pada pertumbuhan *Chlorella sp.* itu sendiri.

Konsentrasi CO<sub>2</sub> yang optimal untuk pertumbuhan *Chlorella sp.* adalah sekitar 3-5% (Wirosaputro, 2002).

## **2. Temperatur**

Kondisi lingkungan di mana pembiakan diletakan akan mempengaruhi proses metabolisme sel yang ada di dalamnya. Kondisi lingkungan tersebut biasanya berkaitan dengan temperatur 5-35°C, Namun temperatur optimum bagi pertumbuhannya berkisar antara 23-30°C (Wirosaputro, 2002).

## **3. Derajat Keasaman (pH)**

Derajat keasaman (pH) akan mempengaruhi kinerja kerja suatu enzim. Menurut Round (1973), pH media yang berkisar antar 7.0-8.0 cukup baik digunakan dalam kultur alga di laboratorium. *Chlorella sp.* sendiri tahan terhadap lingkungan yang asam dengan pH mencapai 2. Untuk mencegah terjadinya perubahan pH dalam media kultur alga, perlu ditambahkan EDTA (*Ethyl Diamine Tetra Acetate*) ke dalam media, karena EDTA berfungsi sebagai buffer sehingga pH media akan tetap stabil.

## **4. Laju Alir Udara dan CO<sub>2</sub>**

Laju alir udara perlu dipertimbangkan jika jenis reaktor yang digunakan adalah reaktor kolom gelembung. Sedangkan laju CO<sub>2</sub> diatur sesuai dengan model reaktor yang digunakan, luas permukaan kontak dan volume kultur. Hal ini ditujukan untuk pemerataan suplai CO<sub>2</sub> yang dibutuhkan oleh *Chlorella sp.* pada medium terbatas (<http://www.nhm.ac.uk>).

## **5. Pre-Culture**

Tahapan ini sangat penting dalam pembiakan *Chlorella sp.* Pada tahap ini mikroalga dikenalkan pada medium baru agar lebih terbiasa hingga dapat melewati fasa lag-nya. Setelah itu, *Chlorella* siap untuk dibiakkan pada fasa log. Tahap ini juga bertujuan untuk mengetahui apakah medium yang digunakan sesuai (<http://www.nhm.ac.uk>).

## **6. Kontaminasi**

Sedikit kontaminan yang ada akan mempengaruhi pertumbuhan *Chlorella sp.* Kontaminan dapat berebut makanan dengan *Chlorella* itu sendiri dan yang lebih berbahaya jika kontaminan yang ada menjadi predator bagi



mikroalga itu sendiri. Oleh karena itu, seluruh kegiatan kultivasi *Chlorella sp.* harus dilakukan secara steril untuk mencegah adanya kontaminan.

### 2.2.3. Kandungan Biomassa *Chlorella sp.*

*Chlorella sp.* memiliki komposisi biomassa yang sangat bermanfaat. Walaupun ukurannya kecil tetapi kandungan gizinya sangat tinggi (Sargowo dan Ratnawati, 2005). Di dalam organisme ini terkandung berbagai macam unsur vitamin dan mineral yang esensial bagi tubuh. Salah satunya adalah *Chlorella Growth Factor* (CGF). Komposisi CGF dalam *Chlorella vulgaris* hanya 5%, namun memiliki manfaat yang sangat luas di bidang kesehatan. CGF mengandung berbagai jenis asam amino, peptida, protein, vitamin, dan glukoprotein. CGF dapat digunakan sebagai obat antitumor dan dapat merangsang hormon pertumbuhan (Wirosaputro, 2002). Secara umum kandungan biomassa dari *Chlorella vulgaris* dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2. 2** Komposisi Umum *Chlorella sp.* (Lee dan Rosenbaum, 1987; Steenblock, 1989; Kastono, 1991)

Komposisi	Kandungan (persentase)
Kelembaban	3,6
Protein	60,5
Lemak	11
Karbohidrat	20,1
Serat	0,2
Abu	4,6
Kalori	421 kkal/100 gram

Kandungan protein dalam *Chlorella sp.* jauh lebih banyak dibandingkan dengan biji-bijian dan kacang-kacangan. Protein dalam *Chlorella sp.* terdiri dari asam amino esensial yang sangat dibutuhkan oleh tubuh karena tubuh manusia tidak dapat membuatnya (Sargowo dan Ratnawati, 2005).

Lemaknya sebagian besar terdiri dari lemak tidak jenuh omega-3 dan omega-6 yang merupakan lemak esensial bagi tubuh serta berkhasiat untuk mencegah dan menurunkan darah tinggi (Muhital, 1991; Oezil, 1991). *Chlorella*

*sp.* juga mengandung vitamin dan mineral yang cukup banyak. Kandungan vitamin dan mineral dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan 2.4 di bawah ini :

**Tabel 2. 3** Kandungan Vitamin (mg/100 mg) (Muhital, 1991; Oezil 1991)

Vitamin	Komposisi	Vitamin	Komposisi
Vitamin A aktif	51300 IU	Vitamin B6	1,4
Vitamin E	1,5	Biotin	0,2
Vitamin B1	1,7	Vitamin B12	0,13
Vitamin B2	4,3	Inositol	132
Niasin	23,8	Vitamin C	10,4
Asam pantotenat	1,1	Asam folat	0,09

**Tabel 2. 4** Kandungan Mineral (mg/100 mg) (Muhital, 1991; Oezil 1991)

Mineral	Komposisi
Kalsium	221
Seng	71
Magnesium	315
Fosfor	895
Zat besi	130
Yodium	0,4

#### 2.2.4. Manfaat *Chlorella sp.* dalam Bidang Kesehatan

*Chlorella sp.* merupakan organisme autotrof sehingga dapat berperan aktif memfiksasi CO<sub>2</sub> dari udara sehingga dapat mengurangi polusi udara dari gas CO<sub>2</sub> pada lingkungan. Berkurangnya polutan CO<sub>2</sub> ini membawa dampak positif bagi kesehatan manusia karena akan mengurangi kemungkinan timbulnya gangguan pernafasan.

*Chlorella sp.* telah banyak diteliti dan dimanfaatkan di dalam bidang kesehatan dan pengobatan penyakit. Studi yang banyak diteliti mengenai beberapa komponen utama *Chlorella sp.* adalah :

##### a. Dinding Sel

*Chlorella sp.* memiliki dinding sel dengan komposisi 27% protein, 9,2% lemak, 15,4% selulosa, 31% hemiselulosa, 3,3% glukosamin, dan abu yang banyak mengandung besi serta kapur. Setelah diteliti ternyata dinding sel ini memiliki manfaat sebagai berikut (Sargowo dan Ratnawati, 2005) :

- Merangsang kekebalan tubuh sehingga tidak mudah terserang penyakit yang disebabkan oleh virus (batuk dan pilek); bakteri (disentri dan tifus)
- Menyerap atau mengikat kolesterol sehingga tidak akan menyebabkan tekanan darah tinggi
- Menyerap atau mengikat racun, baik yang berasal dari bahan kimia, makanan maupun bakteri
- Merangsang produksi sel-sel ketebalan saluran cerna sehingga tidak mudah terserang infeksi saluran cerna atau diare

**b. Klorofil**

*Chlorella* mengandung klorofil sebanyak 3%. Dengan bantuan cahaya matahari, klorofil mampu mengubah air dan zat asam arang menjadi oksigen serta bahan makanan yang sangat dibutuhkan oleh manusia. Selain itu, penelitian menunjukkan beberapa manfaat dari klorofil yaitu (Sargowo dan Ratnawati, 2005):

- Menghambat pertumbuhan bakteri jahat di dalam saluran cerna dan merangsang pertumbuhan bakteri yang berguna untuk pencernaan makanan sehingga tidak mudah sariawan dan diare
- Bersifat deodoran, sehingga dapat mengurangi bau badan, bau mulut, bau nafas, serta bau yang berasal dari gas perut (flatulensi)
- Merangsang tumbuhnya *fibroblast* sehingga dapat mempercepat penyembuhan luka
- Memperbaiki fungsi hati sehingga dapat menjalankan fungsi metabolisme makanan dan detoksifikasi racun
- Merangsang pembentukan sel darah merah (eritrosit)
- Mencegah dan memperbaiki pengerasan pembuluh darah, untuk mencegah tekanan darah tinggi, penyakit reumatik dan jantung
- Memperlancar aliran darah
- Bersifat anti-proteolitik, untuk mencegah penyakit alergi, dan tumor atau kanker
- Bersifat antioksidan sehingga dapat mengikat radikal bebas

### c. Beta-Karoten

*Chlorella sp.* mengandung beta-karoten 18-20 kali lebih banyak dibandingkan dengan wortel, pepaya, atau tomat. Dalam kandungan tersebut, maka manfaat yang dapat diambil yaitu (Sargowo dan Ratnawati, 2005) :

- Sebagai antioksidan
- Merangsang kekebalan tubuh
- Sumber vitamin A

### d. *Chlorella Growth Factor* (CGF)

CGF ini hanya terdapat pada *Chlorella sp.* CGF ini mengandung bahan pertumbuhan yang disebut *Ribo Nucleic Acid* (RNA) sebanyak 10% dan *Deoxy Ribo Nucleic Acid* (DNA) 3%. Dengan bantuan CGF, *Chlorella vulgaris* dapat berkembang biak dengan sangat cepat, menjadi 4 kali lipatnya dalam waktu 16-20 jam. Satu sel *Chlorella vulgaris* akan mati setelah berkembang biak menjadi 10.000 sel (Jensen, 1990). Untuk kesehatan manusia, CGF berfungsi untuk :

- Menghambat pertumbuhan tumor ganas (kanker)
- Meningkatkan regenerasi atau peremajaan sel-sel tubuh yang rusak

### e. Protein

Tubuh manusia memerlukan asam amino esensial karena asam amino ini tidak dapat disintesis oleh tubuh manusia sendiri. Asam amino ini juga terdapat dalam protein yang terkandung dalam *Chlorella vulgaris*. Asam amino berguna bagi pertumbuhan dan membantu menjaga gula dalam darah (<http://www.chlorellafactor.com>).

## 2.3. FOTOSINTESIS MIKROALGA HIJAU

*Chlorella sp.* merupakan organisme yang dapat melakukan reaksi fotosintesis dengan memfiksasi CO<sub>2</sub> untuk memproduksi biomassa sebagai sumber energi bagi makhluk heterotrof.

### 2.3.1. Komponen Fotosintesis Mikroalga Hijau *Chlorella sp.*

Komponen-komponen yang berperan dalam proses fotosintesis *Chlorella* adalah kloroplas, sistem *antenna* penyerapan cahaya, dan pusat reaksi fotokimia utama.

#### a. Kloroplas

Proses fotosintesis pada *Chlorella* terjadi di dalam kloroplas, di mana organela-organela ditemukan di dalam sel. Kloroplas menyediakan energi dan karbon tereduksi yang diperlukan untuk pertumbuhan *Chlorella* dan perkembangannya, sementara itu medium hidupnya menyediakan CO<sub>2</sub>, air, nitrogen, senyawa organik, dan mineral-mineral yang penting yang diperlukan kloroplas untuk biogenesis (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

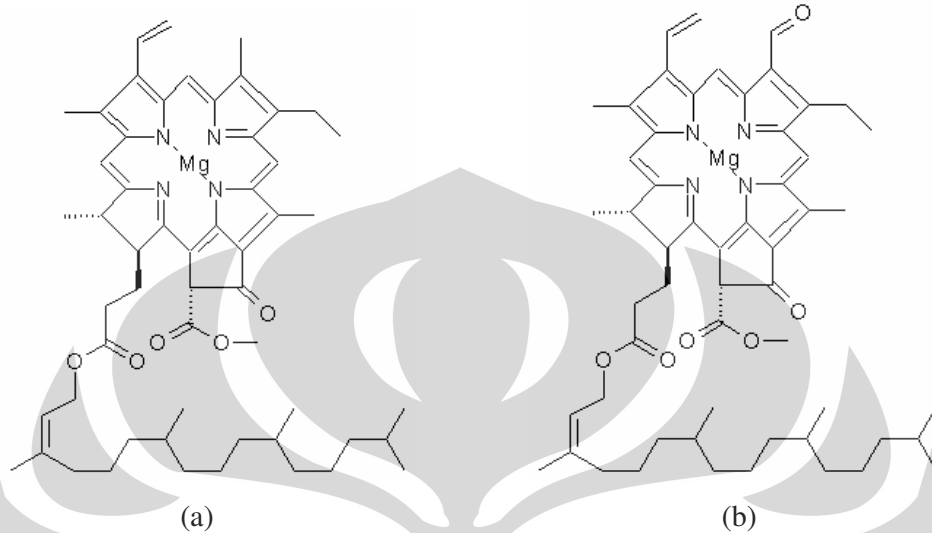
Di dalam kloroplas terdapat sistem membran yang kompleks. Dikenal dengan membran fotosintetik (*membrane thylakoid*), yang mengandung cukup protein yang diperlukan untuk reaksi terang. Protein yang diperlukan untuk fiksasi dan reduksi CO<sub>2</sub> terdapat di luar membran fotosintetik. Membran fotosintetik terbentuk terutama dari lemak, gliserol, dan protein (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

Masing-masing kloroplas dibentuk dari lapisan dalam dan luar *envelope* membran dan berbentuk seperti lensa *konveks meniskus* dengan diameter 5-10 mikron. *Envelope* membran bagian dalam berfungsi sebagai *barrier* untuk mengontrol fluks organik dan bertanggung jawab atas molekul yang keluar masuk kloroplas. Air dapat dengan bebas melalui *envelope* membran, juga bagi molekul netral seperti CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

#### b. Sistem *antenna* penyerapan cahaya

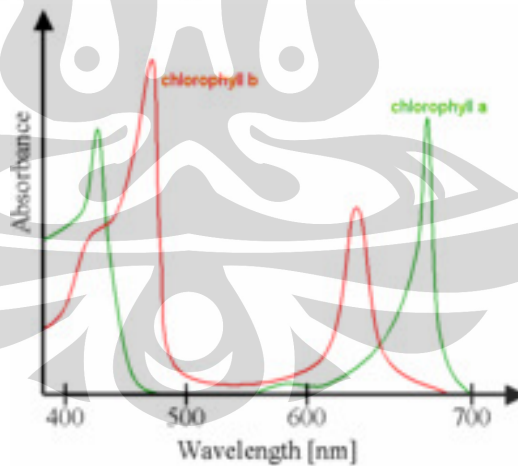
Salah satu faktor utama yang menggerakkan fotosintesis adalah cahaya tampak (panjang gelombang 400 hingga 700 nm) yang teradsorb oleh molekul pigmen (terutama klorofil a dan b, dan karotenoid) (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

Struktur kimia dari klorofil a dan b dapat dilihat pada Gambar 2.6. Pada klorofil b, CH<sub>3</sub> pada cincin II digantikan oleh grup CHO. *Chlorella* akan kelihatan hijau dikarenakan klorofil yang dimilikinya.



**Gambar 2. 6** (a) Struktur klorofil a ; (b) Struktur klorofil b ([http://www.steve\\_gb\\_com-images-science-action\\_spectrum\\_photosynthesis\\_png.htm](http://www.steve_gb_com-images-science-action_spectrum_photosynthesis_png.htm))

Masing-masing klorofil ini memiliki kelebihan pada daya absorpsi terhadap panjang gelombang tertentu seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7.



**Gambar 2. 7** Daya Absorbansi untuk Tiap Klorofil ([http://www.sciepeps\\_com-images-200px-Chlorophyll\\_ab\\_spectra\\_png.htm](http://www.sciepeps_com-images-200px-Chlorophyll_ab_spectra_png.htm))

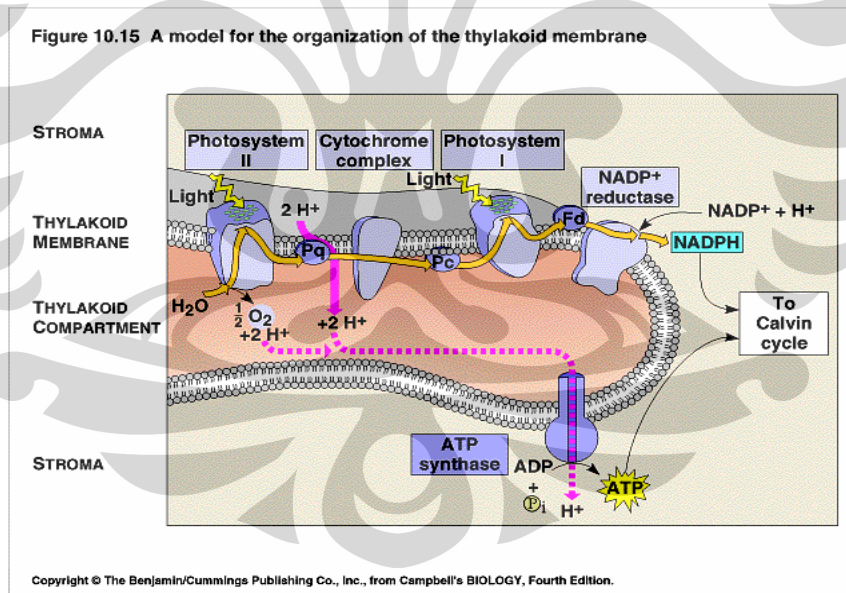
Cahaya yang dikumpulkan oleh 200-300 molekul pigmen akan diikat oleh protein kompleks berada di dalam membran fotosintetik. *Light harvesting complex* akan mengelilingi pusat reaksi yang berfungsi sebagai *antenna*.

Fotosintesis akan dimulai dengan absorpsi foton oleh molekul *antenna*, yang berlangsung sekitar *femto* detik ( $10^{-15}$  s) dan menyebabkan transisi dari elektron stabil menjadi elektron tereksitasi. Dalam waktu  $10^{-13}$  detik bentuk tereksitasi akan menurun oleh karena relaksasi vibrasi (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

Transfer energi *exciton* antara molekul *antenna* disebabkan karena interaksi dari molekul yang mengalami transisi momen *dipole*. Kemungkinan transfer tergantung pada jarak antar transisi dipole dari molekul donor dan akseptor. Pada kondisi optimum lebih dari 90% dari paket energi (*quanta*) akan ditransfer dalam beberapa ratus piko detik dari sistem *antenna* ke pusat reaksi (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

### c. Pusat reaksi fotokimia utama

Terdapat dua pusat reaksi fotokimia utama dalam proses fotosintesis yaitu fotosistem II dan fotosistem I seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8:



Gambar 2. 8 Membran Tilakoid (<http://www.Photosynthesis-Chempedia.htm>)

Fotosistem II menggunakan energi untuk menggerakkan dua reaksi kimia, oksidasi air dan reduksi *plastoquinone*. Fotosistem II kompleks terdiri dari 15 lebih *polypeptide* dan sekurangnya 9 komponen redoks yang berbeda (klorofil, *pheophytin*, *plastoquinone*, *tyrosine*, Mn, Fe, *cytochrome b559*, karotenoid dan

*histidine*) yang menjalankan transfer elektron *light-induced*. Fotosistem II merupakan satu-satunya protein kompleks yang dapat mengoksidasi air, menghasilkan pelepasan O<sub>2</sub> ke atmosfer.

Fotosistem I terdiri dari protein *heterodimer* yang berfungsi sebagai ligan untuk kebanyakan *electron carrier*. Pusat reaksi dijalankan oleh sistem *antenna* yang mengandung dua ratus molekul klorofil (terutama klorofil a). Pada keadaan terang, fotosistem II akan mengumpukan elektron ke fotosistem I. Elektron ini akan ditransfer dari fotosistem II ke fotosistem I oleh *intermediate carrier*. Reaksi tersebut adalah transfer elektron dari molekul air ke NADP<sup>+</sup>, menghasilkan bentuk tereduksi, yaitu NADPH yang akan digunakan bersama ATP dan CO<sub>2</sub> yang difiksasi untuk membentuk senyawa organik pada reaksi gelap (siklus *Calvin*) (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

### 2.3.2. Reaksi Fotosintesis

Fotosintesis adalah reaksi kimia di mana energi pencahayaan diubah menjadi energi kimia dalam glukosa. Mikroalga hijau seperti tumbuhan tingkat tinggi pada umumnya menggunakan proses ini untuk mensintesa gula dan gas oksigen yang merupakan komponen penting dalam kehidupan. Secara kimia, proses fotosintesis merupakan reaksi oksidasi-reduksi di mana oksigen dioksidasi dan hidrogen, ATP dan NADP direduksi.

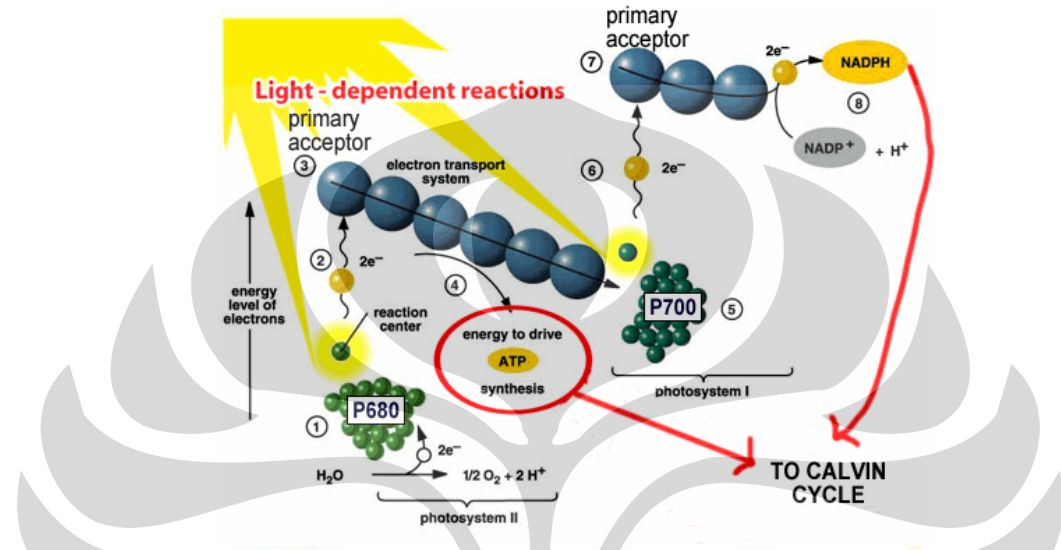
Reaksi fotosintesis secara umum dibagi menjadi dua tahap, yaitu reaksi terang dan reaksi gelap. Pada reaksi terang terjadi reaksi transfer elektron dan foton, sedangkan pada reaksi gelap terjadi reaksi biosintesa karbohidrat dari CO<sub>2</sub>. Reaksi terang menghasilkan sintesis ATP dan NADPH untuk membentuk senyawa organik pada reaksi gelap (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

#### a. Reaksi Terang

Reaksi terang berlangsung pada sistem membran kompleks/grana yang tersusun dari protein kompleks, *electron carrier*, dan molekul lemak. Reaksi terang mengkonversi energi menjadi berbagai produk (<http://www.biology.arizona.edu/>). Pada langkah pertama adalah konversi foton



menjadi bentuk elektron tereksitasi pada molekul *antenna* pigmen yang terdapat pada sistem *antenna*. Baik molekul donor maupun molekul akseptor akan melekat pada protein kompleks pusat reaksi (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).



Gambar 2. 9 Sketsa Reaksi Terang (<http://www.Photosynthesis-Chempedia.htm>)

Secara umum, terdapat tiga reaksi utama yang terjadi pada reaksi terang yaitu :

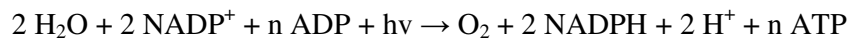
1. Oksidasi H<sub>2</sub>O, menurut persamaan :  

$$2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4 \text{e}^- + 4 \text{H}^+$$
2. Reduksi NADP<sup>+</sup>, menurut persamaan :  

$$2 \text{NADP}^+ + 4 \text{e}^- + 4 \text{H}^+ \rightarrow 2 \text{NADPH} + 2 \text{H}^+$$
3. Sintesis ATP, menurut persamaan :  

$$\text{ADP} + \text{Pi} \rightarrow \text{ATP}$$

Jika tiga persamaan di atas digabungkan maka akan di dapat persamaan untuk reaksi terang :



Pada organisme fotosintetik oksigenik, terdapat dua pusat reaksi yang berbeda, yaitu fotosistem II dan fotosistem I, yang bekerja bersamaan secara seri. Pada keadaan terang, fotosistem II mengumpan elektron ke fotosistem I. Elektron ini

akan ditransfer dari fotosistem II ke fotosistem I oleh *intermediate carrier*. Reaksi tersebut adalah transfer elektron dari molekul air ke  $\text{NADP}^+$ , menghasilkan bentuk yang tereduksi, yaitu NADPH.

Pada proses fotosintesis, banyaknya energi yang disediakan oleh energi cahaya disimpan sebagai energi bebas redoks (sebuah bentuk energi bebas kimia) dalam NADPH, yang kemudian akan digunakan untuk mereduksi karbon (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

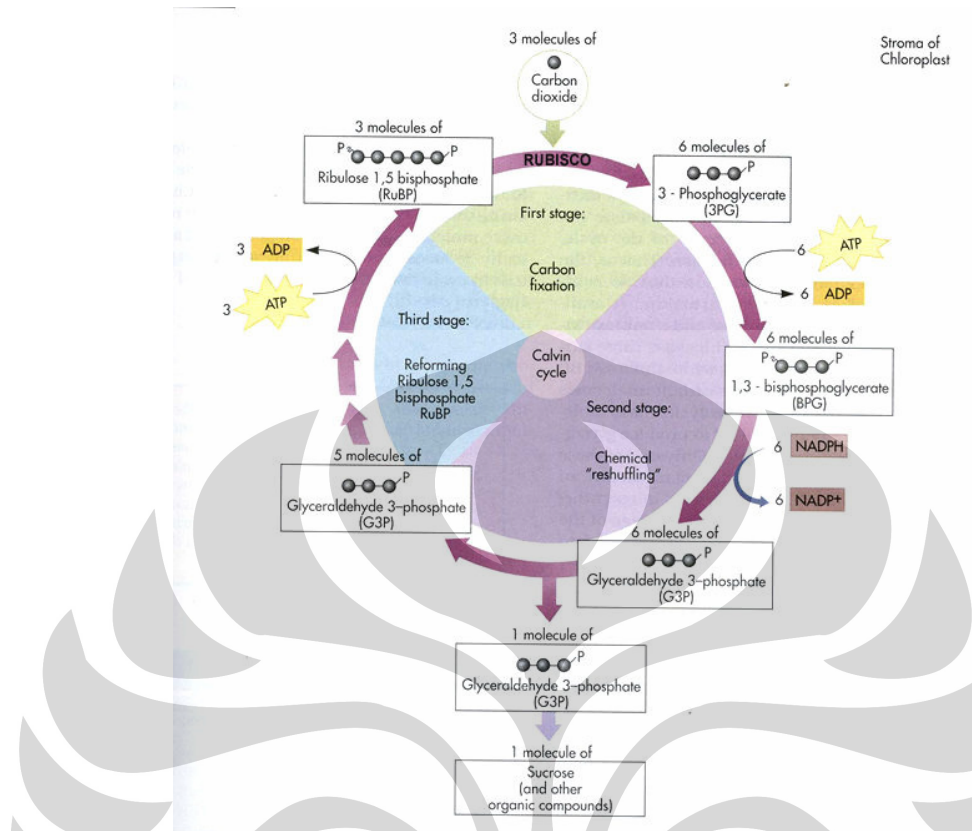
Efek dari reaksi terang adalah konversi energi radian menjadi energi bebas redoks dalam bentuk NADPH dan transfer energi grup fosfat dalam bentuk ATP. Pada reaksi terang, transfer elektron tunggal dari air menjadi  $\text{NADP}^+$  melibatkan sekitar 30 ion logam dan 7 grup aromatik. Ion logam termasuk 20 ion Fe, 5 ion Mg, 4 ion Mn, dan 1 ion Cu. Aromatik termasuk *quinone*, *pheophytin*, NADPH, *tyrosine*, dan *flavoprotein*.

NADPH dan ATP yang terbentuk pada reaksi terang menyediakan energi untuk reaksi gelap fotosintesis, yang dikenal sebagai siklus *Calvin* atau siklus fotosintetik reduksi karbon (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

#### **b. Reaksi Gelap (Siklus Calvin)**

Siklus *Calvin* merupakan suatu siklus dalam proses fotosintesis yang termasuk dalam reaksi gelap. Kata 'Calvin' berasal dari nama seorang peraih *Nobel Prize* pada tahun 1950-an karena telah melakukan eksperimen berbagai reaksi, yaitu Melvin Calvin.

*Chlorella* menghilangkan  $\text{CO}_2$  dari lingkungan dan mereduksinya menjadi karbohidrat melalui siklus *Calvin*. Proses ini merupakan serangkaian reaksi biokimia yang mereduksi karbon dan menyusun ulang ikatan menghasilkan karbohidrat dari molekul  $\text{CO}_2$ . Untuk fiksasi karbon (fiksasi gas  $\text{CO}_2$  yang bebas berdifusi menjadi bentuk yang non-volatil berupa *reduced sugar*) dibutuhkan ATP (energi) dan NADPH (*reducing power*) (<http://fig.cox.miami.edu>).



**Gambar 2. 10** Siklus Calvin (<http://www.Photosynthesis-Chempedia.htm>)

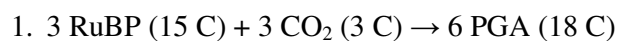
Reaksi yang terjadi pada siklus *Calvin* secara umum dapat dituliskan sebagai berikut :



Senyawa-senyawa yang berperan dalam siklus *Calvin*, antara lain :

- RuBP (*ribulose biphosphate*) 5 carbons
- PGA (*phosphoglycerate*) 3 carbons
- bPG (*bis- phosphoglycerate*) 3 carbons
- GP (*glyceraldehyde-3-phosphate*) 3 carbons
- CO<sub>2</sub> (*carbondioxide*) 1 carbon

Adapun urutan reaksi siklus *Calvin*, antara lain (<http://fig.cox.miami.edu/>) :

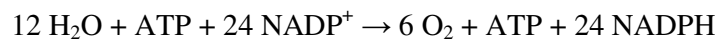


- Reaksi ini dikatalisis oleh *Rubisco* (*ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase*), yang merupakan enzim berlimpah di bumi
  - Tiga molekul CO<sub>2</sub> ditambah energi merupakan *net reactant*
2.  $6 \text{ PGA} + 6 \text{ ATP} \rightarrow 6 \text{ bPG (18 C)} + 6 \text{ ADP}$
- Fosfat yang berenergi tinggi ditransfer dari ATP menjadi PGA membentuk bPG
3.  $6 \text{ bPG} + 6 \text{ NADPH} \rightarrow 6 \text{ GP (15 C)} + 6 \text{ NADP}^+$
- Elektron berenergi tinggi dari NADPH digunakan untuk mereduksi bPG menjadi GP
4.  $5 \text{ GP (15 C)} + 3 \text{ ATP} \rightarrow 3 \text{ RuBP (15 C)}$
- Terjadi berbagai reaksi di mana ikatan disusun ulang untuk mengkonversi 5 buah molekul karbon tiga rantai menjadi 3 molekul karbon lima rantai
  - Reaksi-reaksi ini menghasilkan RuBP, reaksi RuBP yang merupakan bentuk molekul baru CO<sub>2</sub>, akan memulai sebuah iterasi dari siklus ini
  - Satu molekul GP (3 C) akan keluar dari siklus, ini merupakan *yield net* dari reduksi karbon pada siklus *Calvin*

Sehingga persamaan energi yang terjadi dalam siklus *Calvin* adalah (<http://fig.cox.miami.edu/>) :



Pada reaksi terang molekul H<sub>2</sub>O terurai menjadi molekul O<sub>2</sub> dan proton (H<sup>+</sup>). Dalam reaksi tersebut dihasilkan energi dalam bentuk ATP dan NADP<sup>+</sup>. Kemudian, H<sup>+</sup> yang dihasilkan dalam reaksi penguraian air tersebut ditangkap oleh NADP<sup>+</sup> sehingga terbentuk NADPH. Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut :



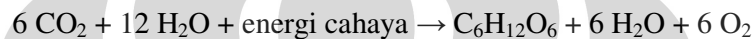
Reaksi terang tersebut terjadi dalam grana. Sedangkan reaksi gelap yang dikemukakan oleh *Blackman* terjadi pada stroma. Dalam reaksi gelap, ATP dan NADPH yang terbentuk pada reaksi terang digunakan untuk pembentukan

glukosa dari karbondioksida (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut :



Jika kedua reaksi tersebut digabungkan maka akan diperoleh reaksi umum fotosintesis sebagai berikut :



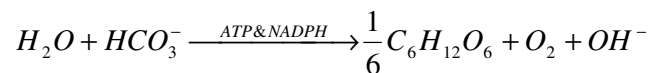
Jadi, reaksi gelap hanya berlangsung jika tersedia energi kimia dan proton ( $\text{H}^+$ ) yang dihasilkan oleh reaksi terang. Tanpa didahului reaksi terang, reaksi gelap tak akan berlangsung (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

### 2.3.3. Fotosintesis Mikroalga Hijau *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Pada mikroalga hijau *Chlorella* yang termasuk organisme renik air, fotosintesis dilakukan di dalam air/media hidupnya.  $\text{CO}_2$  yang dibutuhkan sebagai *carbon source*-nya didapatkan dalam bentuk senyawa bikarbonat yang terbentuk dari reaksi air dengan  $\text{CO}_2$  terlarut dalam media hidupnya (pada ekstra selular) sebagai berikut (Wijanarko, 2004a) :



Senyawa bikarbonat ini yang kemudian diserap oleh sel *Chlorella*. Proses metabolisme yang terjadi dalam sel selanjutnya adalah reaksi antara bikarbonat tersebut dan air yang terdapat dalam sel (siklus *Calvin*) membentuk senyawa organik seperti glukosa dan ion  $\text{OH}^-$  menggunakan energi ATP dan NADPH dari konversi cahaya pada reaksi terang, sebagaimana tergambar pada persamaan reaksi berikut (Wijanarko, A., 2004a) :



Sehingga diketahui bahwa hasil fotosintesis dari mikroalga hijau *Chlorella* adalah ion OH<sup>-</sup>, oksigen molekular, dan senyawa organik yang akan digunakan sebagai cadangan makanan, apabila tidak mendapatkan cahaya dan CO<sub>2</sub> untuk pertumbuhan dan pembelahan selnya (heterotrof).

Seperti yang kita ketahui bahwa fotosintesis adalah bagian dari metabolisme, maka apabila metabolisme ini terganggu maka pertumbuhan dari *Chlorella* yang mengalami hambatan.

#### **2.3.4. Faktor yang Mempengaruhi Fotosintesis**

Berikut beberapa faktor yang mempengaruhi proses fotosintesis yaitu :

##### **a. Cahaya**

Berlangsungnya proses fotosintesis sangat bergantung pada sumber cahaya yang diperoleh. Semakin tinggi intensitas cahaya maka laju fotosintesis akan semakin besar. Namun pada titik tertentu perbandingan intensitas cahaya dengan laju fotosintesis tidak lagi berbanding lurus jika laju fotosintesis telah mencapai titik maksimum atau sering disebut titik jenuh cahaya. Selain itu, terdapat titik di antara keadaan gelap di mana laju fotosintesis adalah nol dan keadaan jenuh cahaya tersebut terdapat suatu titik di mana laju fotosintesis sama dengan laju respirasi. Titik ini disebut titik kompensasi cahaya.

##### **b. Ketersediaan CO<sub>2</sub>**

Ketersediaan CO<sub>2</sub> juga berpengaruh dalam proses fotosintesis. Semakin tinggi kadar CO<sub>2</sub> di udara, maka semakin banyak jumlah bahan yang bisa digunakan untuk melangsungkan reaksi fotosintesis. Namun, kadar CO<sub>2</sub> yang terlalu tinggi juga akan merugikan bagi proses fotosintesis karena dapat meracuni tumbuhan dan menutup stomata. Tingkat konsentrasi CO<sub>2</sub> optimum bagi reaksi fotosintesis adalah 1000-1200  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ .

##### **c. Temperatur**

Kondisi lingkungan seperti temperatur dan tekanan sangat berpengaruh dalam proses fotosintesis. Temperatur akan mempengaruhi kerja enzim yang dibutuhkan dalam proses fotosintesis agar laju fotosintesis berjalan dengan baik.

#### d. Kadar Air

Kadar air sama pentingnya dengan kadar CO<sub>2</sub>, karena keduanya merupakan bahan utama bagi terjadinya reaksi fotosintesis. Kekurangan air atau kekeringan menyebabkan stomata menutup, sehingga menghambat penyerapan karbondioksida yang seterusnya akan mengurangi laju fotosintesis.

### 2.4. FOTOBIOREAKTOR

Terdapat dua jenis aliran untuk kultivasi medium kultur, yaitu sistem *batch* dan sistem kontinyu. Sistem *batch* sering mengalami masalah dalam kultivasi mikroorganisme fototropik yaitu diperlukan kecukupan sistem penerangan yang lebih baik untuk mempertahankan laju pertumbuhan yang maksimum. Dengan sistem *batch*, perlakuan intensitas penerangan yang konstan dalam fotobioreaktor dapat menurunkan rasio intensitas cahaya per sel seiring bertambahnya biomassa (Asterio Sanchez Miron, 2002). Hal ini dikarenakan peristiwa *Self-shading of light*, yaitu sel-sel akan mulai memblok penetrasi cahaya yang akan masuk ke dalam fotobioreaktor.

Pentingnya mikroorganisme fototropik dalam industri bioteknologi akan tetap terbatas sampai permasalahan dalam peningkatan sistem produksi dan penyediaan cahaya yang cukup secara simultan untuk memberikan laju produksi volumetrik yang tinggi terpecahkan. Untuk memaksimalkan produktivitas produk yang berasal dari mikroorganisme fototropik, sangat dirasakan pentingnya untuk memonitor secara *on-line* densitas sel dalam fotobioreaktor dan menyesuaikan parameter proses untuk meyakinkan penggunaan cahaya yang maksimum. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan sistem kontinyu yang dapat dipertahankan di bawah level *self-shading*. Hal ini tidak dapat dilakukan jika dengan pemilihan sistem *batch*, yang menandakan bahwa regulasi intensitas cahaya menjadi sangat penting artinya.

Sebuah fotobioreaktor dengan intensitas cahaya terkontrol, disebut juga lumostat, dapat menjadi sebuah model fotobioreaktor skala laboratorium dengan pengukuran pH dan *dissolved oxygen* secara *on-line*. CO<sub>2</sub> (dan juga HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + H<sup>+</sup>) akan dieliminasi dari medium dan digunakan sebagai sumber karbon oleh mikroorganisme, yang juga akan merubah pH dari medium. Gas CO<sub>2</sub> murni akan ditambahkan ke dalam sistem sebagai titran asam untuk mempertahankan pH

yang dijaga konstan. Laju titrasi gas CO<sub>2</sub> dapat juga digunakan untuk menentukan laju pertumbuhan secara *on-line*. Dengan menyesuaikan intensitas cahaya dapat dicapai nilai optimum untuk densitas biomassa dalam lumostat dengan meminimisasi depresi dari laju pertumbuhan spesifik yang dikarenakan pembatasan cahaya oleh peristiwa *self-shading* pada densitas tinggi.

Gas O<sub>2</sub> yang dihasilkan harus dihilangkan untuk menghindari kerusakan pada fotobioreaktor dari presurisasi dan penurunan produktivitas yang disebabkan oleh karena fotorespirasi di dalam kultur. Salah satu cara untuk menghilangkan konsentrasi O<sub>2</sub> di dalam medium kultur adalah dengan titrasi gas H<sub>2</sub> secara katalitik. Laju titrasi H<sub>2</sub> dapat dilakukan secara proporsional dengan laju produksi O<sub>2</sub> dari fotosintesis dan dapat memberikan tambahan ukuran bebas untuk menentukan konsentrasi biomassa, yaitu jumlah akumulasi tambahan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>. Tetapi ada juga cara lain untuk menghilangkan konsentrasi O<sub>2</sub> yang dihasilkan, yaitu dengan sistem aerasi dengan *bubbler* atau *aerator* dalam fotobioreaktor untuk mengurangi O<sub>2</sub> *dissolved*.

#### **2.4.1. Peranan Fotobioreaktor**

Baik makro maupun mikro alga mempunyai peranan yang sangat penting dalam perekonomian dunia dengan nilai perkiraan *turn over* sebesar US\$ 5 milyar/tahun. Mikroalga merupakan organisme yang unik dan berharga dalam beberapa aplikasi, di mana organisme ini merupakan organisme yang pertama *biological CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> exchanger* pada planet ini, penghasil biomassa terutama yang paling penting, dan salah satu organisme grup ekologi yang beragam. Bakteri fotosintesis dan mikroalga yang telah menjadi suatu ketertarikan dalam beberapa penelitian, industrial, dan kepentingan lingkungan hayati. Yang mendasari penelitian-penelitian tersebut adalah untuk mendalami pemahaman proses fotosintesis secara selular pada organisme fotosintetik, tetapi beberapa penelitian juga telah diarahkan untuk keperluan industri komersial yang dapat memasarkan produk yang dihasilkan dari proses ini. Mikroalga memiliki potensial bioteknologi yang besar untuk memproduksi substansi berharga untuk aplikasi makanan kesehatan, kosmetika, industri farmasi dan juga untuk proses bioteknologi lainnya, misalnya : makanan berprotein, bahan pewarna kosmetik, isotop stabil



dari biokimia, suplemen makanan, dan sebagainya. Proses *biological C-fixation* menawarkan suatu potensial untuk *recycle* CO<sub>2</sub> menjadi bahan polimer dan *supplement* bahan bakar fosil, misalnya : *poly-3-β-hydroxybutyrate* dan H<sub>2</sub> dari *Cyanobacteria* yang telah dimodifikasi secara genetik, trigliserida untuk menghasilkan diesel fuel dari *Nannochloris sp.*, dan hidrokarbon rantai panjang dari *Botryococcus braunii*. Proses reaksi yang menghasilkan produk-produk komersial tersebut dijalankan dalam sebuah sistem yang dinamakan fotobioreaktor. Proses *biological C-Fixation* untuk mengurangi emisi industri relatif lebih mahal dibandingkan dengan teknik penghilangan CO<sub>2</sub> secara konvensional, tetapi akan dapat bernilai ekonomis dengan pemilihan jenis spesies mikroalga yang menghasilkan produk yang bernilai komersial tinggi.

Sehingga basis bioteknologi untuk produksi yang paling efisien dari biomassa mikroalga merupakan kunci keberhasilan untuk dampak masa depan dari organisme ini. Sistem teknis untuk produksi mikroorganisme fototropik diformulasikan dalam bentuk fotobioreaktor. Sistem ini telah dievaluasi pada berbagai konsep konfigurasi dengan pertimbangan potensial produktivitas dan prospek ekonominya. Desain secara teknik dan basis teknologi untuk fotobioreaktor merupakan pokok yang paling penting untuk keberhasilan ekonomi dalam lapangan bioteknologi fototropik. Untuk aplikasi di masa depan, sistem kolam terbuka untuk produksi skala besar sepertinya akan memiliki potensi inovatif yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem tertutup. Untuk produksi dengan nilai komersial tinggi tentunya, sistem tertutup dari fotobioreaktor akan menjadi lapangan yang lebih menjanjikan untuk perkembangan teknis, kecuali adanya pendekatan desain yang sangat berbeda nantinya.

#### **2.4.2. Jenis Fotobioreaktor**

Pemilihan desain dari sebuah fotobioreaktor akan sangat mempengaruhi produksi dan efisiensi overall untuk memproduksi mikroorganisme yang berbasiskan produk. Sistem terbuka dan sistem tertutup merupakan dua jenis kelas fotobioreaktor, yang masing-masing mempunyai properti unik yang harus dievaluasi ketika mendesain sebuah sistem produksi biomassa. Jenis bioreaktor terbuka dapat berupa kolam outdoor, yang biasanya mempunyai kekurangan dalam hal kontrol parameter proses secara akurat. Sistem ini menawarkan sedikit

atau tidak adanya kontrol pada parameter temperatur dan intensitas cahaya, efisiensi penggunaan CO<sub>2</sub> yang kecil dikarenakan kurangnya aliran turbulen dan pelepasan gas-gas dari medium kultur. Kontaminasi oleh mikroorganisme lain akan mempengaruhi pertumbuhan dari kultur yang diinginkan dan penurunan kualitas produk. Karena laju keluaran per volume reaktor kecil, menyebabkan suatu beban berat pada biaya produksi dan berdampak pada kecenderungan pertumbuhan pada fotobioreaktor tertutup. Sistem tertutup menawarkan kontrol yang lebih bagus pada variabel proses, efisiensi penggunaan CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi, dan sangat mengurangi adanya kontaminasi. Bentuk yang umum untuk sistem bioreaktor tertutup adalah *rigid tubular*, tetapi ada juga yang berbentuk *thin panel*, *helical coil*, dan lain-lain. Perbandingan luas permukaan dengan volume untuk reaktor luar berkisar 20-40/m, sedangkan untuk sistem tertutup dapat mencapai 40-80/m tergantung dari bentuk konfigurasi.

Sistem terbuka dapat dibagi menjadi *natural water* (danau, kolam, laguna) dan kolam buatan (*container*) dengan konstruksi yang sangat berbeda jalannya. Dengan pertimbangan kompleksitas teknis, sistem terbuka akan jauh lebih mudah dioperasikan dibandingkan dengan sistem tertutup. Kebanyakan sistem tertutup terdiri dari fotobioreaktor tubular dengan bentuk, ukuran, dan panjang *tube* yang berbeda-beda juga bahan transparan yang digunakan. Dalam semua kasus, kunci solusi untuk bioteknologi dengan pertumbuhan mikroalga yang optimum adalah cahaya dan turbulensi. Sistem dengan kolam terbuka dapat memberikan kondisi alam yang sama dengan mikroalga di lingkungan. Meskipun banyak jenis dan bentuk yang berbeda, tetapi desain teknis yang paling sering digunakan untuk sistem kolam terbuka adalah *raceway cultivator* yang digerakkan oleh *paddle wheels* dan biasanya dioperasikan pada kedalaman air 15-20 cm. Pada kedalaman ini, konsentrasi biomassa dapat mencapai 1000 mg/L dan produktivitas dapat dicapai sampai 60-100 mg/L-hari (10-25 g/m<sup>2</sup>-hari). Desain yang sama adalah bentuk *circular pond* yang sering dipakai di Asia dan Ukraina. Dengan penggunaan sistem kolam terbuka, memerlukan suatu lahan tanah yang tidak sedikit. Dan kekurangan yang paling utama dari sistem kolam terbuka yaitu memerlukan suatu lahan tanah yang tidak sedikit. Dan kekurangan yang paling utama dari sistem kolam terbuka yang berhubungan dengan produktivitas adalah

keterbatasan cahaya pada lapisan yang tebal. Secara teknis suplai cahaya dapat diperkaya dengan mereduksi lapisan tebal tersebut menjadi beberapa centimeter atau bahkan milimeter, dengan menggunakan sistem kultur dari jenis *thin layer inclined*. Permasalahan lainnya dari sistem terbuka adalah *maintenance* dari populasi mikroalga yang diinginkan, yang mungkin hanya bisa untuk spesies *extremophilic*, dan mengandung resiko kontaminasi yang lebih besar. Sampai belakangan ini, sistem terbuka masih menjadi desain utama untuk produksi mikroalga. Preparasi untuk produk bernilai tinggi dari mikroalga dalam aplikasi kosmetik dan farmasi kelihatannya lebih memungkinkan hanya pada basis fotobioreaktor tertutup dengan kemampuan sistem tertutup ini untuk menghasilkan kondisi produksi yang lebih baik dan relevan dengan GMP (*GMP : Good manufacturing Practise following ISO and EC guidelines*).



**Gambar 2. 11** (a) Fotobioreaktor sistem terbuka ([http://www.ppo.be-images-104\\_1B.jpg.htm](http://www.ppo.be-images-104_1B.jpg.htm)) (b) Fotobioreaktor sistem tertutup ([http://www.energiaverde.com.br-parceiros\\_clip\\_image003.jpg.htm](http://www.energiaverde.com.br-parceiros_clip_image003.jpg.htm))

Fotobioreaktor tertutup dikarakterisasi oleh regulasi dan kontrol hampir semua parameter bioteknologi penting, juga oleh keunggulan dasar lain : mereduksi resiko kontaminasi, tidak kekurangan CO<sub>2</sub>, kondisi kultivasi yang reproduktif, temperatur dan hidrodinamika yang terkontrol, dan desain teknis yang fleksibel. Sejak tahun 1990an parameter seperti efisiensi cahaya terhadap iluminasi fotobioreaktor, jarak pencahayaan, ketebalan lapisan, turbulensi, dan pelepasan O<sub>2</sub> dari sistem telah menjadi suatu hal yang sangat penting dalam perancangan fotobioreaktor sistem tertutup atau hampir semua tertutup yang berdasarkan konsep desain konsep desain yang sangat berbeda dengan sistem terbuka telah diimplementasikan dan diuji coba sampai *pilot scale*

*photobioreactor* dengan sistem tertutup dapat berupa *tubular*, *compact-plate*, dan *bubble column photobioreactor*.

**Tabel 2. 5** Perbandingan Beberapa Nilai Fotobioreaktor (Pulz, O., 2001)

	Unit	Raceway	Surface Type Open Pond, High Layer Thickness	Tubular Open Pond, Low Layer Thickness	Semi-closed Plated Tubular System
<i>Illuminate surface</i>	m <sup>2</sup>	500	200	600	500
<b>Volume total</b>	m <sup>3</sup>	75	5	7	6
<i>Space required</i>	m <sup>2</sup>	550	250	110	100
<i>Layer thickness</i>	cm	10-30	0.5-1	4	3
<b>Laju alir</b>	cm s <sup>-1</sup>	30-55	30-45	50-60	120
<b>Konsentrasi Biomassa</b>	mg L <sup>-1</sup>	300-500	3000-6500	5000-8000	5000-8000
<b>Produktivitas</b>	g L <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup>	0.05-0.1	0.8-1	0.8-1.2	0.8-1.3

Dikarenakan sistem terbuka biasanya memiliki produktivitas yang kecil, sehingga untuk skala industri banyak digunakan sistem tertutup seperti tubular fotobioreaktor.

Fotobioreaktor sistem tertutup mempunyai berbagai bentuk, ukuran, dan panjang yang disesuaikan dengan material yang digunakan (Pulz, O., 2001). Ada beberapa jenis fotobioreaktor sistem tertutup (dibedakan berdasarkan bentuk, *flow regime*, efisiensi cahaya, dan luas permukaan kontakannya) yang biasanya digunakan dalam kultivasi mikroorganisme yaitu :

Tubular fotobioreaktor

*Conical* fotobioreaktor

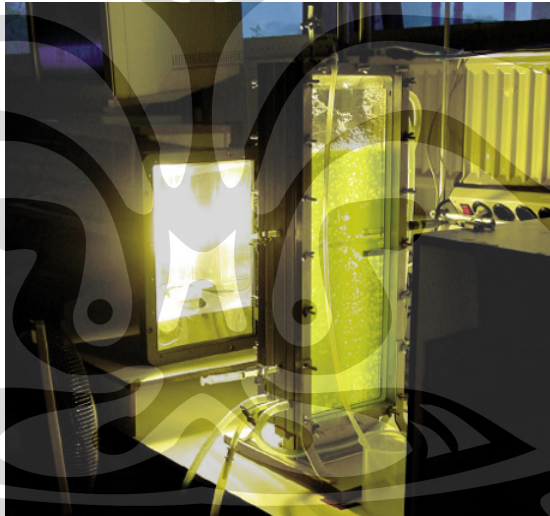
*Plat-type* fotobioreaktor

*Bubble column* fotobioreaktor

### 2.4.3. Fotobioreaktor Kolom Gelembung

Sistem fotobioreaktor terdiri dari beberapa bagian yaitu reaktor vessel, sistem sirkulasi gas, sistem titrasi gas, lemari yang bersih, sumber cahaya, dan sistem pengendalian reaktor. Untuk kultivasi mikroalga sendiri dapat dilakukan dengan sistem *batch* atau kontinu. Tetapi dalam beberapa penelitian sistem kultivasi yang digunakan adalah *semi-batch* di mana gas CO<sub>2</sub> secara kontinu dialirkan ke dalam reaktor sedangkan mikroalga ditempatkan secara *batch* (<http://www.inhavision.inha.ac.kr/~leecg/Lumostat.pdf>).

Dalam fotobioreaktor ini biasanya digunakan sparger yang fungsinya sama seperti pengaduk dalam reaktor berpengaduk. Fungsi dari sparger di sini adalah agar pencampuran gas dan aerasi terjadi secara baik. Penggunaan fotobioreaktor kolom gelembung ini mempunyai beberapa keuntungan di antaranya biaya modal yang cukup rendah.



Gambar 2. 12 Fotobioreaktor Kolom Gelembung (<http://www.bio-ic.ac.uk/research-pnixon-images-figure3.gif>)

Intensitas penerangan dalam fotobioreaktor kolom gelembung sistem *batch* harus dipertahankan pada tingkat yang sesuai dengan jumlah inokulum. Hal ini dikarenakan semakin bertambahnya waktu maka jumlah mikroorganisme dalam fotobioreaktor tersebut akan semakin banyak karena terjadi proses pembelahan sel. Semakin banyak jumlah mikroorganisme tersebut maka kemungkinan bagi mikroorganisme yang berada di bagian tengah dan belakang untuk memperoleh cahaya semakin minim karena tertutup oleh

mikroorganisme yang berada di depannya. Distribusi yang tidak seimbang ini menyebabkan laju pertumbuhan mikroorganisme terganggu. Peristiwa ini dikenal dengan *self-shading of light* (Gunther, 2000).

Dalam reaksi fotosintesis dihasilkan gas O<sub>2</sub> yang dapat menyebabkan kenaikan tekanan dan merusak fotobioreaktor. Dengan menggunakan sistem titrasi katalitik menggunakan gas H<sub>2</sub> atau menggunakan sistem aerasi dengan aerator, konsentrasi O<sub>2</sub> dalam fotobioreaktor dapat dihilangkan.

## 2.5. PROSES SCALE-UP

Proses *scale-up* membutuhkan beberapa kriteria untuk memprediksi hasil proses dalam peralatan yang lebih besar. Setiap proses mempunyai prosedur unik dalam *scale-up*. Prosedur ini diperoleh dari pengujian dan pengalaman.

### 2.5.1. Kesamaan Geometri, Dinamika, dan Kinematika (Oldshue, 1983)

Kesamaan geometri berarti bahwa semua dimensi yang berhubungan sama dan mempunyai rasio konstanta yang sama. Kesamaan kinematika mengharuskan semua kecepatan dalam dua skala yang berbeda mempunyai rasio yang sama. Kesamaan dinamika mengharuskan semua rasio gaya yang berhubungan harus mempunyai rasio konstanta umum.

Pengujian gaya yang penting dalam reaktor berpengaduk menunjukkan bahwa terdapat empat hal yang disyaratkan yang harus dianalisis. Hal pertama adalah gaya input dari pengadukan yang dapat dikatakan mengacu pada gaya inersia. Gaya ini ditentukan oleh pemilihan peralatan pengaduk dan dimensinya. Ditambah lagi terdapat tiga gaya berlawanan yaitu viskositas, gravitasi, dan tegangan permukaan.

Kesamaan dinamika mengharuskan rasio dari keempat gaya ini sama, baik dalam model dan prototipe mempunyai nilai yang sama pada rasio konstanta yang sering digunakan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.6.

**Tabel 2. 6** Rasio Konstanta Umum (Oldshue, 1983)

---

$$\text{Geometri : } X_M/X_P = X_R$$

$$\text{Dinamika : } (F_I)_M/(F_I)_P = (F_V)_M/(F_V)_P = (F_\sigma)_M/(F_\sigma)_P = F_R$$

---

Dengan :

$X$  = dimensi yang diberikan untuk M (model) dan P (prototipe)

$X_R$  = nilai rasio umum

$F$  = gaya yang diberikan untuk model dan prototipe

$I$  = gaya inersia

$V$  = gaya viscous

$G$  = gaya gravitasi

$\sigma$  = gaya tegangan permukaan

### 2.5.2. Shear

Satu-satunya jalan suatu partikel dapat bertumbukan dengan partikel lain dalam vessel berpengaduk adalah dengan mempunyai vektor kecepatan yang berbeda. *Shear rate* merupakan ukuran gradien kecepatan. Nilai ini juga merupakan elemen esensial dari proses *mixing*.

Dalam proses *scale-up* gradien kecepatan harus dihitung sedemikian rupa sehingga nilai ini sesuai dengan proses pengadukan yang diharapkan. Hal ini sangat sulit mengingat semakin besar ukuran alat yang digunakan semakin sulit untuk suatu partikel bertumbukan satu sama lain untuk bereaksi dibandingkan dengan alat yang lebih kecil.

Penghitungan gradien kecepatan pada proses *scale-up* bergantung pada jenis alat dan sistem pengadukan yang digunakan. Oleh karena itu, sebelum melakukan *scale-up* sebaiknya dilakukan pengujian parameter apa yang sangat berpengaruh pada proses yang dijalankan.

### 2.5.3. Scale-up Bioreactor

*Scale-up* untuk pertumbuhan mikroorganisme biasanya dilakukan dengan mempertahankan konsentrasi oksigen yang terlarut dalam liquid, tidak bergantung pada ukuran reaktor.

Jika memperbesar ukuran reaktor maka hal kunci yang harus diperhatikan adalah kecepatan pengadukan yang digunakan pada sistem. Kecepatan yang terlalu besar maka akan menghambat pertemuan antara mikroorganisme dengan substrat. Namun jika terlalu rendah, proses pencampuran tidak akan berlangsung baik (Fogler, 1870).

Penentuan laju superficial pada perbesaran reaktor dilakukan dengan uji profil waktu tinggal (RTD). Proses ini harus dilakukan secara teliti sehingga pertumbuhan mikroorganisme berjalan dengan baik. Jumlah sel awal juga berpengaruh pada hasil akhir produksi biomassa sehingga pada volume reaktor yang lebih besar, jumlah inokulum awal yang digunakan juga sebaiknya ditingkatkan agar perbandingan antara medium hidup dan jumlah sel sama. Persentase *carbon source* yang diberikan juga berpengaruh karena beberapa mikroorganisme hanya tahan pada senyawa tertentu dengan konsentrasi tertentu juga.

Temperatur dan tekanan pada proses *scale-up* tidak terlalu berpengaruh karena kedua variabel ini terus dijaga tetap selama proses kultivasi sehingga tidak akan berubah seiring dengan perubahan volume.

Pada bioraktor fotosintesa, intensitas merupakan salah satu faktor pendukung untuk pertumbuhan mikroalga. Pencahayaan bergantung pada jumlah sel mikroorganisme. Oleh karena itu, jika dilakukan *scale-up* pada reaktor tidak akan mempengaruhi proses hanya saja pencahayaan yang baik bergantung pada bentuk reaktor yang ada. Semakin luas permukaan iluminasi yang dimiliki maka reaktor tersebut semakin baik menerima cahaya sehingga konversi yang diperoleh akan lebih besar.



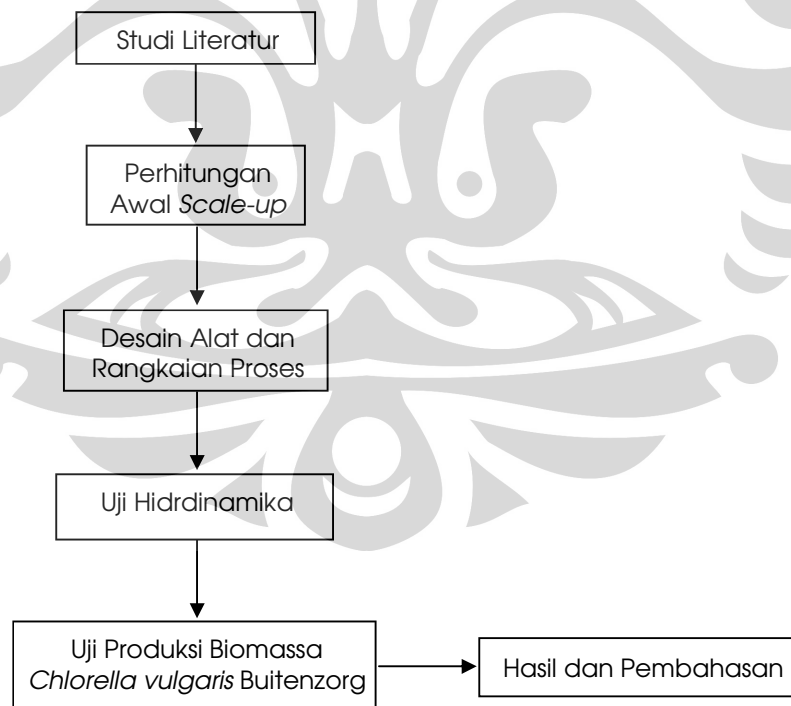
## BAB III

### METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai diagram alir penelitian, alat dan bahan penelitian, variabel penelitian, prosedur penelitian, dan metode pengolahan data yang akan dilakukan untuk mendapatkan hasil penelitian.

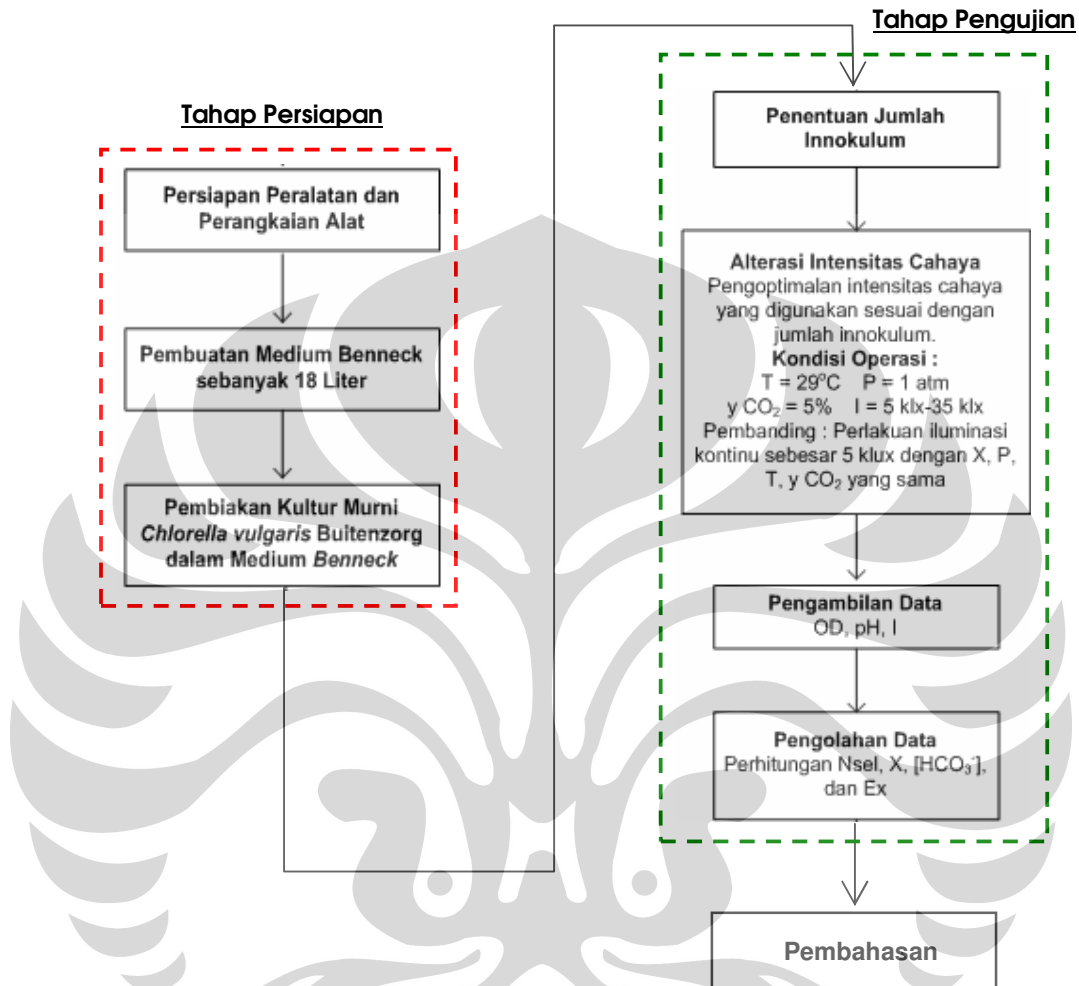
#### 3.1. DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur dan perhitungan awal dalam perbesaran skala produksi untuk mendapatkan basis acuan/referensi dalam penelitian kali ini. Langkah selanjutnya dapat dilihat pada diagram alir penelitian pada Gambar 3.1 :



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

Uji produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg sendiri terdiri dari beberapa langkah kerja berikut :



Gambar 3. 2 Uji Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

### 3.2. ALAT DAN BAHAN PENELITIAN

Pada bagian berikut akan dijelaskan mengenai beberapa alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini.

### 3.2.1. Alat Penelitian

Peralatan yang akan dirangkai menjadi satu instrumen di dalam lemari fotobioreaktor untuk melakukan *running* kultivasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg adalah sebagai berikut :

1. Bioreaktor dengan kapasitas 18 dm<sup>3</sup> dengan bahan kaca yang transparan sebagai reaktor untuk melakukan *running*
2. *Air pump*
3. Tabung gas CO<sub>2</sub> yang dilengkapi dengan regulator
4. *Flowmeter* udara dan *flowmeter* CO<sub>2</sub>
5. Lampu Phillip 23 watt sebanyak 8 buah
6. Sparger sebanyak 2 buah
7. T-septum yang terbuat dari bahan gelas sebagai titik indikator konsentrasi CO<sub>2</sub> yang masuk ke dalam fotobioreaktor
8. Selang silikon dan selang plastik

Peralatan di bawah ini merupakan instrumen untuk pengambilan data penelitian, baik variabel bebas maupun variabel terikatnya, yaitu :

1. Kuvet kaca dengan volume 5 mL
2. Spektrofotometer UV-VIS (*spectro UV-VIS Spectrophotometre*, LaboMed Inc.)
3. Luxmeter (*Set Lightmeter* Lxtron LX-103)
4. pHmeter (HANNA Model HI 8014)

Selain itu terdapat juga instrumen tambahan dengan beberapa fungsi tertentu, antara lain :

1. Peralatan *glassware* yang terdiri dari erlenmeyer, pipet ukur, pipet tetes, gelas ukur, botol sampel sel, dan *beaker glass* yang memiliki volume tertentu sesuai dengan kebutuhan
2. Penangas dan kompor gas untuk sterilisasi alat
3. Lemari kerja UV

### 3.2.2. Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Starter mikroalga hijau *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan usia  $\pm$  60 jam yang telah dihitung sel awal-nya (inokulum) menggunakan spektrofotometer pada 600 nm
2.  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$ , dan  $\text{FeCl}_3$  untuk membuat medium *Benneck*
3. Gas  $\text{CO}_2$  sebagai bahan untuk fotosintesis mikroalga
4. Aquadest untuk membuat medium *Benneck* dan mencuci peralatan
5. Alkohol 70% untuk sterilisasi peralatan

### 3.3. VARIABEL PENELITIAN

Variabel yang terdapat dalam penelitian kali ini adalah :

#### 3.3.1. Variabel Bebas

Variabel ini merupakan variabel yang diset pada suatu harga tertentu. Variabel bebas pada penelitian ini adalah waktu pengambilan data ( $t$ ) dan jumlah sel awal ( $N_0$ ). Selain itu ada variabel yang semibebas yaitu variabel yang besarnya ditentukan oleh suatu variabel terikat tertentu. Variabel ini adalah besarnya intensitas cahaya ( $I_0$ ) yang ditentukan sesuai dengan konsentrasi sel di dalam reaktor ( $N$ ) yang merupakan variabel terikat.

#### 3.3.2. Variabel Terikat

Variabel ini merupakan variabel yang diukur dengan menggunakan alat. Variabel terikat pada penelitian ini adalah jumlah kerapatan sel ( $N$ ), pH, dan besar intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh reaktor ( $I_b$ ).

### 3.4. PROSEDUR PENELITIAN

Dari Gambar 3.1 di atas, tahapan prosedur penelitian yang dilakukan dapat dijabarkan sebagai berikut :

#### 3.4.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan sebelum menjalankan persiapan, semua literatur yang berkaitan dengan penelitian dikumpulkan dan dipelajari.

### **3.4.2. Perhitungan Awal *Scale-up***

Perhitungan awal *scale-up* dilakukan sebagai basis/referensi penelitian di mana akan dibandingkan data hasil penelitian dengan hasil perhitungan. Perhitungan awal ini dilakukan pada beberapa variabel yang berhubungan dengan proses pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg seperti hasil produksi, kecepatan superfisial dan volume yang digunakan selama kultivasi.

### **3.4.3. Desain Alat dan Rangkaian Proses**

Desain alat dilakukan dengan melihat hal-hal penting dalam sistem proses yaitu dimensi reaktor, sistem rangkaian alat, dan sistem pencahayaan. Aspek-aspek tersebut merupakan faktor penentu dalam desain alat dengan mengacu pada sistem rangkaian penelitian sebelumnya yang telah berhasil dilakukan oleh Sang Made Kresna Andika (2005).

### **3.4.4. Uji Hidrodinamika**

Penentuan kecepatan superfisial gas dilakukan dengan penentuan *Retention Time Distribution* (RTD) dan juga membandingkan turbulensi aliran yang terjadi pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dengan fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium. Kecepatan superfisial gas yang digunakan pada fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium sebagai pembanding adalah 2,4 m/jam dengan volume 0.25 dm<sup>3</sup> sedangkan volume yang digunakan pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah adalah 18 dm<sup>3</sup>.

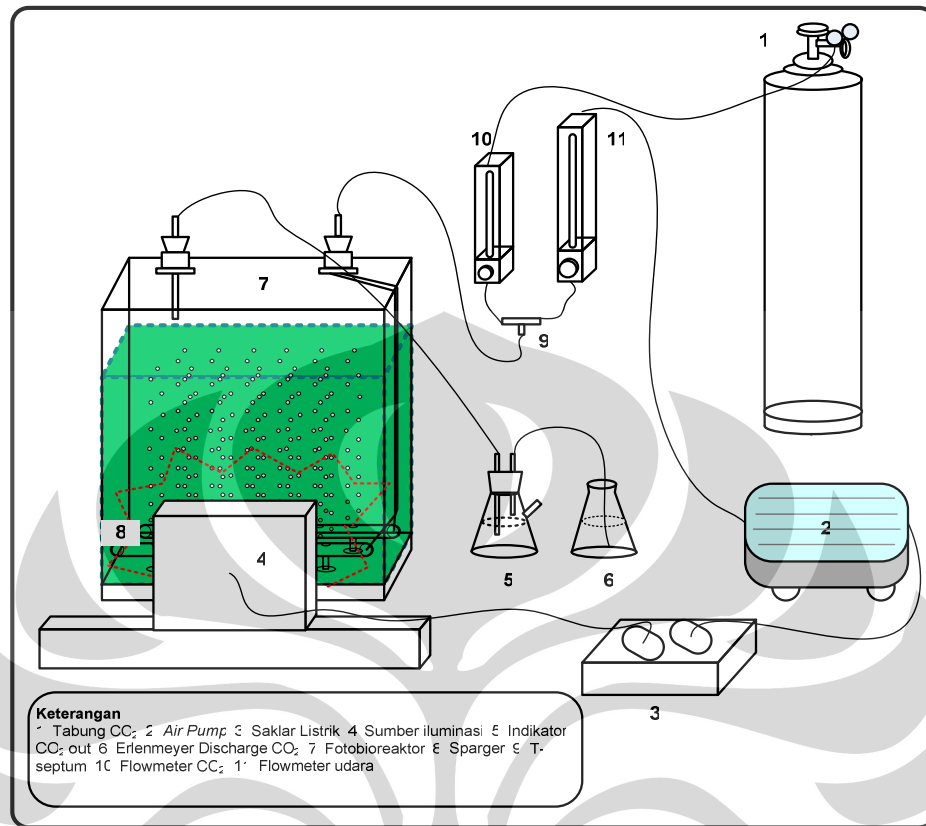
### **3.4.5. Uji Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg**

Uji produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg terdiri dari dua tahap yaitu :

#### **3.4.5.1. Tahap Persiapan**

##### **a. Perangkaian Alat**

Pada tahap ini semua alat yang dibutuhkan dirangkai menjadi satu kesatuan seperti Gambar 3.2 :



Gambar 3.3 Rangkaian Alat

Aliran CO<sub>2</sub> (5%) disatukan dengan aliran udara yang berasal dari *air pump*, laju alir keduanya di atur sedemikian rupa sehingga asupan CO<sub>2</sub> ke dalam reaktor baik.

b. Pembuatan Medium *Benneck*

Medium *Benneck* dibuat dengan cara melarutkan 200 mg MgSO<sub>4</sub>, 100 mg KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 500 mg NaNO<sub>3</sub>, dan 3 – 5 mg FeCl<sub>3</sub> dalam 1 liter aquadest. Larutan ini kemudian dikukus di dalam panci bertekanan selama 1 jam dengan api sedang. Setelah itu larutan dipisahkan dari padatan yang mengendap pada bagian bawahnya dan didinginkan. Larutan ini selanjutnya digunakan sebagai medium pertumbuhan *Chlorella vulgaris*.

c. Pemiakan Kultur Murni *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

*Chlorella vulgaris* murni dimasukkan ke dalam reaktor steril dan dicampur dengan medium *Benneck* dengan perbandingan tertentu sesuai kebutuhan

penelitian. Kemudian dilakukan kultivasi dengan mengalirkan udara ke dalam reaktor. Kultivasi dapat dilakukan selama 2-3 hari dengan memberikan cahaya dengan intensitas 1000 lx untuk melewati *fasa lag* dari pertumbuhan *Chlorella vulgaris*.

#### **3.4.5.2. Tahap Pengujian**

##### **a. Penentuan Jumlah Inokulum**

Dalam proses ini dilakukan homogenisasi dengan cara mengaduk medium kultur hingga semua endapan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang ada di dalamnya merata. Kemudian mengambil sampel yang akan ditentukan jumlah selnya kemudian mengukur nilai absorbansinya dengan menggunakan spektrofotometer. Setelah itu, data yang diperoleh dapat diketahui dengan melihat hubungan antara OD<sub>600</sub> vs jumlah sel pada kurva kalibrasi.

##### **b. Alterasi Intensitas Cahaya**

Setelah inokulum diukur pada tahap penentuan jumlah, kemudian inokulum tersebut dipindahkan ke dalam reaktor dan penelitian dimulai. Intensitas cahaya akan terus ditingkatkan seiring dengan peningkatan jumlah sel dalam reaktor. Intensitas yang digunakan disesuaikan dengan grafik yang telah diperoleh pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sang Made Kresna di Departemen Teknik Kimia, dapat dilihat pada Gambar 2.5.

##### **c. Pengambilan Data**

Data yang diambil setiap 4 jam sekali adalah OD, pH, dan I.

##### **d. Pengolahan Data**

Data yang diambil pada saat pengambilan data akan diolah menjadi beberapa variabel berikut :

#### **1. Perhitungan $\mu$ (Monod, 1949)**

Laju pertumbuhan spesifik ( $\mu$ ) adalah laju pertumbuhan sel/produksi biomassa pada selang waktu pertumbuhan. Laju pertumbuhan spesifik ini dihitung dengan menggunakan persamaan Monod :

$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} \quad \text{atau} \quad \mu = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (3.1)$$

dimana:

- $\mu$  = laju pertumbuhan spesifik ( $h^{-1}$ )
- $N$  = jumlah sel ( $sel/cm^3$ )
- $X$  = berat kering sel/biomassa ( $g/dm^3$ )
- $t$  = waktu (h)

## 2. Perhitungan X

Jumlah biomassa yang dihasilkan dari medium kultur mikroalga dapat dihitung secara langsung dengan mengkorelasikannya pada kurva kalibrasi yang telah dibuat.

## 3. Perhitungan $[HCO_3^-]$ (Badger and Andrews, 1982; Wijanarko and Otaguchi, 2004)

Dengan menggunakan persamaan *Henderson-Hasellbach*, dapat dicari besar konsentrasi  $[HCO_3^-]$ , yaitu:

$$K_{CO_2} = \frac{[HCO_3^-] \cdot [H^+]}{[CO_2]} \quad (3.2)$$

$$[HCO_3^-] = K_{CO_2} [CO_2] [H^+] \quad (3.3)$$

$$[HCO_3^-] = K_{CO_2} [CO_2] 10^{-pH} \quad (3.4)$$

Sedangkan untuk mencari nilai  $K_{CO_2}$  dan  $[CO_2]$  digunakan pendekatan hukum Henry.

$$P_{CO_2} = H_{CO_2} \cdot [CO_2] \quad (3.5)$$

$$[CO_2] = \frac{P_{CO_2}}{H_{CO_2}} \quad (3.6)$$

$$\ln \left( \frac{H_{CO_2}}{H_{CO_2,0}} \right) = A_H \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_H \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_H \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \quad (3.7)$$

$$\ln \left( \frac{H_{CO_2}}{H_{CO_2,0}} \right) = A_K \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_K \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_K \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \quad (3.8)$$

Dengan menggabungkan kedua persamaan di atas, maka kandungan bikarbonat  $[HCO_3^-]$  dapat dicari dengan menggunakan persamaan :



$$[HCO_3] = \left( \frac{K_{CO_2,0}}{H_{CO_2,0}} \right) \left( \frac{y_{CO_2} \cdot P_T}{10^{-pH}} \right) \left( \frac{\text{EXP} \left[ A_k \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_k \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_k \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]}{\text{EXP} \left[ A_h \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_h \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_h \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]} \right) \quad (3.9)$$

dengan :

$P_T$  = temperatur operasi. (atm)

$y_{CO_2}$  = konsentrasi gas  $CO_2$  yang diumpankan.

$K_{CO_2}$  =  $4.38 \cdot 10^{-7}$

$H_{CO_2}$  =  $2900 \text{ kPa.kg/mol}$

$T$  = temperatur operasi (K)

$T_0$  = temperatur standar (K)

Konstanta-konstanta aktivitas gas  $CO_2$  :

$A_k = 40.557$     $B_k = -36.782$     $C_k = 0$

$A_h = 22.771$     $B_h = -11.452$     $C_h = -3.117$

#### 4. Pengolahan Ex dan $\eta$ (Hirata et al, 1996)

Nilai  $I_0$  (jumlah intensitas yang diterima oleh reaktor) dan  $I_b$  (besar intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh reaktor) digunakan untuk menentukan besarnya nilai energi yang digunakan untuk produksi biomassa dari *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Nilai energi ini ditentukan melalui persamaan berikut :

$$E_x = \frac{\int_0^t I_t dt}{\Delta X \cdot s} \quad (3.10)$$

di mana :

$\Delta X$  = berat biomassa yang dihasilkan selama masa kultivasi ( $g/dm^3$ )

$s$  = jarak yang ditempuh cahaya didalam kultur medium (m)

$I_t$  = intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh kultur medium ( $W/m^2$ )

$t$  = waktu (jam)

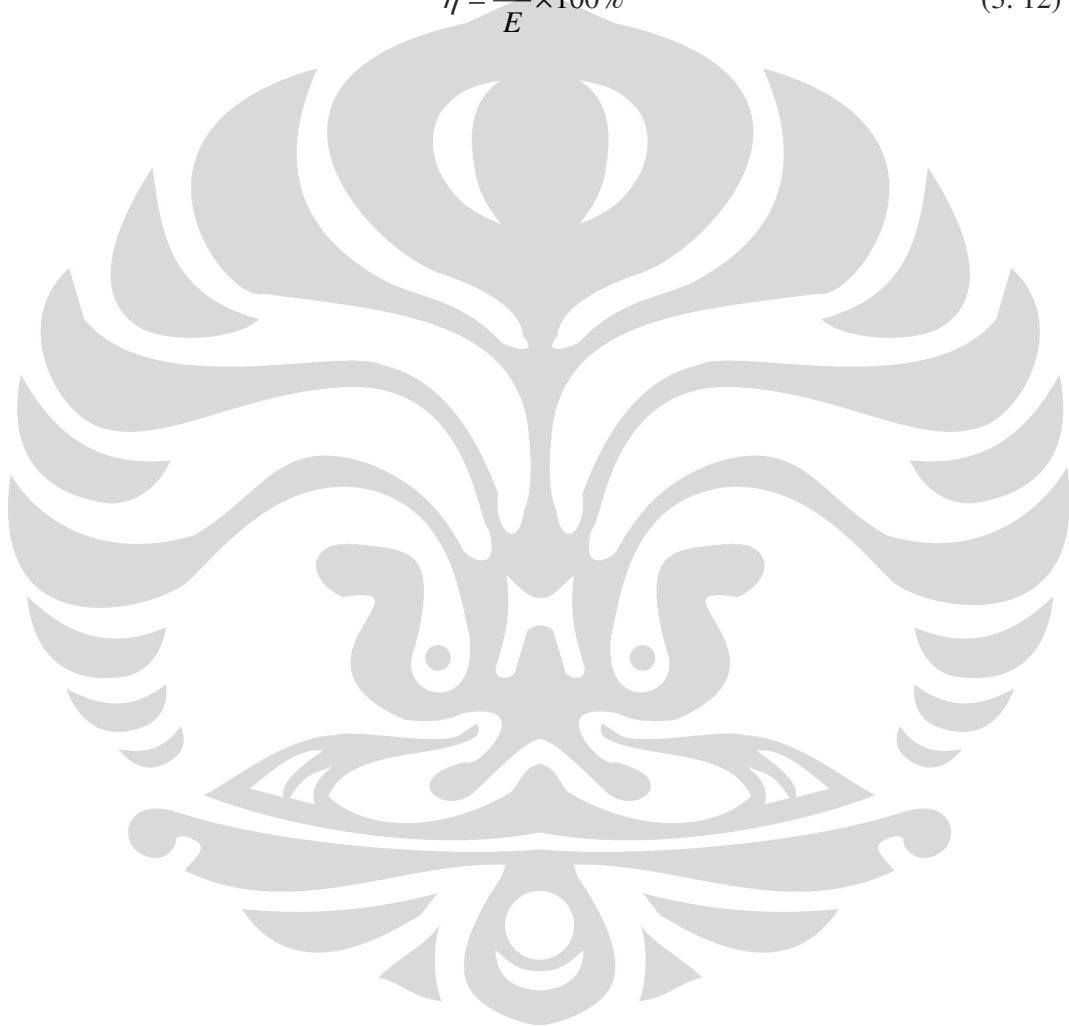
dengan nilai konversi  $1 \text{ lx} = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$  (Schugerl dan Bellgardt, 2000)

Energi cahaya total yang diterima oleh medium kultur selama pertumbuhan) adalah sebagai berikut (Hirata et al, 1996) :

$$E = \frac{\int (I_i - I_t) dt}{\Delta X \cdot s} \quad (3.11)$$

Selanjutnya dapat dicari besarnya nilai  $\eta$  yakni besar efisiensi konversi energi cahaya untuk pembentukan biomassa (Hirata et al, 1996) :

$$\eta = \frac{E_x}{E} \times 100\% \quad (3.12)$$



## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg melalui pengaturan kerapatan fluks cahaya (alterasi pencahayaan). Nama belakang Buitenzorg ditambahkan pada nama *Chlorella vulgaris* sebagai identitas jenis mikroalga ini karena berasal dari daerah Bogor yang pada zaman Belanda disebut sebagai Buitenzorg. Mikroalga *Chlorella vulgaris* diperoleh dari koleksi kultur Sub Balai Penelitian dan Perikanan Air Tawar Depok.

Proses evaluasi kinerja fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dilakukan dengan membandingkan semua data hasil uji dengan hasil perhitungan yang dilakukan pada tahap perhitungan scale-up.

#### **4.1. PERHITUNGAN AWAL SCALE-UP**

Perhitungan awal *scale-up* dibutuhkan sebagai pembanding/referensi untuk proses uji kinerja. *Scale-up* fotobioreaktor sendiri mempunyai beberapa parameter penting yang harus dicapai dalam proses uji yaitu nilai hasil akhir produksi biomassa *Chlorella vulgaris* yang diperkirakan sesuai dengan kecepatan superfisial yang digunakan. Kecepatan superfisial yang sesuai digunakan untuk proses kultivasi juga diprediksi melalui perhitungan yang akan dibuat berdasarkan penelitian yang sebelumnya telah dilakukan.

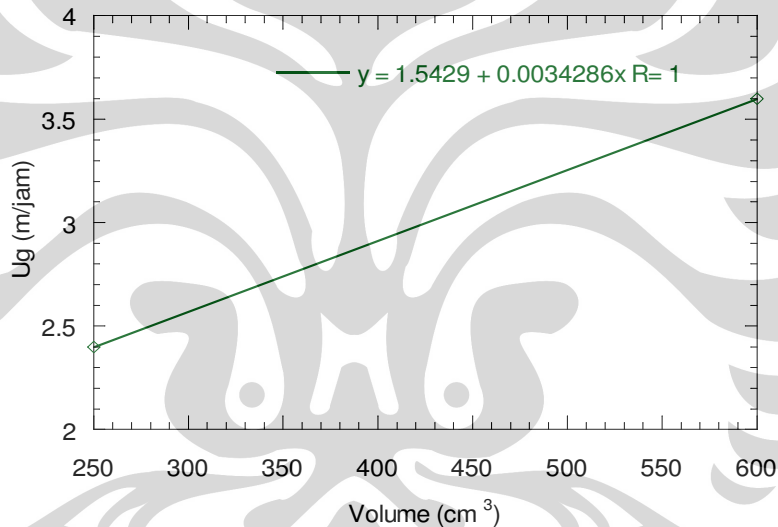
Untuk menentukan besar laju superfisial yang menunjukkan tingkat homogenitas dalam kolom gelembung yang sama dilakukan uji profil distribusi waktu tinggal (RTD, *Residence Time Distribution*) pada kolom gelembung yang digunakan. Penelitian sebelumnya menjelaskan bahwa laju superfisial optimum untuk volume 250 cm<sup>3</sup> adalah 2,4 m/jam. Basis ini kemudian digunakan untuk

menjadi acuan dalam melakukan *scale-up* produksi untuk reaktor berukuran 600 cm<sup>3</sup> dan diperoleh hasil sebagai berikut :

**Tabel 4. 1** Hasil Akhir Produksi Biomassa Skala laboratorium

Volume (cm <sup>3</sup> )	U <sub>g</sub> (m/jam)
250	2,4
360	3,6

Data pada Tabel 4.1 dijadikan sebagai acuan grafik untuk melakukan *scale-up* lebih lanjut dengan volume lebih besar dengan memanfaatkan persamaan yang dihasilkan oleh grafik pada Gambar 4.1:



**Gambar 4. 1** Kurva Basis Volume terhadap Laju Superfisial yang Sesuai untuk Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Volume kultivasi yang akan digunakan pada uji kinerja fotobioreaktor ini adalah 18 dm<sup>3</sup>. Maka untuk volume 18 dm<sup>3</sup> nilai kecepatan superfisial yang sesuai adalah:

$$y = 1,5429 + 0,0034286 x$$

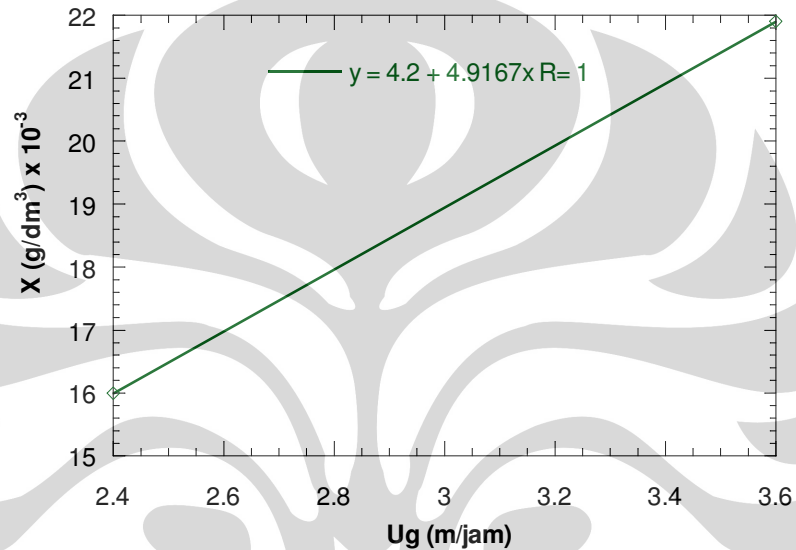
$$y = 1,5429 + 0,0034286 (18.000)$$

$$y = 63,257 \text{ m/jam}$$

Sesuai dengan persamaan tersebut, nilai kecepatan superfisial yang dibutuhkan untuk kultivasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg sebesar 63,257 m/jam.

Nilai ini akan dijadikan pembanding dalam proses uji hidrodinamika untuk fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah ini.

Hasil produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg juga dapat dijadikan basis untuk proses *scale-up*. Tiap penambahan volume dan perubahan laju superfisial maka hasil produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg juga akan bertambah sesuai dengan data yang diperoleh pada penelitian sebelumnya yaitu :



**Gambar 4. 2** Kurva Basis Laju Superfisial yang Sesuai untuk Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Hasil produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dapat diprediksi dengan menggunakan persamaan pada grafik tersebut yaitu :

$$y = 4,2 + 4,9167 x$$

$$y = 4,2 + 4,9167 (63,257)$$

$$y = 315,22 \times 10^{-3} \text{ g/dm}^3$$

$$= 315,22 \text{ mg/dm}^3$$

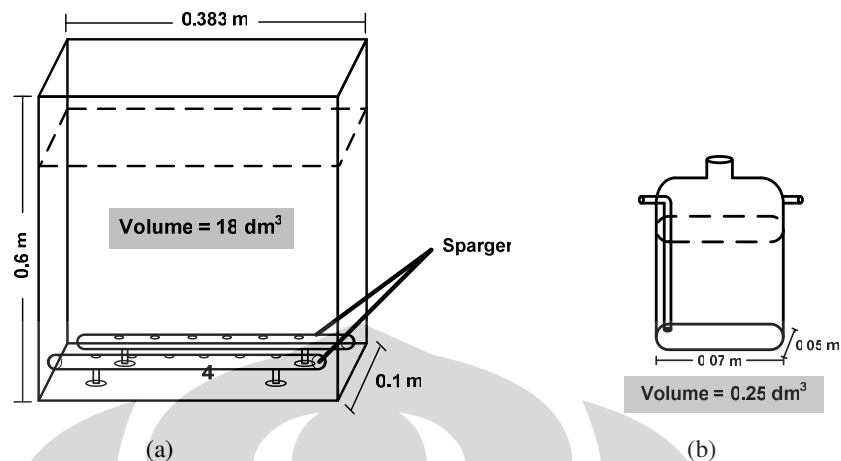
Hasil ini akan didekati oleh uji produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan menggunakan kecepatan superfisial yang diperoleh dari hasil uji hidrodinamika yang sebelumnya dilakukan.

Variabel lain yang terkait dengan produksi biomassa seperti temperatur, tekanan, medium, dan cahaya tidak dilakukan perhitungan karena variabel ini tidak bergantung pada ukuran reaktor hanya bergantung pada jumlah sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg.

#### 4.2. EVALUASI DESAIN ALAT YANG DIGUNAKAN

Pemilihan desain dari sebuah fotobioreaktor akan sangat mempengaruhi produksi dan efisiensi *overall* untuk memproduksi mikroorganisme yang berbasiskan produk. Fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah yang digunakan berdimensi 38,3 x 60 x 10 cm<sup>3</sup>. Desain dimensi fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah ini dibuat setipis mungkin sehingga meminimalisasi terjadinya proses *self shading of light* yaitu sel-sel akan mulai memblok penetrasi cahaya yang akan masuk ke dalam fotobioreaktor (Astero Sanchez Miron, 2002). Peristiwa ini akan mengganggu pertumbuhan sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg sehingga produksi biomasnya tidak akan optimal. Tebal reaktor sebesar 10 cm merupakan nilai maksimum yang dapat dibuat untuk mempermudah perangkaian *sparger* di dalam reaktor. Panjang reaktor 38,3 cm dipilih berdasarkan pengukuran panjang *sparger* yaitu 32 cm. Panjang reaktor dibuat semirip mungkin dengan *sparger* untuk meminimalisasi *dead zone* yang akan terbentuk ketika proses pengadukan dilakukan. Pemilihan tinggi reaktor 60 cm didasarkan pada volume yang akan digunakan pada saat kultivasi yaitu 18 dm<sup>3</sup>. Nilai 18 dm<sup>3</sup> dipilih sebagai basis volume kultivasi karena nantinya jika evaluasi ini berhasil maka akan dibuat tiga buah reaktor susun seri yang volume totalnya sama dengan volume reaktor skala menengah ini sehingga dipilih nilai berkelipatan tiga yang memungkinkan untuk dijadikan sebagai dasar pada volume kultivasi.

Fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah yang akan dievaluasi menggunakan *sparger* sebagai penghasil gelembung sedangkan fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium menggunakan pipa kapiler dengan diameter yang sangat kecil untuk menghasilkan gelembung seperti yang terlihat pada Gambar 4.3.



**Gambar 4. 3** Sketsa Dimensi Fotobioreaktor Kolom Gelembung : (a) Skala Menengah; (b) Skala Laboratorium

*Sparger* yang digunakan berjumlah dua buah dan diletakkan pada bagian tengah fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah. Peletakkan *sparger* harus tepat karena dapat mempengaruhi proses pengadukan yang terjadi sedangkan proses pengadukan merupakan variabel penting yang mempengaruhi produktivitas mikroalga yang akan dikultivasi (Eriksen, 2008).

Aliran udara dibuat dalam dua arah agar proses pengadukan berlangsung lebih baik. Sebelumnya, aliran dibuat satu arah yang *displit* ke dalam dua buah *sparger* namun aliran yang dihasilkan hanya mengaduk satu sisi reaktor. Lalu aliran dirubah menjadi dua arah agar kedua sisi reaktor teraduk sempurna.

Fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah ini merupakan fotobioreaktor sistem tertutup. Sistem tertutup lebih baik dalam hal kontrol pada variabel proses, efisiensi penggunaan CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi, dan sangat mengurangi adanya kontaminasi (Pulz, O., 2001). Penutup didesain sebaik mungkin sehingga mempermudah dalam pengambilan sampel dan pengaliran udara dalam reaktor.

Cahaya yang akan diiluminasikan pada reaktor berasal dari delapan buah lampu Phillips 23 watt yang dipasang pada rumah lampu yang mempunyai ukuran yang sama dengan luas permukaan sisi reaktor yang akan dikenai cahaya yaitu 0,2298 m<sup>2</sup>. Lampu disusun menjadi dua kolom sehingga pada satu kolom terdapat empat buah lampu. Rumah lampu didesain sama besar dengan bagian sisi permukaan reaktor yang akan dikenai cahaya karena untuk mendistribusikan

cahaya yang diiluminasikan. Distribusi cahaya merupakan salah satu variabel penting dalam produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. *Chlorella vulgaris* Buitenzorg membutuhkan cahaya untuk proses fotosintesis. Proses fotosintesis merupakan salah satu aktivitas metabolisme sel yang mendukung perkembangbiakan sel tersebut. Jika sistem fotosintesis pada sel terganggu, maka proses metabolisme sel juga akan tergantung yang kemudian akan menghambat proses pertumbuhan sel.

Pada fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium, iluminasi cahaya diberikan oleh sebuah lampu Phillips halogen diletakkan sejajar dengan bagian tengah reaktor sehingga distribusi cahaya yang diberikan merata.

#### **4.3. UJI HIDRODINAMIKA**

Uji hidrodinamika dibutuhkan pada proses perbesaran skala produksi untuk mengamati peristiwa pengadukan yang terjadi pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah. Uji hidrodinamika ini dilakukan dengan menentukan *Retention Time Distribution* (RTD) pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah ini. Basis yang digunakan adalah penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang mengatakan bahwa kecepatan superficial optimum untuk produksi biomassa *Chlorella sp.* dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium ( $250 \text{ cm}^3$ ) adalah 2,4 m/jam. Basis ini dapat digunakan karena bentuk reaktor sama hanya saja volume yang digunakan lebih besar (Andika, 2005).

*Methylene blue* yang merupakan zat berwarna biru pekat yang digunakan untuk uji hidrodinamika ini. Proses ini dilakukan dengan melihat distribusi konsentrasi *methylene blue* dengan variasi berbagai laju alir volumetrik udara yang dihisap ke dalam reaktor dan volume yang digunakan. Hasilnya kemudian akan dibandingkan dengan distribusi konsentrasi zat yang sama pada fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium. Konsentrasi *methylene blue* dianalisa menggunakan *spektrofotometer UV-VIS* dengan panjang gelombang yang digunakan adalah 664 nm. Sebelumnya telah dilakukan pengujian panjang gelombang yang sesuai untuk *methylene blue* pada *spektrofotometer UV-VIS* dengan mencoba beberapa panjang gelombang yang dapat menyerap warna biru yang dipancarkan dan kemudian diperoleh nilai 664 nm. Nilai laju alir volumetrik



ini kemudian dirubah dalam bentuk kecepatan superfisial menggunakan persamaan (Nevers, 1991) :

$$U_g = \frac{V}{A} \quad (4.1)$$

Dengan :

$U_g$  = kecepatan superfisial (m/jam)

$V$  = laju alir volumetrik ( $m^3$ /jam)

$A$  = luas penampang ( $m^2$ )

Hasil dari uji hidrodinamika ini dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 2** Korelasi Nilai  $U_g$  dengan Volume yang Digunakan pada Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah

Volume ( $cm^3$ )	$U_g$ (m/jam)
10.000	11,18
15.000	18,63
18.000	22,36
21750	26,08

Tabel 4.2 menunjukkan nilai kecepatan superfisial untuk beberapa variasi volume. Hasil ini akan dibandingkan dengan uji turbulensi aliran. Pada tahap uji turbulensi aliran, basis yang digunakan sama dengan basis uji hidrodinamika. Pada tahap ini akan dilihat tingkat turbulensi aliran secara visual dengan mengalirkan udara ke dalam air untuk kedua fotobioreaktor. Fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah menggunakan volume  $18 \text{ dm}^3$  dengan kecepatan superfisial hasil uji hidrodinamika yaitu  $22,36 \text{ m/jam}$  dengan fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium dengan volume  $250 \text{ cm}^3$  dan kecepatan superfisial  $2,4 \text{ m/jam}$ . Setelah dilihat secara visual ternyata turbulensi aliran yang ditimbulkan oleh gelembung udara pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dan laboratorium berbeda. Turbulensi aliran pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah terlalu besar sehingga dikhawatirkan akan menimbulkan *shear stress* pada mikroalga. *Shear stress* yang berlebihan akan menghambat pertumbuhan mikroalga (Eriksen, 2008). Oleh karena itu, nilai

kecepatan superfisial hasil uji RTD tidak serta merta digunakan untuk uji produksi melainkan dilakukan pencarian kecepatan superfisial lebih lanjut yang dianggap memiliki turbulensi aliran yang sama dengan kecepatan superfisial pada reaktor skala laboratorium.

Langkah selanjutnya kemudian menurunkan sedikit demi sedikit nilai kecepatan superfisial yang diperoleh sebelumnya hingga turbulensi aliran yang dihasilkan sesuai dengan turbulensi aliran yang dihasilkan pada fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium dan diperoleh nilai kecepatan superfisial untuk fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah yaitu 15,66 m/jam. Nilai ini yang akan digunakan untuk menguji produktivitas mikroalga dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah ini.

Nilai kecepatan superfisial ini tidak sesuai dengan perhitungan awal yang dilakukan yang memprediksi bahwa laju superfisial yang sesuai untuk volume reaktor 18 dm<sup>3</sup> adalah 63, 26 m/jam. Oleh karena itu, nilai kecepatan superfisial ini belum tentu menjadi kecepatan superfisial optimum untuk produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah, hanya saja dapat dipastikan bahwa dengan turbulensi yang sama secara visual, proses aerasi dan pengadukan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg akan berjalan dengan baik.

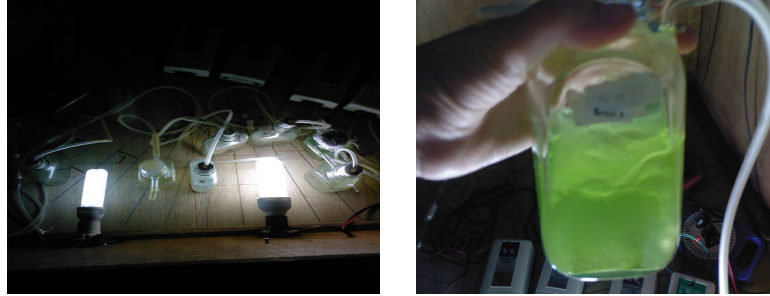
#### **4.4. UJI PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* Buitenzorg DALAM FOTOBIOREAKTOR KOLOM GELEMBUNG SKALA MENENGAH DENGAN PENCAHAYAAN ALTERASI**

Setiap jenis dan bentuk fotobioreaktor kolom gelembung akan mempengaruhi produktivitas pertumbuhan mikroalga (Eriksen, 2008). Perlakuan ini bertujuan untuk menguji kinerja fotobioreaktor kolom gelembung dan pengaruhnya terhadap produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Metode pencahayaan yang digunakan dalam proses produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg untuk pengujian fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah adalah pencahayaan alterasi di mana metode ini merupakan metode pencahayaan paling baik yang telah terbukti dapat meningkatkan produksi biomassa 60% lebih besar dibandingkan dengan pencahayaan kontinu (tetap) (Andika, 2005).

Tahap pertama dalam perlakuan ini yaitu merangkai peralatan menjadi suatu instrumen yang dibutuhkan untuk melakukan *running*. Sebelum merangkai peralatan terlebih dahulu dilakukan sterilisasi untuk peralatan-peralatan yang langsung bersinggungan dengan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dan juga peralatan yang digunakan untuk membuat medium *Benneck*, seperti reaktor, selang, *sparger*, dan *beaker glass*. Sterilisasi ini berguna untuk membersihkan dan membebaskan peralatan dari gangguan bakteri yang dapat menghambat pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Tahap-tahap dalam melakukan sterilisasi peralatan dapat dilihat pada Lampiran E.

Setelah semua peralatan disterilkan, maka dilanjutkan dengan pembuatan medium *Benneck*. Seperti yang telah dijelaskan pada tinjauan pustaka, sebenarnya terdapat banyak medium yang dapat digunakan untuk mengembangbiakan *Chlorella vulgaris*. Medium *Benneck* dipilih sebagai media hidup *Chlorella vulgaris* Buitenzorg karena pada medium *Benneck* terkandung senyawa makro seperti  $MgSO_4$ ,  $KH_2PO_4$ , dan  $NaNO_3$  yang sangat dibutuhkan dalam pertumbuhannya untuk melakukan pembelahan sel dan pembentukan asam nukleat dan protein (Wirosaputro, 2002:<http://www.nhm.ac.uk/>). Nitrogen, fosfor, dan sulfur berfungsi untuk pembentukan protein, sedangkan natrium dan besi (Fe) berguna untuk klorofil dan sebagainya.  $MgSO_4$ ,  $KH_2PO_4$ ,  $NaNO_3$ , dan  $FeCl_3$  dilarutkan dalam aquadest kemudian dipanaskan selama 2 jam. Pemanasan ini ditujukan untuk mematikan kuman dan bakteri yang terdapat dalam aquadest dan bahan-bahan medium sehingga tidak mengganggu pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg.

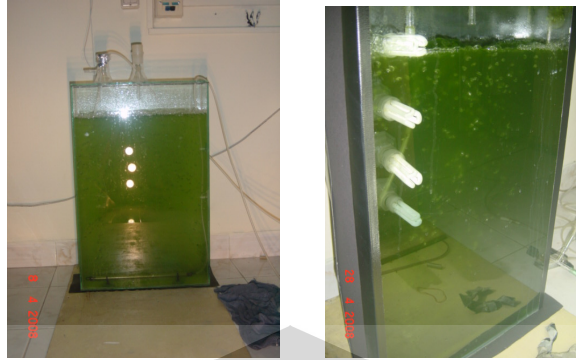
Selama proses pemanasan dilakukan perangkaian alat untuk pembiakan dan *running*. pembiakan dilakukan dalam reaktor yang sama untuk mempermudah proses *running*. Setelah itu dilanjutkan dengan memasang dua buah *sparger* pada bagian dasar reaktor dengan posisi berkebalikan agar aliran yang terjadi dapat mengaduk *Chlorella vulgaris* dan mengalirkan  $CO_2$  secara merata.



**Gambar 4. 4** Proses pembiakkan (*pre-culture*) *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Setelah rangkaian alat selesai, kemudian dilakukan pembiakan *Chlorella* murni dalam reaktor. Pembiakan dilakukan dengan mencampurkan *Chlorella* murni dan medium *Benneck* dalam reaktor yang telah dirangkai dengan intensitas cahaya 1000 lux. Pembiakan dilakukan selama 3-4 hari untuk melewati fasa lag. Setelah melewati fasa lag, dilanjutkan dengan penentuan jumlah innokulum. Innokulum yang akan digunakan untuk *running* yaitu 1.000.000 sel/dm<sup>3</sup>. Nilai ini dipilih untuk mempermudah dalam proses perbandingan hasil karena nantinya data yang diperoleh akan dibandingkan dengan data penelitian yang dilakukan oleh Sang Made Kresna Andika. Penentuan jumlah innokulum *Chlorella vulgaris* Buitenzorg untuk *running* dilakukan dengan menganalisa konsentrasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang telah dibiakkan menggunakan spektrofotometri (kurva kalibrasi terdapat pada Lampiran B). Jika terlalu pekat maka diencerkan dengan medium *Benneck* sehingga diperoleh jumlah 1.000.000 sel/cm<sup>3</sup> dengan volume 18 liter.

*Running* alterasi pencahayaan dilakukan setelah semua rangkaian dan *Chlorella* siap. *Running* alterasi pencahayaan dilakukan selama 244 jam dengan melakukan penyesuaian intensitas cahaya terhadap berat kering *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Saat *running* dilakukan juga pencahayaan kontinu (tetap) sebagai pembanding dengan jumlah innokulum yang sama yaitu 1.000.000 sel/cm<sup>3</sup>.



Gambar 4. 5 Proses *running* produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

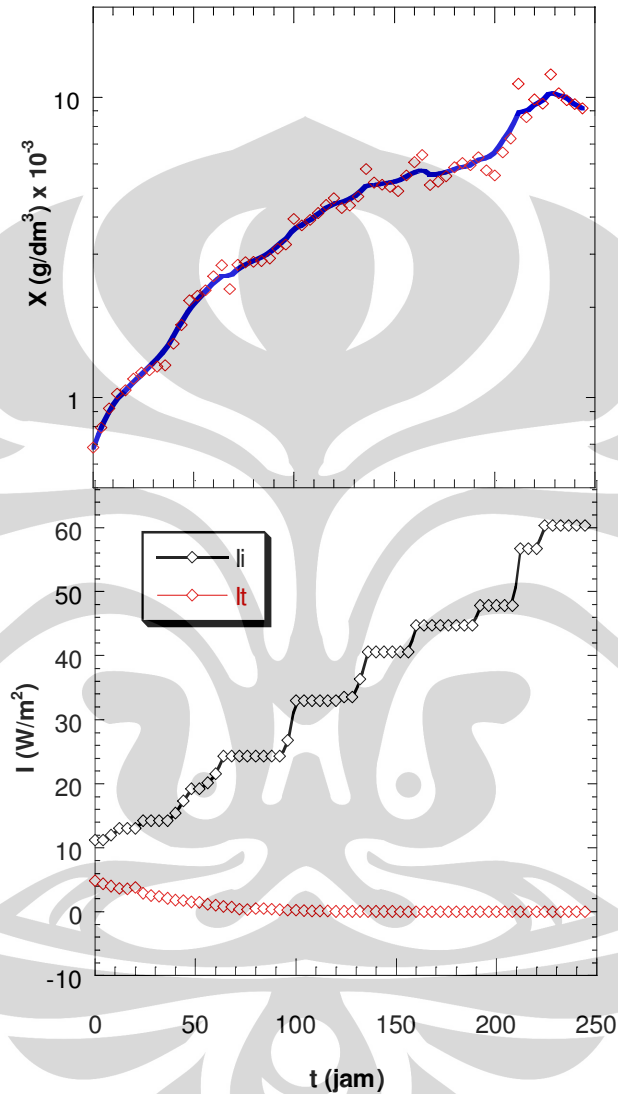
#### 4.4.1. Produksi Biomassa (X) *Chlorella vulgaris* Buitenzorg Menggunakan Pencahayaan Alterasi

Produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dipengaruhi oleh banyak faktor di antaranya yaitu proses pengadukan dan aerasi pada sistem, metode pencahayaan, dan juga dimensi fotobioreaktor yang digunakan. Proses pengadukan dan aerasi pada sistem fotobioreaktor telah diuji hidrodinamika dan secara visual pada tahap penentuan kecepatan superfisial yang akan digunakan untuk kultivasi dan menghasilkan nilai 15,66 m/jam.

Dimensi fotobioreaktor dibuat sebaik mungkin untuk meminimalisasi terjadinya peristiwa *self shading of light* sehingga tidak mengganggu proses produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Dari Gambar 4.1, dapat dilihat bahwa fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dibuat cukup tipis agar cahaya yang diberikan dapat menembus hingga ke bagian dalam reaktor.

Metode pencahayaan yang dipilih adalah metode yang telah diuji dapat meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yaitu metode pencahayaan alterasi. Pengujian produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dilakukan dengan jumlah inokulum awal  $1.000.000 \text{ sel/cm}^3$ . Nilai ini diambil untuk mempermudah dalam perbandingan data karena penelitian pendahuluan telah mengambil basis inokulum awal  $1.000.000 \text{ sel/cm}^3$ . Selain itu, nilai  $1.000.000 \text{ sel/cm}^3$  merupakan kerapatan minimum yang diperbolehkan untuk kultivasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Gambar 4.6 di bawah ini menunjukkan ilustrasi proses pencahayaan alterasi di mana intensitas cahaya akan terus

ditingkatkan seiring dengan peningkatan jumlah biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg sesuai dengan grafik pada Gambar 2.5.

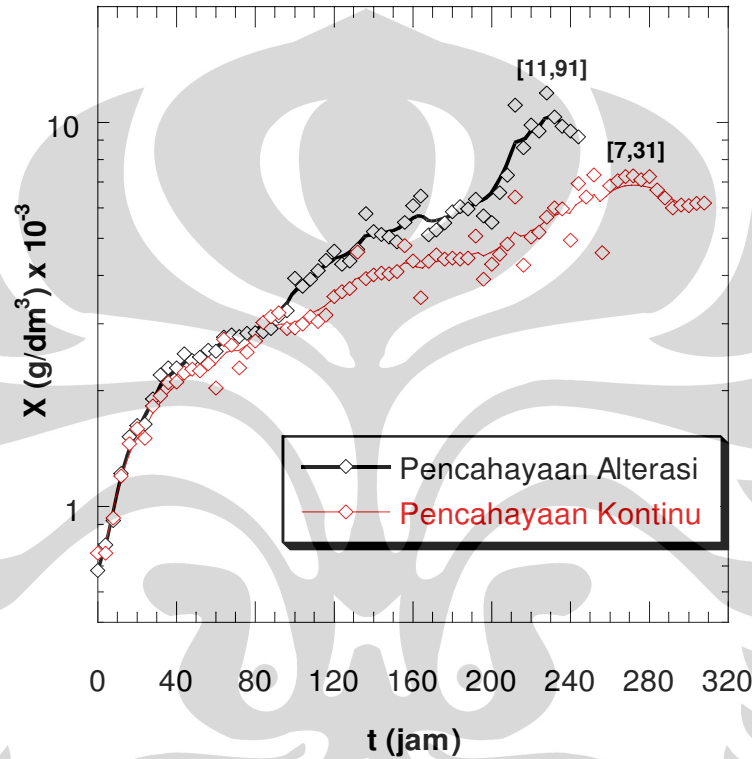


**Gambar 4. 6** Atas : Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan Perlakuan Pencahayaan Alterasi; Bawah : Intensitas yang Digunakan dalam Perlakuan Pencahayaan Alterasi

Gambar 4.6 menunjukkan peningkatan intensitas cahaya yang cukup signifikan dan penurunan intensitas cahaya yang diteruskan oleh medium kultur. Hal ini menunjukkan bahwa kerapatan sel semakin bertambah dari waktu ke

waktu hingga mencapai fasa jenuh. Intensitas yang digunakan berkisar 11,17 hingga 60,35 W/m<sup>2</sup>.

Perlakuan pencahayaan kontinu dilakukan sebagai pembandingan untuk melihat kinerja fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah. Inokulum awal yang digunakan sama yaitu 1.000.000 sel/cm<sup>3</sup> dengan intensitas pencahayaan kontinu (tetap) yaitu 11,17 W/m<sup>2</sup>.



Gambar 4. 7 Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan Perlakuan Pencahayaan Berbeda

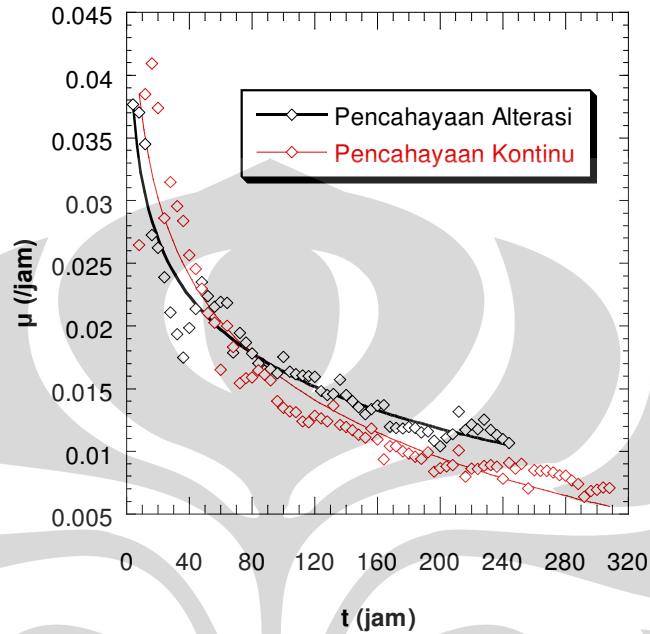
Gambar 4.7 menunjukkan bahwa gradien garis untuk perlakuan pencahayaan kontinu lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan pencahayaan alterasi. Gradien garis tersebut menggambarkan pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dari waktu ke waktu sesuai dengan persamaan Monod :

$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (4. 2)$$

dimana:

$\mu$  = laju pertumbuhan spesifik (h<sup>-1</sup>)

- N = jumlah sel (sel/cm<sup>3</sup>)  
 X = berat kering sel/biomassa (g/dm<sup>3</sup>)  
 t = waktu (h)

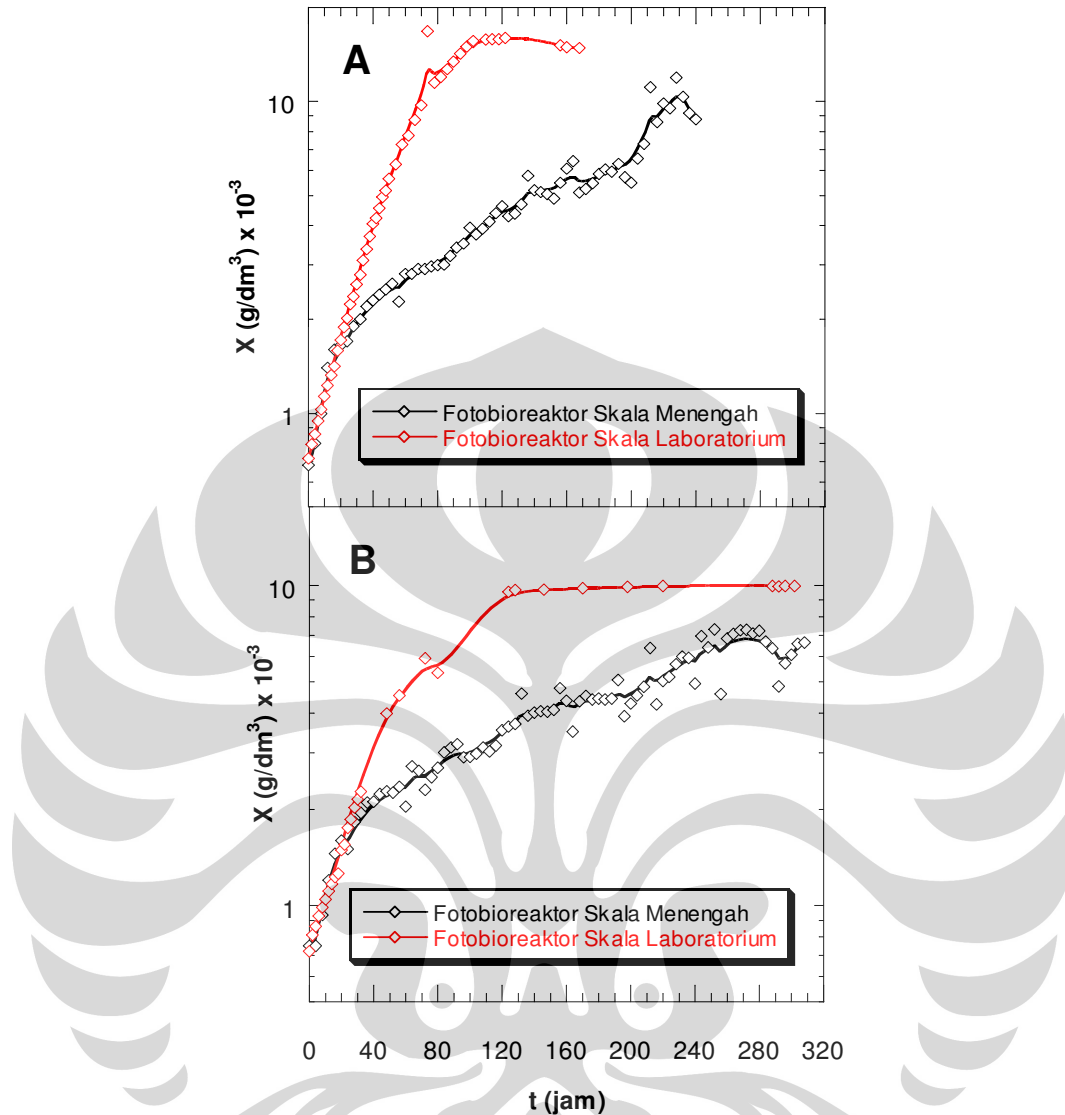


**Gambar 4. 8** Kurva Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan Perlakuan Pencahayaannya yang Berbeda

Dengan demikian, pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg pada pencahayaan alterasi lebih tinggi (Gambar 4.8) dibandingkan dengan pencahayaan kontinu sesuai dengan penelitian yang sebelumnya telah dilakukan oleh Sang made Kresna Andika (2005) menggunakan fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium. Hal ini menunjukkan bahwa fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dapat digunakan untuk produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg.

Produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg ini kemudian dibandingkan dengan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan menggunakan fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium seperti yang terlihat pada Gambar 4.9:





**Gambar 4.9** Pengaruh Perbesaran Fotobioreaktor Kolom Gelembung terhadap Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg (A) Perlakuan Pencahayaan Alterasi; (B) Perlakuan Pencahayaan Kontinu

Dari Gambar 4.9 dapat diperoleh kesimpulan bahwa pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg menggunakan perlakuan pencahayaan alterasi dan kontinu relatif sama, namun pada jam ke-28 dan 30 terjadi penurunan pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah. Hal ini disebabkan karena pengaruh ruang fotobioreaktor. Fotobioreaktor skala laboratorium mempunyai ruang yang cukup kecil sehingga kemungkinan suatu sel untuk memperoleh cahaya yang cukup

akibat pengadukan lebih besar karena tebal reaktor (jarak tempuh cahaya) untuk fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium lebih kecil dibandingkan dengan fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah yaitu setengah dari ketebalan fotoboreaktor skala menengah, sehingga untuk memperoleh produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang maksimum akan membutuhkan waktu yang lebih cepat dibandingkan pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah.

Hasil akhir produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dapat dilihat pada Tabel 4.3 :

**Tabel 4. 3** Pengaruh Pencahayaan terhadap Hasil Akhir Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Jenis Fotobioreaktor	Pencahayaan	$X_0$ (g/dm <sup>3</sup> )	$X_f$ (g/dm <sup>3</sup> )	Waktu Kultivasi
Kolom Gelembung Skala Laboratorium (250 cm <sup>3</sup> )	Alterasi	0,72	16,0	195
	Kontinu	0,72	9,97	302
Kolom Gelembung Skala Menengah (18 dm <sup>3</sup> )	Alterasi	0,72	11,91	308
	Kontinu	0,72	7,31	242

Tabel 4.3 menggambarkan pengaruh perlakuan pencahayaan terhadap hasil produksi akhir biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Pencahayaan alterasi pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dapat meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg 1,63 kali lebih besar dibandingkan dengan pencahayaan kontinu. Hal yang sama juga ditunjukkan pencahayaan alterasi pada fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium yang juga dapat meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg 1,61 kali lebih besar dibandingkan dengan pencahayaan kontinu. Namun hasil produksi biomassa dengan menggunakan pecahayaian alterasi pada fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium lebih besar 1,34 kali dibandingkan dengan hasil akhir pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah sedangkan pencahayaan kontinu untuk skala laboratorium 1,36 kali dibandingkan dengan skala laboratorium dengan masa kultivasi yang lebih singkat. Hasil akhir produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buteinzorg ini juga

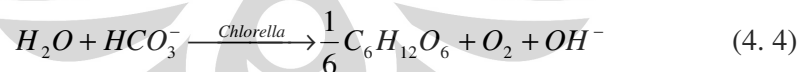
tidak sesuai dengan prediksi pada tahap perhitungan yaitu  $0,315 \text{ g/dm}^3$  untuk reaktor bervolume  $18 \text{ dm}^3$ . Pada proses scale reaktor fotosintesa, terjadinya penurunan produksi biomassa yang cukup signifikan disebabkan bukan karena sifat hidrodinamika kolom gelembung tetapi disebabkan oleh perbedaan waktu tinggal gelembung dalam reaktor. Kesimpulan yang dapat diambil dari pengujian ini adalah bahwa kinerja fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah cukup baik hanya saja dibutuhkan pengoptimalan variabel kecepatan superfisial yang sangat berpengaruh pada proses pengadukan dan aerasi lebih lanjut untuk memotong waktu produksi menjadi lebih singkat dan mengoptimalkan produksi biomassa.

#### 4.4.2. Kandungan $[\text{HCO}_3^-]$ dalam Medium Kultur

Senyawa bikarbonat ( $[\text{HCO}_3^-]$ ) akan dikonsumsi oleh sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam proses pertumbuhannya. Oleh karena itu, diperlukan nilai  $[\text{HCO}_3^-]$  untuk mengetahui jumlah  $[\text{HCO}_3^-]$  yang tersedia. Senyawa bikarbonat terbentuk karena adanya  $\text{CO}_2$  yang terlarut dalam larutan medium dengan air. Saat udara yang diperkaya dengan gas  $\text{CO}_2$  diaerasikan dalam kultur, maka akan terbentuk reaksi (pada ekstraselular) sebagai berikut :



Senyawa bikarbonat inilah yang kemudian diserap oleh sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Selanjutnya bikarbonat akan bereaksi dengan air yang terdapat dalam sel membentuk senyawa organik seperti glukosa dan ion  $\text{OH}^-$  yang biasa dikenal sebagai proses metabolisme sel seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut :



Konsentrasi  $[\text{HCO}_3^-]$  merupakan fungsi dari perubahan pH kultur yang terjadi sebagai akibat adanya aktivitas pertumbuhan sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Pendekatan hukum Henry berikut dapat digunakan untuk memperoleh konsentrasi  $[\text{HCO}_3^-]$  yang terbentuk dalam kultur yaitu :

$$[HCO_3^-] = \left( \frac{K_{CO_2,0}}{H_{CO_2,0}} \right) \left( \frac{y_{CO_2} \cdot P_T}{10^{-pH}} \right) \left( \frac{\text{EXP} \left[ A_k \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_k \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_k \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]}{\text{EXP} \left[ A_h \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_h \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_h \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]} \right) \quad (4.5)$$

dengan :

$P_T$  = temperatur operasi. (atm)

$y_{CO_2}$  = konsentrasi gas  $CO_2$  yang diumpangkan.

$K_{CO_2,0} = 4.38 \cdot 10^{-7}$

$H_{CO_2,0} = 2900 \text{ kPa.kg/mol}$

$T$  = temperatur operasi (K)

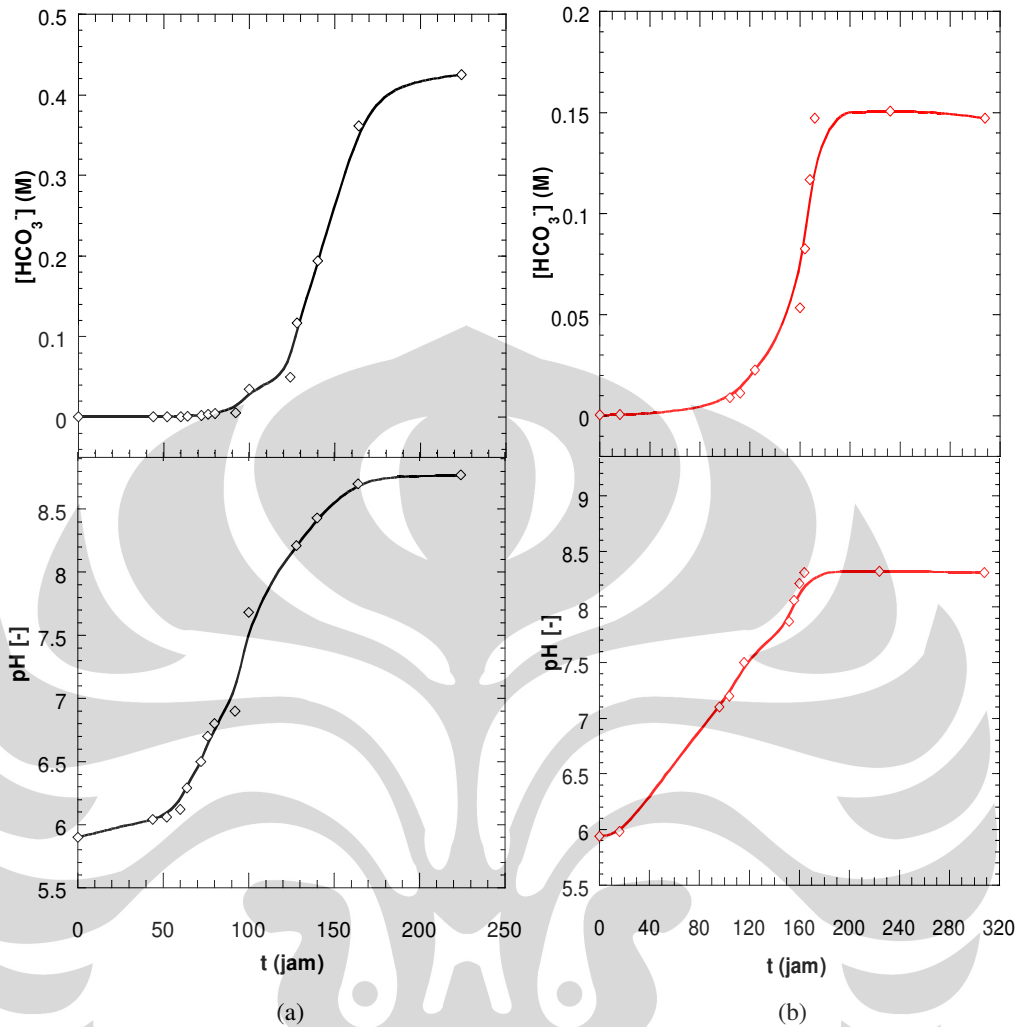
$T_0$  = temperatur standar (K)

Konstanta-konstanta aktivitas gas  $CO_2$  :

$A_k = 40.557$     $B_k = -36.782$     $C_k = 0$

$A_h = 22.771$     $B_h = -11.452$     $C_h = -3.117$

Gambar 4.3 menggambarkan perbandingan nilai  $[HCO_3^-]$  dengan perlakuan pencahayaan alterasi dan kontinu :



**Gambar 4. 10** Pengaruh Kondisi Pencahayaannya terhadap nilai pH dan [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] yang terdapat dalam Kultur : (a) Pencahayaannya Alterasi; (b) Pencahayaannya Kontinu

Nilai pH untuk kedua kondisi pencahayaannya pada Gambar 4.8 cenderung naik hingga mencapai suatu titik tertinggi dan konstan pada suatu titik tertentu. Nilai pH ini menggambarkan proses metabolisme sel, semakin panjang waktu kultivasi maka nilai pH semakin tinggi, yang menandakan bahwa proses metabolisme semakin banyak. Proses metabolisme yang banyak tersebut menggambarkan peningkatan jumlah sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Setelah meningkat drastis, nilai pH akan berhenti pada suatu titik kemudian akan mengalami nilai yang konstan yang menandakan bahwa pertumbuhan sel mulai menurun sehingga kadar OH<sup>-</sup> yang terbentuk akibat adanya proses metabolisme menjadi stabil dalam medium kultur sehingga nilai pH akan cenderung konstan.

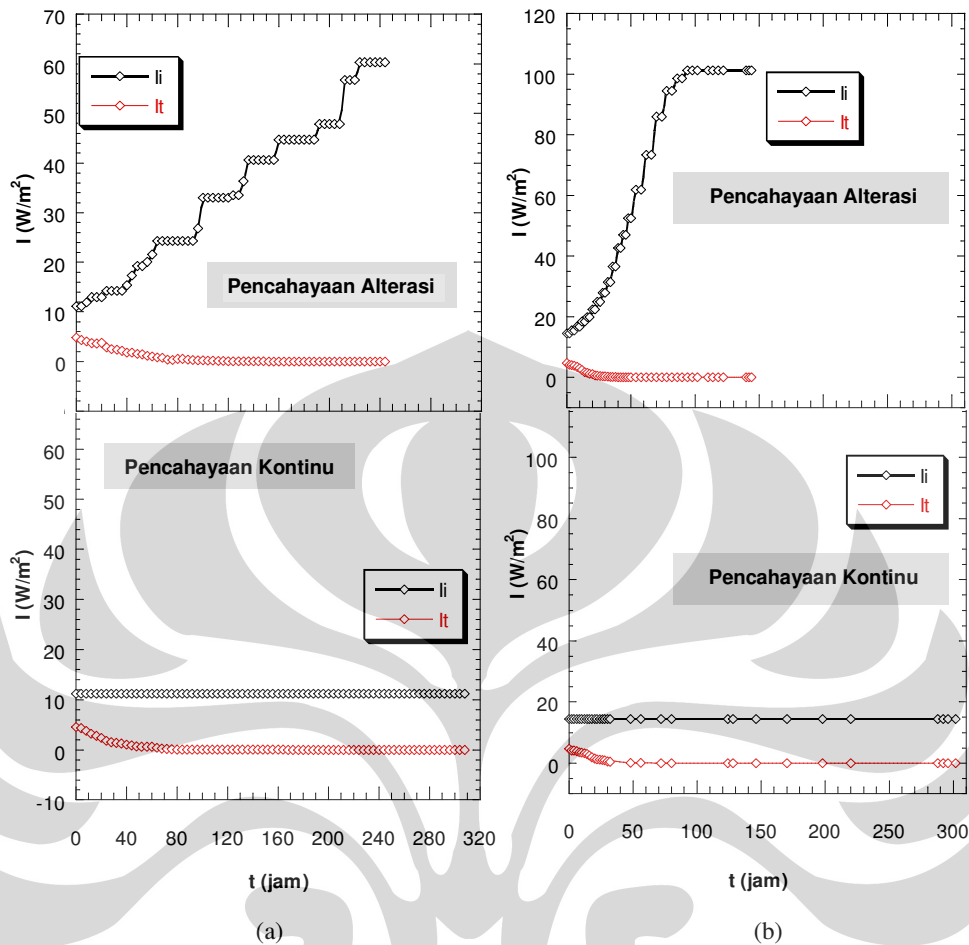
Nilai pH pada pencahayaan alterasi lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinu, hal ini menunjukkan bahwa aktivitas pertumbuhan pada kultivasi dengan pencahayaan alterasi lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinu.

Nilai substrat  $[\text{HCO}_3^-]$  merupakan fungsi eksponensial dari substrat sehingga semakin tinggi nilai pH maka nilai  $[\text{HCO}_3^-]$  pada media kultur semakin besar. Adanya perbedaan nilai  $[\text{HCO}_3^-]$  yang cukup signifikan antara pencahayaan alterasi dan kontinu disebabkan karena cukup signifikannya perbedaan nilai pH. Adanya peningkatan  $[\text{HCO}_3^-]$  dikarenakan adanya pergantian tabung  $\text{CO}_2$ , sehingga terkadang terjadi akumulasi  $\text{CO}_2$  yang terlarut dalam air dalam bentuk  $[\text{HCO}_3^-]$ .

#### **4.4.3. Konsumsi Energi Cahaya**

Penelitian yang dilakukan menggunakan sumber cahaya buatan dari lampu. Penghitungan konsumsi energi cahaya untuk produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dibutuhkan untuk mengetahui korelasi penggunaan energi dengan biomassa yang dihasilkan. Hal ini akan mengarah pada keekonomisan proses jika ingin dikembangkan pada dunia industri.

Data penelitian yang digunakan untuk menghitung konsumsi energi cahaya adalah intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh lampu ke reaktor ( $I_0$ ) dan intensitas yang diteruskan oleh medium di bagian belakang reaktor ( $I_b$ ).



**Gambar 4. 11** Intensitas Cahaya yang Digunakan untuk Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg : (a) Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah; (b) Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Laboratorium

Dari Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa grafik konsumsi energi pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dan skala laboratorium menunjukkan profil yang sama. Intensitas yang ditransmisikan pada pencahayaan alterasi dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium lebih tinggi dibandingkan dengan skala menengah, hal ini dikarenakan aktivitas pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala laboratorium lebih tinggi seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Sedangkan pada pencahayaan kontinu, intensitas cahaya yang diteruskan oleh medium relatif sama karena produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg pada kedua reaktor sama.

**Tabel 4. 4** Pengaruh Kondisi Pencahayaan terhadap Energi Cahaya untuk Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Jenis Fotobioreaktor	Pencahayaan	$E_x$ (kJ/g)	$\eta_{bp}$ (%)
Kolom Gelembung Skala Laboratorium (250 cm <sup>3</sup> )	Alterasi	44,3	0,11
	Kontinu	94,1	0,35
Kolom Gelembung Skala Menengah (18 dm <sup>3</sup> )	Alterasi	1203	0.44
	Kontinu	1096	0.61

Dari Tabel 4.3 di atas dapat diketahui bahwa energi yang digunakan untuk produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan perlakuan pencahayaan alterasi lebih besar dibandingkan dengan perlakuan pencahayaan kontinu. Hal ini disebabkan oleh adanya penyesuaian intensitas cahaya yang digunakan pada perlakuan pencahayaan alterasi. Intensitas cahaya yang digunakan pada pencahayaan alterasi terus ditingkatkan seiring dengan peningkatan jumlah sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam reaktor. Intensitas cahaya sendiri berbanding lurus dengan energi yang digunakan untuk memproduksi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg sesuai dengan persamaan :

$$E_x = \frac{\int_0^t I_t dt}{\Delta X \cdot s} \quad (4. 6)$$

di mana :

$\Delta X$  = berat biomassa yang dihasilkan selama masa kultivasi (g/dm<sup>3</sup>)

$s$  = jarak yang ditempuh cahaya didalam kultur medium (m)

$I_t$  = intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh kultur medium (W/m<sup>2</sup>)

$t$  = waktu (jam)

dengan nilai konversi 1 lx = 2,95 . 10<sup>-3</sup> W/m<sup>2</sup> (Schugerl dan Bellgardt, 2000)

Jadi, semakin besar intensitas cahaya yang diberikan ke reaktor maka akan semakin besar energi yang diperlukan untuk memproduksi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Pada pencahayaan kontinu, intensitas cahaya yang digunakan tetap dari awal hingga akhir masa kultivasi yaitu 11,18 W/m<sup>2</sup>. Karena intensitas yang digunakan tetap maka energi yang digunakan juga akan konstan dari waktu ke



waktu walaupun masa kultivasi pada pencahayaan kontinu lebih panjang dibandingkan dengan pencahayaan alterasi.

Efisiensi konversi energi cahaya untuk produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg ( $\eta_{bp}$ ) dengan perlakuan pencahayaan alterasi lebih kecil dibandingkan dengan perlakuan pencahayaan kontinu. Hal ini menunjukkan bahwa pada perlakuan pencahayaan kontinu, penggunaan energi untuk produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg lebih efisien karena energi yang diberikan dikonversi lebih besar dibandingkan dengan energi yang diberikan pada pencahayaan alterasi.

Perbesaran skala produksi meningkatkan energi yang dibutuhkan untuk produksi biomassa hingga 27 kali lebih besar untuk pencahayaan alterasi dan 11 kali lebih besar untuk pencahayaan kontinu. Konsumsi energi yang dibutuhkan untuk produksi biomassa pada skala besar cukup besar sehingga belum ekonomis untuk diaplikasikan pada skala industri. Oleh karena itu, dibutuhkan optimasi proses lebih lanjut seperti pemilihan dan perangkaian sistem pencahayaan yang tepat guna untuk membuat semua sistem menjadi ekonomis sehingga dapat diterapkan pada skala industri.

#### **4.5. TINJAUAN EKONOMI**

Ditinjau dari segi ekonomi, rancangan fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah untuk produksi biomassa ini dapat dikatakan lebih murah dibandingkan dengan fotobioreaktor yang ada sekarang ini. Fotobioreaktor kolom gelembung dengan volume 1,7 liter dengan medium yang hampir sama dengan komposisi medium *Benneck* dapat menghabiskan dana \$6,3 dengan hasil produksi 1,12 mg/dm<sup>3</sup> (Eriksen, 2008).

Sedangkan dana yang dibutuhkan untuk memproduksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan menggunakan fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dengan medium *Benneck* dan asupan gas CO<sub>2</sub> dapat menghabiskan dana sekitar Rp. 1.200.000,- untuk memproduksi 11,91 mg/dm<sup>3</sup>. Nilai ini lebih ekonomis dibandingkan dengan fotobioreaktor yang ada sekarang ini dengan kapasitas produksi yang lebih besar.

## BAB V

### KESIMPULAN

#### 5.1. KESIMPULAN

1. Evaluasi kinerja fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dilakukan pada desain alat dan uji produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah.
2. Desain alat yang digunakan cukup baik karena disesuaikan dengan penelitian skala laboratorium yang telah optimum.
3. Kecepatan superfisial yang sesuai digunakan untuk produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah adalah 15,66 m/jam.
4. Pencahayaan alterasi pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dapat meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg 1,63 kali lebih besar dibandingkan dengan pencahayaan kontinu dengan masa kultivasi yang lebih singkat yaitu 244 jam.
5. Perbesaran reaktor tidak diikuti dengan peningkatan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang disebabkan karena kecepatan superfisial yang digunakan belum optimum.
6. Kecepatan superfisial sangat mempengaruhi produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg karena akan mempengaruhi proses pengadukan dan aerasi pada sistem.
7. Nilai pH medium kultur menggambarkan pertumbuhan sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. pH medium akhir pada pencahayaan alterasi lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinu yang sebanding dengan nilai  $[\text{HCO}_3^-]$  pada kultur.
8. Konsumsi energi yang dibutuhkan pada pencahayaan alterasi lebih besar dibandingkan dengan pencahayaan kontinu yang disebabkan karena total intensitas cahaya yang digunakan lebih besar dibandingkan pada pencahayaan kontinu.

9. Perbesaran reaktor mengakibatkan peningkatan konsumsi energi yang cukup signifikan sehingga belum ekonomis untuk diaplikasikan ke skala industri.
10. Hasil evaluasi keseluruhan dari sistem fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah ini adalah diperlukan pengoptimalan lebih lanjut baik dari segi hidrodinamika dan sistem pencahayaan karena produksi ini tidak ekonomis dibandingkan dengan produksi biomassa pada skala laboratorium.

## 5.2. SARAN

Sebaiknya dilakukan penentuan kecepatan superfisial optimum untuk produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dengan menguji hidrodinamika dan mencoba berbagai kecepatan superfisial optimum yang diperoleh dari hasil uji hidrodinamika untuk kultivasi *Chlorella* dan melihat *trend* pertumbuhan optimum.

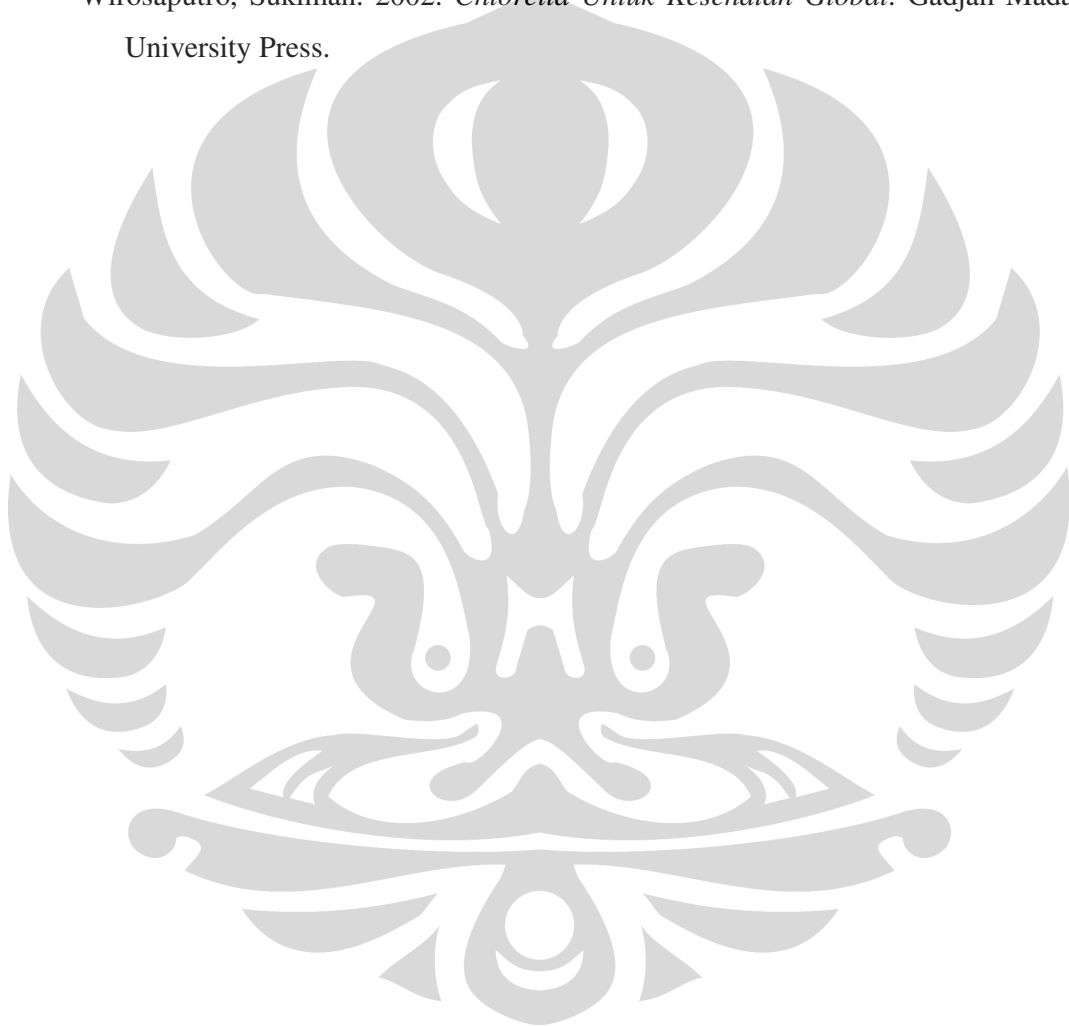
## DAFTAR PUSTAKA

- Andika, Sang Made. 2000. *Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dengan Alterasi Pencahayaan pada Fotobioreaktor Kolom Gelembung*. Departemen Gas dan Petrokimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
- Anonim. (Maret 2007). *History of Chlorella*, <http://www.chlorella-microalgae.htm>
- Anonim. (Maret 2007). *Potensi Chlorella*, <http://www.chlorella-world.com/yaeyama.html>
- Bailey J.E. dan D.F. Ollis. 1986. *Biochemical Engineering Fundamental*. McGraw-Hill : New York.
- Eriksen, Niels T. 2008. *The Technology of Microalgal Culturing*. *Biotechnol Lett.* <http://springer.de>. April, 2008.
- Oldshue, James Y. 1983. *Fluid Mixing Technology*. McGraw-Hill Publications Co. : New York.
- Pulz, O. 2001. *Photobioreactor : Production System for Phototropic Mikroorganism*. Perry, *Chemical Handbook*. <http://link.springer.de>. Mei, 2006.
- Sargowo, Dj, dan Ratnawati. (Maret 2007). *Penaruh Pemberian Zat Aktif Ganggang Hijau (Green Algae) terhadap Produk Radikal Bebas dan Fraksi Lipid pada Penderita Dislipidemia Usia Lanjut*, Fakultas Kedokteran Universitas Brawijaya, Malang. <http://www.tempo.co.id/medika/arsip/112002/art-list.htm>
- Schugerl, K., K. H. Bellgardt. 2000. *Bioreaction Engineering Modeling and Control*. Springer.
- Suriawiria, Unus. 2005. *Chlorella Untuk Kesehatan dan Kebugaran*, Papas Sinar Sinanti.
- Wijanarko, A., K. Othaguchi. 2000. *Alteration of Light Illumination During Microbial Growth : An Enhancement Effort of Biomass Production and*

*Carbon Dioxide Fixation of Psychrophilic Cyanobacterium Anabaena cylindrica IAM MI.* Department of Chemical Engineering. Tokyo Institute of Technology.

Wijanarko, A., dkk. 2003. *Reactor in Series Approximation, An Enhancement Effort of CO<sub>2</sub> Removal and Biomass Production by Anabaena cylindrical.* Department of Chemical Engineering. Tokyo Institute of Technology.

Wirosaputro, Sukiman. 2002. *Chlorella Untuk Kesehatan Global.* Gadjah Mada University Press.



## LAMPIRAN A

### DATA HASIL PENELITIAN

#### A. Pencahayaan Alterasi

$\mu_x$	0	0,037672	0,037048177	0,034483315	0,027271993	0,026235742
Jam	0	4	8	12	16	20
OD Terbaca	0,21	0,243	0,28	0,314	0,321	0,35
OD Pengenceran						
N (sel/cm <sup>3</sup> )	957510	1113237	1287840	1448286	1481319	1618170
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,000683	0,000794	0,000918654	0,001033105	0,001056668	0,001154288
pH	5,9	6,1	6,3	6,2	6,2	7,53
I <sub>o</sub> (lx)	5000	5000	5350	5813	5813	5813
y CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0,0238792	0,019654502	0,018213367	0,016573982	0,017262444	0,018779637
Jam	24	30	34	38	46	50
OD Terbaca	0,367	0,373	0,384	0,388	0,431	0,485
OD Pengenceran					0,456	0,526
N (sel/cm <sup>3</sup> )	1698393	1726707	1778616	1797492	2118384	2448714
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,0012115	0,001231711	0,001268739	0,001282204	0,001511105	0,001746739
pH	7,9	6,49	6,24	6,15	6,27	6,04
I <sub>o</sub> (lx)	6368	6368	6368	6368	6889	7747
y CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0,0208899	0,020043918	0,019432126	0,01990686	0,019966688	0,016400225
Jam	54	58	62	66	70	74
OD Terbaca	0,575	0,612	0,677	0,723	0,793	0,743
OD Pengenceran	0,634	0,656	0,684	0,762	0,828	0,69
N (sel/cm <sup>3</sup> )	2958366	3062184	3194316	3562398	3873852	3222630
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,0021103	0,002184345	0,002278599	0,002541162	0,002763332	0,002298796
pH	6,07	6,06	6,19	6,12	6,29	6,12
I <sub>o</sub> (lx)	8622	8622	9000	9663	10887	10887
y CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0,01796559	0,017309247	0,016545674	0,015889215	0,015399632	0,015556037
---------	------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Jam	78	82	86	90	94	98
OD Terbaca	0.851	0.871	0.86	0.98	1.13	1.52
OD Pengenceran	0.831	0.846	0.849	0.855	0.87	0.939
N (sel/cm <sup>3</sup> )	3888009	3958794	3972951	4001265	4072050	4397661
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00277343	0.002823923	0.002834022	0.002854219	0.002904712	0.00313698
pH	6.5	6.7	6.8	6.7	6.7	6.9
I <sub>o</sub> (lx)	10887	10887	10887	10887	10887	10887
γ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

μ <sub>x</sub>	0.01525663	0.016519654	0.015472633	0.015300139	0.015236265	0.015230132
Jam	102	106	110	114	118	122
OD Terbaca	1.83	1.196	1.266	1.298	1.354	1.333
OD Pengenceran	0.969	1.176	1.12	1.168	1.232	1.308
N (sel/cm <sup>3</sup> )	4539231	5516064	5251800	5478312	5780328	6138972
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00323797	0.003934769	0.003746262	0.00390784	0.004123276	0.004379108
pH	6.7	7.68	7.72	7.8	7.84	7.85
I <sub>o</sub> (lx)	12000	14757	14757	14757	14757	14757
γ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

μ <sub>x</sub>	0.01517417	0.01412552	0.01384901	0.013933415	0.015043108	0.013895088
Jam	126	130	134	138	142	146
OD Terbaca	1.388	1.523	1.519	1.554	1.558	1.617
OD Pengenceran	1.38	1.28	1.305	1.395	1.725	1.55
N (sel/cm <sup>3</sup> )	6478740	6006840	6124815	6549525	8106795	7280970
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00462147	0.004284854	0.004369009	0.004671967	0.005782813	0.005193728
pH	7.9	8.85	8.21	8.4	8.15	8.43
I <sub>o</sub> (lx)	14757	15000	15000	16273	18175	18175
γ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

μ <sub>x</sub>	0.01343757	0.012981061	0.012450654	0.012865129	0.013165806	0.013197876
Jam	150	154	158	162	166	170
OD Terbaca	1.661	1.773	1.882	1.987	over	over
OD Pengenceran	1.53	1.505	1.458	1.638	1.812	1.92
N (sel/cm <sup>3</sup> )	7186590	7068615	6846822	7696242	8517348	9027000
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.0051264	0.005042249	0.004884038	0.005489954	0.006075672	0.006439222
pH	8.64	9.11	8.91	8.96	8.55	8.7
I <sub>o</sub> (lx)	18175	18175	18175	18175	20000	20000
γ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0.01156143	0.011455054	0.011431128	0.011549847	0.011467648	0.011161735
Jam	174	178	182	186	190	194
OD Terbaca	over	over	over	over	over	over
OD Pengenceran	1.524	1.566	1.632	1.746	1.8	1.776
N (sel/cm <sup>3</sup> )	7158276	7356474	7667928	8205894	8460720	8347464
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00510621	0.005247587	0.005469756	0.005853503	0.006035278	0.005954489
pH	7.1	6.9	7.4	7.2	9.26	7.28
I <sub>o</sub> (lx)	20000	20000	20000	20000	20000	20000
y CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0.0510416	0.049711504	0.04845375	0.047262449	0.046132343	0.045058724
Jam	126	130	134	138	142	146
OD Terbaca	over	over	over	over	over	over
OD Pengenceran	1.884	1.704	1.638	1.956	2.172	3.3
N (sel/cm <sup>3</sup> )	594560520	613436520	632312520	651188520	670064520	688940520
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.42411732	0.437582118	0.451046918	0.464511718	0.477976518	0.491441318
pH	7.32	6.86	6.93	6.97	7	6.63
I <sub>o</sub> (lx)	21406	21406	21406	21406	21406	25387
y CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0.01688687	0.017335353	0.016667661	0.017647118	0.016367398	0.015663485
Jam	150	154	158	162	166	170
OD Terbaca	over	over	over	over	over	over
OD Pengenceran	2.562	2.936	2.832	3.546	3.078	2.916
N (sel/cm <sup>3</sup> )	12056598	13821504	13330728	16700094	14491602	13727124
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00860032	0.009859281	0.009509196	0.011912663	0.010337282	0.009791957
pH	6.51	7.45	8.77	9	8.89	8.87
I <sub>o</sub> (lx)	25387	25387	27000	27000	27000	27000
y CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0.01512278	0.014600653
Jam	174	178
OD Terbaca	over	over
OD Pengenceran	2.826	2.736
N (sel/cm <sup>3</sup> )	13302414	12877704
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.009489	0.009186041
pH	8.57	8.37
I <sub>o</sub> (lx)	27000	27000
y CO <sub>2</sub> in	5%	5%



## B. Pencahayaan Kontinu

$I_0 = 5000 \text{ lx}$

$\mu_x$	0	0	0,026450117	0,038482581	0,040927	0,0373718
Jam	0	4	8	12	16	20
OD Terbaca	0,232	0,232	0,285	0,364	0,426	0,473
OD Pengenceran					0,44	0,482
N (sel/cm <sup>3</sup> )	1061328	1061328	1311435	1684236	2042880	2241078
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,00075708	0,00075708	0,000935485	0,001201415	0,001457	0,0015986
pH	5,94	5,93	5,74	5,88	5,98	6,23
$I_b$ (lx)	1170	1120	960	830	720	610
$\gamma \text{ CO}_2$ in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0,02861113	0,0314734	0,029545604	0,028386682	0,025628	0,0245671
Jam	24	28	32	36	40	44
OD Terbaca	0,475	0,518	0,556	0,578	0,592	0,632
OD Pengenceran	0,454	0,55	0,586	0,632	0,634	0,67
N (sel/cm <sup>3</sup> )	2108946	2561970	2731854	2948928	2958366	3128250
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,00150437	0,00182753	0,001948711	0,002103556	0,00211	0,0022315
pH	5,94	5,88	7,58	8,09	8,48	8,24
$I_b$ (lx)	470	390	360	330	260	230
$\gamma \text{ CO}_2$ in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0,02295525	0,02101824	0,020247066	0,016489872	0,02	0,0183243
Jam	48	52	56	60	64	68
OD Terbaca	0,706	0,651	0,697	0,728	0,739	0,763
OD Pengenceran	0,684	0,678	0,706	0,612	0,816	0,789
N (sel/cm <sup>3</sup> )	3194316	3166002	3298134	2854548	3817224	3689811
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,0022786	0,0022584	0,002352655	0,002036232	0,002723	0,002632
pH	7,81	8,33	7,93	8	7,6	7,67
$I_b$ (lx)	180	160	150	150	110	70
$\gamma \text{ CO}_2$ in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0,01542606	0,01582807	0,015906965	0,016454228	0,016117	0,0156596
Jam	72	76	80	84	88	92
OD Terbaca	0,814	0,832	0,851	0,886	0,91	0,942
OD Pengenceran	0,69	0,756	0,81	0,903	0,936	0,957
N (sel/cm <sup>3</sup> )	3222630	3534084	3788910	4227777	4383504	4482603
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,0022988	0,00252097	0,00270274	0,003015797	0,003127	0,0031976

pH	7,79	7,6	7,63	7,71	7,6	7,4
$I_b$ (lx)	50	30	20	12	12	12
$y$ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0,01400651	0,01348096	0,013192871	0,013132659	0,0124	0,0123101
Jam	96	100	104	108	112	116
OD Terbaca	0,977	0,979	0,982	1,116	1,026	1,142
OD Pengenceran	0,87	0,873	0,894	0,936	0,909	0,945
N (sel/cm <sup>3</sup> )	4072050	4086207	4185306	4383504	4256091	4425975
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,00290471	0,00291481	0,002985501	0,003126881	0,003036	0,0031572
pH	7,1	7,3	7,2	7,3	7,3	7,5
$I_b$ (lx)	12	12	12	12	12	12
$y$ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0,01283186	0,01262289	0,012400779	0,013660308	0,012093	0,0119176
Jam	120	124	128	132	136	140
OD Terbaca	1,16	1,119	1,143	1,199	1,225	1,26
OD Pengenceran	1,056	1,083	1,107	1,372	1,172	1,2
N (sel/cm <sup>3</sup> )	4949784	5077197	5190453	6440988	5497188	5629320
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,00353083	0,00362171	0,003702501	0,004594544	0,003921	0,0040156
pH	7,2	7,12	6,04	6,31	6,09	6,21
$I_b$ (lx)	12	12	12	11	10	10
$y$ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0,01165609	0,01131859	0,011086146	0,011816473	0,01095	0,0093425
Jam	144	148	152	156	160	164
OD Terbaca	1,295	1,301	1,307	1,366	1,47	1,166
OD Pengenceran	1,212	1,208	1,22	1,428	1,304	1,048
N (sel/cm <sup>3</sup> )	5685948	5667072	5723700	6705252	6120096	4912032
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,00405595	0,00404249	0,004082882	0,004783052	0,004366	0,0035039
pH	5,94	7,21	7,87	8,06	8,21	8,31
$I_b$ (lx)	10	10	10	9	7	6
$y$ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

$\mu_x$	0,01041052	0,01039767	0,010007198	0,009818668	0,009572	0,0094009
Jam	168	172	176	180	184	188
OD Terbaca	1,206	1,253	1,276	1,314	1,273	1,275
OD Pengenceran	1,3	1,352	1,316	1,324	1,316	1,324

N (sel/cm <sup>3</sup> )	6101220	6346608	6176724	6214476	6176724	6214476
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,00435218	0,00452722	0,004406037	0,004432967	0,004406	0,004433
pH	6,41	6,6	6,4	6,5	6,7	6,9
I <sub>b</sub> (lx)	4	4	3	2	2	2
γ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

μ <sub>x</sub>	0,00990003	0,00838264	0,008666888	0,008777585	0,008903	0,0100605
Jam	192	196	200	204	208	212
OD Terbaca	1,263	1,386	1,51	1,631	1,724	1,725
OD Pengenceran	1,512	1,17	1,28	1,355	1,44	1,905
N (sel/cm <sup>3</sup> )	7101648	5487750	6006840	6360765	6761880	8956215
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,00506581	0,00391457	0,004284854	0,004537319	0,004823	0,0063887
pH	7,76	7,1	6,5	6,52	6,49	5,95
I <sub>b</sub> (lx)	1	1	1	1	1	0
γ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

μ <sub>x</sub>	0,00798838	0,00861883	0,008582576	0,008840193	0,008919	0,0087391
Jam	216	220	224	228	232	236
OD Terbaca	1,773	1,789	1,84	1,805	1,833	over
OD Pengenceran	1,27	1,505	1,545	1,695	1,788	1,776
N (sel/cm <sup>3</sup> )	5959650	7068615	7257375	7965225	8404092	8347464
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,00425119	0,00504225	0,005176897	0,005681827	0,005995	0,0059545
pH	6,01	7,15	8,32	8,14	8,08	7,82
I <sub>b</sub> (lx)	0	0	3788,237375	11,17530026	0	0
γ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

μ <sub>x</sub>	0,00781914	0,00908275	0,008606475	0,008996904	0,007032	0,0084675
Jam	240	244	248	252	256	260
OD Terbaca	over	over	over	over	over	over
OD Pengenceran	1,476	2,07	1,908	2,178	1,368	2,04
N (sel/cm <sup>3</sup> )	6931764	9734850	8970372	10244502	6422112	9593280
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,00494463	0,00694415	0,006398828	0,007307702	0,004581	0,0068432
pH	7,94	8,19	7,84	7,9	8,05	8,19
I <sub>b</sub> (lx)	0	0	0	0	0	0
γ CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

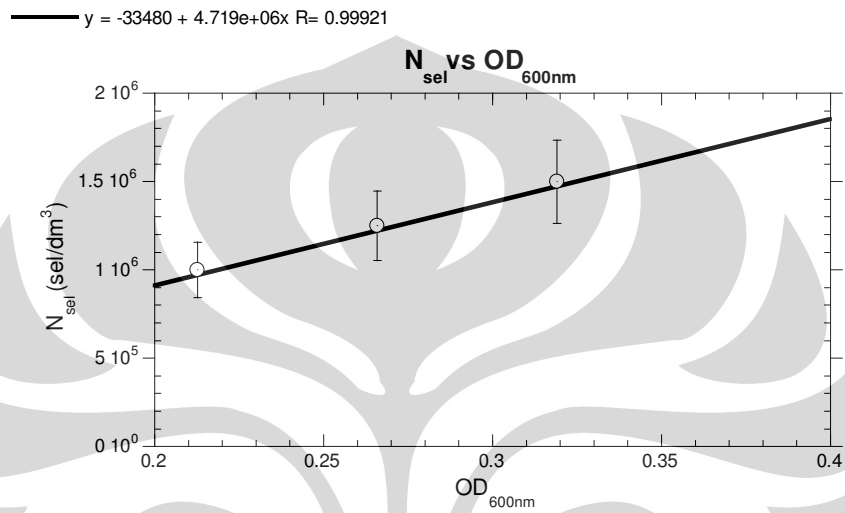
μ <sub>x</sub>	0,0084602	0,00842871	0,008314989	0,008102703	0,008058	0,0076678
Jam	264	268	272	276	280	284

OD Terbaca	over	over	over	over	over	over
OD Pengenceran	2,106	2,16	2,166	2,112	2,154	1,992
N (sel/cm <sup>3</sup> )	9904734	10159560	10187874	9933048	10131246	9366768
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,00706534	0,00724711	0,007267307	0,007085532	0,007227	0,0066816
pH	8,12	7,91	8,2	8,07	8,13	7,8
I <sub>b</sub> (lx)	0	0	0	0	0	0
y CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

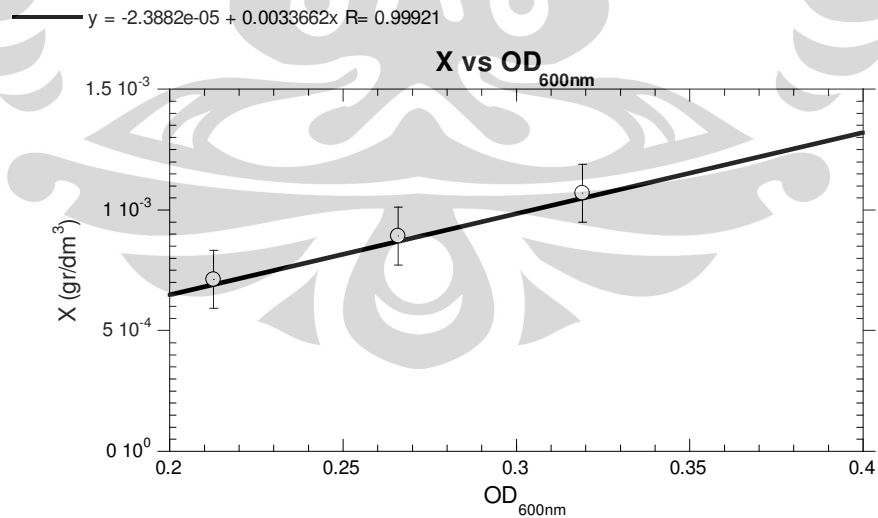
$\mu_x$	0,00728792	0,00627013	0,006736273	0,006850605	0,007011	0,0069602
Jam	292	296	300	304	308	312
OD Terbaca	over	over	over	over	over	over
OD Pengenceran	1,896	1,446	1,704	1,812	1,956	1,98
N (sel/cm <sup>3</sup> )	8913744	6790194	8007696	8517348	9196884	9310140
X (g/dm <sup>3</sup> )	0,00635843	0,00484364	0,005712123	0,006075672	0,00656	0,0066412
pH	7,92	8,23	8,25	8,3	8,31	8,31
I <sub>b</sub> (lx)	0	0	0	0	0	0
y CO <sub>2</sub> in	5%	5%	5%	5%	5%	5%

## LAMPIRAN B

### KURVA KALIBRASI



Gambar B. 1 Kurva Kalibrasi N<sub>sel</sub> vs OD<sub>600</sub>



Gambar B. 2 Kurva Kalibrasi N<sub>sel</sub> vs OD<sub>600</sub>

## LAMPIRAN C

### CONTOH DAN HASIL PERHITUNGAN $[HCO_3^-]$

#### D.1. Contoh Perhitungan

Persamaan yang digunakan untuk menghitung konsentrasi bikarbonat  $[HCO_3^-]$  adalah :

$$[HCO_3^-] = \left( \frac{K_{CO_2,0}}{H_{CO_2,0}} \right) \left( \frac{y_{CO_2} \cdot P_T}{10^{-pH}} \right) \left( \frac{\text{EXP} \left[ A_k \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_k \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_k \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]}{\text{EXP} \left[ A_h \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_h \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_h \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]} \right)$$

dengan :

$P_T$  = temperatur operasi (atm) = 1 atm = 101.25 kPa

$y_{CO_2}$  = konsentrasi gas  $CO_2$  yang diumpangkan = 5% = 0.05

$K_{CO_2,0}$  =  $4.38 \cdot 10^{-7}$

$H_{CO_2,0}$  =  $2900 \frac{kPa \cdot kg}{mol}$

$T$  = temperatur operasi (K) =  $29^\circ C = 302$  K

$T_0$  = temperatur standar (K) = 298.15 K

Konstanta-konstanta aktivitas gas  $CO_2$  :

$A_k = 40.557$     $B_k = -36.782$     $C_k = 0$

$A_h = 22.771$     $B_h = -11.452$     $C_h = -3.117$

Karena semua nilai telah diketahui, maka dengan memasukkan nilai pH yang diperoleh dari pengambialn data tiap jam maka akan diperoleh konsentrasi bikarbonat  $[HCO_3^-]$  yang terdapat dalam medium. Misalnya pada jam ke-0 data pH pada alterasi pencahayaan adalah 5,9. Kemudian masukkan nilai tersebut ke dalam persamaan dan diperoleh nilai konsentrasi bikarbonat sebesar 0,00057313 M atau sama dengan 0.57 mM.

## D.2. Hasil Perhitungan

### A. Pencahayaan Alterasi

Jam	pH	[HCO <sub>3</sub> ] <sup>-</sup> (M)	Jam	pH	[HCO <sub>3</sub> ] <sup>-</sup> (M)
0	5,9	0,00057313	124	8,85	0,5108015
4	6,1	0,00090835	128	8,21	0,11701786
8	6,3	0,00143963	132	8,4	0,18123921
12	6,2	0,00114354	136	8,15	0,1019183
16	6,2	0,00114354	140	8,43	0,19420131
20	7,53	0,0244485	144	8,64	0,31495765
24	7,9	0,05731287	148	9,11	0,92950592
28	6,49	0,00222973	152	8,91	0,58647859
32	6,24	0,00125387	156	8,96	0,6580398
36	6,15	0,00101918	160	8,55	0,25600719
40	6,27	0,00134354	164	8,7	0,36161977
44	6,04	0,00079114	168	7,1	0,00908348
48	6,07	0,00084772	172	6,9	0,00573129
52	6,06	0,00082842	176	7,4	0,01812392
56	6,19	0,00111751	180	7,2	0,01143542
60	6,12	0,00095116	184	9,26	1,31296202
64	6,29	0,00140686	188	7,28	0,0137484
68	6,12	0,00095116	192	7,32	0,01507482
72	6,5	0,00228167	196	6,86	0,005227
76	6,7	0,0036162	200	6,93	0,00614118
80	6,8	0,00455252	204	6,97	0,00673368
84	6,7	0,0036162	208	7	0,00721526
88	6,7	0,0036162	212	6,63	0,00307788
92	6,9	0,00573129	216	6,51	0,00233481
96	6,7	0,0036162	220	7,45	0,02033537
100	7,68	0,03453442	224	8,77	0,42486618
104	7,72	0,03786624	228	9	0,72152629
108	7,8	0,04552523	232	8,89	0,56008271
112	7,84	0,04991742	236	8,87	0,53487483
116	7,85	0,05108015	240	8,57	0,26807244
120	7,9	0,05731287	244	8,37	0,16914227

### B. Pencahayaan Kotinu

Jam	pH	[HCO <sub>3</sub> ] <sup>-</sup> (M)	Jam	pH	[HCO <sub>3</sub> ] <sup>-</sup> (M)
0	5,94	0,000628	156	8,06	0,082842
4	5,93	0,000614	160	8,21	0,117018
8	5,74	0,000397	164	8,31	0,147317
12	5,88	0,000547	168	6,41	0,001855
16	5,98	0,000689	172	6,6	0,002872
20	6,23	0,001225	176	6,4	0,001812

24	5,94	0,000628	180	6,5	0,002282
28	5,88	0,000547	184	6,7	0,003616
32	7,58	0,027432	188	6,9	0,005731
36	8,09	0,088767	192	7,76	0,04152
40	8,48	0,217897	196	7,1	0,009083
44	8,24	0,125387	200	6,5	0,002282
48	7,81	0,046586	204	6,52	0,002389
52	8,33	0,15426	208	6,49	0,00223
56	7,93	0,061412	212	5,95	0,000643
60	8	0,072153	216	6,01	0,000738
64	7,6	0,028724	220	7,15	0,010192
68	7,67	0,033748	224	8,32	0,150748
72	7,79	0,044489	228	8,14	0,099598
76	7,6	0,028724	232	8,08	0,086747
80	7,63	0,030779	236	7,82	0,047671
84	7,71	0,037004	240	7,94	0,062842
88	7,6	0,028724	244	8,19	0,111751
92	7,4	0,018124	248	7,84	0,049917
96	7,1	0,009083	252	7,9	0,057313
100	7,3	0,014396	256	8,05	0,080957
104	7,2	0,011435	260	8,19	0,111751
108	7,3	0,014396	264	8,12	0,095116
112	7,3	0,014396	268	7,91	0,058648
116	7,5	0,022817	272	8,2	0,114354
120	7,2	0,011435	276	8,07	0,084772
124	7,12	0,009512	280	8,13	0,097331
128	6,04	0,000791	284	7,8	0,045525
132	6,31	0,001473	288	7,92	0,060014
136	6,09	0,000888	292	8,23	0,122533
140	6,21	0,00117	296	8,25	0,128308
144	5,94	0,000628	300	8,3	0,143963
148	7,21	0,011702	304	8,31	0,147317
152	7,87	0,053487	308	8,31	0,147317



## LAMPIRAN D

### CONTOH DAN HASIL PERHITUNGAN $E_x$ DAN $\eta_{bp}$

#### D.1. Contoh Perhitungan

Data  $I_0$  dan  $I_b$  yang diambil pada penelitian akan digunakan untuk menghitung parameter efisiensi energi cahaya, antara lain :

b. Total energi cahaya yang tersedia selama masa kultivasi :

$$E_o = A \int_0^t (I_i - I_t) dt$$

c. Total energi cahaya yang terserap selama masa kultivasi :

$$E_i = A \int_0^t I_i dt$$

Di mana :

A = luas permukaan plat iluminasi ( $m^2$ )

$I_t$  = intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh kultur ( $W/m^2$ )

$I_i$  = intensitas cahaya yang diterima oleh kultur ( $W/m^2$ )

t = waktu (jam)

dengan nilai konversi  $1 \text{ lx} = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$

d.  $E_x$  (energi cahaya yang dimanfaatkan selama kultivasi) dan E (energi cahaya yang tersedia dalam kultivasi) :

$$E_x = \frac{\int_0^t I_i dt}{\Delta X \cdot s} \quad E = \frac{\int_0^t (I_i - I_t) dt}{\Delta X \cdot s}$$

Di mana :

$\Delta X$  = berat biomassa yang dihasilkan selama masa kultivasi ( $g/dm^3$ )

s = jarak yang ditempuh cahaya di dalam kultur (m)

Sehingga dapat dihitung besar efisiensi konversi energi cahaya untuk pembentukan biomassa ( $\eta_{bp}$ ) :

$$\eta_{bp} = \frac{E_x}{E} \times 100\%$$

Pada penelitian ini :

$$A = 0.383 \text{ m}^2$$

$$S = 0.1 \text{ m}$$

$$\alpha_{\text{kaca}} = 0.76$$

$$\Delta X_{\text{alterasi}} = 0.012 \text{ g/dm}^3 ; \Delta X_{\text{kontinu}} = 0.0073 \text{ g/dm}^3$$

## D.2. Data Perhitungan

### A. Pencahayaan Alterasi

Jam	lo (lux)	lb (lux)	li (lux)	lt (lux)	Ex (J/g)	E (J/g)
0	5000	1240	3788,237	1636,645	0	0
4	5000	1110	3788,237	1465,061	14512,06	23012,05
8	5350	1030	4053,414	1359,471	26932,28	53369,3
12	5813	940	4404,205	1240,683	36868,47	94008,1
16	5813	920	4404,205	1214,285	48112,04	126390,1
20	5813	970	4404,205	1280,279	63408,53	154719,1
24	6368	740	4824,699	976,7075	58048,22	228696
28	6368	650	4824,699	857,9188	59486,36	275048,5
32	6368	610	4824,699	805,1238	63800,75	318524,8
36	6368	550	4824,699	725,9313	64715,92	365400,4
40	6889	470	5219,433	620,3413	61447,44	455559,7
44	7747	460	5869,495	607,1425	66154,06	573384,3
48	8622	400	6532,437	527,95	62754,84	713723,9
52	8622	370	6532,437	488,3538	62885,58	778299,8
56	9000	300	6818,827	395,9625	54910,48	890696,9
60	9663	270	7321,148	356,3663	52949,39	1034837
64	10887	220	8248,508	290,3725	46020,21	1261260
68	10887	200	8248,508	263,975	44451,34	1344533
72	10887	100	8248,508	131,9875	23533,06	1447157
76	10887	90	8248,508	118,7888	22356,41	1530038
80	10887	132	8248,508	174,2235	34515,16	1599585
84	10887	130	8248,508	171,5838	35691,81	1680113
88	10887	100	8248,508	131,9875	28762,63	1768747
92	10887	90	8248,508	118,7888	27063,02	1852152
96	12000	70	9091,77	92,39125	21964,19	2139424
100	14757	63	11180,6	83,15213	20591,43	2748125
104	14757	52	11180,6	68,6335	17675,95	2861789
108	14757	43	11180,6	56,75463	15178,83	2975034
112	14757	34	11180,6	44,87575	12446,38	3088516
116	14757	26	11180,6	34,31675	9857,739	3201853

120	14757	15	11180,6	19,79813	5883,266	3316576
124	15000	9	11364,71	11,87888	3647,625	3486094
128	15000	10	11364,71	13,19875	4183,656	3598130
132	16273	11	12329,2	14,51863	4745,834	4025410
136	18175	10	13770,24	13,19875	4445,134	4633159
140	18175	8	13770,24	10,559	3660,699	4770343
144	18175	8	13770,24	10,559	3765,29	4906639
148	18175	5	13770,24	6,599375	2418,676	5044386
152	18175	4	13770,24	5,2795	1987,236	5181217
156	18175	4	13770,24	5,2795	2039,532	5317565
160	20000	3	15152,95	3,959625	1568,871	6002288
164	20000	1	15152,95	1,319875	536,0309	6153417
168	20000	1	15152,95	1,319875	549,1048	6303500
172	20000	1	15152,95	1,319875	562,1787	6453584
176	20000	1	15152,95	1,319875	575,2527	6603667
180	20000	1	15152,95	1,319875	588,3266	6753750
184	20000	1	15152,95	1,319875	601,4005	6903834
188	20000	1	15152,95	1,319875	614,4744	7053917
192	21406	1	16218,2	1,319875	627,5484	7710486
196	21406	1	16218,2	1,319875	640,6223	7871121
200	21406	1	16218,2	1,319875	653,6962	8031756
204	21406	1	16218,2	1,319875	666,7701	8192391
208	21406	1	16218,2	1,319875	679,8441	8353026
212	25387	0	19234,4	0	0	10097819
216	25387	0	19234,4	0	0	10288344
220	25387	0	19234,4	0	0	10478869
224	27000	0	20456,48	0	0	11347289
228	27000	0	20456,48	0	0	11549919
232	27000	0	20456,48	0	0	11752549
236	27000	0	20456,48	0	0	11955179
240	27000	0	20456,48	0	0	12157810
244	27000	0	20456,48	0	0	12360440
<b>Jumlah</b>					<b>1202736</b>	<b>2,74 x10<sup>8</sup></b>
<b>Efisiensi</b>					<b>0,438573</b>	

## B. Pencahayaan Kontinu

Jam	lo (lux)	lb (lux)	li (lux)	lt (lux)	Ex (J/g)	E (J/g)
0	5000	1170	3788,2374	1544,2538	0	0
4	5000	1120	3788,2374	1478,2601	23,869979	37,30001
8	5000	960	3788,2374	1267,08	40,919965	81,42001
12	5000	830	3788,2374	1095,4963	53,068079	130,4419
16	5000	720	3788,2374	950,31004	61,379947	183,3
20	5000	610	3788,2374	805,12378	65,003069	240,8469
24	5000	470	3788,2374	620,34127	60,101198	306,9187

28	5000	390	3788,2374	514,75127	58,183075	370,0068
32	5000	360	3788,2374	475,15502	61,379947	427,9799
36	5000	330	3788,2374	435,55877	63,29807	487,2318
40	5000	260	3788,2374	343,16751	55,412452	556,2874
44	5000	230	3788,2374	303,57126	53,920579	618,9493
48	5000	180	3788,2374	237,57751	46,03496	688,0049
52	5000	160	3788,2374	211,18001	44,329962	750,8799
56	5000	150	3788,2374	197,98126	44,756211	811,6236
60	5000	150	3788,2374	197,98126	47,953084	869,5967
64	5000	110	3788,2374	145,18626	37,509968	941,2098
68	5000	70	3788,2374	92,391254	25,361853	1014,528
72	5000	50	3788,2374	65,993753	19,181233	1081,879
76	5000	30	3788,2374	39,596252	12,148115	1150,082
80	5000	20	3788,2374	26,397501	8,5249927	1214,875
84	5000	12	3788,2374	15,838501	5,3707454	1279,199
88	5000	12	3788,2374	15,838501	5,6264951	1340,113
92	5000	12	3788,2374	15,838501	5,8822449	1401,027
96	5000	12	3788,2374	15,838501	6,1379947	1461,942
100	5000	12	3788,2374	15,838501	6,3937445	1522,856
104	5000	12	3788,2374	15,838501	6,6494943	1583,77
108	5000	12	3788,2374	15,838501	6,905244	1644,684
112	5000	12	3788,2374	15,838501	7,1609938	1705,599
116	5000	12	3788,2374	15,838501	7,4167436	1766,513
120	5000	12	3788,2374	15,838501	7,6724934	1827,427
124	5000	12	3788,2374	15,838501	7,9282432	1888,341
128	5000	12	3788,2374	15,838501	8,1839929	1949,256
132	5000	11	3788,2374	14,518626	7,7364308	2010,873
136	5000	10	3788,2374	13,198751	7,2462438	2072,533
140	5000	10	3788,2374	13,198751	7,4593686	2133,49
144	5000	10	3788,2374	13,198751	7,6724934	2194,447
148	5000	10	3788,2374	13,198751	7,8856182	2255,404
152	5000	10	3788,2374	13,198751	8,098743	2316,361
156	5000	9	3788,2374	11,878875	7,4806811	2378,149
160	5000	7	3788,2374	9,2391254	5,9674949	2440,832
164	5000	6	3788,2374	7,9192503	5,2428705	2502,727
168	5000	4	3788,2374	5,2795002	3,5804969	2565,559
172	5000	4	3788,2374	5,2795002	3,6657468	2626,644
176	5000	3	3788,2374	3,9596252	2,8132476	2688,666
180	5000	2	3788,2374	2,6397501	1,9181233	2750,731
184	5000	2	3788,2374	2,6397501	1,9607483	2811,859
188	5000	2	3788,2374	2,6397501	2,0033733	2872,986
192	5000	1	3788,2374	1,3198751	1,0229991	2935,136
196	5000	1	3788,2374	1,3198751	1,0443116	2996,285
200	5000	1	3788,2374	1,3198751	1,0656241	3057,434
204	5000	1	3788,2374	1,3198751	1,0869366	3118,582

208	5000	1	3788,2374	1,3198751	1,108249	3179,731
212	5000	0	3788,2374	0	0	3242,009
216	5000	0	3788,2374	0	0	3303,179
220	5000	0	3788,2374	0	0	3364,349
224	5000	0	3788,2374	0	0	3425,519
228	5000	0	3788,2374	0	0	3486,689
232	5000	0	3788,2374	0	0	3547,859
236	5000	0	3788,2374	0	0	3609,029
240	5000	0	3788,2374	0	0	3670,199
244	5000	0	3788,2374	0	0	3731,369
248	5000	0	3788,2374	0	0	3792,539
252	5000	0	3788,2374	0	0	3853,709
256	5000	0	3788,2374	0	0	3914,879
260	5000	0	3788,2374	0	0	3976,049
264	5000	0	3788,2374	0	0	4037,219
268	5000	0	3788,2374	0	0	4098,389
272	5000	0	3788,2374	0	0	4159,559
276	5000	0	3788,2374	0	0	4220,729
280	5000	0	3788,2374	0	0	4281,899
284	5000	0	3788,2374	0	0	4343,069
288	5000	0	3788,2374	0	0	4404,239
292	5000	0	3788,2374	0	0	4465,409
296	5000	0	3788,2374	0	0	4526,579
300	5000	0	3788,2374	0	0	4587,749
304	5000	0	3788,2374	0	0	4648,919
308	5000	0	3788,2374	0	0	4710,089
				<b>Jumlah</b>	<b>1095,725</b>	<b>130159,9</b>
				<b>Efisiensi</b>	<b>0,8064888</b>	

## LAMPIRAN E

### PROSEDUR STERILISASI PERALATAN

Prosedur sterilisasi peralatan dilakukan pada alat-alat yang akan langsung bersentuhan dengan *Chlorella*. Hal ini dilakukan untuk mencegah kontaminasi bakteri yang dapat mengganggu dan menghambat pertumbuhan *Chlorella*. Prosedur sterilisasi terdiri dari beberapa langkah berikut :

#### 2. Pencucian Peralatan

Peralatan yang akan digunakan dicuci dengan air sabun sampai bersih kemudian dibilas kembali dengan air hingga tidak terdapat sisa sabun yang menempel pada peralatan.

#### 3. Pengeringan

Peralatan yang telah dicuci dapat dikeringkan dengan menggunakan tisu kering atau dengan kompressor udara. Setelah kering, semua peralatan yang memiliki rongga ditutup dengan *aluminium foil* untuk mencegah masuknya kontaminan setelah disterilisasi.

#### 4. Sterilisasi

Peralatan yang terbuat dari kaca atau logam disterilisasi menggunakan oven pada suhu 120°C selama  $\pm 1$  jam dan peralatan dari plastik atau berukuran cukup besar dapat direndam dalam alkohol 70% selama  $\pm 5$  menit tanpa proses peng-ovenan. Proses perendaman menggunakan alkohol dapat dilakukan kembali sebelum peralatan digunakan.

#### 5. Penyimpanan

Semua peralatan yang telah disterilisasi disimpan dalam lemari penyimpanan kedap udara yang dilengkapi dengan lampu UV.

## LAMPIRAN F

### PROSEDUR PEMBUATAN MEDIUM BENNECK

Medium yang digunakan sebagai media kultur pertumbuhan *Chlorella* dalam penelitian ini adalah medium *Benneck*. Berikut prosedur yang dilakukan untuk membuat 1 liter medium *Benneck* :

1. Menyiapkan bahan medium *Benneck*

Bahan	Kuantitas (mg/liter aquadest)
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	100
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	200
$\text{NaNO}_3$	500
$\text{FeCl}_3$	3-5

2. Untuk membuat 1 liter medium, bahan-bahan di atas dilarutkan dalam aquadest sehingga volume larutan menjadi 1 liter dan diaduk sehingga seluruh bahan larut.
3. Mensterilisasi medium menggunakan autoclave selama 1,5 jam, lalu dinginkan.
4. Medium yang telah disterilkan dan dingin dapat disimpan dalam lemari yang telah disterilisasi dengan UV atau lemari pendingin jika tidak langsung digunakan.
5. Jika masih terdapat endapan maka dipisahkan terlebih dahulu lalu disimpan.