

**PERLAKUAN FILTRASI ALIRAN SIRKULASI MEDIA  
KULTUR UNTUK PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA  
*Chlorella sp.* MELALUI PENCAHAYAAN KONTINYU DALAM  
FOTOBIOREAKTOR KOLOM GELEMBUNG  
SKALA MENENGAH**

**SKRIPSI**

Oleh

**RACHMA NUZULLIANY**

**04 04 06 047 Y**



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

**PERLAKUAN FILTRASI ALIRAN SIRKULASI MEDIA  
KULTUR UNTUK PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA  
*Chlorella sp.* MELALUI PENCAHAYAAN KONTINYU DALAM  
FOTOBIOREAKTOR KOLOM GELEMBUNG  
SKALA MENENGAH**

**SKRIPSI**

Oleh

**RACHMA NUZULLIANY**

**04 04 06 047 Y**



**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 :

**PERLAKUAN FILTRASI ALIRAN SIRKULASI MEDIA KULTUR UNTUK  
PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella sp.* MELALUI PENCAHAYAAN  
KONTINYU DALAM FOTOBIOREAKTOR KOLOM GELEMBUNG  
SKALA MENENGAH**

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, 18 Juli 2008

Rachma Nuzulliany  
NPM 04 04 06 047 Y

## PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

**PERLAKUAN FILTRASI ALIRAN SIRKULASI MEDIA KULTUR UNTUK  
PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella* sp. MELALUI PENCAHAYAAN  
KONTINYU DALAM FOTOBIOREAKTOR KOLOM GELEMBUNG  
SKALA MENENGAH**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 18 Juli 2008

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Ir. Dianursanti, M. T.**

NIP 132 165 710

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

NIP. 132 058 695

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

**Ir. Dianursanti, MT**

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

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

Rachma Nuzulliany	Pembimbing :
NPM 040406047Y	I. Ir. Dianursanti, M.T.
Departemen Teknik Kimia	II.Dr. Ir. Anondho Wijanarko,M.Eng.

**PERLAKUAN FILTRASI ALIRAN SIRKULASI MEDIA KULTUR UNTUK  
PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella sp.* MELALUI  
PENCAHAYAAN KONTINYU DALAM FOTOBIOREAKTOR  
KOLOM GELEMBUNG SKALA MENENGAH**

**ABSTRAK**

Mikroalga *Chlorella sp.* termasuk kelompok kecil yang dikenal sebagai *nutriceutical*, yang merupakan makanan bergizi sangat tinggi dan mulai banyak dikembangkan sebagai penghasil biomassa. Belakangan ini, *Chlorella sp.* sangat diminati oleh para ahli untuk diteliti karena kemampuannya sebagai penghasil biomassa yang bermanfaat sebagai suplemen makanan dan kesehatan. Berbagai riset yang telah dilakukan di beberapa negara membuktikan bahwa *Chlorella* aman dijadikan sebagai bahan pangan alternatif yang mempunyai khasiat penyembuh. Selain manfaat biomassa itu sendiri, dalam proses pembudidayaannya, *Chlorella sp.* dapat dimanfaatkan sebagai pereduksi pemanasan global, yaitu dengan memfiksasi CO<sub>2</sub> yang terjadi dalam proses fotosintesis.

Berdasarkan alasan-alasan tersebut, maka beberapa penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan produksi biomassa dan kemampuan fiksasi CO<sub>2</sub>-nya. Penelitian kali ini merupakan scale-up dari penelitian-penelitian sebelumnya. Pencahayaan yang diberlakukan pada penelitian ini adalah pencahayaan kontinyu. Namun, pencahayaan ini memiliki keterbatasan karena intensitas yang diberikan selalu konstan padahal jumlah *Chlorella* dalam kultur semakin meningkat. Oleh sebab itu, salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengatasinya adalah dengan menggunakan proses filtrasi.

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Rekayasa Bioproses dan Laboratorium Rekayasa Reaksi Kimia, Departemen Teknik Kimia. Jenis mikroalga yang digunakan adalah jenis *Chlorella sp.*, yang telah dikultivasi dalam medium *Benneck*. Sistem reaktor yang digunakan adalah fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah yang dialiri oleh udara yang mengandung 5 % CO<sub>2</sub>.

Proses filtrasi untuk kultivasi *Chlorella vulgaris Buitenzorg* berhasil meningkatkan produksi biomassa *Chlorella sp.* hingga 1,03 kali lipat dibandingkan dengan pencahayaan kontinu tanpa filtrasi dengan jumlah inokulum yang sama. Hasil akhir produksi biomassa adalah 0,00756 g/dm<sup>3</sup> dengan masa kultivasi yang lebih singkat yaitu selama 200 jam.

**Keywords: filtrasi, *Chlorella sp.*, pencahayaan kontinyu.**

Rachma Nuzulliany NPM 040406047Y Chemical Engineering Department	Counsellor : I. Ir. Dianursanti, M.T. II.Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng.
<b>FILTRATION PROCESS FOR INCREASING BIOMASS PRODUCTION OF <i>Chlorella sp.</i> WITH CONSTANT LIGHTING INTENSITY IN MID-SCALE BUBBLE COLUMN PHOTOBIOREACTOR</b>	
<b>ABSTRACT</b>	
<p>Nutraceutical is one small group that has very high nutrition, including microalgae <i>Chlorella sp.</i> It has been developed as biomass product. For now, many researchers feel interested to research about their ability as a biomass product that is very useful as food supplement and for health. Many researches that have been done in many countries prove that <i>Chlorella</i> is safe to be alternative food which can be a healing food. Beside the use of the biomass, in the cultivation of <i>Chlorella</i>, it can be used as a reducer of global warming because it can fixate CO<sub>2</sub> by photosynthesis.</p> <p>Base on those reasons, many researches have been done to increase the biomass production and the ability of its fixation. This research is about scaling-up from the researches before. It uses constant lighting intensity. But, this lighting has limitation because the intensity is always constant though the number of <i>Chlorella</i> in culture always increases. Therefore, one solution to solve it is by using filtration process.</p> <p>This research is done in Bioprocess Laboratory, Department of Chemical Engineering, University of Indonesia. The type of microalgae that is used is <i>Chlorella sp.</i>, in Benneck medium. The system of reactor that is used is mid-scale bubble column photobioreactor flowed by air which contains 5% CO<sub>2</sub>.</p> <p>Filtration process for cultivating <i>Chlorella sp.</i> has increased biomass production of <i>Chlorella sp.</i> about 1,03 times more than cultivation without filtration by using the same number of <i>Chlorella sp.</i> starter. Final result of dry weight is 0,00756 g/dm<sup>3</sup> in shorter time of cultivation, 200 hours.</p>	
<b>Keywords: filtration, <i>Chlorella sp.</i>, constant lighting intensity.</b>	

## DAFTAR ISI

<b>PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI .....</b>	<b>ii</b>
<b>PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR ISTILAH/SIMBOL.....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 <b>LATAR BELAKANG MASALAH .....</b>	<b>1</b>
1.2 <b>RUMUSAN MASALAH.....</b>	<b>4</b>
1.3 <b>TUJUAN PENELITIAN.....</b>	<b>4</b>
1.4 <b>BATASAN MASALAH.....</b>	<b>4</b>
1.5 <b>SISTEMATIKA PENULISAN .....</b>	<b>5</b>
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1 <b>MIKROALGA <i>Chlorella vulgaris</i> .....</b>	<b>6</b>
2.1.1 <b>Taksonomi <i>Chlorella vulgaris</i> .....</b>	<b>9</b>
2.1.2 <b>Morfologi <i>Chlorella vulgaris</i> .....</b>	<b>9</b>
2.1.3 <b>Fase Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> (Sujarwo, 2006) .....</b>	<b>11</b>
2.1.4 <b>Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> .....</b>	<b>13</b>
2.2 <b>FOTOSINTESIS (<a href="http://www.lablink.or.id">http://www.lablink.or.id</a>).....</b>	<b>16</b>
2.2.1 <b>Fotosintesis pada Tumbuhan.....</b>	<b>16</b>
2.2.2 <b>Fotosintesis pada Alga dan Bakteri .....</b>	<b>18</b>
2.2.3 <b>Fotosintesis pada Tingkat Molekuler.....</b>	<b>18</b>
2.2.4 <b>Hasil Proses Fotosintesis.....</b>	<b>21</b>
2.2.5 <b>Faktor Penentu Laju Fotosintesis .....</b>	<b>21</b>

2.3	FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PERTUMBUHAN	
	MIKROALGA HIJAU <i>Chlorella</i> PADA MEDIUM TERBATAS .....	22
2.3.1	Jenis Medium.....	22
2.3.2	Pencahayaan .....	23
2.3.3	Temperatur .....	25
2.3.4	Oksigen (O <sub>2</sub> ) dan Karbondioksida (CO <sub>2</sub> ).....	25
2.3.5	Derajat Keasaman (pH).....	25
2.3.6	Radiasi Cahaya .....	25
2.4	PERHITUNGAN DASAR DALAM KINETIKA PERTUMBUHAN	
	MIKROALGA (Wijanarko, 2006).....	26
2.4.1	Perhitungan Laju Pertumbuhan Spesifik ( $\mu, \mu_{max}$ ) .....	26
2.4.2	Perhitungan X dan N <sub>sel</sub> .....	26
2.4.3	Perhitungan [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] di dalam Medium Kultur Mikroalga.....	27
2.4.4	Perhitungan Energi Cahaya yang Dimanfaatkan untuk Duplikasi maupun untuk Pendewasaan Sel .....	29
2.5	FOTOBIOREAKTOR .....	30
2.5.1	Karakteristik Fotobioreaktor (Pulz, 2001) .....	30
2.5.2	Jenis Fotobioreaktor.....	32
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>		<b>34</b>
3.1	DIAGRAM ALIR PENELITIAN .....	34
3.2	ALAT DAN BAHAN PENELITIAN .....	34
3.3	VARIABEL PENELITIAN .....	36
3.3.1	Variabel Bebas.....	36
3.3.2	Variabel Terikat.....	36
3.3.3	Variabel Tetap .....	36
3.4	PROSEDUR PENELITIAN.....	36
3.4.1	Persiapan Peralatan dan Medium .....	37
3.4.2	Pembiakan Kultur <i>Chlorella vulgaris</i> Dalam Medium <i>Benneck</i> .....	40
3.4.3.	Penentuan Kerapatan Biomassa Inokulum <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Buitenzorg</i> .....	41
3.4.4.	Pelaksanaan Kegiatan Riset.....	41
3.4.5.	Pengambilan Data .....	42
3.4.6.	Pengolahan Data Penelitian.....	42

<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>44</b>
4.1. PEMBAHASAN UMUM.....	44
4.2. DATA PENELITIAN.....	46
4.3. PENGARUH PERLAKUAN FILTRASI TERHADAP PERTUMBUHAN <i>Chlorella vulgaris</i> .....	48
4.3.1. Pengaruh Perlakuan Filtrasi terhadap Berat Kering (X).....	48
4.3.2. Pengaruh Perlakuan Filtrasi terhadap Laju Pertumbuhan ( $\mu$ ).....	50
4.3.3. Pengaruh Perlakuan Filtrasi terhadap nilai pH Medium.....	51
4.3.4. Pengaruh Perlakuan Filtrasi terhadap Konsentrasi $\text{HCO}_3^-$ dalam Medium.....	52
4.4. PENGARUH PERLAKUAN FILTRASI TERHADAP BESARNYA ENERGI CAHAYA UNTUK PRODUKSI BIOMASSA ( $E_x$ ).....	54
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	<b>56</b>
3.5. KESIMPULAN .....	56
3.6. SARAN .....	56
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>xiv</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1.</b> Koloni <i>Chlorella vulgaris</i> .....	7
<b>Gambar 2. 2.</b> Struktur Sel <i>Chlorella</i> .....	9
<b>Gambar 2. 3.</b> Kurva Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> .....	11
<b>Gambar 2. 4.</b> Reaksi pada Fotosintesis.....	19
<b>Gambar 2. 5.</b> Kurva Kalibrasi $N_{sel}$ vs $OD_{600}$ .....	27
<b>Gambar 2. 6.</b> Kurva Kalibrasi $X$ vs $OD_{600}$ .....	27
<b>Gambar 2. 7.</b> Fotobioreaktor Terbuka untuk Pembiakan <i>Chlorella vulgaris</i> . .....	30
<b>Gambar 3. 1.</b> Diagram Alir Penelitian .....	34
<b>Gambar 3. 2.</b> Susunan Rangkaian Peralatan Running Fotobioreaktor .....	38
<b>Gambar 4. 1.</b> Grafik Data Pengamatan pada Reaktor dengan Filtrasi dan Tanpa Filtrasi.....	47
<b>Gambar 4. 2.</b> Grafik Perbandingan Pertumbuhan <i>Chlorella sp.</i> Pada Reaktor Berfilter.....	48
<b>Gambar 4. 3.</b> Grafik Berat Kering Kultur dan Berat Kering Filtrat vs Waktu .....	50
<b>Gambar 4. 4.</b> Grafik Perbandingan $\mu$ vs Waktu pada Reaktor.....	51
<b>Gambar 4. 5.</b> Grafik $HCO_3^-$ vs Waktu pada Reaktor dengan Filtrasi.....	53
<b>Gambar 4. 6.</b> Grafik $HCO_3^-$ vs Waktu pada Reaktor tanpa Filtrasi.....	54

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1.</b> Taksonomi <i>Chlorella vulgaris</i> .....	9
<b>Tabel 2. 2.</b> Komposisi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> .....	14
<b>Tabel 2. 3.</b> Pigmen Biomassa Penyerap Cahaya pada Alga.....	15
<b>Tabel 2. 4.</b> Perbandingan Komposisi Nutrisi Medium .....	23
<b>Tabel 2. 5.</b> Karakteristik Beberapa Jenis Fotobioreaktor.....	33
<b>Tabel 3. 1.</b> Bahan Medium Benneck .....	39
<b>Tabel 4. 1.</b> Data Sel pada Akhir Kultivasi .....	49
<b>Tabel 4. 2.</b> Energi Cahaya untuk Produksi Biomassa.....	55

## DAFTAR LAMPIRAN

	<b>Halaman</b>
<b>LAMPIRAN A</b> Kurva Kalibrasi : Tabel Konversi OD <sub>600</sub> , Nsel, serta X	xvi
<b>LAMPIRAN B</b> Penentuan Kecepatan Superfisial	xvii
<b>LAMPIRAN C</b> Data Hasil Penelitian	xix
<b>LAMPIRAN D</b> Pengolahan Data OD <sub>600</sub>	xxii
<b>LAMPIRAN E</b> Pengolahan Data pH	xxviii
<b>LAMPIRAN F</b> Pengolahan Data I	xxxii

## DAFTAR ISTILAH/SIMBOL

$\alpha_{\text{kaca}}$	= Efisiensi penyerapan cahaya oleh permukaan kaca bioreaktor
A	= Luas permukaan plat iluminasi ( $\text{m}^2$ )
$C_S$	= Konsentrasi substrat ( $\text{mol.dm}^{-3}$ )
E	= Energi cahaya yang diterima oleh kultur medium ( $\text{kJ.g}^{-1}$ )
$E_X$	= Energi cahaya yang dimanfaatkan alga dalam pertumbuhannya ( $\text{kJ.g}^{-1}$ )
I	= Intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh kultur medium dalam bioreaktor (Lux)
$I_b$	= Intensitas cahaya yang keluar dari bioreaktor (lux)
$I_i$	= Intensitas cahaya yang diterima oleh kultur medium dalam bioreaktor (lux)
$I_o$	= Intensitas cahaya yang diterima oleh kultur medium dalam bioreaktor (lux)
N	= Nilai kerapatan sel ( $\text{sel.dm}^{-3}$ )
$\eta$	= Efisiensi konversi energi cahaya
OD	= <i>Optical density</i> (kerapatan optik)/absorbansi kultur terhadap cahaya. [-]
$OD_{680}$	= <i>Optical density</i> (kerapatan optik)/absorbansi kultur terhadap cahaya pada panjang gelombang 680nm. [-]
P	= Tekanan operasional (atm)
$q_{\text{CO}_2}$	= Laju transfer $\text{CO}_2$ spesifik ( $\text{h}^{-1}$ )
R	= Konstanta Tetapan Gas ( $0.082 \text{ atm.dm}^3.\text{mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
S	= Jarak yang ditempuh cahaya dalam kultur medium (m)
T	= Temperatur Operasional (K)
t	= Waktu (h)
$U_G$	= Kecepatan superficial gas (m/h)
$\mu$	= Laju pertumbuhan sel ( $\text{h}^{-1}$ )
$V_{\text{med}}$	= Volume medium ( $\text{dm}^{-3}$ )
X	= Massa kering sel ( $\text{g.dm}^{-3}$ )

# BAB I

## PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan dari skripsi ini.

### 1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Karbondioksida merupakan gas tidak berwarna yang terdapat pada atmosfer dengan jumlah mencapai 330 ppm dan paling banyak berasal dari pembakaran bahan bakar fosil (Making the World Sustainable EnergyBulletin\_net Peak Oil News Clearinghouse.htm, Februari 2007). Peningkatan emisi gas rumah kaca ini menyebabkan efek pemanasan global yang ditandai dengan naiknya suhu atmosfer dan iklim yang tidak stabil. Hal tersebut yang mendorong lahirnya Protokol Kyoto pada tanggal 11 Desember 1997. Pada pokoknya, Protokol Kyoto mewajibkan negara-negara industri maju untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (*Green House Gases/GHGs*) - CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCS, PFCS dan SF<sub>6</sub>- minimal 5,5 % dari tingkat emisi tahun 1990, selama tahun 2008 sampai tahun 2012 (Republika Online-<http://www.republika.co.id.htm>, Januari 2007). Sebelumnya, Indonesia sebagai negara berkembang belum meratifikasi protokol ini karena belum diwajibkan mengurangi emisi gas rumah kaca di dalam negeri. Namun, seiring waktu, semakin banyak hutan Indonesia yang ditebang ataupun terbakar sehingga lahan resapan gas rumah kaca sangat jauh berkurang. Oleh karena itu, saat ini Indonesia telah ikut menandatangani Protokol Kyoto.

Berbagai upaya telah dilakukan sebagai langkah untuk mendukung protokol tersebut, di antaranya adalah dengan mengembangkan penelitian-penelitian di bidang bioteknologi. Inovasi yang ramai diperbincangkan saat ini adalah pemanfaatan mikroalga untuk memfiksasi CO<sub>2</sub> melalui proses fotosintesis. Salah satu mikroalga tersebut adalah *Chlorella vulgaris*.

Efisiensi fotosintesis pada *Chlorella vulgaris* mencapai 8% dan kandungan klorofilnya mencapai 28,9 g/kg berat biomassa, paling tinggi jika dibandingkan dengan seluruh mikroalga hijau bahkan tumbuhan tingkat tinggi di dunia (Turkenburg, 1997). Oleh karena itu, *Chlorella vulgaris* dapat memfiksasi CO<sub>2</sub> dalam jumlah yang sangat besar. Kemampuan inilah yang secara tidak langsung berdampak positif terhadap penurunan efek pemanasan global.

Selama berfotosintesis, *Chlorella vulgaris* mempunyai kemampuan untuk tumbuh dan berkembangbiak dengan cepat. Oleh karena itu, selain menguntungkan dalam penurunan efek pemanasan global, pertumbuhan *Chlorella vulgaris* juga memberikan efek ganda yaitu menghasilkan produksi biomassa dalam jumlah yang tinggi. Biomassa dari *Chlorella vulgaris* banyak mengandung vitamin, karbohidrat, dan terutama protein sehingga mempunyai potensi secara komersial untuk dimanfaatkan sebagai suplemen makanan (Surawiria, 2005). Hal ini juga menjawab permasalahan kurangnya asupan gizi bagi masyarakat, khususnya masyarakat perkotaan. Gaya hidup masyarakat metropolitan yang menuntut serba cepat dan praktis ternyata mempengaruhi pola makan masyarakat kota. Masyarakat cenderung memilih *fast food* sebagai alternatif makanan sehari-hari. Padahal, setiap manusia memerlukan zat-zat nutrisi yang cukup bagi tubuhnya seperti vitamin, serat, dan mineral, yang tidak dapat diproduksi sendiri oleh tubuhnya. Biomassa *Chlorella* dapat dibuat menjadi *food supplement* yang dapat memberikan zat nutrisi tersebut bagi tubuh manusia.

Mengingat banyaknya manfaat *Chlorella vulgaris*, perlu dilakukan studi lebih lanjut tentang pembudidayaan mikroalga ini agar didapatkan hasil yang optimal. Variabel penting yang perlu diperhatikan dalam pembudidayaan *Chlorella* adalah pencahayaan. Pencahayaan yang tidak baik dapat menyebabkan efek self-shading yaitu peristiwa penutupan satu sel oleh sel lain akibat tidak meratanya cahaya dan CO<sub>2</sub> yang didapatkan oleh alga. Di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia telah dilakukan berbagai penelitian dengan optimasi pencahayaan untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris*. Awalnya, pembudidayaan *Chlorella* menggunakan pencahayaan siklus harian (terang-gelap) namun produksi yang dihasilkan kurang baik karena fotosintesis tidak dapat dilakukan secara maksimal pada saat kondisi gelap (tidak ada pencahayaan). Lalu, produksi biomassa dilakukan dengan menggunakan pencahayaan kontinyu, yaitu pemberian cahaya

buatan secara terus-menerus dengan intensitas yang konstan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa perlakuan pencahayaan kontinyu pada *Chlorella* menunjukkan hasil akhir produksi biomassa (X) tiga kali lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan siklus harian (Rahayu, 2006). Penelitian mengenai produksi biomassa *Chlorella* dilanjutkan dengan menggunakan pencahayaan alterasi, yaitu pengaturan intensitas cahaya secara berkesinambungan seiring dengan pertumbuhan sel di dalam kultur (Wijanarko, 2006). Hasil penelitian dengan pencahayaan alterasi pada skala lab menunjukkan bahwa alterasi pencahayaan menunjukkan produksi biomassa 1,61 kali lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu pada  $I_{\mu\max, opt}$ -nya dengan  $N_0$  yang sama yaitu sebesar  $16 \text{ g/dm}^3$  dengan masa kultivasi lebih singkat 220 jam (Kresna, 2005). Hasil tersebut diperkuat dengan penelitian pada skala menengah dengan jenis pencahayaan yang sama, yang menunjukkan bahwa pencahayaan alterasi memberi produksi biomassa sekitar 1,63 kali lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu (Syahri, 2008).

Kedua hasil tersebut menunjukkan bahwa pencahayaan kontinyu memiliki keterbatasan karena jumlah sel akan selalu meningkat dalam media kultur namun tidak diimbangi dengan peningkatan intensitas seperti yang dilakukan pada pencahayaan alterasi. Oleh karena itu, selain dari segi pencahayaan, optimasi untuk menghindari efek self-shading pada perlakuan pencahayaan kontinyu juga dilakukan dengan metode lain, di antaranya adalah dengan penggunaan reaktor seri. Kultivasi pada reaktor seri memiliki keunggulan yaitu optimasi pengontakkan cahaya dan  $\text{CO}_2$  dengan medium kultur sehingga menghasilkan produksi biomassa 1,6 kali lebih tinggi dibandingkan dengan kultivasi pada reaktor tunggal.

Pada penelitian kali ini, metode baru yang akan dilakukan adalah penggunaan proses filtrasi pada kultivasi *Chlorella*. Perlakuan filtrasi pada aliran sirkulasi kultur alga bertujuan memerangkap sebagian biomassa dalam kultur untuk mengurangi kepadatan sehingga intensitas cahaya yang selalu konstan tetap dapat mencukupi pada kultivasi. Dengan berkurangnya kepadatan, pengaruh self shading yang terjadi dalam kultur alga di dalam reaktor dapat diatasi. Penelitian ini diperlukan sebagai pembanding dengan proses tanpa filtrasi untuk mengetahui proses yang lebih efektif dalam meningkatkan pertumbuhan biomassa *Chlorella*, juga sebagai pembanding dengan perlakuan pencahayaan lain seperti alterasi dan siklus harian dalam fotobioreaktor skala industri menengah.

Penelitian kali ini merupakan *scale-up* dari penelitian-penelitian sebelumnya. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat dijadikan acuan dalam penelitian-penelitian selanjutnya, dalam mengoptimalkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam skala besar.

## 1.2 RUMUSAN MASALAH

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

Bagaimana meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* melalui perlakuan filtrasi aliran sirkulasi media kultur pada pencahayaan kontinyu dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah.

## 1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* dengan memberikan pengaruh proses filtrasi pada fotobioreaktor dibandingkan dengan proses nonfiltrasi pada kondisi pencahayaan kontinyu.
2. Menentukan konsumsi energi yang dibutuhkan dalam produksi biomassa *Chlorella sp.*

## 1.4 BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
2. Penelitian ini hanya akan dilakukan untuk mengetahui pengaruh filtrasi dengan pencahayaan kontinyu pada produksi biomassa *Chlorella sp.*
3. Produksi biomassa dalam penelitian ini baru terbatas pada peningkatan jumlah sel kering.
4. Mikroalga yang digunakan adalah *Chlorella vulgaris* Buitenzorg.

5. Medium yang digunakan untuk perkembangbiakan mikroalga ini adalah larutan *Beneck*.
6. Sistem reaktor yang digunakan adalah fotobioreaktor tunggal dengan volume 18 L.
7. Konsentrasi CO<sub>2</sub> yang digunakan sebesar 5%.
8. Kecepatan superfisial CO<sub>2</sub> yang digunakan adalah kecepatan superfisial optimum.

## 1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

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

### BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi penjelesan mengenai latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematikan penulisan makalah.

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan teori umum tentang mikroalga *Chlorella vulgaris*, proses fotosintesis, dan faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan produksi biomassa mikroalga *Chlorella vulgaris*.

### 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 penjelasan pengaruh filtrasi terhadap pertumbuhan berat kering *Chlorella sp.*, laju pertumbuhan, serta konsumsi energi yang digunakan untuk pertumbuhan.

### BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian ini dan saran untuk penelitian selanjutnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini, akan dibahas mengenai tinjauan pustaka yang menjadi referensi penelitian. Beberapa topik yang akan diuraikan antara lain mengenai mikroalga *Chlorella vulgaris*, fotosintesis pada mikroalga, faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan produksi biomassa *Chlorella sp*, serta fotobioreaktor yang digunakan.

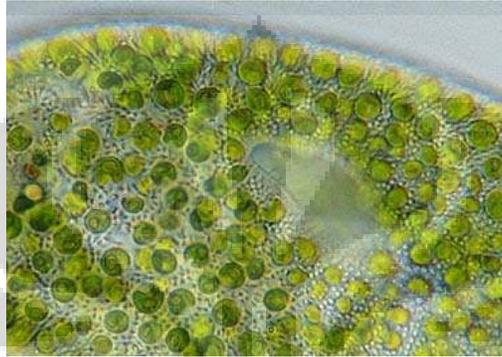
#### 2.1 MIKROALGA *Chlorella vulgaris*

*Chlorella vulgaris* merupakan mikroalga yang termasuk dalam golongan alga hijau (*Chlorophyta*) dengan bentuk tubuh bulat, bulat lonjong dengan garis tengah sel antara 2 – 8  $\mu\text{m}$ . Perkembangbiakannya dengan pembelahan sel dan dengan pembentukan spora. Meskipun demikian waktu generasinya sangat cepat. Organisme ini bersifat fotoautotrof atau dapat mensintesis makanan sendiri melalui reaksi fotosintesis dengan bantuan energi dari cahaya matahari (<http://www.chlorella-world.com/yaeyama.html>).

*Chlorella vulgaris* merupakan mikroorganisme yang cukup unik karena memiliki komponen biomassa penyerap cahaya dengan konsentrasi tinggi melebihi seluruh organisme fotoautotrof yang lain, termasuk tanaman tingkat tinggi (<http://www.chlorellafactor.com>). Mikroalga ini merupakan mikroalga primitif yang telah ada sejak 2,5 miliar tahun yang lalu. Namun populasinya masih dapat bertahan sampai sekarang karena beberapa sebab, yaitu :

1. Kestabilan sifat genetik dari pengaruh luar.
2. Memiliki daya dan mekanisme perbaikan DNA yang tinggi untuk beradaptasi dengan lingkungannya yang baru.
3. Bentuk dan sifat dinding sel yang sangat kuat sehingga tahan terhadap pengaruh luar.

*Chlorella vulgaris* hidup secara berkoloni dalam jumlah besar. Lingkungan tempat hidupnya secara umum akan didapatkan di mana-mana, terutama pada tempat lembab dan berair. Bahkan beberapa jenis bersimbiosis dengan jamur membentuk lumut kerak (*Lichenes*) atau hidup di antara jaringan *Hydra* (Sendjaja, 2006). Sistem koloni *Chlorella vulgaris* dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.1.



**Gambar 2. 1. Koloni *Chlorella vulgaris***

(Sumber : <http://chlorella.co.nz/>)

*Chlorella* merupakan ganggang hijau, kelompok tumbuhan satu sel, mengandung bukan akar sejati, batang tanaman, atau daun. Nama *Chlorella* berasal dari bahasa Latin *chloros* yang berarti ‘daun’ dan *ella* yang berarti ‘kecil’. Kandungan klorofil pada *Chlorella* sangat tinggi dan memberikan warna sangat hijau (emerald) pada *Chlorella*. Kandungan klorofil pada *Chlorella* mencapai 5 hingga 10 kali lebih banyak dibandingkan dengan alga lainnya. *Chlorella* mengandung vitamin dan mineral yang sangat tinggi, di antaranya vitamin B kompleks yang dapat memberikan energi tinggi, vitamin E dan C, serta sejumlah besar mineral seperti magnesium, potasium, besi, dan kalsium, serat untuk diet, asam nukleat, asam amino, enzim, CGF (*Chlorella Growth Factor*), dan substansi lain. Di bawah kondisi yang baik, yaitu adanya sinar matahari yang kuat, air bersih, dan udara segar, *Chlorella* berkembang biak dengan laju yang sangat cepat. Siklus reproduksi yang lengkap memakan waktu tak kurang dari 24 jam (*Chlorella\_ Watershed Chlorella 100% Pure*, <http://chlorella.co.nz/>, Januari 2007).

*Chlorella* memiliki sejumlah sifat yang sangat membantu bagi organ dan jaringan yang rusak karena berbagai alasan. Hal itu telah diteliti untuk kesehatan hati. *Chlorella* dikatakan sebagai “*great normalizer*” yang membantu fungsi tubuh kembali seimbang. Kandungan asam nukleat pada *Chlorella* mempercepat pertumbuhan pada

balita, serta memperbaiki jaringan yang rusak pada manusia dewasa. Bahkan, beberapa efek positif dari mengonsumsi *Chlorella* dapat langsung dirasakan, seperti mengobati kesulitan dalam buang air besar dan sulit bernafas ([http://www.healingdaily.com/health\\_benefit\\_of\\_chlorella.htm](http://www.healingdaily.com/health_benefit_of_chlorella.htm), Januari 2007).

Beberapa percobaan lain menunjukkan bahwa CGF pada *Chlorella* dapat meningkatkan resistansi terhadap tumor abdominal dengan cara meningkatkan jumlah sel imun pada rongga abdominal. *Chlorella* mendukung reproduksi sel, mengurangi kolesterol dan meningkatkan hemoglobin. Karena nutrisinya yang besar dan kemampuannya dalam proses detoksifikasi, *Chlorella* mendukung perbaikan dari organ tubuh dan jaringan yang terluka (Chlorella\_ Watershed Chlorella 100% Pure, <http://chlorella.co.nz/>, Januari 2007).

Sejumlah proyek penelitian di USA dan Eropa mengindikasikan bahwa *Chlorella* dapat membantu tubuh dalam penurunan dari persistensi hidrokarbon dan logam beracun seperti DDT, PCB, merkuri, kadmium, timbal, dengan cara memperkuat respon sistem kekebalan tubuh. Di Jepang, ketertarikan pada *Chlorella* difokuskan lebih luas terhadap sifat detoksifikasinya, yang merupakan kemampuan untuk menetralkan atau membuang substansi beracun dari tubuh. Material berserat pada *Chlorella* juga membantu proses pencernaan dan mendukung pertumbuhan dari bakteri aerob yang menguntungkan di dalam perut (Chlorella\_ Watershed Chlorella 100% Pure, <http://chlorella.co.nz/>, Januari 2007).

Beberapa program penelitian yang lain telah mengindikasikan bahwa penggunaan *Chlorella* secara rutin mampu membantu melawan penyakit jantung, mengurangi tekanan darah tinggi, dan menurunkan tingkat kolesterol. Tidak ada tumbuhan hijau lain di bumi yang lebih menguntungkan bagi tubuh dan jiwa manusia selain *Chlorella*. Sebagai makanan sempurna, *Chlorella* tidak memiliki saingan. *Chlorella* termasuk kelompok kecil yang dikenal sebagai *nutriceutical*, yang merupakan makanan bergizi sangat tinggi (Chlorella\_ Watershed Chlorella 100% Pure, <http://chlorella.co.nz/>, Januari 2007).

### 2.1.1 Taksonomi *Chlorella vulgaris*

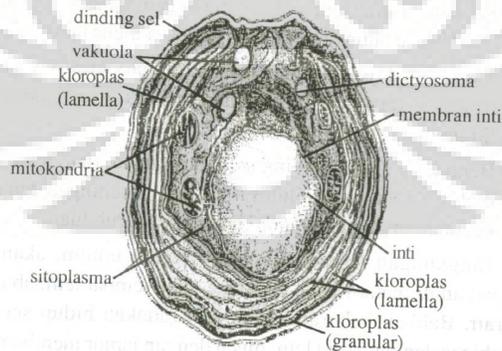
Berdasarkan taksonominya, *Chlorella vulgaris* memiliki klasifikasi sebagai berikut (<http://en.wikipedia.org/wiki/Chlorella>, 27 Mei 2007):

Tabel 2. 1. Taksonomi *Chlorella vulgaris*  
(Sumber : <http://id.wikipedia.org/wiki/chlorella>)

Chlorella
<b>Scientific classification</b>
Kingdom: <u>Plantae</u>
Division: <u>Chlorophyta</u>
Class: <u>Chlorophyceae</u>
Order: <u>chlorococcales</u>
Family: <u>Oocystaceae</u>
Genus: <i>Chlorella</i>
<b>Species</b>
<i>Chlorella vulgaris pyrenoidosa</i>
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>

### 2.1.2 Morfologi *Chlorella vulgaris*

*Chlorella vulgaris* adalah organisme bersel tunggal atau *uniselular*. Struktur sel dari *Chlorella vulgaris* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2. Struktur Sel *Chlorella*

(Sumber : <http://merops.sanger.ac.uk/cgi-bin/speccards?sp=sp001794&type=P>)

Secara umum bagian-bagian sel *Chlorella vulgaris* dapat dijelaskan sebagai berikut :

#### 2.1.2.1 Inti Sel

Inti sel (*nukleus*) merupakan suatu struktur dengan ukuran yang besar dan dikelilingi oleh sitoplasma (<http://www.chem.mtu.edu/~drshonna/cm4710/lectures/chapter2.pdf>).

Inti sel ini dilindungi oleh sebuah membran. Bagian ini memiliki peran yang sangat penting karena bertugas mengatur seluruh aktivitas sel seperti berfotosintesis dan berkembang biak (Wirosaputro, 2002).

Di dalam inti sel terdapat sebuah inti lagi yang berukuran lebih kecil yang disebut dengan *nukleolus*. Nukleolus merupakan anak inti sel yang sangat kecil dan terbentuk dari kumpulan RNA (*Ribo Nucleic Acid*) sehingga nukleolus berperan dalam sintesis protein di dalam sel (Wirosaputro, 2002).

Selain itu, inti sel juga memiliki jaringan-jaringan halus yang berada di dalam cairan inti yang mengandung gen. Jaringan ini disebut dengan benang kromatin dan berfungsi sebagai pembawa informasi genetik dari sel induk kepada sel anak pada saat berkembang biak (Wirosaputro, 2002).

#### 2.1.2.2 Kloroplast

Kloroplast merupakan jaringan berbentuk cangkir atau lonceng. Kloroplast terdiri atas lamella fotosintetik dan diselubungi oleh suatu membran ganda. Bagian ini memegang peranan 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>).

#### 2.1.2.3 Mitokondria

Mitokondria merupakan organel sel yang sangat kompleks dan terdiri atas struktur-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.

Mitochondria 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>).

#### 2.1.2.4 Dinding Sel

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

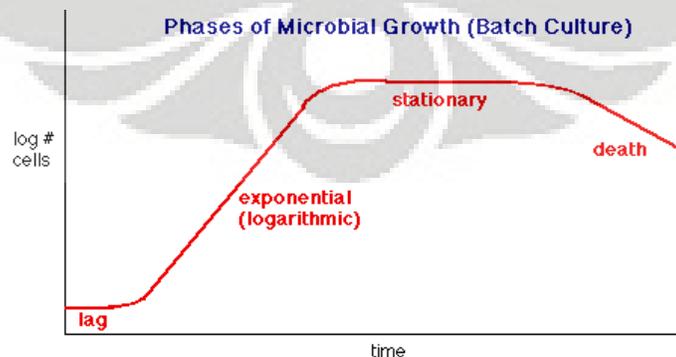
#### 2.1.2.5 Vakuola

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>).

### 2.1.3 Fase Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* (Sujarwo, 2006)

Pola pertumbuhan berdasarkan jumlah sel dapat dikelompokkan menjadi lima fase, yaitu *lag phase*, *log phase*, fase penurunan laju pertumbuhan, fase stasioner, dan fase kematian.

Kelima fase tersebut dapat ditunjukkan dengan kurva jumlah sel vs waktu seperti pada Gambar 23.



Gambar 2. 3. Kurva Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* (Sumber : Sendjaja, 2006)

### 1. Fase Tunda (*lag phase*)

*Lag phase* adalah suatu tahap setelah pemberian inokulum ke dalam media kultur dimana terjadi penundaan pertumbuhan yang dikarenakan *Chlorella vulgaris* memerlukan pembelahan. Dalam fase ini tidak terjadi penambahan jumlah sel. Fase ini adalah fase penyesuaian yaitu suatu masa ketika sel-sel kekurangan metabolit dan enzim akibat dari keadaan tidak menguntungkan dalam pembiakan terdahulu, menyesuaikan diri dengan lingkungan yang baru. Enzim-enzim dan zat antara terbentuk dan terkumpul sampai konsentrasi yang cukup untuk kelanjutan pertumbuhan.

### 2. Fase Pertumbuhan Logaritmik (*log phase*)

Pada fase ini, sel-sel membelah dengan cepat dan terjadi penambahan dalam jumlah sel. Selama fase ini, sel-sel berada dalam keadaan yang stabil. Bahan sel baru terbentuk dengan konstan tetapi bahan-bahan baru itu bersifat katalitik dan massa bertambah secara eksponensial. Hal ini bergantung hingga satu dari dua hal terjadi, yaitu kalau tidak atau lebih zat makanan dalam pembenihan habis maka tentu hasil metabolisme beracun akan tertimbun dan menghambat pertumbuhan. Kultur dalam fase pertumbuhan eksponensial tidak hanya berada dalam keseimbangan pertumbuhan tetapi jumlah dari sel-sel dalam kultur ini bertambah dengan kecepatan yang konstan. Dalam penggunaan mikroorganisme pada dunia perindustrian, dibutuhkan bibit atau starter untuk proses fermentasi suatu bahan makanan, biasanya digunakan mikroorganisme yang sedang berada dalam fase eksponensial. Hal ini dikarenakan mikroorganisme tersebut tidak akan mengalami fase pertumbuhan sebelum fase eksponensial dalam media yang baru.

### 3. Fase Penurunan Laju Pertumbuhan

Pada fase ini, tetap terjadi penambahan jumlah sel namun laju pertumbuhannya menurun. Hal ini dikarenakan terjadinya kompetisi yang sangat tinggi di dalam media hidup karena zat makanan yang tersedia tidak sebanding dengan jumlah populasi akibat dari penambahan yang sangat cepat pada fase eksponensial sehingga hanya sebagian dari populasi yang mendapatkan makanan yang cukup dan dapat tumbuh serta membelah.

#### 4. Fase Stasioner

Pada fase ini, jumlah sel kurang lebih tetap. Hal ini disebabkan oleh habisnya zat makanan atau menumpuknya hasil metabolisme yang beracun sehingga mengakibatkan pertumbuhan berhenti. Akan tetapi, dalam kebanyakan kasus, pergantian sel terjadi dalam fase stasioner, yaitu adanya kehilangan sel yang lambat karena kematian yang diimbangi oleh pembentukan sel-sel yang baru melalui pertumbuhan dan pembelahan. Bila hal ini terjadi, jumlah seluruh sel akan bertambah secara lambat meskipun jumlah sel yang hidup akan konstan.

#### 5. Fase kematian

Dalam fase ini, jumlah populasi menurun. Selama fase ini, jumlah sel yang mati per satuan waktu secara perlahan-lahan bertambah dan akhirnya kecepatan mati dari sel-sel menjadi konstan.

#### 2.1.4 Biomassa *Chlorella vulgaris*

*Chlorella vulgaris* adalah organisme yang telah memiliki peran penting bagi bumi sejak dahulu. Organisme ini merupakan organisme yang paling efektif dalam melakukan fotosintesis dan biomassa yang dihasilkan telah melebihi jumlah seluruh biomassa yang dihasilkan oleh tanaman tingkat tinggi (<http://www.chlorellafactor.com>). Biomassa ini memiliki dua peranan, yaitu sebagai pengikat CO<sub>2</sub> sehingga dapat mengurangi konsentrasi CO<sub>2</sub> pada lapisan atmosfer dan sebagai sumber makanan sehat. Sejak dahulu suku Aztek dan Maya telah membudidayakan *Chlorella* dan mengkonsumsinya sebagai sumber protein (<http://www.chlorella-world.com/yaeyama.html>).

*Chlorella vulgaris* memiliki komposisi biomassa yang sangat bermanfaat. 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 (Sendjaja, 2006). Secara umum kandungan biomassa dari *Chlorella vulgaris* dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2. 2. Komposisi Biomassa *Chlorella vulgaris***

(Sumber : [http://www.gtamart.com/mart/products/chlorella\\_vulgaris/](http://www.gtamart.com/mart/products/chlorella_vulgaris/))

Komponen		
Protein	g/100g	33-45
Lemak	g/100g	6.9-16.1
Air	g/100g	04-Mei
Klorofil	g/100g	0.7-2.7
Sumber Mineral	g/100g	6.5-10.5
Lipid	g/100g	6.5-12.5
Rohfaser	g/100g	6.6-7.5
Ballaststoffe	g/100g	27.1-32.5
Karbohidrat	g/100g	0.9-2
Mineral		
Kalsium	mg/100g	321-604
Magnesium	mg/100g	273-325
Seng	mg/100g	04-Jun
Besi	mg/100g	40-70
Kalium	mg/100g	1000-2900
Iodium	mg/100g	< 0.0005
Selenium	µg/100g	02-Okt
Vitamins:		
Betakaroten	mg/100g	3.3-11.2
Vitamin B1	mg/100g	0.5-1.0
Vitamin B2	mg/100g	3.2-3.8
Vitamin B6	mg/100g	0.3-3.7
Vitamin B12	mg/100g	0.2-1.0
Vitamin E	mg/100g	3.6-10.0
Vitamin C	mg/100g	13-20
Vitamin K1	mg/100g	0.2-0.8

Beberapa komponen biomassa dari *Chlorella* berfungsi untuk mengabsorb sebagian dari spektrum sinar tampak dari matahari untuk diubah menjadi energi yang akan menggerakkan reaksi fotosintesis. Biomassa ini berupa pigmen yang akan memberikan warna pada organisme tersebut. Beberapa jenis biomassa yang dapat menyerap energi cahaya pada alga ditunjukkan oleh Tabel 2.3.

**Tabel 2. 3. Pigmen Biomassa Penyerap Cahaya pada Alga (Sumber : [http://www.gtamart.com/mart/products/chlorella\\_vulgaris/](http://www.gtamart.com/mart/products/chlorella_vulgaris/))**

Cyanophyta (Alga hijau-biru)		
Grup pigmen	Pigmen yang penting	Pigmen lain yang terdapat dalam jumlah kecil
Chlorophyll	Klorofil a	
Phycobilins	<i>Phycocyanin</i> <i>Allophycocyanin</i> <i>Phycocerythrin</i> <i>Phycobilisomes</i>	
Karoten	karoten	
Xanthophyll	Zeaxanthin Echinenone Canthaxanthin Myxoxanthrophyll Oscillaxanthin	□-cryptoxanthin Isocryptoxanthin Mutachrome
Chlorophyta (Alga hijau)		
Grup pigmen	Pigmen yang penting	Pigmen lain yang terdapat dalam jumlah kecil
Chlorophyll	Klorofil a Klorofil b	Klorofil c <sub>1</sub> Klorofil c <sub>2</sub> Klorofil c <sub>3</sub>
Karoten	karoten	Karoten γ-karoten
Xanthophyll	Lutein Violaxanthin Neoxanthin	Zeaxanthin Echinenone Cryptoxanthin Antheraxanthin Siphonein Siphonoxanthin

Dari Tabel 2.3. dapat dilihat bahwa pigmen fotosintesis yang paling banyak dijumpai pada alga adalah klorofil dan betakaroten. Kedua pigmen ini memiliki peran yang penting dalam proses fotosintesis sebagai penyerap energi yang berasal dari cahaya tampak yang kemudian digunakan dalam reaksi fotosintesis (Sendjaja, 2006).

## 2.2 FOTOSINTESIS (<http://www.lablink.or.id>)

Fotosintesis adalah suatu proses biokimia yang dilakukan tumbuhan, alga, dan beberapa jenis bakteri untuk menghasilkan makanan dengan memanfaatkan energi cahaya. Hampir semua makhluk hidup bergantung dari energi yang dihasilkan dalam fotosintesis. Akibatnya fotosintesis menjadi sangat penting bagi kehidupan di bumi. Fotosintesis juga berjasa menghasilkan sebagian besar oksigen yang terdapat di atmosfer bumi. Organisme yang menghasilkan energi melalui fotosintesis disebut sebagai fototrof.

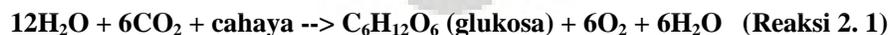
Arti fotosintesis sendiri adalah proses penyusunan atau pembentukan dengan menggunakan energi cahaya atau foton. Sumber energi cahaya alami adalah matahari yang memiliki spektrum cahaya infra merah (tidak kelihatan), merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, ungu dan ultra ungu (tidak kelihatan).

Pada proses fotosintesis, cahaya yang digunakan adalah spektrum cahaya tampak, dari ungu sampai merah. Infra merah dan ultra ungu tidak digunakan dalam fotosintesis.

Dalam fotosintesis, dihasilkan karbohidrat dan oksigen. Oksigen merupakan hasil sampingan dari fotosintesis dimana volumenya dapat diukur. Oleh sebab itu, untuk mengetahui tingkat produksi fotosintesis adalah dengan mengatur volume oksigen yang dikeluarkan dari tumbuhan.

### 2.2.1 Fotosintesis pada Tumbuhan

Tumbuhan bersifat autotrof. Autotrof artinya dapat mensintesis makanan langsung dari senyawa anorganik. Tumbuhan menggunakan karbondioksida dan air untuk menghasilkan gula dan oksigen yang diperlukan sebagai makanannya. Energi untuk menjalankan proses ini berasal dari fotosintesis. Perhatikan persamaan reaksi yang menghasilkan glukosa berikut ini:



Glukosa dapat digunakan untuk membentuk senyawa organik lain seperti selulosa dan dapat pula digunakan sebagai bahan bakar. Proses ini berlangsung melalui respirasi seluler yang terjadi baik pada hewan maupun tumbuhan. Secara umum reaksi yang terjadi pada respirasi seluler berkebalikan dengan persamaan di

atas. Pada respirasi, gula (glukosa) dan senyawa lain akan bereaksi dengan oksigen untuk menghasilkan karbon dioksida, air, dan energi kimia.

Tumbuhan menangkap cahaya menggunakan pigmen yang disebut klorofil. Pigmen inilah yang memberi warna hijau pada tumbuhan. Klorofil mengandung organel yang disebut kloroplas. Kloroplas inilah yang menyerap cahaya yang akan digunakan dalam fotosintesis. Dilihat dari strukturnya, kloroplas terdiri atas membran ganda yang melingkupi ruangan yang berisi cairan yang disebut **stroma**. Membran tersebut membentuk suatu sistem membran tilakoid yang berwujud sebagai suatu bangunan yang disebut kantung tilakoid. Kantung-kantung tilakoid tersebut dapat berlapis-lapis dan membentuk apa yang disebut **grana**. Klorofil terdapat pada membran tilakoid dan perubahan energi cahaya menjadi energi kimia berlangsung dalam tilakoid, sedang pembentukan glukosa sebagai produk akhir fotosintesis berlangsung di **stroma**.

Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap pembentukan klorofil antara lain :

1. **Gen**

Bila gen untuk klorofil tidak ada maka tanaman tidak akan memiliki klorofil.

2. **Cahaya :**

Beberapa tanaman dalam pembentukan klorofil memerlukan cahaya, tanaman lain tidak memerlukan cahaya.

3. **Unsur N, Mg, Fe :**

Merupakan unsur-unsur pembentuk dan katalis dalam sintesis klorofil.

4. **Air :**

Bila kekurangan air akan terjadi desintegrasi klorofil.

Meskipun seluruh bagian tubuh tumbuhan yang berwarna hijau mengandung kloroplas, namun sebagian besar energi dihasilkan di daun. Di dalam daun terdapat lapisan sel yang disebut mesofil yang mengandung setengah juta kloroplas setiap milimeter persegi. Cahaya akan melewati lapisan epidermis tanpa warna dan yang transparan, menuju mesofil, tempat terjadinya sebagian besar proses fotosintesis. Permukaan daun biasanya dilapisi oleh kutikula dari lilin yang bersifat anti air untuk mencegah terjadinya penyerapan sinar matahari ataupun penguapan air yang berlebih

### **2.2.2 Fotosintesis pada Alga dan Bakteri**

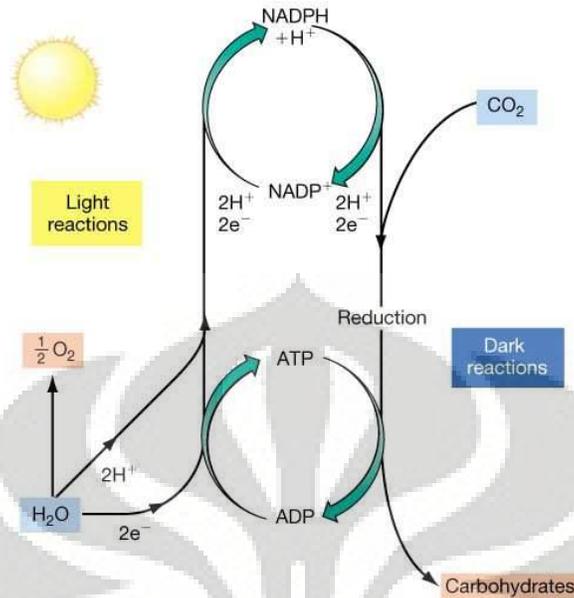
Alga terdiri dari alga multiseluler seperti ganggang hingga alga mikroskopik yang hanya terdiri dari satu sel. Meskipun alga tidak memiliki struktur sekomples tumbuhan darat, fotosintesis pada keduanya terjadi dengan cara yang sama. Hanya saja karena alga memiliki berbagai jenis pigmen dalam kloroplasnya, maka panjang gelombang cahaya yang diserapnya pun lebih bervariasi. Semua alga menghasilkan oksigen dan kebanyakan bersifat autotrof. Hanya sebagian kecil saja yang bersifat heterotrof yang berarti bergantung pada materi yang dihasilkan oleh organisme lain.

### **2.2.3 Fotosintesis pada Tingkat Molekuler**

Pigmen klorofil menyerap lebih banyak cahaya terlihat pada warna biru (400-450 nanometer) dan merah (650-700 nanometer) dibandingkan hijau (500-600 nanometer). Cahaya hijau ini akan dipantulkan dan ditangkap oleh mata kita sehingga menimbulkan sensasi bahwa daun berwarna hijau. Fotosintesis akan menghasilkan lebih banyak energi pada gelombang cahaya dengan panjang tertentu. Hal ini karena panjang gelombang yang pendek menyimpan lebih banyak energi.

Di dalam daun, cahaya akan diserap oleh molekul klorofil untuk dikumpulkan pada pusat-pusat reaksi. Pada tumbuhan ada dua jenis pigmen yang berfungsi aktif sebagai pusat reaksi atau fotosistem yaitu fotosistem II dan fotosistem I. Fotosistem II terdiri dari molekul klorofil yang menyerap cahaya dengan panjang gelombang 680 nanometer, sedangkan fotosistem I 700 nanometer. Kedua fotosistem ini akan bekerja secara simultan dalam fotosintesis, seperti dua baterai dalam senter yang bekerja saling memperkuat.

Dalam fotosintesis terdapat dua tahap, yaitu reaksi terang dan reaksi gelap (siklus Calvin). Reaksi terang terjadi pada grana (granum), sedangkan reaksi Calvin terjadi di dalam stroma.



**Gambar 2. 4. Reaksi pada Fotosintesis (Sumber : <http://www.lablink.or.id>)**

Dalam reaksi terang, terjadi konversi energi cahaya menjadi energi kimia dan menghasilkan oksigen ( $O_2$ ). Sedangkan dalam siklus Calvin terjadi seri reaksi siklik yang membentuk gula dari bahan dasar  $CO_2$  dan energi (ATP dan NADPH). Energi yang digunakan dalam siklus Calvin diperoleh dari reaksi terang.

Dari semua radiasi matahari yang dipancarkan, hanya panjang gelombang tertentu yang dimanfaatkan tumbuhan untuk proses fotosintesis, yaitu panjang gelombang yang berada pada kisaran cahaya tampak (380-700 nm). Cahaya tampak terbagi atas cahaya merah (610 - 700 nm), hijau kuning (510 - 600 nm), biru (410 - 500 nm) dan violet (< 400 nm). Masing-masing jenis cahaya berbeda pengaruhnya terhadap fotosintesis. Hal ini terkait pada sifat pigmen penangkap cahaya yang bekerja dalam fotosintesis. Pigmen yang terdapat pada membran grana menyerap cahaya yang memiliki panjang gelombang tertentu. Pigmen yang berbeda menyerap cahaya pada panjang gelombang yang berbeda. Kloroplast mengandung beberapa pigmen. Sebagai contoh, klorofil a terutama menyerap cahaya biru-violet dan merah. Klorofil b menyerap cahaya biru dan oranye dan memantulkan cahaya kuning-hijau. Klorofil a berperan langsung dalam reaksi terang, sedangkan klorofil b tidak secara langsung berperan dalam reaksi terang.

Fotosintesis dimulai ketika cahaya mengionisasi molekul klorofil pada fotosistem II, membuatnya melepaskan elektron yang akan ditransfer sepanjang rantai transpor elektron. Energi dari elektron ini digunakan untuk fotofosforilasi yang menghasilkan ATP, satuan pertukaran energi dalam sel. Reaksi ini menyebabkan fotosistem II mengalami defisit atau kekurangan elektron yang harus segera diganti. Pada tumbuhan dan alga, kekurangan elektron ini dipenuhi oleh elektron dari hasil ionisasi air yang terjadi bersamaan dengan ionisasi klorofil. Hasil ionisasi air ini adalah elektron dan oksigen.

Oksigen dari proses fotosintesis hanya dihasilkan dari air, bukan dari karbon dioksida. Pendapat ini pertama kali diungkapkan oleh C.B. van Neil yang mempelajari bakteri fotosintetik pada tahun 1930-an. Bakteri fotosintetik, selain sianobakteri, menggunakan tidak menghasilkan oksigen karena menggunakan ionisasi sulfida atau hidrogen.

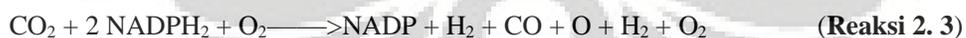
Pada saat yang sama dengan ionisasi fotosistem II, cahaya juga mengionisasi fotosistem I, melepaskan elektron yang ditransfer sepanjang rantai transpor elektron yang akhirnya mereduksi NADP menjadi NADPH.

ATP dan NADPH yang dihasilkan dalam proses fotosintesis memicu berbagai proses biokimia. Pada tumbuhan, proses biokimia yang terpicu adalah siklus Calvin dimana karbon dioksida diubah menjadi ribulosa (dan kemudian menjadi gula seperti glukosa). Reaksi ini disebut reaksi gelap karena tidak bergantung pada ada tidaknya cahaya sehingga dapat terjadi meskipun dalam keadaan gelap (tanpa cahaya).

**Ringkasnya :**



Reaksi gelap :



atau

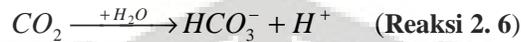


atau

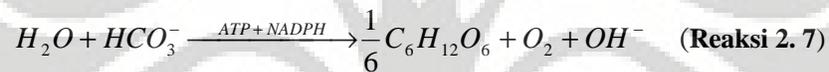


#### 2.2.4 Hasil Proses Fotosintesis

Pada mikroalga hijau *Chlorella sp.* yang termasuk organisme renik air, fotosintesis dilakukan di dalam air atau media hidupnya. CO<sub>2</sub> yang dibutuhkan sebagai sumber karbonnya didapatkan dalam bentuk senyawa bikarbonat yang terbentuk dari reaksi air dengan CO<sub>2</sub> terlarut dalam media hidupnya (pada ekstra selular) sebagai berikut (Wijanarko dan Ohtaguchi, 2004) :



Senyawa bikarbonat ini yang kemudian diserap oleh sel *Chlorella sp.* 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 OH<sup>-</sup> menggunakan energy ATP dan NADPH dari konversi cahaya pada reaksi terang, sebagaimana tergambar dalam persamaan reaksi berikut (Wijanarko dan Ohtaguchi, 2004) :



Hasil fotosintesis mikroalga hijau *Chlorella sp.* adalah ion OH<sup>-</sup>, oksigen molekular, dan senyawa organik (karbon) yang akan digunakan sebagai cadangan makanan (*carbon source*) apabila tidak mendapatkan cahaya dan CO<sub>2</sub> untuk pertumbuhan dan pembelahan selnya.

Seperti yang telah kita ketahui bahwa fotosintesis adalah bagian dari metabolisme, maka apabila metabolisme ini terganggu akan mengakibatkan terhambatnya pertumbuhan mikroalga hijau *Chlorella sp.*

#### 2.2.5 Faktor Penentu Laju Fotosintesis

Berikut adalah beberapa faktor utama yang menentukan laju fotosintesis :

1. *Intensitas cahaya*

Laju fotosintesis maksimum ketika banyak cahaya.

2. *Konsentrasi karbon dioksida*

Semakin banyak karbon dioksida di udara, makin banyak jumlah bahan yang dapat digunakan tumbuhan untuk melangsungkan fotosintesis.

3. *Suhu*

Enzim-enzim yang bekerja dalam proses fotosintesis hanya dapat bekerja pada

suhu optimalnya. Umumnya laju fotosintesis meningkat seiring dengan meningkatnya suhu hingga batas toleransi enzim.

#### 4. *Kadar air*

Kekurangan air atau kekeringan menyebabkan stomata menutup, menghambat penyerapan karbon dioksida sehingga mengurangi laju fotosintesis.

#### 5. *Kadar fotosintat (hasil fotosintesis)*

Jika kadar fotosintat seperti karbohidrat berkurang, laju fotosintesis akan naik. Bila kadar fotosintat bertambah atau bahkan sampai jenuh, laju fotosintesis akan berkurang.

#### 6. *Tahap pertumbuhan*

Penelitian menunjukkan bahwa laju fotosintesis jauh lebih tinggi pada tumbuhan yang sedang berkecambah ketimbang tumbuhan dewasa. Hal ini mungkin dikarenakan tumbuhan berkecambah memerlukan lebih banyak energi dan makanan untuk tumbuh.

### **2.3 FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PERTUMBUHAN MIKROALGA HIJAU *Chlorella* PADA MEDIUM TERBATAS**

Organisme autotrofik seperti *Chlorella* membutuhkan cahaya, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, nutrisi, dan trace element untuk pertumbuhannya ([www.nhm.ac.uk](http://www.nhm.ac.uk)). Berikut akan diuraikan beberapa faktor lain yang berhubungan dengan hal-hal tersebut yang sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan mikroalga hijau *Chlorella* pada medium terbatas (Wirosaputro, 2002).

#### **2.3.1 Jenis Medium**

Agar *Chlorella vulgaris* dapat hidup, maka medium pembiakannya harus memiliki berbagai nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangannya. Apabila asupan nutrisi dari medium tidak cukup, maka laju pertumbuhannya akan terhambat. Untuk itu maka komposisi dari medium yang diberikan harus tepat.

Namun sebenarnya medium yang diperlukan untuk perkembangan *Chlorella vulgaris* relatif lebih sederhana dan memerlukan jenis nutrisi yang lebih sedikit dibandingkan dengan medium untuk jenis alga lainnya. Sebagian besar jenis

mediumnya juga tidak memerlukan *trace* mineral seperti yang diperlukan oleh organisme lain.

Ada beberapa medium yang lazim digunakan untuk membiakkan *Chlorella vulgaris*, yaitu *Benneck*, *Detmer*, Pupuk Komersial, dan *Walne*. Komposisi nutrisi dari masing-masing medium tersebut dapat dilihat pada tabel 2.4.

**Tabel 2. 4. Perbandingan Komposisi Nutrisi Medium Pembiakan *Chlorella vulgaris*.  
(Sumber : Wirosaputro, 2002)**

<i>Nutrisi</i>	<i>Benneck</i>	<i>Detmer</i>	<i>Pupuk Komersial</i>	<i>Walne</i>
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	40mg/L	-
Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	1000 mg/L	-	-
CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	800mg/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>	-	-	-	0,36mg/L

### 2.3.2 Pencahayaan

Cahaya merupakan faktor utama yang mempunyai peranan penting untuk pertumbuhan mikroalga sebagai sumber energi untuk pertumbuhan mikroalga dan fotosintesis. Intensitas yang baik bagi mikroalga untuk melakukan fotosintesis berkisar antara 2-3 kilolux. Cahaya matahari yang diperlukan oleh mikroalga dapat diganti dengan lampu TL. Penggunaan cahaya yang berasal dari lampu TL karena didasari oleh kebutuhan intensitas cahaya pada penelitian ini dimana jika cahaya pada lampu TL dapat diatur sesuai intensitas yang dibutuhkan. Selain itu, lampu TL mempunyai kestabilan intensitas cahaya jika dibandingkan dengan cahaya yang bersumber dari cahaya matahari.

Faktor pencahayaan terbagi menjadi tiga bagian, yaitu pencahayaan kontinyu, pencahayaan alterasi, dan pencahayaan gelap-terang (fotoperiodesitas). Sebenarnya faktor pencahayaan ini juga dapat dibagi lagi menjadi pencahayaan dengan panjang gelombang tertentu dan pencahayaan dengan intensitas tertentu. Namun, kali ini hanya akan dibahas mengenai pencahayaan dengan intensitas tertentu.

### **1. Pencahayaan Kontinyu**

Istilah pencahayaan kontinyu dalam penelitian ini adalah *Chlorella vulgaris* yang diiluminasi dengan cahaya tampak (370-900 nm) secara terus-menerus hingga mencapai fase stasionernya. Menurut penelitian yang telah dilakukan, perlakuan ini memberikan hasil laju pertumbuhan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pencahayaan gelap-terang (fotoperiodesitas).

### **2. Pencahayaan Terang Gelap**

Istilah pencahayaan terang gelap dalam penelitian ini adalah *Chlorella vulgaris* yang diiluminasi dengan cahaya tampak (370-900 nm) dengan mengatur kondisi terang selama 8 jam dan kondisi gelap selama 16 jam, seperti kondisi alami (periode cahaya matahari). Dari penelitian yang telah dilakukan, perlakuan ini memberikan efisiensi cahaya yang paling besar dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu, namun laju pertumbuhannya masih sedikit di bawah pencahayaan kontinyu.

### **3. Pencahayaan Alterasi**

Alterasi adalah perubahan perlakuan cahaya kontinyu dengan memberikan intensitas cahaya yang semakin tinggi seiring dengan penambahan jumlah sel dari dalam penelitian ini. Dari penelitian-penelitian sebelumnya, diketahui bahwa semakin banyak jumlah sel/biomassa dalam penelitian ini maka kultur akan semakin pekat sehingga cahaya yang diberikan tidak lagi dapat diterima secara merata oleh semua sel. Karena itu, perlu dilakukan peningkatan intensitas cahaya agar cahaya dapat masuk dan diterima secara merata oleh semua sel. Usaha ini telah dibuktikan dapat meningkatkan laju pertumbuhan menjadi lebih optimal dan menghasilkan biomassa dengan jumlah yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu (Wijanarko, 2003).

### 2.3.3 Temperatur

Semakin tinggi suhu maka laju reaksi akan semakin besar. Berdasarkan prinsip tersebut sel akan tumbuh lebih cepat pada temperatur yang lebih tinggi. Namun temperatur yang terlalu tinggi akan menyebabkan denaturasi protein dan asam nukleat, kehilangan enzim yang penting dan metabolisme sel. Temperatur optimum bagi perkembangan *Chlorella vulgaris* adalah 23°C – 30°C (<http://www.sp.uconn.edu/~terry/229sp03/lectures/growth.html>).

### 2.3.4 Oksigen (O<sub>2</sub>) dan Karbondioksida (CO<sub>2</sub>)

O<sub>2</sub> diperlukan oleh mikroorganisme untuk proses respirasi, sedangkan CO<sub>2</sub> diperlukan untuk proses fotosintesis. Walaupun dari reaksi fotosintesis dapat dihasilkan O<sub>2</sub> namun apabila tidak terdapat cahaya sebagai sumber energi maka mikroorganisme tidak akan dapat berfotosintesis sehingga diperlukan juga udara dari luar. Demikian juga tanpa adanya CO<sub>2</sub> mikroorganisme tidak akan dapat berfotosintesis. Oleh karena itu jumlah CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> pada medium harus seimbang agar didapat laju pertumbuhan yang optimum.

### 2.3.5 Derajat Keasaman (pH)

pH memiliki peran dalam mengatur kerja dari enzim. Perubahan pH sangat berpengaruh terhadap kinerja enzim dalam metabolisme sel sehingga akan mempengaruhi laju pertumbuhan sel. pH yang optimum bagi perkembangan *Chlorella vulgaris* adalah 7,0 – 8,0.

### 2.3.6 Radiasi Cahaya

Radiasi cahaya diperlukan untuk melakukan reaksi fotosintesis dan dapat berkembang biak. Namun radiasi cahaya juga dapat membunuh mikroorganisme, terutama radiasi sinar ultraviolet dan radiasi cahaya tampak berwarna ungu dan biru karena memiliki energi yang besar.

## 2.4 PERHITUNGAN DASAR DALAM KINETIKA PERTUMBUHAN MIKROALGA (Wijanarko, 2006)

Perhitungan yang dilakukan dalam kegiatan eksperimental ini menggunakan perhitungan dasar sebagai berikut :

### 2.4.1 Perhitungan Laju Pertumbuhan Spesifik ( $\mu, \mu_{\max}$ )

Laju pertumbuhan spesifik ( $\mu$ ) adalah laju pertumbuhan sel pada selang pertumbuhan sedangkan  $\mu_{\max}$  adalah laju pertumbuhan sel pada awal fase logaritmik selang pertumbuhan dan nilainya berbanding terbalik dengan waktu yang diperlukan untuk sekali pembelahan sel.

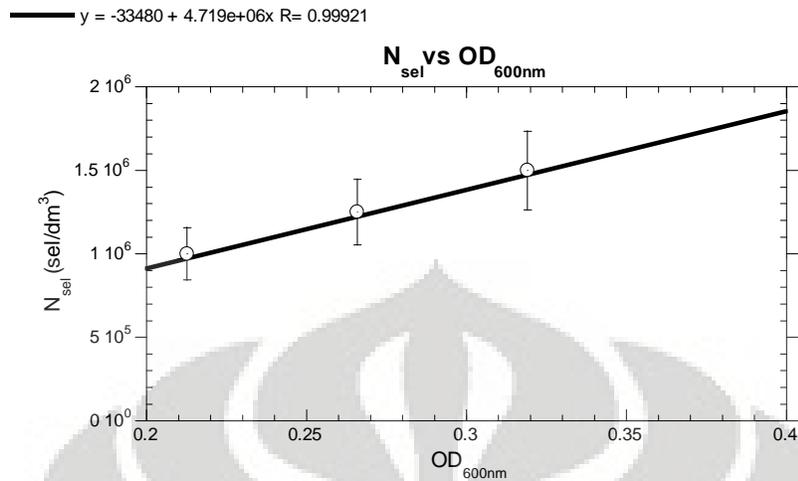
$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} \quad \text{atau} \quad \mu = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (2.1)$$

dimana:

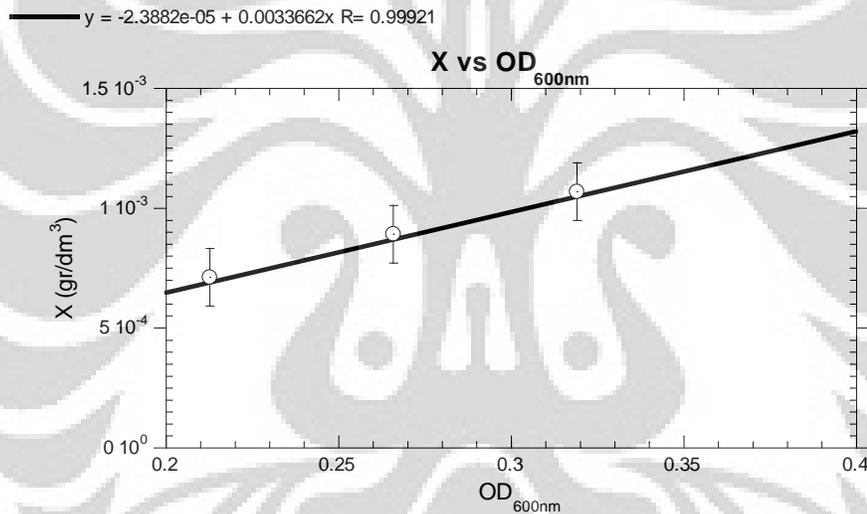
- $\mu$  = laju pertumbuhan spesifik ( $\text{h}^{-1}$ )
- $N$  = jumlah sel ( $\text{sel}/\text{cm}^3$ )
- $X$  = berat kering sel/biomassa ( $\text{g}/\text{dm}^3$ )
- $t$  = waktu (h)

### 2.4.2 Perhitungan X dan $N_{\text{sel}}$

Jumlah biomassa yang dihasilkan dari medium kultur mikroalga dapat dihitung secara langsung dengan mengkorelasikan hasil pengukuran *optical density* pada 600 nm ( $\text{OD}_{600}$ ) dari medium kultur mikroalga dengan menggunakan kurva kalibrasi  $\text{OD}_{600}$  versus berat kering dan  $\text{OD}_{600}$  versus  $N_{\text{sel}}$  yang telah dibuat di awal penelitian. Kurva kalibrasi yang digunakan pada penelitian ini adalah kurva yang sudah dibuat oleh Sang Made Kresna dalam skripsinya pada tahun 2005.



**Gambar 2. 5. Kurva Kalibrasi N<sub>sel</sub> vs OD<sub>600</sub> (Sumber : Kresna, 2005)**



**Gambar 2. 6. Kurva Kalibrasi X vs OD<sub>600</sub> (Sumber : Kresna, 2005)**

### 2.4.3 Perhitungan [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] di dalam Medium Kultur Mikroalga

Dengan menggunakan persamaan Henderson-Hasellbach, dapat dicari besar konsentrasi [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] dalam reactor, yaitu :

$$K_{CO_2} = \frac{[HCO_3^-] \cdot [H^+]}{[CO_2]} \quad (2.2)$$

$$[HCO_3^-] = K_{CO_2} [CO_2] [H^+] \quad (2.3)$$

$$[HCO_3^-] = K_{CO_2} [CO_2] 10^{-pH} \quad (2.4)$$

Sedangkan untuk mencari nilai  $K_a$  dan  $[CO_2]$  digunakan pendekatan hukum Henry.

$$P_{CO_2} = H_{CO_2} \cdot [CO_2] \quad (2.5)$$

$$P_{CO_2} = y_{CO_2} \cdot P_T \quad (2.6)$$

$$\ln \left( \frac{H_{CO_2}}{H'_{CO_2}} \right) = A_H \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_H \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_H \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \quad (2.7)$$

$$\ln \left( \frac{H_{CO_2}}{H'_K_{CO_2}} \right) = A_K \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_K \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_K \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \quad (2.8)$$

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

$$[HCO_3^-] = \left( \frac{K_{CO_2}}{H_{CO_2}} \right) \left( \frac{y_{CO_2} \cdot P_T}{10^{-pH}} \right) \left( \frac{\exp \left[ A_k \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_k \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_k \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]}{\exp \left[ A_h \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_h \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_h \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]} \right) \quad (2.9)$$

dengan :

$P_T$  = temperatur operasi. (atm)

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

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

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

$T$  = temperatur operasi (K)

$T_0$  = temperatur standar (K)

Konstanta-konstanta aktivitas gas  $CO_2$  :

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

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

#### 2.4.4 Perhitungan Energi Cahaya yang Dimanfaatkan untuk Duplikasi maupun untuk Pendewasaan Sel

Untuk menentukan besarnya nilai total energi cahaya yang tersedia melalui plat iluminasi selama pertumbuhan dapat dihitung dengan cara :

$$E_o = A \int_0^t (I_i - I) dt \quad (2.10)$$

Total energi yang diserap selama masa pertumbuhan

$$E_i = A \int_0^t I dt \quad (2.11)$$

dimana

A = luas permukaan plat iluminasi (m<sup>2</sup>)

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

I<sub>i</sub> = intensitas cahaya yang diterima oleh medium kultur medium (W/m<sup>2</sup>)

t = waktu (jam)

dengan nilai konversi 1 lx = 2,95 x 10<sup>-3</sup> W/m<sup>2</sup>, dan untuk mencari nilai E<sub>x</sub> (energi cahaya yang dimanfaatkan selama pertumbuhan untuk duplikasi maupun pendewasaan sel) dan E (energi cahaya total yang diterima oleh medium kultur selama pertumbuhan) adalah sebagai berikut :

$$E_x = \frac{\int_0^t I_t dt}{\Delta X \cdot s} \quad (2.12)$$

$$E_o = \frac{\int_0^t (I_i - I) dt}{\Delta X \cdot s} \quad (2.13)$$

dengan :

Δ X = berat biomassa yang dihasilkan selama masa pertumbuhan (g/dm<sup>3</sup>)

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

I<sub>t</sub> = intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh kultur medium (W/m<sup>2</sup>)

## 2.5 FOTOBIOREAKTOR

Dalam rangka memaksimalkan produktivitas produk yang berasal dari mikroorganisme fototropik, fotobioreaktor sangat dibutuhkan sebagai tempat hidup dari mikroorganisme ini (Pulz, 2001).

Fotobioreaktor itu sendiri terbagi dalam dua sistem, yaitu sistem terbuka (*open system*) dan sistem tertutup (*closed system*). Sistem terbuka bisa berupa air alami (danau, lagoon (danau di pinggir laut), kolam) dan danau buatan. Umumnya sistem tertutup terdiri dari fotobioreaktor tubular dengan tube dalam berbagai bentuk, ukuran, dan panjang yang disesuaikan dengan material yang digunakan (Pulz, 2001).

Pada masa yang akan datang, sistem kolam terbuka yang digunakan untuk memproduksi mikroorganisme dalam skala besar, mempunyai potensi inovasi yang lebih rendah dibanding sistem tertutup. Untuk produk yang bermutu tinggi, fotobioreaktor sistem tertutup lebih dipilih, ditinjau dari segi perkembangannya dan bervariasinya pendekatan yang dapat digunakan dalam desain (Pulz, 2001).



Gambar 2. 7. Fotobioreaktor Terbuka untuk Pemiakan *Chlorella vulgaris*.

(Sumber : <http://www.chlorella-world.com/yaeyama.html>)

### 2.5.1 Karakteristik Fotobioreaktor (Pulz, 2001)

Umumnya, kondisi kehidupan normal alamiah mikroalga yang menjadi salah satu subjek penelitian bioteknologi adalah sebagai berikut : jarak rata-rata antara sel (*cell displacement*) vertikal atau horizontal berkisar  $5 \cdot 10^{-3}$  sampai  $3 \cdot 10^{-5}$  m/s. Densitas maksimum sel  $1.000 \text{ sel/cm}^3$ , *photon flux density (PFD)* biasanya bagus dalam *light limited area*, suplai cahaya efektif pada saat pagi sampai sore, kondisi  $\text{CO}_2$  dan nutrisi

biasanya jauh dari optimal, stabilitas nilai pH, konsentrasi ion, dan temperatur pada rentang yang cukup panjang.

Pada kenyataannya, untuk sistem kultivasi dalam fotobioreaktor, harus diberikan pada kondisi yang sangat berbeda, dimana densitas sel dapat mencapai hingga  $10^8$  sel/cm<sup>3</sup>, jarak rata-rata sel tereduksi sampai 60  $\mu$ m atau 10 kali diameter sel, *cell displacement* dari 0,3 sampai 1 m/s, *turbulence-conditioned* PFD bervariasi antara frekuensi 0,1-1.000 s dapat menggantikan waktu pagi sampai sore maupun malam harinya, suplai nutrisi dan CO<sub>2</sub> yang biasanya optimum, nilai pH dan temperatur yang optimum untuk spesifik sel mikroalga tertentu.

Berikut akan dijelaskan beberapa karakteristik dari fotobioreaktor :

#### 2.5.1.1 Energi Cahaya

Cahaya sebagai sumber energi untuk kehidupan fotoautotropik merupakan faktor pembatas yang mendasar dalam *photobiotechnology*. Pada pencahayaan yang intens, laju fotosintesis akan berbanding lurus proporsional dengan intensitas cahaya, sampai intensitas iluminasi yang tinggi dapat merusak sistem reseptor fotosintetik dalam beberapa menit, yang dinamakan *photoinhibition*. Pada kebanyakan mikroalga, fotosintesis akan ter-*saturated* pada radiasi sekitar 1.700-2.000  $\mu$ E/m<sup>2</sup> dan mengalami *photoinhibition* pada 130  $\mu$ E/m<sup>2</sup> (Pulz, 2001).

Pada jenis fotobioreaktor tubular atau *plate-type*, dengan *surface-to-volume ratio* 20-80 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> dan besarnya pencahayaan mencapai 1,15  $\mu$ E/m<sup>2</sup>s, dengan *layer thickness* sampai 5 mm, produktivitas dapat mencapai 2-5 g.DW/day. Meskipun minat pada bioteknologi semakin berkembang belakangan ini, tetapi masih sedikit referensi literatur mengenai *short-term process* dari *photoadaptation*, yaitu mengenai *light inhibition* atau *saturation effect* dalam fotobioreaktor dalam sistem tertutup. *Photoadaptation* memerlukan waktu sekitar 10-40 menit dimana dapat dijelaskan ketidaksesuaian antara produktivitas kultur alga pada *open-air* dan pencahayaan optimum mereka.

#### 2.5.1.2 Kesetimbangan CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>

Untuk laju fotosintesis yang tinggi, kesetimbangan CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> harus disesuaikan, dimana enzim utama *carboxylating*, Rubisco, menggunakan CO<sub>2</sub> untuk siklus Calvin dan tidak menggunakan untuk O<sub>2</sub> fotorespirasi. Oksigen dapat menjadi permasalahan

dalam kultur mikroalga dengan densitas sel tinggi karena akan menghambat laju fotosintesis.

Konsentrasi CO<sub>2</sub> biasanya harus dijaga selama margin yang sempit. Kandungan CO<sub>2</sub> udara 0,03% menjadi suboptimal bagi pertumbuhan, dan pada umumnya tumbuh-tumbuhan dapat mentoleransi konsentrasi CO<sub>2</sub> hanya sampai 0,1%. Tetapi untuk kebanyakan strain dari mikroalga, telah diteliti bahwa mikroorganisme ini dapat mentoleransi kandungan CO<sub>2</sub> udara sampai 12% pada temperatur 35°C. Sampai saat ini, tekanan parsial O<sub>2</sub> (pO<sub>2</sub>) dalam suspensi mikroalga baik dalam *open* atau *closed photobioreactor*, dapat direduksi hanya dengan menambah turbulensi dan *stripping* O<sub>2</sub> dengan udara. Kedua pendekatan ini masih menjadi '*unsolved dilemma*' dalam sistem fotobioreaktor (Pulz, 2001).

#### 2.5.1.3 Temperatur

Temperatur dapat mempengaruhi respirasi dan fotorespirasi secara lebih kuat dibanding dengan fotosintesis. Ketika CO<sub>2</sub> atau cahaya menjadi terbatas untuk proses fotosintesis, pengaruh temperatur menjadi tidak signifikan. Dengan penambahan temperatur, respirasi akan meningkat secara signifikan. Jadi, net efisiensi fotosintesis akan menurun dengan kenaikan pada temperatur tinggi. Efek ini dapat memperburuk kultur suspensi pada kondisi penurunan CO<sub>2</sub> dan kelarutan O<sub>2</sub> pada kenaikan temperatur (Pulz, 2001).

#### 2.5.1.4 Nutrien dan Nilai pH

Suplai nutrien yang cukup untuk mikroalga adalah pre-kondisi untuk fotosintesis yang optimal. Defisiensi nutrien akan menyebabkan gangguan pada metabolisme dan ketidaksesuaian produksi pada *intermediate* proses fotosintesis. Deviasi dari nilai pH optimum akan mempengaruhi psikologis reaksi dan produktivitas sehingga kondisi yang terkontrol dengan mudah harus dijaga pada rasio optimum dalam fotobioreaktor (Pulz, 2001).

### 2.5.2 Jenis Fotobioreaktor

Pemilihan desain dari sebuah fotobioreaktor akan sangat mudah mempengaruhi produksi dan efisiensi overall untuk memproduksi mikroorganisme yang berbasiskan

produk. Dikarenakan sistem terbuka biasanya memiliki produktivitas yang kecil, sehingga untuk skala industri banyak digunakan sistem tertutup seperti tubular fotobioreaktor (*biocoil, biofence, ultrathin sheet*) (Gunther, 2001).

Ada beberapa jenis fotobioreaktor yang sering digunakan dalam kultivasi mikroorganisme, yaitu :

- *Tubular* fotobioreaktor
- *Conical* fotobioraktor
- *Plat-type* fotobioreaktor
- *Bubble column* fotobioreaktor

Jenis dari fotobioreaktor tersebut dibedakan berdasarkan bentuknya, *flow regime*, efisiensi energi cahaya, dan luas permukaan kontakannya.

**Tabel 2. 5. Karakteristik Beberapa Jenis Fotobioreaktor. (<http://link.springer.de>)**

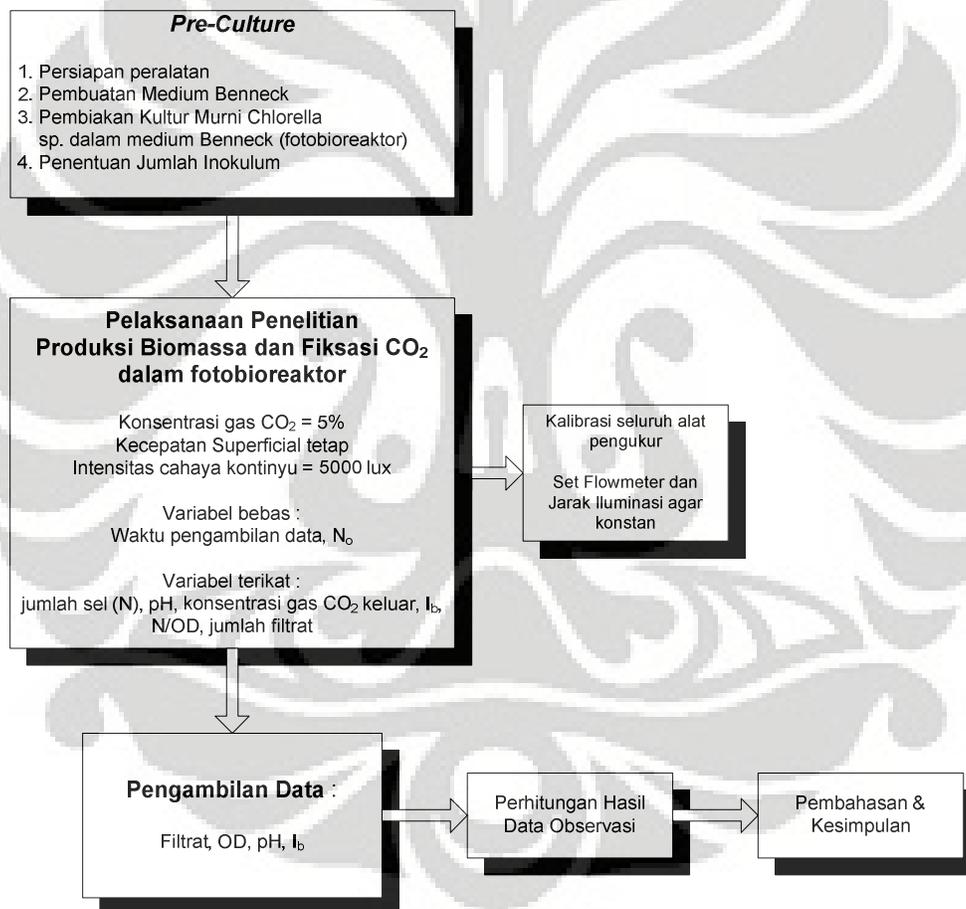
	Satuan	Raceway	Surface type open pond high layer thickness	Tubular open pond, low layer thickness	Semi-closed plated- tubular system
Permukaan terkena cahaya	m <sup>2</sup>	500	200	600	500
Volume	m <sup>2</sup>	75	5	7	6
Ruang kosong diperlukan	m <sup>2</sup>	550	350	110	100
Ketebalan film	cm	16 – 30	0,5 – 1	4	3
Laju alir	cm/s	30 – 55	30 – 48	50 – 60	120
Konsentrasi biomassa (DW)	mg/L	300 – 500	3000 – 6500	5000 – 8000	5000 – 8000
Produktivitas (DW)	g/L.d	0,05 – 0,1	0,8 – 1	0,8 – 1,2	0,8 – 1,3

# BAB III

## METODE PENELITIAN

Pada bab ini, akan dijelaskan mengenai diagram alir penelitian, alat dan bahan penelitian, variabel penelitian, prosedur serta metode perhitungan data hasil observasi yang akan digunakan pada penelitian ini.

### 3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN



Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian

### 3.2 ALAT DAN BAHAN PENELITIAN

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

Pada penelitian ini akan digunakan peralatan-peralatan sebagai berikut :

1. Satu buah fotobioreaktor dengan volume total 18 dm<sup>3</sup> dengan bahan dasar kaca transparan yang dilengkapi dengan aliran input dan output gas dan udara yang mengandung CO<sub>2</sub>.
2. Kompresor udara
3. Tabung CO<sub>2</sub> yang dilengkapi dengan *regulator*
4. Flowmeter udara dan flowmeter CO<sub>2</sub>
5. Filter udara dari *glassware* diisi dengan kapas steril
6. Lampu Philips Halogen 20W/12V/50Hz (sebagai sumber pencahayaan) dan transformator 220 V primer/12 V sekunder
7. *T-septum* yang terbuat dari bahan gelas (sebagai titik indikator konsentrasi CO<sub>2</sub> input fotobioreaktor)
8. Peralatan *glassware* yang terdiri dari erlenmeyer 100 cm<sup>3</sup> (sebagai *discharge* gas CO<sub>2</sub> dan udara output fotobioreaktor), pipet ukur 5 cm<sup>3</sup>, pipet *pasteur*, gelas ukur 10 cm<sup>3</sup> dan 100 cm<sup>3</sup> botol sampel sel, dan *beaker glass* 20 cm<sup>3</sup> dan 100 cm<sup>3</sup>
9. Selang silikon dan selang plastik (sebagai rangkaian peralatan dan konektor rangkaian)
10. *Syringe 1001 RT Hamilton* 1 cm<sup>3</sup> (*inlet-outlet*) (untuk mengambil sampel dari input dan output CO<sub>2</sub>)
11. *Set Lightmeter Lxtron LX-103* (sebagai penghitung kekuatan intensitas cahaya, dengan satuan *Lx* ataupun *Foot-Candle*)
12. *pH meter HANNA Model HI 8014* dengan larutan buffer 4 dan 7
13. Lemari kerja *ultraviolet* (sebagai transfer box)
14. Lemari reaktor terbuat dari kaca dan kotak kayu (sebagai tempat *running* fotobioreaktor)
15. *Oven* (untuk sterilisasi alat dan mengeringkan sel *Chlorella*)
16. *Spectro UV-VIS RS Spectrometre, LaboMed. Inc* (untuk menghitung OD/absorbansi pada 600 nm)
17. *Centrifuge* (untuk memisahkan sel *Chlorella vulgaris* dari mediumnya)

Sedangkan untuk bahan penelitian yang digunakan adalah :

1. Starter mikroalga hijau *Chlorella vulgaris* dengan usia  $\pm 60$  jam yang telah dihitung sel awalnya (inokulum) dengan menggunakan spektrofotometer pada 600 nm.
2.  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  untuk membuat medium Benneck
3. Aquadest (sebagai bahan medium dan mencuci alat seperti gelas, pipet ukur, dan lain-lain)
4. Alkohol 70% (untuk mencuci alat/sterilisasi dan mencegah kontaminasi)

### **3.3 VARIABEL PENELITIAN**

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian 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 ( $N_0$ ).

#### **3.3.2 Variabel Terikat**

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

#### **3.3.3 Variabel Tetap**

Variabel tetap dalam penelitian ini adalah kecepatan superfisial  $\text{CO}_2$  dan intensitas cahaya yang digunakan.

### **3.4 PROSEDUR PENELITIAN**

Tahapan penelitian secara umum dapat dilihat pada Gambar III.1. Masing-masing tahapan tersebut dapat dijabarkan lagi menjadi prosedur-prosedur seperti terlihat pada penjelasan berikut.

### 3.4.1 Persiapan Peralatan dan Medium

Peralatan seperti fotobioreaktor kolom gelembung (aquarium), filter udara, filter biomassa, multi sparger, peralatan venturi hisap, dan media Benneck yang akan digunakan disterilisasi terlebih dahulu dalam panci bertekanan tinggi dalam selang waktu 1-2 jam atau dengan alkohol 70% sebelum dilakukan perangkaian peralatan riset ini.

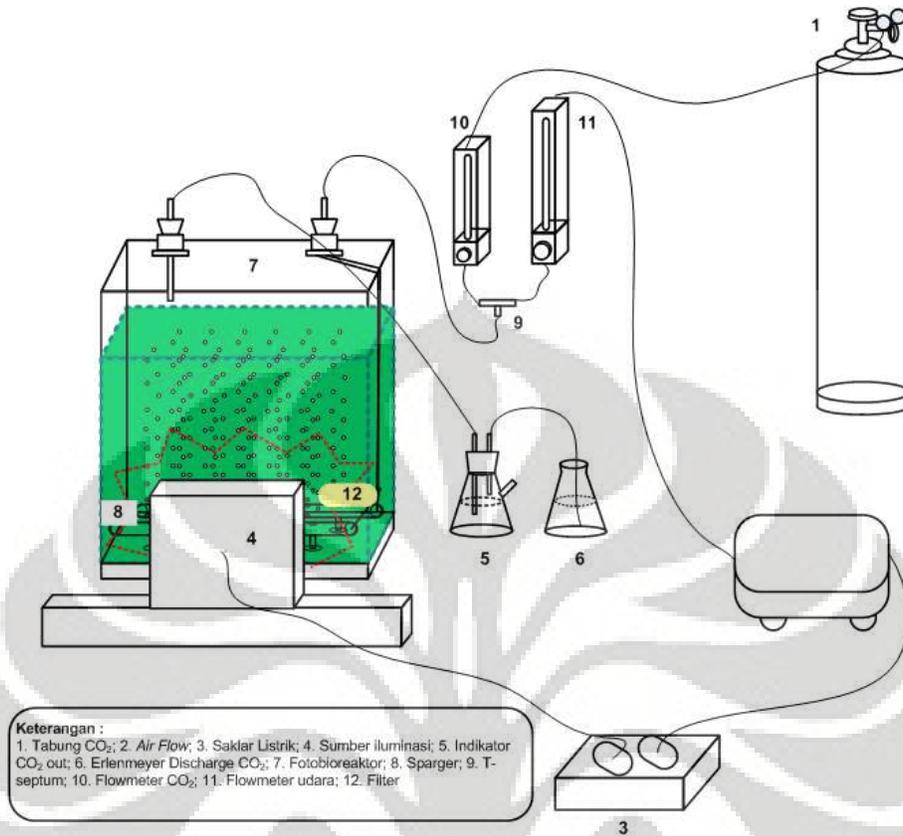
#### 3.4.1.1 Pembuatan Rangkaian Peralatan

Peralatan riset dirangkai dalam suatu lemari kaca untuk melindungi reaktor dari kontaminan. Reaktor yang digunakan berukuran 18 L. Tiap reaktor yang digunakan dihitung nilai  $\alpha_{\text{kaca}}$ -nya sebagai fungsi dari intensitas. Nilai  $\alpha_{\text{kaca}}$  ini digunakan untuk mengetahui hambatan cahaya dari tiap reaktor dikarenakan ukuran dan tebalnya yang berbeda-beda sehingga pada perhitungan dapat diketahui jumlah cahaya yang digunakan mikroalga untuk pertumbuhannya dengan tepat.

Untuk penghubung rangkaian digunakan selang silikon dan selang plastik. Pada tiap sambungan selang dilapisi dengan selotip untuk memastikan tidak ada sambungan yang bocor sekaligus mencegah kontaminan masuk ke dalam rangkaian.

Lemari reaktor yang dibuat memiliki kapasitas 1 reaktor sehingga dalam sekali running, diperlukan 2 lemari. Kalibrasi flowmeter juga dilakukan agar dapat diketahui dengan tepat skala dari masing-masing flowmeter. Hal ini penting karena CO<sub>2</sub> sebagai carbon source yang akan dialirkan harus selalu dijaga konstan pada konsentrasi 5% dari laju aliran total.

Kemudian untuk sumber iluminasi digunakan lampu halogen dengan kekuatan intensitas cahaya sampai 110 Klx. Karena lampu ini berdaya 12 V maka dipasang transformator untuk menurunkan tegangan dari 220 V ke 12 V.



**Gambar 3. 2. Susunan Rangkaian Peralatan Running Fotobioreaktor**

### 3.4.1.2 Sterilisasi Peralatan

Sebelum digunakan, seluruh peralatan untuk riset yang akan bersentuhan langsung dengan *Chlorella* disterilisasi terlebih dahulu agar tidak terkontaminasi bakteri pengganggu yang dapat menghambat/mengganggu pertumbuhan *Chlorella*. Langkah-langkah sterilisasi alat :

#### 1. Pencucian Alat

Peralatan yang digunakan dicuci terlebih dahulu dengan air dan sabun cuci sampai bersih lalu dibilas dengan air sampai tidak terdapat sisa sabun lagi pada peralatan.

#### 2. Pengeringan

Peralatan yang telah dicuci kemudian dibilas sampai bersih, selanjutnya dikeringkan menggunakan tisu kering atau dengan kompressor udara. Kemudian semua peralatan kaca yang memiliki rongga ditutup dengan aluminium foil untuk mencegah masuknya kontaminan setelah disterilisasi.

### 3. Sterilisasi

Peralatan dari kaca/logam disterilisasi menggunakan oven dengan suhu  $120^{\circ}\text{C}$  selama  $\pm 1$  jam sedangkan peralatan dari plastik atau berdimensi besar cukup direndam dalam alkohol 70% selama  $\pm 5$  menit dan direndam lagi sebelum dipakai.

### 4. Penyimpanan

Peralatan kaca/logam dan peralatan dari plastik yang telah disterilisasi selanjutnya disimpan dalam lemari penyimpanan kedap udara yang dilengkapi dengan lampu UV.

Hal-hal yang perlu diperhatikan yaitu lingkungan pada lemari kerja dan transfer box juga harus bersih dan steril, caranya dengan dilap terlebih dahulu, lalu disemprot dengan alkohol 70% dan diratakan dengan lap/tisu kering dan bersih. Lemari penyimpanan alat dan transfer box harus menggunakan lampu UV untuk mencegah pertumbuhan kuman dan dimatikan saat akan digunakan untuk kerja. Dan yang tidak kalah penting yaitu tangan praktikan juga harus selalu bersih, dicuci terlebih dahulu dan dilumuri spray alkohol 70% sebelum mulai bekerja atau mengambil data.

#### 3.4.1.3 Pembuatan Medium Benneck

Medium yang digunakan sebagai medium kultur media pertumbuhan *Chlorella* dalam riset ini adalah medium *Benneck*. Bahan-bahan yang digunakan untuk membuat medium *Benneck* ini yaitu :

**Tabel 3. 1. Bahan Medium Benneck**

Bahan	( $\text{mg}/\text{dm}^3$ 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

Pertimbangan penggunaan medium ini, antara lain karena stock *Chlorella vulgaris Buitenzorg* murni yang didapat dengan menggunakan medium ini mudah dibuat. Hal lain yang menjadi pertimbangan adalah kandungan nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris Buitenzorg* terdapat pada medium ini. Penggunaan medium ini juga mengacu pada hasil riset-riset sebelumnya yang

menggunakan medium ini cukup baik untuk digunakan sebagai media hidup *Chlorella vulgaris* Buitenzorg.

Cara membuat satu liter medium :

1. Menyiapkan bahan-bahan di atas :  $\text{MgSO}_4$  100 mg,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  200 mg,  $\text{NaNO}_3$  500 mg,  $\text{FeCl}_3$  3-5mg lalu keempat bahan tersebut dilarutkan dalam 1  $\text{dm}^3$  aquadest. Diaduk sampai seluruh bahan larut.
2. Medium disterilisasi menggunakan autoclave selama  $\pm 1,5$  jam, lalu didinginkan. Lakukan pemanasan sebanyak  $\pm 3$  kali untuk memastikan medium benar-benar steril. Cara membuka autoclave harus menunggu suhu dan tekanan autoclave turun agar tidak berbahaya.
3. Medium yang telah steril dan dingin dapat disimpan dalam lemari yang telah disterilisasi dengan UV atau lemari pendingin bila tidak langsung digunakan. Apabila terdapat endapan pada dasar medium, harus dipisahkan terlebih dahulu sebelum disimpan.

#### **3.4.2 Pemiakan Kultur *Chlorella vulgaris* Dalam Medium Benneck.**

Medium kultur murni yang didapat harus dibiakkan lagi sebelum dapat digunakan dalam riset. Tujuannya adalah selain untuk memperbanyak stock yang ada, juga untuk membuat *Chlorella vulgaris* Buitenzorg tersebut beradaptasi dalam medium baru sebelum digunakan (melewati fasa lag).

Cara pemiakan medium kultur murni :

1. Menyiapkan medium serta peralatan pemiakan (wadah, selang udara, tutup wadah) lalu disterilkan terlebih dahulu.
2. Stock murni *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dimasukkan ke dalam wadah steril dan dicampur dengan medium Benneck yang telah steril. Perbandingan antara jumlah stock *Chlorella* dengan medium dapat diatur sesuai kebutuhan riset. Pemindehan ini harus dijaga steril, dilakukan dalam transfer box, lingkungan disterilkan dengan alkohol 70% dan menggunakan api bunsen.
3. Lalu medium kultur tersebut di-bubbling dengan menggunakan kompresor udara dan  $\text{CO}_2$  sebesar 1 v/vm. Pada tahap ini juga harus diberikan cahaya namun dengan intensitas yang kecil  $\pm 1.000$  lx.

4. Pembiakan dapat dilakukan selama satu minggu atau lebih bila bertujuan untuk memperbanyak stock yang ada, tetapi jika hanya untuk melewati lag time dapat dilakukan selama 2-3 hari atau  $\pm 60$  jam, tergantung jumlah selnya.

### **3.4.3. Penentuan Kerapatan Biomassa Inokulum *Chlorella vulgaris* Buitenzorg.**

Penentuan kerapatan biomassa inokulum sangat penting dalam riset ini karena secara garis besar berkaitan dengan jumlah sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang terdapat dalam medium kultur. Kerapatan biomassa inokulum perlu diketahui agar dapat dilihat perubahan jumlahnya dari waktu ke waktu dan berkaitan dengan besar intensitas cahaya yang dibutuhkan.

Langkah-langkah perhitungan :

1. Homogenisasi yang dilakukan dengan pengadukan medium kultur sampai semua endapan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang ada merata di dalamnya.
2. Pengambilan sejumlah volume inoculum stock yang teraduk merata dan memasukkannya ke dalam glass cuvette.
3. Penghitungan kerapatan biomassa dapat dilakukan dengan alat bantu spektrofotometer, didapatkan data absorbansi kemudian menggunakan kurva kalibrasi OD vs  $X_{sel}$  atau OD vs  $N_{sel}$ .

### **3.4.4. Pelaksanaan Kegiatan Riset**

Riset yang dilakukan adalah pemberian perlakuan intensitas cahaya kontinu pada jumlah inokulum  $1.000.000 \text{ sel/cm}^3$  (pada riset ini, jumlah yang digunakan tepatnya adalah  $1.320.873 \text{ sel/cm}^3$ ) dengan intensitas cahaya maksimum ( $I_{\mu\text{max,opt}}$ ) yang dijaga tetap selama masa pertumbuhan, perlakuan filtrasi aliran sirkulasi kultur media, serta kombinasi antara keduanya.

Pada eksperimen dengan perlakuan filtrasi aliran sirkulasi kultur media yang ditujukan untuk mengurangi self shading dengan memerangkap sebagian produk biomassa dalam filter aliran sirkulasi media, dilakukan observasi pengaruh filtrasi terhadap besarnya perolehan biomassa dan kemampuan fiksasi  $\text{CO}_2$  pada budidaya *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan beberapa variasi kecepatan hisap kultur media.

Pada awal perlakuan riset, selalu dilakukan secara aseptik dengan menggunakan bunsen dan alkohol 70% untuk menghindari atau mengurangi efek kontaminasi. Hal

ini sangat penting karena efek kontaminasi dapat menghambat pertumbuhan dari mikroalga ini.

### 3.4.5. Pengambilan Data

Adapun data yang diambil selama proses percobaan ini, antara lain adalah:

- Temperatur bioreaktor ( $^{\circ}\text{C}$ )
- pH kultur media dalam fotobioreaktor
- Intensitas cahaya di balik reaktor /  $I_b$  ( $I_x$ )
- Kerapatan biomassa dalam kultur media dalam fotobioreaktor (g/L)
- Kerapatan biomassa yang terperangkap dalam filter (g/L)

Langkah-langkah pengambilan data :

1. Sampel diambil dari kultur media dalam reaktor untuk diukur kerapatan biomassa dalam kultur media/absorbansinya (X/OD) bersamaan dengan mengambil nilai pH dan intensitas cahaya yang ditransmisikan ke belakang reaktor ( $I_b$ ).
2. Bersamaan dengan perlakuan di atas, biomassa yang terperangkap dalam filter juga diambil dengan cara memindahkannya dari media kultur ke wadah berisi medium Benneck melalui proses pemerasan sebelum diukur kerapatan biomassa dalam kultur media/absorbansinya (X/OD) dari media kultur tersebut.
3. Langkah-langkah pengambilan data diulangi setiap interval waktu yang telah ditetapkan (untuk sampel dari media kultur, sebanyak 4 jam sekali, sedangkan untuk filtrat sebanyak 12 jam sekali).

### 3.4.6. Pengolahan Data Penelitian

Variabel penelitian yang diambil yaitu  $\text{OD}_{680}$ , pH, dan  $I_b$  akan diolah menggunakan beberapa metode perhitungan, antara lain:

#### 3.4.6.1. Pengolahan Data $\text{OD}_{600}$

Nilai OD yang didapatkan dari hasil penelitian akan dikonversi menjadi nilai N sel dan X di mana N sel adalah jumlah sel *Chlorella vulgaris* yang terdapat di dalam satu satuan volume, sedangkan berat kering biomassa (X) adalah berat dari *Chlorella vulgaris* di luar medium hidupnya. Jumlahnya dapat dihitung secara langsung dengan menggunakan data absorbansi pada 600 nm dan mengkorelasikannya dengan

menggunakan kurva kalibrasi OD<sub>600</sub> vs N sel dan OD<sub>600</sub> vs X. Dari pengolahan ini dapat dibuat kurva pertumbuhan X vs t.

Selanjutnya dibuat model pendekatan untuk mendapatkan suatu persamaan yang menyatakan hubungan antara X dengan t atau X = f(t). Persamaan ini digunakan untuk menghitung nilai laju pertumbuhan spesifik ( $\mu$ ) yaitu laju pertumbuhan produksi biomassa pada fasa logaritmik, yang merupakan waktu yang diperlukan untuk sekali pembelahan sel. Pada pengolahan ini model yang digunakan adalah persamaan kinetika Monod, yaitu :

$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} \quad \text{atau} \quad \mu = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (\text{Schugerl dan Bellgardt, 2000}) \quad (2. 1)$$

#### 3.4.6.2. Pengolahan Data pH

Nilai pH digunakan untuk menghitung besar konsentrasi [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] dalam reaktor dengan menggunakan persamaan *Henderson-Hasellbach*, yaitu:

$$[HCO_3] = \left( \frac{K \cdot CO_{2,0}}{H \cdot CO_{2,0}} \right) \left( \frac{y \cdot CO_2 \cdot P_T}{10^{-pH}} \right) \left( \frac{\text{EXP} \left[ A_k \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_k \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_k \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]}{\text{EXP} \left[ A_h \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_h \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_h \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]} \right) \quad (2. 2)$$

#### 3.4.6.3. Pengolahan Data I

Nilai I<sub>0</sub> (jumlah intensitas yang diterima oleh reaktor) dan I<sub>b</sub> (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 :

$$E_x = \frac{\int_0^t I_t dt}{\Delta X \cdot s} \quad (2. 12)$$

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, akan dijelaskan mengenai pelaksanaan penelitian, hasil pengamatan, serta analisa dari hasil penelitian.

#### 4.1. PEMBAHASAN UMUM

Pada eksperimen dengan perlakuan filtrasi aliran sirkulasi media kultur ini, pembahasan mengenai hasil penelitian akan ditekankan pada pengaruh perlakuan filtrasi dengan pencahayaan kontinyu terhadap peningkatan produksi biomassa *Chlorella vulgaris*, dimana sebagai pembandingnya adalah kultur media yang mempunyai jumlah sel awal, volume (18 L), dan pencahayaan yang sama namun tanpa perlakuan filtrasi (dilakukan oleh Indah Permata Syahri dalam skripsinya “Evaluasi Kinerja Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah untuk Produksi Biomassa *Chlorella sp.* melalui Pengaturan Kerapatan Fluks Cahaya” pada tahun 2008). Untuk itu, variabel-variabel yang menjadi bahasan hanya terbatas pada variabel yang merupakan parameter pertumbuhan *Chlorella vulgaris*. Pada penelitian ini, digunakan strain *Chlorella vulgaris* sebagai objek penelitian yang merupakan ganggang bersel tunggal yang didapat dari Balai Penelitian Perikanan Air Tawar Depok. Penelitian ini menggunakan fotobioreaktor kolom gelembung tembus cahaya skala menengah bervolume 18 L dengan ukuran reaktor (38.5 x 10 x 60) cm<sup>3</sup>. Ukuran tersebut digunakan karena reaktor didesain memiliki ukuran yang sangat tipis. Hal itu bertujuan untuk membantu cahaya mudah tembus hingga ke belakang reaktor dan menghindari terjadinya *self-shading* (peristiwa penutupan satu sel oleh sel lain yang menyebabkan tidak meratanya cahaya dan CO<sub>2</sub> yang didapatkan oleh alga) saat kultur sudah semakin padat. Penggunaan kolom gelembung tembus cahaya dilakukan karena kolom ini merupakan peralatan yang sesuai untuk budidaya mikroorganisme fotosintesa karena maksimalisasi peningkatan produksi dan penyediaan cahaya yang secara simultan memberikan laju produksi volumetrik yang tinggi dapat dilakukan pada reaktor ini (Wijanarko, 2006).

Kolom gelembung pada penelitian ini dilengkapi dengan filter untuk memerangkap sebagian biomassa *Chlorella* sehingga dapat menghindari kepadatan dalam reaktor yang dapat menyebabkan efek *self-shading*. Dengan terjaganya kepadatan dalam reaktor, kultur tetap dapat menerima cahaya serta nutrisi secara merata sehingga tetap dapat berfotosintesis yang berarti pertumbuhannya tidak terhambat.

Reaktor ditutup oleh karton hitam di sekeliling penampang kecuali penampang depan. Hal ini dimaksudkan supaya kultur hanya memperoleh cahaya dari sisi depan sehingga perhitungan penggunaan energi cahaya bagi pertumbuhan sel lebih mudah untuk dilakukan (tidak ada penyerapan dari sisi lain).

Pada tahap awal penelitian, dilakukan penentuan kurva OD<sub>600</sub> vs X. Penentuan kurva OD<sub>600</sub> vs X ini bertujuan untuk memudahkan perhitungan terhadap berat kering sel selama masa kultivasi sehingga untuk mengetahui jumlah sel serta berat kering dari sampel cukup dengan mengetahui tingkat absorbansinya yang kemudian dihubungkan dengan kurva OD<sub>600</sub> vs X. Hal ini membuat prosedur perhitungan maupun pengukuran yang dilakukan tidak membutuhkan waktu yang relatif lama. Kurva OD<sub>600</sub> vs X yang digunakan pada penelitian ini merupakan kurva hasil penelitian Sang Made Kresna (2004). Panjang gelombang yang digunakan dalam pengukuran absorbansi adalah 600 nm karena absorbansi dari *Chlorella vulgaris* pada panjang gelombang ini paling tinggi jika dibandingkan pada panjang gelombang cahaya tampak lainnya (Sujarwo, 2006).

Tahapan penelitian berikutnya adalah kultur terhadap *Chlorella vulgaris* dalam medium *Benneck*. Medium ini dipilih sebagai medium kultur *Chlorella vulgaris* karena dalam medium ini banyak terdapat senyawa makro yang sangat diperlukan untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris* secara optimal dalam fotobioreaktor, seperti NaNO<sub>3</sub>, MgSO<sub>4</sub>, dan KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. Mg<sup>2+</sup> diperlukan dalam mengontrol proses pembelahan sel, sedangkan PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> dan NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sangat penting dalam pembentukan nukleat dan protein selama pertumbuhan sel (Wirosaputro, 2002). Selain itu, dipilihnya *Benneck* sebagai medium dalam penelitian kali ini karena *Benneck* telah terbukti mampu memberikan asupan nutrisi kepada *Chlorella vulgaris* pada penelitian-penelitian sebelumnya. Pemiakan medium kultur murni *Chlorella vulgaris* dalam medium *Benneck* (*pre-culture*) dilakukan untuk mempersiapkan mikroalga berada pada fase pertumbuhan eksponensial atau telah melewati fase adaptasi (*lag phase*) serta untuk membiasakan

mikroalga pada kondisi operasi yang akan digunakan pada penelitian ini. Waktu pre-culture untuk tiap jenis mikroorganisme berbeda-beda, untuk *Chlorella vulgaris* adalah selama 48 jam (Wijanarko, 2006). Proses ini dilakukan dalam fotobioreaktor skala kecil dengan intensitas penyinaran yang cukup serta aliran udara tanpa CO<sub>2</sub> tambahan.

Tahap selanjutnya adalah penentuan kecepatan superficial untuk reaktor yang bervolume 18 L. Proses ini perlu dilakukan untuk mengetahui kecepatan alir udara maksimum yang diberikan untuk mendapatkan pertumbuhan *Chlorella vulgaris* yang optimum. Kecepatan superficial yang digunakan sebesar 0,4 SCFM (penjelasan pada Lampiran B).

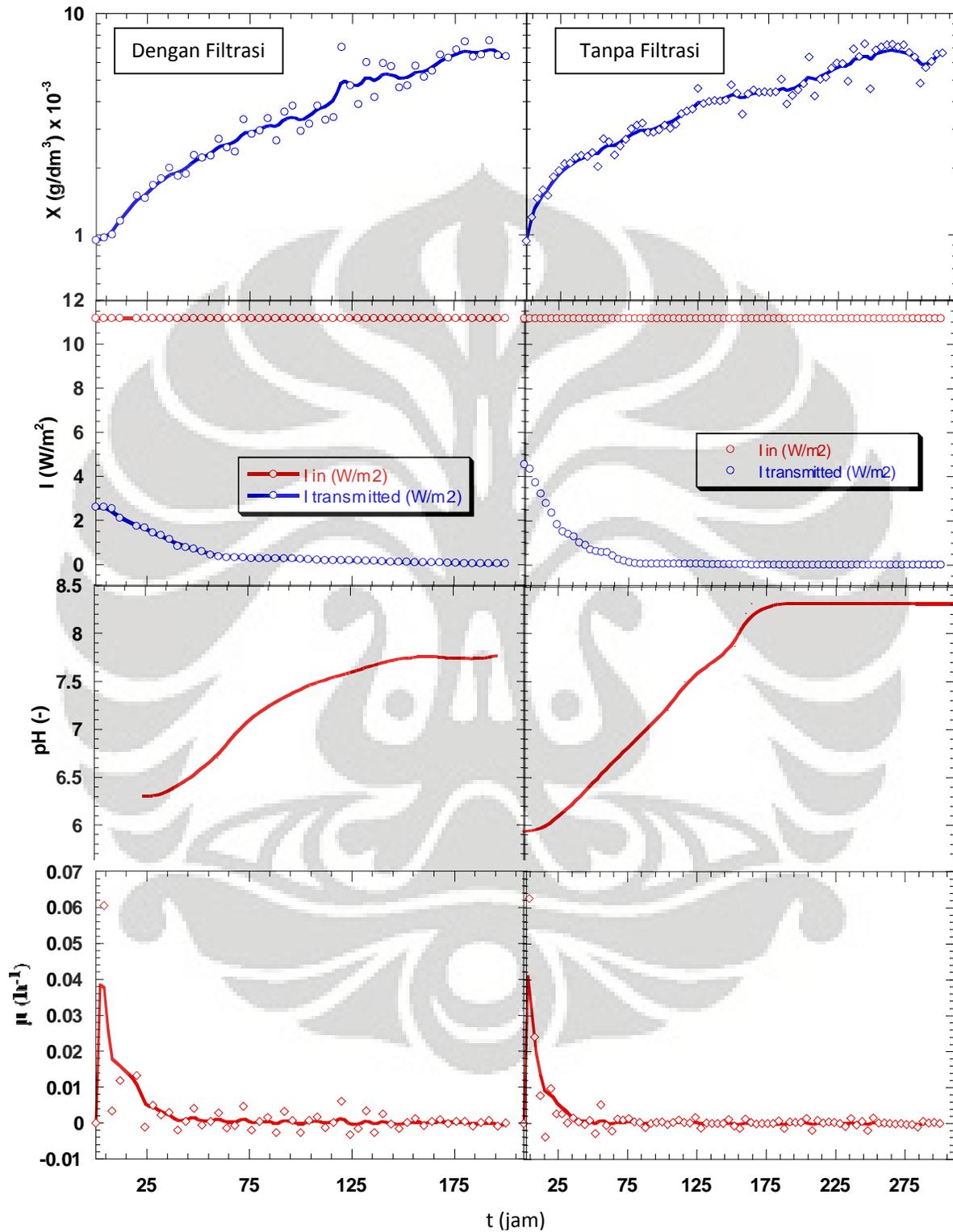
Langkah berikutnya adalah pembuatan inokulum awal dari mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan jumlah sel ( $N_{sel}$ ) sebanyak 1.000.000 sel/dm<sup>3</sup>. Berdasarkan kurva kalibrasi OD<sub>600</sub> vs  $N_{sel}$  maka inokulum ini memiliki absorbansi 0,2 pada panjang gelombang 600 nm. Pembuatan starter ini dilakukan dengan menuangkan sedikit *Chlorella* dari hasil panen penelitian sebelumnya kemudian ditambahkan dengan medium *Benneck* sampai memiliki nilai absorbansi 0,2 yang menunjukkan jumlah sel ( $N_{sel}$ ) sebanyak 1.000.000 sel/dm<sup>3</sup>.

Setelah semua kondisi operasi ditetapkan, penelitian baru dapat dimulai. Data yang diambil mencakup OD<sub>sel</sub>, OD<sub>filtrat</sub>, pH, dan I<sub>back</sub> untuk rentang waktu yang telah ditentukan. Data OD<sub>sel</sub> digunakan untuk melihat adanya peningkatan berat kering sel dalam masa kultivasi sedangkan OD<sub>filtrat</sub> digunakan untuk mengetahui berat kering sel yang terperangkap dalam filter yang bertujuan untuk mengurangi kepadatan dalam kultur. Data OD<sub>sel</sub> diambil setiap 4 jam sekali sedangkan OD<sub>filtrat</sub> diambil setiap 12 jam sekali. pH digunakan untuk melakukan perhitungan terhadap konsentrasi substrat HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> yang terdapat dalam medium, sedangkan untuk mengetahui besarnya energi cahaya yang tersedia dan dikonversi untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris* digunakan data I<sub>0</sub> dan I<sub>back</sub>.

## 4.2. DATA PENELITIAN

Data hasil pengamatan yang didapat dari penelitian ini disajikan dalam dua bentuk yaitu data dalam bentuk angka dan data dalam bentuk grafik. Adapun data dalam bentuk angka akan disajikan dalam lampiran pada bagian akhir skripsi ini.

Berikut adalah data grafik yang didapat dari pengamatan terhadap reaktor dengan perlakuan filtrasi dan tanpa perlakuan filtrasi :



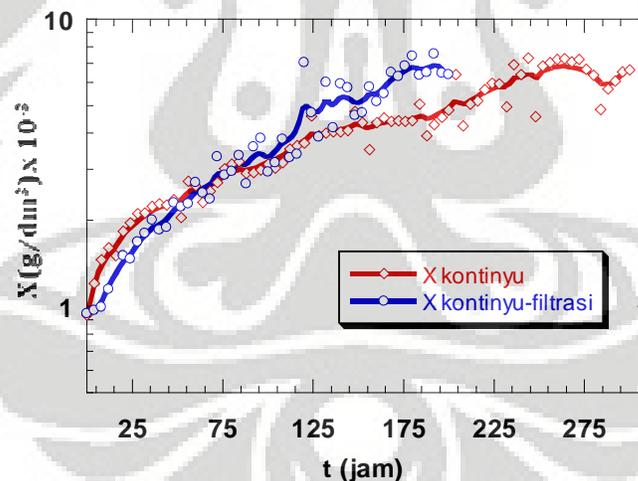
Gambar 4. 1. Grafik Data Pengamatan pada Reaktor dengan Filtrasi dan Tanpa Filtrasi

### 4.3. PENGARUH PERLAKUAN FILTRASI TERHADAP PERTUMBUHAN *Chlorella vulgaris*

Untuk dapat melihat pengaruh dari penggunaan filter terhadap pertumbuhan *Chlorella vulgaris* secara lebih detail maka pembahasan akan dilakukan terhadap beberapa variable yang mempengaruhi pertumbuhan *Chlorella vulgaris*, antara lain :

#### 4.3.1. Pengaruh Perlakuan Filtrasi terhadap Berat Kering (X)

Pada penelitian ini, digunakan inokulum awal dengan berat kering (X) 0.94 mg/dm<sup>3</sup> dengan intensitas cahaya yang diatur konstan yaitu sebesar 5000 lux serta dikultivasi dalam waktu 200 jam. Sebagai data pembanding maka dikultur pula *Chlorella vulgaris* dengan diberikan intensitas cahaya yang sama, volume yang sama, serta berat kering yang hampir sama (0.935 mg/dm<sup>3</sup>). Data yang didapat dari penelitian ini tersaji dalam bentuk grafik X (berat kering) vs t (jam) seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.2. Namun, untuk lebih memperjelas perbandingan pertumbuhan berat kering *Chlorella* antara reaktor yang berfilter dengan tidak berfilter, dapat dilihat pada grafik di bawah ini :



Gambar 4. 2. Grafik Perbandingan Pertumbuhan *Chlorella sp.* Pada Reaktor Berfilter dengan Reaktor Tidak Berfilter

Pada grafik tersebut, dapat dilihat bahwa pada jam-jam pertama, pertumbuhan berat kering *Chlorella* meningkat dengan pesat. Hal ini sesuai dengan kurva masa pertumbuhan *Chlorella vulgaris* dimana setelah fase lag (fase adaptasi) pada awal

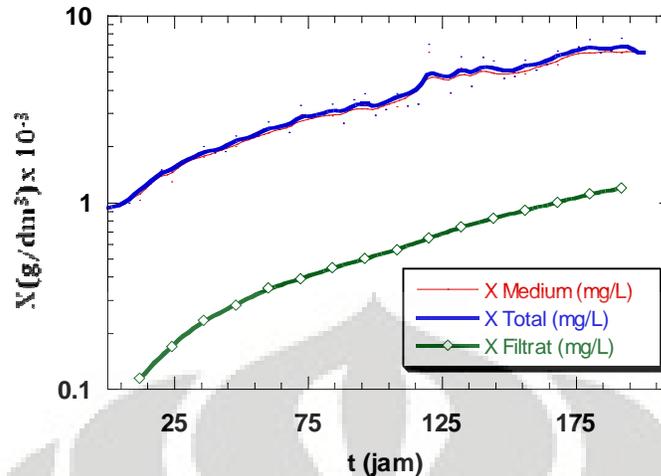
kultivasi, *Chlorella* akan mengalami fasa pertumbuhan logaritmik dengan laju pertumbuhan yang maksimum. Seiring dengan waktu kultivasi, penambahan berat kering sel akan semakin berkurang karena telah memasuki fasa stasioner dimana terjadi penurunan metabolisme sel. Penurunan metabolisme sel disebabkan bertambahnya jumlah sel yang berarti kepadatan sel di dalam kultur semakin tinggi. Hal tersebut bisa menyebabkan *self-shading* sehingga mengganggu proses fotosintesis.

Jika perbandingan dilakukan dengan melihat grafik, pertumbuhan sel dalam reaktor dengan perlakuan filtrasi pada awal masa kultivasi lebih rendah dibandingkan pertumbuhan sel dalam reaktor tanpa filtrasi. Namun, pertumbuhan pada reaktor dengan filtrasi meningkat cepat dalam waktu yang lebih singkat sehingga pada sekitar jam ke-92 dan seterusnya pertumbuhan sel pada reaktor tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor tanpa filtrasi. Secara keseluruhan, reaktor dengan sistem filtrasi menghasilkan pertumbuhan yang sedikit lebih tinggi, dilihat dari segi jumlah akhir berat kering yang dihasilkan pada masa akhir kultivasi dan berat kering maksimum selama masa kultivasi, dengan waktu kultivasi yang lebih singkat dibandingkan dengan reaktor tanpa filter, seperti yang terlihat pada tabel di bawah ini :

**Tabel 4. 1. Data Sel pada Akhir Kultivasi**

<b>Jenis Reaktor</b>	<b>X akhir (mg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Berat Kering Maksimum</b>	<b>Waktu Kultivasi</b>
Reaktor dengan Sistem Filtrasi	6.39	7.56	200 jam
Reaktor tanpa Sistem Filtrasi	6.34	7.31	300 jam

Dari tabel di atas, dapat dilihat bahwa penggunaan perlakuan filtrasi memberikan peningkatan terhadap biomassa yang dihasilkan sekitar 1,03 kali lipat dibandingkan dengan reaktor tanpa filtrasi, dengan waktu yang lebih singkat yaitu selama 200 jam dibandingkan dengan reaktor tanpa filtrasi yang memerlukan waktu selama 300 jam. Hasil tersebut disebabkan adanya perlakuan filtrasi yang dapat memerangkap sebagian produk biomassa dalam filter aliran sirkulasi kultur media. Filter tersebut lalu diambil setiap 12 jam sekali dan filtrat yang tersaring diperas dan disimpan. Grafik yang menunjukkan banyaknya filtrat berupa produk biomassa yang terperangkap dapat dilihat pada gambar berikut :



**Gambar 4. 3. Grafik Berat Kering Kultur dan Berat Kering Filtrat vs Waktu**

Dengan adanya filtrasi, kepadatan sel di dalam medium dapat dikurangi, yang berarti peristiwa *self shading* dapat diatasi sehingga cahaya dan nutrisi yang diberikan tetap dapat diterima secara merata oleh *Chlorella* di dalam kultur. Oleh karena mikroalga pada reaktor dengan filter mendapatkan cahaya dan nutrisi yang merata maka sel masih dapat melakukan proses metabolisme dengan baik sehingga biomassa yang terbentuk juga lebih besar.

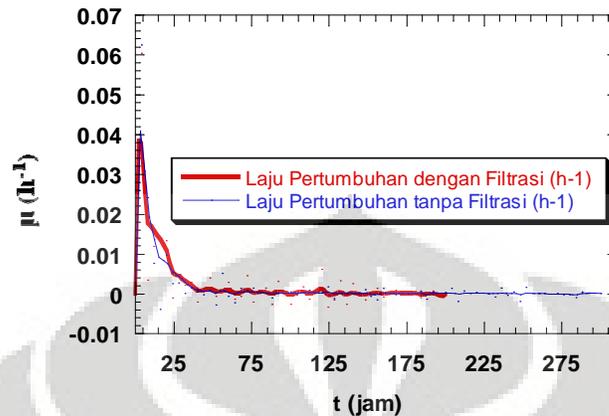
#### 4.3.2. Pengaruh Perlakuan Filtrasi terhadap Laju Pertumbuhan ( $\mu$ )

Laju pertumbuhan *Chlorella* pada media kultur seharusnya berada dalam fase logaritmik dimana laju pertumbuhan berada pada titik maksimal lalu seiring bertambahnya waktu akan terus menurun hingga memasuki fasa stasioner. Fenomena ini juga dapat dipahami dari persamaan yang digunakan untuk menentukan  $\mu$ , yaitu :

$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt}$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa laju pertumbuhan berbanding terbalik dengan berat kering yang dihasilkan pada rentang waktu tertentu. Dari Gambar 4.5, terlihat bahwa terdapat kesamaan trend grafik antara reaktor dengan filtrasi dan tanpa filtrasi. Namun, pada masa awal kutivasi, laju pertumbuhan *Chlorella* meningkat terlebih dahulu hingga laju pertumbuhan maksimumnya kemudian menurun hingga memasuki fasa stasioner. Hal itu menunjukkan bahwa sel pada awal kultivasi masih

berada pada fasa lag (fasa adaptasi) dimana sel masih beradaptasi dengan mediumnya. Setelah itu, barulah sel tumbuh memasuki fasa log hingga stasioner.



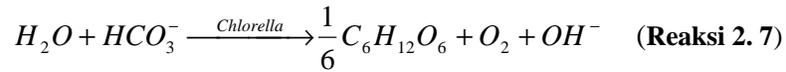
**Gambar 4. 4. Grafik Perbandingan  $\mu$  vs Waktu pada Reaktor dengan Perlakuan Filtrasi dan tanpa Perlakuan Filtrasi**

Dari kedua gambar tersebut, juga dapat disimpulkan adanya perbedaan laju pertumbuhan maksimum pada awal kultivasi dimana laju pertumbuhan maksimum pada reaktor tanpa filtrasi sedikit lebih tinggi dibandingkan pada reaktor dengan filtrasi. Hal ini disebabkan karena pada awal kultivasi, sel pada reaktor dengan filtrasi tersaring oleh filter padahal sel pada medium belum padat sehingga kemungkinan terlalu banyak sel yang terperangkap dalam filter. Pada jam-jam berikutnya, dapat dilihat bahwa laju pertumbuhan pada reaktor dengan filtrasi lebih baik dibandingkan pada reaktor tanpa filtrasi karena dengan kepadatan yang selalu dikurangi dengan adanya filter, tingkat kompetisi antar sel untuk memperebutkan nutrisi dan sumber pencahayaan jauh lebih rendah sehingga sel-sel mampu melakukan metabolisme secara maksimal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan reaktor dengan filtrasi untuk kultivasi *Chlorella vulgaris* memberikan laju pertumbuhan maksimum yang lebih rendah dibandingkan reaktor tanpa filtrasi pada masa awal kultivasi namun secara keseluruhan laju pertumbuhannya lebih baik.

#### **4.3.3. Pengaruh Perlakuan Filtrasi terhadap nilai pH Medium**

Nilai pH yang terukur adalah tingkat keasaman dari medium yang digunakan untuk kultur *Chlorella vulgaris*. Aktivitas sel yang berupa pertumbuhan, pembelahan, serta metabolisme sel yang tinggi dapat meningkatkan nilai pH medium.

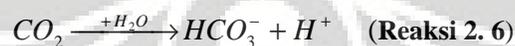
Hubungan ini dapat dijelaskan dengan menggunakan persamaan reaksi metabolisme yang terjadi dalam sel *Chlorella vulgaris* sebagai berikut :



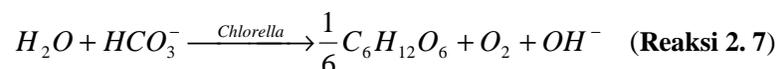
Reaksi di atas diawali dengan adanya proses pelarutan CO<sub>2</sub> dalam medium karena proses aerasi menggunakan udara yang kaya CO<sub>2</sub> membentuk ion HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Senyawa yang terbentuk ini berupa substrat yang mudah diserap oleh sel untuk digunakan dalam reaksi seperti di atas. Dari persamaan reaksi tersebut, dapat dilihat bahwa selama proses metabolisme sel akan selalu terbentuk ion OH<sup>-</sup> yang bersifat basa selain senyawa glukosa dan oksigen sehingga semakin banyak ion karbonat yang dikonsumsi, semakin banyak pula ion OH<sup>-</sup> yang terbentuk, yang berarti meningkatnya nilai pH medium. Pada grafik yang tersaji pada Gambar 4.1, terlihat bahwa pada masa kultivasi nilai pH meningkat semakin tajam hingga mencapai titik maksimum kemudian menjadi stabil. Fenomena ini akan dijelaskan pada analisa pengaruh perlakuan filtrasi terhadap konsentrasi HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dalam medium.

#### 4.3.4. Pengaruh Perlakuan Filtrasi terhadap Konsentrasi HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dalam Medium

Perhitungan terhadap HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> bertujuan untuk mengetahui konsentrasi HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> yang tersedia, yang dapat dikonsumsi oleh sel *Chlorella vulgaris* untuk metabolismenya. Ion ini terbentuk karena adanya reaksi antara gas CO<sub>2</sub> yang larut dalam medium dengan air. Konsentrasi HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dihitung dari perubahan pH kultur sebagai akibat adanya aktivitas pertumbuhan sel *Chlorella vulgaris*. Pada saat gas CO<sub>2</sub> mengalir ke dalam kultur, proses yang terjadi adalah pembentukan senyawa bikarbonat seperti pada reaksi berikut :

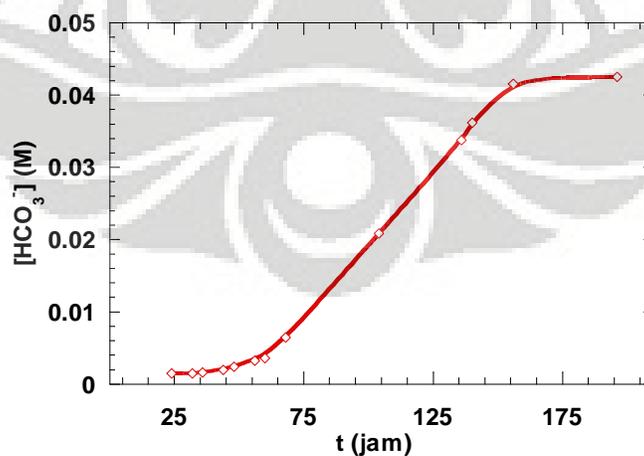


Senyawa bikarbonat ini yang kemudian diserap oleh sel *Chlorella vulgaris*. Proses metabolisme yang terjadi dalam sel selanjutnya adalah reaksi antara senyawa tersebut dengan air yang terdapat dalam sel membentuk senyawa organik seperti glukosa dan air (Wijanarko, 2006), seperti yang tergambar pada reaksi berikut ini :

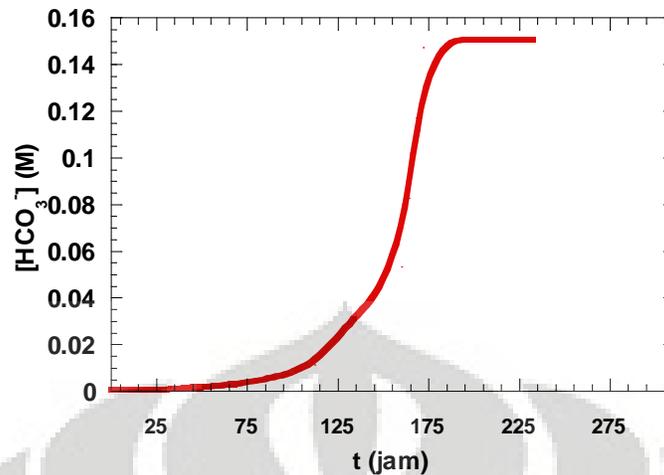


Dengan menggunakan pendekatan hukum Henry seperti pada Lampiran E, konsentrasi  $\text{HCO}_3^-$  dalam medium dapat diketahui. Besar nilai  $[\text{HCO}_3^-]$  sebanding dengan nilai pH sehingga semakin besar nilai pH maka akan semakin besar pula nilai  $[\text{HCO}_3^-]$ . Nilai pH mengalami kenaikan yang semakin tajam pada awal masa kultivasi hingga mencapai titik maksimum kemudian akan stabil pada akhir masa kultivasi. Fenomena ini terjadi karena pada awal kultivasi, sel masih sempat mengalami fasa lag (seperti yang sudah dijelaskan pada grafik laju pertumbuhan terhadap waktu) sehingga proses metabolisme belum terlalu maksimal yang ditandai dengan landainya peningkatan  $[\text{HCO}_3^-]$ . Seiring bertambahnya waktu kultivasi, aktivitas pertumbuhan sel semakin tinggi (sudah berada dalam fasa eksponensial) sehingga proses metabolisme sel berlangsung maksimal. Hal tersebut ditandai dengan adanya peningkatan nilai pH (seperti yang tampak pada kurva) yang disebabkan bertambahnya ion  $\text{OH}^-$  dalam medium. Lalu, kenaikan nilai pH ini akan menurun seiring dengan berkurangnya aktivitas pertumbuhan sel. Hal ini juga berlaku untuk nilai  $[\text{HCO}_3^-]$  dimana nilainya akan semakin naik karena konsumsinya semakin kecil akibat penurunan laju pertumbuhan sel sehingga terjadi akumulasi  $[\text{HCO}_3^-]$ . Selain itu, kemampuan medium untuk melarutkan  $\text{CO}_2$  terbatas sehingga akan terjadi penjumlahan medium terhadap  $\text{CO}_2$  yang menyebabkan sejumlah ion bikarbonat yang terlepas akan kembali ke udara dalam bentuk gas  $\text{CO}_2$ . Oleh karena peristiwa tersebut, konsentrasi  $\text{HCO}_3^-$  dalam medium akan stabil.

Pada grafik di bawah ini, dapat dilihat bahwa tren grafik  $\text{HCO}_3^-$  terbukti sama dengan grafik pH medium pada Gambar 4.1.



**Gambar 4. 5. Grafik  $\text{HCO}_3^-$  vs Waktu pada Reaktor dengan Filtrasi**



**Gambar 4. 6. Grafik HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> vs Waktu pada Reaktor tanpa Filtrasi**

Grafik konsentrasi HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> pada reaktor dengan filter menunjukkan tren yang lebih landai dibandingkan dengan grafik pada reaktor tanpa filter. Konsentrasi substrat pada medium dalam reaktor dengan filtrasi pun lebih rendah dibandingkan dengan reaktor tanpa filter. Pada analisa sebelumnya, pengaruh filter pada produksi biomassa dan laju pertumbuhan *Chlorella* menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan reaktor tanpa filter. Hasil tersebut seharusnya juga tergambar melalui aktivitas sel yang lebih baik namun nyatanya tidak tergambar melalui data konsentrasi bikarbonat dalam medium. Hal ini kemungkinan disebabkan karena grafik tersebut hanya menggambarkan kondisi substrat di dalam medium sedangkan setiap 12 jam sekali ada sebagian kultur yang terperangkap filter dipisahkan dari medium.

#### **4.4. PENGARUH PERLAKUAN FILTRASI TERHADAP BESARNYA ENERGI CAHAYA UNTUK PRODUKSI BIOMASSA (E<sub>x</sub>)**

Dalam melakukan metabolisme, sel memerlukan cahaya sebagai sumber energi. Besarnya energi yang diperlukan untuk proses metabolisme sel sangat tergantung dari besarnya intensitas cahaya serta kondisi fotobioreaktor yang digunakan. Semakin besar intensitas cahaya yang digunakan maka produksi biomassa yang dihasilkan akan lebih baik sampai pada batas maksimumnya. Semakin baik kondisi fotobioreaktor maka semakin tinggi pula konversi energi cahaya untuk pembentukan biomassa. Efisiensi konversi energi dapat dihitung dengan membandingkan antara besarnya

energi yang dimanfaatkan untuk metabolisme dengan energi yang tersedia selama kultivasi. Baik energi yang dimanfaatkan maupun energi yang tersedia dapat diketahui dari besarnya intensitas yang ditransmisikan oleh reaktor dan intensitas cahaya awal yang masuk ke dalam reaktor (perhitungan ada pada lampiran). Tabel berikut adalah besarnya energi cahaya yang digunakan untuk produksi biomassa dari kedua jenis reaktor yang digunakan :

**Tabel 4. 2. Energi Cahaya untuk Produksi Biomassa**

<b>Jenis Reaktor</b>	<b><math>E_x</math> (kJ/g)</b>	<b><math>\eta_{bp}</math> (%)</b>
Reaktor dengan Filtrasi	1.485	1.86
Reaktor tanpa Filtrasi	1.096	0.81

Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa efisiensi energi cahaya yang terjadi pada reaktor dengan filtrasi 2,3 kali lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor tanpa filtrasi. Hal ini disebabkan karena efek *self-shading* yang lebih kecil pada reaktor dengan filtrasi sehingga distribusi cahaya lebih optimal. Ini juga diindikasikan dengan lebih besarnya cahaya yang ditransmisikan oleh sel pada reaktor dengan filtrasi dibanding reaktor tanpa filtrasi, yaitu sekitar 1,35. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan reaktor dengan filtrasi memberikan efisiensi konversi energi cahaya yang lebih baik daripada reaktor tanpa filtrasi.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian serta saran yang dapat diberikan terhadap penelitian-penelitian selanjutnya.

#### **3.5. KESIMPULAN**

Kesimpulan dari penelitian kultivasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam fotobioreaktor kolom gelembung dengan perlakuan filtrasi sirkulasi aliran media kultur adalah :

1. Perlakuan filtrasi pada sirkulasi aliran media kultur *Chlorella vulgaris* dapat meningkatkan produksi biomassa (X) sebesar 1,03 kali lipat dibandingkan dengan biomassa yang dihasilkan pada kultivasi tanpa filtrasi dengan jumlah inokulum dan jenis pencahayaan yang sama (pencahayaan kontinyu).
2. Jumlah energi yang digunakan dalam kultivasi *Chlorella vulgaris* lebih besar 1,35 kali pada reaktor dengan perlakuan filtrasi pada sirkulasi aliran media kultur *Chlorella vulgaris* dibandingkan dengan kultivasi pada reaktor tanpa sistem filtrasi.
3. Efisiensi pada reaktor dengan perlakuan filtrasi pada sirkulasi aliran media kultur *Chlorella vulgaris* lebih tinggi 2,3 kali lipat dibandingkan dengan kultivasi pada reaktor tanpa sistem filtrasi.

#### **3.6. SARAN**

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian-penelitian sejenis berikutnya adalah sebagai berikut :

1. Dari hasil penelitian, terbukti bahwa penggunaan filtrasi berhasil meningkatkan produksi biomassa *Chlorella sp.* biarpun dalam peningkatan yang relatif kecil,

yaitu sebanyak 1.03 kali lipat. Kemungkinan, penambahan alat filter atau peningkatan kecepatan hisap alat tersebut dapat semakin meningkatkan pertumbuhan sel mikroalga. Maka untuk penelitian selanjutnya, sebaiknya diteliti pengaruh kecepatan hisap alat filter dan banyaknya filter untuk dapat ditentukan jumlah optimum filter dan kecepatan hisap optimum.

2. Untuk penelitian selanjutnya, sebaiknya dilakukan perancangan penutup reaktor yang lebih baik namun tetap memudahkan dalam pengambilan alat filter sehingga kultur tidak dapat dimasuki pengotor dari luar.



## DAFTAR PUSTAKA

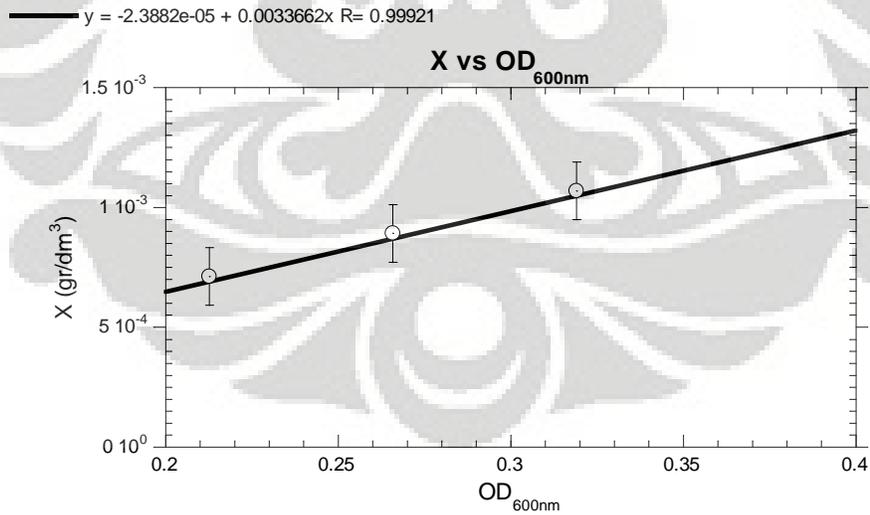
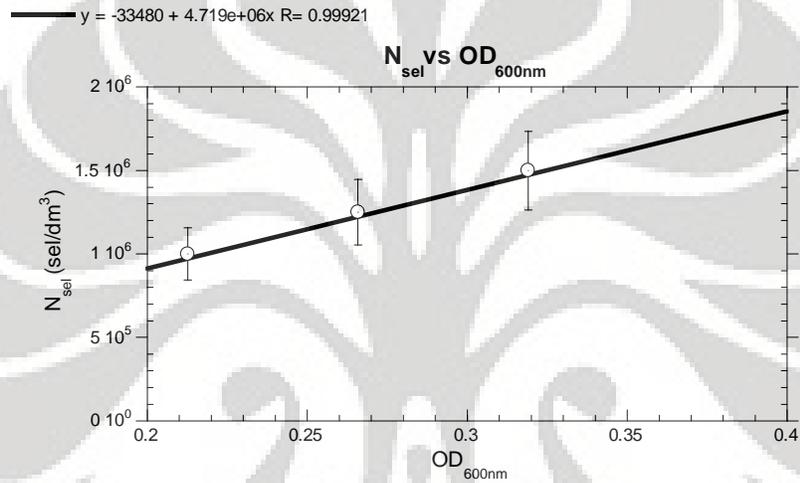
1. Anonim. *Chlorella*. <http://www.mercola.com/chlorella/>. Diakses pada tahun 2007.
2. Anonim. *Chlorella : The Most World's Powerful Food*. <http://chlorella.co.nz/>. Diakses pada tahun 2007
3. Anonim. *Chlorella sp.* <http://www.chlorella-world.com/yaeyama.html>.
4. Anonim. *Chlorella*. <http://www.chlorellafactor.com>.
5. Anonim. *Morphology of Chlorella*. <http://www.chem.mtu.edu/~drshonna/cm4710/lectures/chapter2.pdf>.
6. Anonim. *Health Benefit of Chlorella*. [http://www.healingdaily.com/health\\_benefis\\_of\\_chlorella.htm](http://www.healingdaily.com/health_benefis_of_chlorella.htm). Diakses pada tahun 2007.
7. Anonim. *Chlorella*. <http://id.wikipedia.org/wiki/chlorella>. Diakses pada tahun 2007
8. Anonim. *Fotosintesis*. <http://www.lablink.or.id/Bio/Sel/fotosintesis.htm>. Diakses pada tahun 2007.
9. Gunther, William S. 2000. *A Photobioreactor with On-Line Biomass and Growth Rate Estimations for Optimization of Light Intensity in Cultures of Phototrophic Microorganism*. Department of Life Science Aalborg University.
10. Kresna, Sang Made. 2005. Skripsi : *Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dengan Alterasi Pencahayaan pada Fotobioreaktor Kolom Gelembung*. Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
11. Pulz, O. 2001. *Photobioreactor : Production System for Phototropic Mikroorganism*. Perry, Chemical Handbook. <http://link.springer.de>. Mei, 2006.
12. Schugerl, K., K. H. Bellgardt. 2000. *Bioreaction Engineering Modeling and Control*. Springer.
13. Sendjaja, Antonius Yudi. 2006. Skripsi : *“Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dengan Optimasi Pencahayaan Alterasi dalam Kolom*

- Gelembung Susun Seri*". Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
14. Sujarwo, Muhammad Aji. 2006. Skripsi : "*Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dengan Pencahayaan Kontinyu dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri*". Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
  15. Suriawiria, Unus. 2005. *Chlorella Untuk Kesehatan dan Kebugaran*, Paps Sinar Sinanti.
  16. Syahri, Indah Permata. 2008. Skripsi : *Evaluasi Kinerja Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah untuk Produksi Biomassa Chlorella sp. melalui Pengaturan Kerapatan Fluks Cahaya*. Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
  17. Wijanarko, A., K. Othaguchi. 2000. *Alteration of Light Illumination During Microbial Growth : An Enhancement Effort of Biomass Production and Carbon Dioxide Fixation of Psychrophylic Cyanobacterium Anabaena cylindrica IAM MI*. Department of Chemical Engineering. Tokyo Institute of Technology.
  18. 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.
  19. Wijanarko, A. 2006. Disertasi : "*Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dalam Kolom Gelembung Seri dengan Pengaturan Pencahayaan*". Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
  20. Wijanarko, A. 2007. Proposal Hibah Bersaing XVI : "*Desain Operasional Kolom Gelembung Skala Menengah untuk Budidaya Chlorella vulgaris Buitenzorg dengan Metode Pengaturan Kerapatan Flux Cahaya dan Perlakuan Filtrasi Aliran Sirkulasi Kultur Media*". Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
  21. Wirosaputro, Sukiman. 2002. *Chlorella Untuk Kesehatan Global*. Gadjah Mada University Press.

**LAMPIRAN A**  
**KURVA KALIBRASI**  
**TABEL KONVERSI OD<sub>600</sub>, N<sub>sel</sub>, serta X**

A.1. Kurva Kalibrasi OD<sub>600</sub> vs N<sub>sel</sub> dan OD<sub>600</sub> vs X

Penentuan kurva kalibrasi OD<sub>600</sub> vs N<sub>sel</sub> dan OD<sub>600</sub> vs X telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Kurva yang diperoleh sebagai berikut :

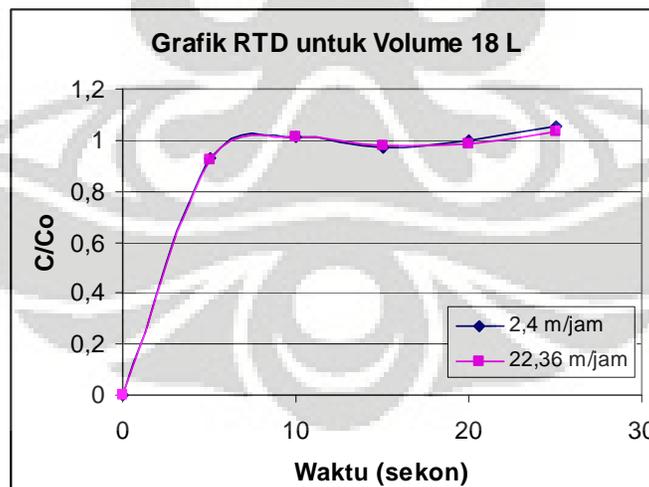


**LAMPIRAN B**  
**PENENTUAN KECEPATAN SUPERFISIAL**

**Langkah Kerja :**

- Menguji RTD untuk reaktor kecil dengan menggunakan  $U_g$  optimum 2.4 m/jam, dengan cara memberikan warna yang dapat ditangkap oleh spektrofotometri pada titik yang dianggap sebagai dead zone (dalam hal ini digunakan zat *methylene blue*)
- Membuat kurva fraksi konsentrasi versus waktu yang merupakan grafik fungsi RTD untuk reaktor kecil
- Setelah diperoleh kurva RTD untuk reaktor kecil maka dilanjutkan dengan menguji RTD untuk reaktor besar
- Pertama-tama, tentukan titik-titik *dead zone* untuk reaktor besar, kemudian ambil beberapa sampel untuk berbagai laju alir udara
- Membuat kurva RTD dari data sampel reaktor besar yang diperoleh
- Mencocokkan trend grafik RTD dari tiap laju alir dengan grafik RTD yang dimiliki oleh reaktor kecil.

**Hasil Percobaan :**



Dari hasil uji coba tersebut, didapatkan  $U_g$  optimal untuk volume 18 L sebesar 22.36 m/jam, maka *flowrate*-nya adalah sebagai berikut :

$$\frac{Q}{A} = U_G \rightarrow \frac{Q}{330 \times 10^{-4} m} = 22.36 m / jam$$

$$\begin{aligned} Q &= 0.84968 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{h}/60 \text{ min} \\ &= 14.16 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min} \cdot 1000 \text{ dm}^3/\text{m}^3 \\ &= 14.16 \text{ dm}^3/\text{min} \\ &= 0.525 \text{ SCFM} \end{aligned}$$

Analisa kegagalan pada kultivasi-kultivasi sebelumnya adalah  $U_G$  yang terlalu besar maka *flowrate* yang digunakan adalah setengah dari *flowrate* hasil perhitungan. Setelah diuji secara langsung untuk melihat bubbling udara (*flowrate* yang diuji : 0.3-0.5 SCFM), terlihat bahwa *flowrate* sebesar 0.4 SCFM merupakan *flowrate* yang terbaik untuk digunakan.



**LAMPIRAN C**  
**DATA HASIL PENELITIAN**

$I_0 = 5000 \text{ lux}$

$\mu_x$	0	0.06045	0.00343	0.01187	0.01327	-0.0011
<b>Jam</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>20</b>	<b>24</b>
OD Terbaca	0.287	0.295	0.303	0.314	0.406	0.428
OD Sebenarnya					0.452	0.39
N (sel/cm <sup>3</sup> )	1,320,873	1,358,625	1,396,377	1,448,286	2,099,508	1,806,930
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00094	0.000969147	0.001	0.00103	0.0015	0.00129
pH	6.05	6.08	6.12	6.16	6.24	6.29
$I_b$	660	570	570	550	530	530
$I_b$ (Ix)	0.67	0.67	0.65	0.54	0.443	0.43
OD Filtrat				3.064		1.446
X Filtrat (g/dm <sup>3</sup> )				0.11549		0.17041

$\mu_x$	0.00487	0.002185758	0.00297	-0.002	0.00049	0.00406
<b>Jam</b>	<b>28</b>	<b>32</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>44</b>	<b>48</b>
OD Terbaca	0.463	0.528	0.557	0.572	0.607	0.579
OD Sebenarnya	0.504	0.54	0.53	0.554	0.566	0.602
N (sel/cm <sup>3</sup> )	2,344,896	2,514,780	2,467,590	2,580,846	2,637,474	2,807,358
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00167	0.001793866	0.00176	0.00184	0.00188	0.002
pH	6.33	6.38	6.42	6.47	6.51	6.56
$I_b$	500	480	480	390	320	280
$I_b$ (Ix)	0.37	0.34	0.29	0.21	0.2	0.18
OD Filtrat			1.704			1.24
X Filtrat (g/dm <sup>3</sup> )			0.23584			0.28387

$\mu_x$	-0.0006	0.000428439	0.00289	-0.0014	-0.0006	0.00467
<b>Jam</b>	<b>52</b>	<b>56</b>	<b>60</b>	<b>64</b>	<b>68</b>	<b>72</b>
OD Terbaca	0.657	0.672	0.684	0.691	0.761	0.845
OD Sebenarnya	0.666	0.682	0.706	0.742	0.711	0.876
N (sel/cm <sup>3</sup> )	3,109,374	3,184,878	3,298,134	3,468,018	3,321,729	4,100,364
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00222	0.002271866	0.00235	0.00247	0.00237	0.00292
pH	6.61	6.65	6.70	6.75	6.79	6.84
$I_b$	270	270	250	220	220	210
$I_b$ (Ix)	0.15	0.11	0.09	0.08	0.07	0.09
OD Filtrat			1.67			1.064
X Filtrat (g/dm <sup>3</sup> )			0.34934			0.3914

$\mu_x$	-0.002	0.000434622	0.0015	-0.0026	0.00322	0.0007
<b>Jam</b>	<b>76</b>	<b>80</b>	<b>84</b>	<b>88</b>	<b>92</b>	<b>96</b>
OD Terbaca	0.854	0.893	0.934	0.936	0.873	0.955
OD Sebenarnya	0.855	0.885	0.87	0.798	1.071	0.996
N (sel/cm <sup>3</sup> )	4,001,265	4,142,835	4,072,050	3,732,282	5,020,569	4,666,644
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00285	0.002955205	0.0029	0.00266	0.00358	0.00333
pH	6.88	6.93	6.97	7.01	7.06	7.10

$l_b$	200	190	180	130	100	90
$l_b$ (lx)	0.08	0.08	0.07	0.068	0.068	0.068
OD Filtrat			1.432			1.34
X Filtrat (g/dm <sup>3</sup> )			0.4487			0.50289

$\mu_x$	-0.0027	0.000732324	0.00175	-0.0013	0.00021	0.00613
Jam	<b>100</b>	<b>104</b>	<b>108</b>	<b>112</b>	<b>116</b>	<b>120</b>
OD Terbaca	0.972	1.033	1.061	1.07	1.081	1.232
OD Sebenarnya	0.879	0.948	0.978	0.987	1.011	1.91
N (sel/cm <sup>3</sup> )	4,114,521	4,440,132	4,581,702	4,624,173	5,067,759	5,780,328
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00294	0.003167276	0.00327	0.0033	0.00361	0.00412
pH	7.14	7.17	7.21	7.25	7.28	7.31
$l_b$	80	80	100	100	96	92
$l_b$ (lx)	0.065	0.054	0.052	0.046	0.04	0.05
OD Filtrat			1.38			2.106
X Filtrat (g/dm <sup>3</sup> )			0.55932			0.64655

$\mu_x$	-0.0032	-0.00153328	0.00333	-0.0027	0.00254	-0.0002
Jam	<b>124</b>	<b>128</b>	<b>132</b>	<b>136</b>	<b>140</b>	<b>144</b>
OD Terbaca	1.272	1.33	1.413	1.455	1.455	1.487
OD Sebenarnya	1.41	1.16	1.576	1.25	1.78	1.475
N (sel/cm <sup>3</sup> )	6,620,310	5,440,560	7,403,664	5,865,270	8,366,340	6,927,045
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00472	0.00388091	0.00528	0.00418	0.00597	0.00494
pH	7.34	7.37	7.39	7.41	7.43	7.45
$l_b$	64	51	40	40	30	30
$l_b$ (lx)	0.048	0.045	0.04	0.037	0.035	0.028
OD Filtrat			2.352			1.92
X Filtrat (g/dm <sup>3</sup> )			0.74509			0.82639

$\mu_x$	-0.0015	0.000142212	0.0013	-0.0007	0.00039	0.001
Jam	<b>148</b>	<b>152</b>	<b>156</b>	<b>160</b>	<b>164</b>	<b>168</b>
OD Terbaca	1.526	1.581	1.598	1.627	1.673	1.59
OD Sebenarnya	1.38	1.41	1.455	1.54	1.64	1.638
N (sel/cm <sup>3</sup> )	6,478,740	6,620,310	6,832,665	7,233,780	7,705,680	7,696,242
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00462	0.00472246	0.00487	0.00516	0.0055	0.00549
pH	7.47	7.48	7.49	7.49	7.50	7.50
$l_b$	30	30	20	20	20	20
$l_b$ (lx)	0.028	0.025	0.023	0.022	0.021	0.019
OD Filtrat			2.052			2.135
X Filtrat (g/dm <sup>3</sup> )			0.91431			1.00685

$\mu_x$	-0.0002	0.000453646	0.00047	-0.0009	0.00012	0.00079
Jam	<b>172</b>	<b>176</b>	<b>180</b>	<b>184</b>	<b>188</b>	<b>192</b>
OD Terbaca	1.615	1.623	1.719	1.552	1.682	1.728
OD Sebenarnya	1.884	2.04	1.89	1.896	1.938	1.896
N (sel/cm <sup>3</sup> )	8,857,116	9,593,280	8,885,430	8,913,744	9,111,942	8,913,744
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00632	0.006843166	0.00634	0.00636	0.0065	0.00636
pH	7.49	7.48	7.47	7.46	7.44	7.42
$l_b$	10	10	10	10	10	10

I <sub>b</sub> (Ix)	0.017	0.014	0.012	0.017	0.017	0.017
OD Filtrat			2.45			1.946
X Filtrat (g/dm <sup>3</sup> )			1.11434			1.20068

μ <sub>x</sub>	-0.0008	-0.000047
Jam	<b>196</b>	<b>200</b>
OD Terbaca	1.51	1.47
OD Sebenarnya	1.926	1.908
N (sel/cm <sup>3</sup> )	9,055,314	8,970,372
X (g/dm <sup>3</sup> )	0.00646	0.006398828
pH	7.39	7.36
I <sub>b</sub>	10	10
I <sub>b</sub> (Ix)	0.017	0.017

**Keterangan :**

1. Satuan I<sub>back</sub> dalam Klux.
2. Data OD medium diambil setiap 4 jam sekali sedangkan OD filtrat setiap 12 jam sekali.

**LAMPIRAN D**  
**PENGOLAHAN DATA OD<sub>600</sub>**

**D.1. Pengolahan Data N<sub>sel</sub> dan X**

Seperti telah dijelaskan pada bab sebelumnya, nilai dari OD<sub>sel</sub> digunakan untuk menentukan nilai N<sub>sel</sub> dan X. Perhitungan dilakukan dengan menghubungkan nilai OD<sub>600</sub> yang didapat dari hasil pengamatan dengan kurva kalibrasi OD<sub>600</sub> vs N<sub>sel</sub> dan OD<sub>600</sub> vs X yang terdapat pada Lampiran A.

Contoh perhitungan : Nilai N<sub>sel</sub> dan X untuk reaktor dengan pencahayaan kontinyu pada jam ke-1 dimana OD<sub>600</sub> = 0.287 dapat diketahui dengan memasukkan nilai OD pada persamaan kurva kalibrasi, yaitu sebagai berikut :

Nilai N sel :

$$\begin{aligned} N \text{ sel} &= -33480 + (4.719 \times 10^6 \times OD) \\ &= -33840 + (4.719 \times 10^6 \times 0.287) \\ &= 1,320,873 \text{ sel/cm}^3 \end{aligned}$$

Nilai X (berat kering)

$$\begin{aligned} X &= (-2.3882 \times 10^{-5}) + (0.0033662 \times OD) \\ &= (-2.3882 \times 10^{-5}) + (0.0033662 \times 0.287) \\ &= 0.00094 \text{ gr/L} \end{aligned}$$

Contoh perhitungan data filtrat : Nilai X untuk filtrat pada jam ke-12 dimana OD = 0.383 dengan pengenceran 8 x adalah sebagai berikut :

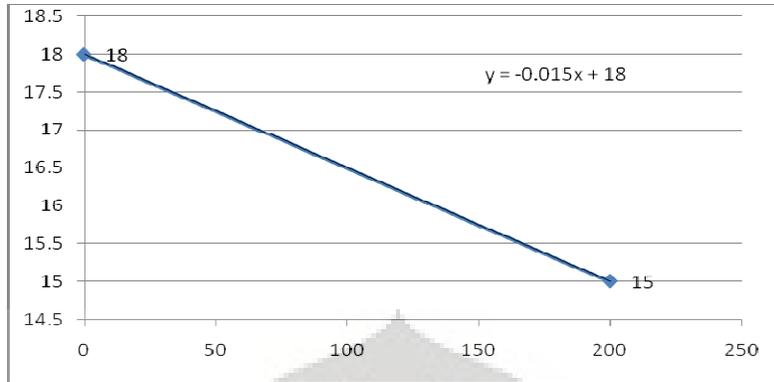
$$\begin{aligned} X &= (-2.3882 \times 10^{-5}) + (0.0033662 \times OD \times \text{pengenceran}) \\ &= (-2.3882 \times 10^{-5}) + (0.0033662 \times 0.383 \times 8) \\ &= 10.29 \text{ mg/L filtrat} \end{aligned}$$

Untuk melihat berat kering filtrat per liter volume reaktor, dilakukan perhitungan sebagai berikut :

$$10.29 \text{ gr/L filtrat} \times \text{volume filtrat} = 10.29 \times 0.2 \text{ L} = 2.058 \text{ gr}$$

$$\text{Maka berat kering filtrat pada volume reaktor} = 2.058 \text{ gr} / 17.82 \text{ L} = 0.11549 \text{ gr/L}$$

Volume sebesar 17.82 L karena volume terus berkurang seiring dengan bertambahnya waktu, dan pengurangan dianggap konstan hingga tersisa 15 L pada akhir masa kultivasi sehingga pengurangan sesuai dengan persamaan garis lurus sebagai berikut :



Jika disimpulkan, maka pengurangan volume reaktor dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Jam	Volume	Jam	Volume
0	18	108	16.38
12	17.82	120	16.2
24	17.64	132	16.02
36	17.46	144	15.84
48	17.28	156	15.66
60	17.1	168	15.48
72	16.92	180	15.3
84	16.74	192	15.12
96	16.56	200	15

## D.2. Hasil Pengolahan Data $N_{sel}$ dan X

Tabel-tabel di bawah ini merupakan hasil pengolahan data untuk kedua reaktor.

### D.2.1. Reaktor dengan Filtrasi

No	Jam	OD	X (mg/dm <sup>3</sup> )	N sel (sel/cm <sup>3</sup> )	No	Jam	OD	X (mg/dm <sup>3</sup> )	N sel (sel/cm <sup>3</sup> )
1	0	0.287	0.942217	1,320,873	26	104	0.948	3.167276	4,440,132
2	4	0.295	0.969147	1,358,625	27	108	0.978	3.827581	4,581,702
3	8	0.303	0.996077	1,396,377	28	112	0.987	3.298557	4,624,173
4	12	0.314	1.148595	1,448,286	29	116	1.011	3.379346	4,737,429
5	20	0.452	1.497640	2,099,508	30	120	1.91	7.052105	8,979,810
6	24	0.39	1.459343	1,806,930	31	124	1.41	4.722460	6,620,310
7	28	0.504	1.672683	2,344,896	32	128	1.16	3.880910	5,440,560
8	32	0.54	1.793866	2,514,780	33	132	1.576	6.026339	7,403,664
9	36	0.53	1.996042	2,467,590	34	136	1.25	4.183868	5,865,270
10	40	0.554	1.840993	2,580,846	35	140	1.78	5.967954	8,366,340
11	44	0.566	1.881387	2,637,474	36	144	1.475	5.767656	6,927,045
12	48	0.602	2.286443	2,807,358	37	148	1.38	4.621474	6,478,740
13	52	0.666	2.218007	3,109,374	38	152	1.41	4.722460	6,620,310
14	56	0.682	2.271866	3,184,878	39	156	1.455	5.788245	6,832,665
15	60	0.706	2.701997	3,298,134	40	160	1.54	5.160066	7,233,780
16	64	0.742	2.473838	3,468,018	41	164	1.64	5.496686	7,705,680

17	68	0.711	2.369486	3,321,729	42	168	1.638	6.496804	7,696,242
18	72	0.876	3.316305	4,100,364	43	172	1.884	6.318039	8,857,116
19	76	0.855	2.854219	4,001,265	44	176	2.04	6.843166	9,593,280
20	80	0.885	2.955205	4,142,835	45	180	1.89	7.452581	8,885,430
21	84	0.87	3.353414	4,072,050	46	184	1.896	6.358433	8,913,744
22	88	0.798	2.662346	3,732,282	47	188	1.938	6.499814	9,111,942
23	92	1.071	3.581318	5,020,569	48	192	1.896	<b>7.559111</b>	8,913,744
24	96	0.996	3.831744	4,666,644	49	196	1.926	6.459419	9,055,314
25	100	0.879	2.935008	4,114,521	50	200	1.908	6.398828	8,970,372

#### D.2.2. Reaktor tanpa Filtrasi

No	Jam	OD	X (mg/L)	N (sel/cm <sup>3</sup> )	No	Jam	OD	X (mg/L)	N (sel/cm <sup>3</sup> )
1	0	0.285	0.935485	1,311,435	39	152	1.304	4.365643	6,120,096
2	4	0.364	1.201415	1,684,236	40	156	1.048	3.503896	4,912,032
3	8	0.44	1.457246	2,042,880	41	160	1.3	4.352178	6,101,220
4	12	0.482	1.598626	2,241,078	42	164	1.352	4.52722	6,346,608
5	16	0.454	1.504373	2,108,946	43	168	1.316	4.406037	6,176,724
6	20	0.55	1.827528	2,561,970	44	172	1.324	4.432967	6,214,476
7	24	0.586	1.948711	2,731,854	45	176	1.316	4.406037	6,176,724
8	28	0.632	2.103556	2,948,928	46	180	1.324	4.432967	6,214,476
9	32	0.634	2.110289	2,958,366	47	184	1.512	5.065812	7,101,648
10	36	0.67	2.231472	3,128,250	48	188	1.17	3.914572	5,487,750
11	40	0.684	2.278599	3,194,316	49	192	1.28	4.284854	6,006,840
12	44	0.678	2.258402	3,166,002	50	196	1.355	4.537319	6,360,765
13	48	0.706	2.352655	3,298,134	51	200	1.44	4.823446	6,761,880
14	52	0.612	2.036232	2,854,548	52	204	1.905	6.388729	8,956,215
15	56	0.816	2.722937	3,817,224	53	208	1.27	4.251192	5,959,650
16	60	0.789	2.63205	3,689,811	54	212	1.505	5.042249	7,068,615
17	64	0.69	2.298796	3,222,630	55	216	1.545	5.176897	7,257,375
18	68	0.756	2.520965	3,534,084	56	220	1.695	5.681827	7,965,225
19	72	0.81	2.70274	3,788,910	57	224	1.788	5.994884	8,404,092
20	76	0.903	3.015797	4,227,777	58	228	1.776	5.954489	8,347,464
21	80	0.936	3.126881	4,383,504	59	232	1.476	4.944629	6,931,764
22	84	0.957	3.197571	4,482,603	60	236	2.07	6.944152	9,734,850
23	88	0.87	2.904712	4,072,050	61	240	1.908	6.398828	8,970,372
24	92	0.873	2.914811	4,086,207	62	244	2.178	<b>7.307702</b>	10,244,502
25	96	0.894	2.985501	4,185,306	63	248	1.368	4.58108	6,422,112
26	100	0.936	3.126881	4,383,504	64	252	2.04	6.843166	9,593,280
27	104	0.909	3.035994	4,256,091	65	256	2.106	7.065335	9,904,734
28	108	0.945	3.157177	4,425,975	66	260	2.16	7.24711	10,159,560
29	112	1.056	3.530825	4,949,784	67	264	2.166	7.267307	10,187,874
30	116	1.083	3.621713	5,077,197	68	268	2.112	7.085532	9,933,048
31	120	1.107	3.702501	5,190,453	69	272	2.154	7.226913	10,131,246
32	124	1.372	4.594544	6,440,988	70	276	1.992	6.681588	9,366,768
33	128	1.172	3.921304	5,497,188	71	280	1.896	6.358433	8,913,744
34	132	1.2	4.015558	5,629,320	72	284	1.446	4.843643	6,790,194
35	136	1.212	4.055952	5,685,948	73	288	1.704	5.712123	8,007,696

<b>36</b>	140	1.208	4.042488	5,667,072	<b>74</b>	292	1.812	6.075672	8,517,348
<b>37</b>	144	1.22	4.082882	5,723,700	<b>75</b>	296	1.956	6.560405	9,196,884
<b>38</b>	148	1.428	4.783052	6,705,252	<b>76</b>	300	1.98	6.641194	9,310,140

### D.2.3. Filtrat

Jam	X' Filtrat	Nsel' Filtrat	Jam	X' Filtrat	Nsel' Filtrat
12	0.11549	19,909	108	0.559319	154,363
24	0.170407	32,424	120	0.646545	174,398
36	0.235838	47,392	132	0.745090	193,775
48	0.283872	63,936	144	0.826393	212,419
60	0.349342	81,979	156	0.914306	232,603
72	0.391396	96,421	168	1.006851	250,766
84	0.448702	116,205	180	1.114345	271,919
96	0.502891	134,893	192	1.200677	288,829

### D.3. Penurunan Persamaan Laju Pertumbuhan Spesifik ( $\mu$ )

Berdasarkan persamaan Monod, dapat diturunkan persamaan sebagai berikut :

$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} \rightarrow \mu \cdot dt = \frac{1}{X} \cdot dX \rightarrow \int_{t_1}^{t_2} \mu \cdot dt = \int_{X_1}^{X_2} \frac{1}{X} \cdot dX$$

$$\mu \cdot (t_2 - t_1) = \ln X_2 - \ln X_1$$

$$\mu = \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{t_2 - t_1}$$

### D.4. Hasil Pengolahan Data $\mu$

Tabel-tabel di bawah ini merupakan hasil pengolahan data  $\mu$  untuk kedua reaktor.

#### D.4.1. Reaktor dengan Filtrasi

Jam	$\mu$ (/jam)	Jam	$\mu$ (/jam)
0	0.000000	104	0.000732
4	0.060450	108	0.001753
8	0.003426	112	-0.001328
12	0.011873	116	0.000209
20	0.013268	120	0.006130
24	-0.001079	124	-0.003234
28	0.004873	128	-0.001533
32	0.002186	132	0.003334
36	0.002966	136	-0.002683
40	-0.002022	140	0.002537
44	0.000493	144	-0.000237
48	0.004062	148	-0.001497
52	-0.000584	152	0.000142

<b>56</b>	0.000428	<b>156</b>	0.001304
<b>60</b>	0.002890	<b>160</b>	-0.000718
<b>64</b>	-0.001378	<b>164</b>	0.000385
<b>68</b>	-0.000634	<b>168</b>	0.000995
<b>72</b>	0.004669	<b>172</b>	-0.000162
<b>76</b>	-0.001974	<b>176</b>	0.000454
<b>80</b>	0.000435	<b>180</b>	0.000474
<b>84</b>	0.001505	<b>184</b>	-0.000863
<b>88</b>	-0.002622	<b>188</b>	0.000117
<b>92</b>	0.003223	<b>192</b>	0.000786
<b>96</b>	0.000704	<b>196</b>	-0.000802
<b>100</b>	-0.002666	<b>200</b>	-0.000047

#### D.4.2. Reaktor tanpa Filtrasi

Jam	$\mu x$ (/jam)	Jam	$\mu x$ (/jam)
<b>0</b>	0.000000	<b>152</b>	-0.000601
<b>4</b>	0.062548	<b>156</b>	-0.001410
<b>8</b>	0.024131	<b>160</b>	0.001355
<b>12</b>	0.007716	<b>164</b>	0.000240
<b>16</b>	-0.003798	<b>168</b>	-0.000162
<b>20</b>	0.009729	<b>172</b>	0.000035
<b>24</b>	0.002675	<b>176</b>	-0.000035
<b>28</b>	0.002731	<b>180</b>	0.000034
<b>32</b>	0.000100	<b>184</b>	0.000725
<b>36</b>	0.001551	<b>188</b>	-0.001371
<b>40</b>	0.000522	<b>192</b>	0.000471
<b>44</b>	-0.000202	<b>196</b>	0.000292
<b>48</b>	0.000852	<b>200</b>	0.000306
<b>52</b>	-0.002778	<b>204</b>	0.001378
<b>56</b>	0.005189	<b>208</b>	-0.001958
<b>60</b>	-0.000566	<b>212</b>	0.000805
<b>64</b>	-0.002115	<b>216</b>	0.000122
<b>68</b>	0.001357	<b>220</b>	0.000423
<b>72</b>	0.000967	<b>224</b>	0.000239
<b>76</b>	0.001442	<b>228</b>	-0.000030
<b>80</b>	0.000452	<b>232</b>	-0.000801
<b>84</b>	0.000266	<b>236</b>	0.001439
<b>88</b>	-0.001092	<b>240</b>	-0.000341
<b>92</b>	0.000038	<b>244</b>	0.000544
<b>96</b>	0.000250	<b>248</b>	-0.001883
<b>100</b>	0.000463	<b>252</b>	0.001593
<b>104</b>	-0.000284	<b>256</b>	0.000125
<b>108</b>	0.000362	<b>260</b>	0.000098
<b>112</b>	0.000999	<b>264</b>	0.000011
<b>116</b>	0.000219	<b>268</b>	-0.000095
<b>120</b>	0.000184	<b>272</b>	0.000073
<b>124</b>	0.001741	<b>276</b>	-0.000284

<b>128</b>	-0.001238	<b>280</b>	-0.000177
<b>132</b>	0.000180	<b>284</b>	-0.000958
<b>136</b>	0.000074	<b>288</b>	0.000573
<b>140</b>	-0.000024	<b>292</b>	0.000211
<b>144</b>	0.000069	<b>296</b>	0.000259
<b>148</b>	0.001069	<b>300</b>	0.000041



**LAMPIRAN E**  
**PENGOLAHAN DATA pH**

**E.1. Contoh Pengolahan Data**

Seperti telah dituliskan pada bab sebelumnya, nilai pH hasil pengamatan digunakan untuk menentukan  $[HCO_3^-]$  dengan menggunakan persamaan :

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

dengan nilai :

$P_T$ (ambient pressure)	= 1 atm = 101.25 kPa
$Y_{CO_2}$	= 5 % = 0.05
$K_{CO_2,0}$	= $4.38 \times 10^{-7}$
$H_{CO_2,0}$	= 2900 kPa.kg/mol
$T$ (ambient temperature)	= 29°C = 302 K
$T_0$	= 298.15 K
$A_k = 40.557$ $B_k = -36.782$ $C_k = 0$	
$A_h = 22.771$ $B_h = -11.452$ $C_h = -3.117$	
Satuan $[HCO_3^-]$	= M

Contoh : Untuk reaktor dengan filtrasi pada jam ke-0, nilai pH yang terukur adalah 7.91. Dengan memasukkan nilai tersebut ke dalam persamaan maka akan didapatkan :

$$[HCO_3^-] = \left[ \frac{4.38 \times 10^{-7}}{2900} \right] \left[ \frac{0.05}{10^{-7.91}} \right] \left[ \frac{\text{EXP} \left( 40.557 \left[ 1 - \frac{298.15}{302} \right] - 36.782 \ln \left[ \frac{302}{298.15} \right] + 0 \right)}{\text{EXP} \left( 22.771 \left[ 1 - \frac{298.15}{302} \right] - 11.452 \ln \left[ \frac{302}{298.15} \right] - 3.117 \left[ \frac{302}{298.15} - 1 \right] \right)} \right]$$

$$[HCO_3^-] = 0.05865 \text{ M}$$

**E.2. Hasil Pengolahan Data**

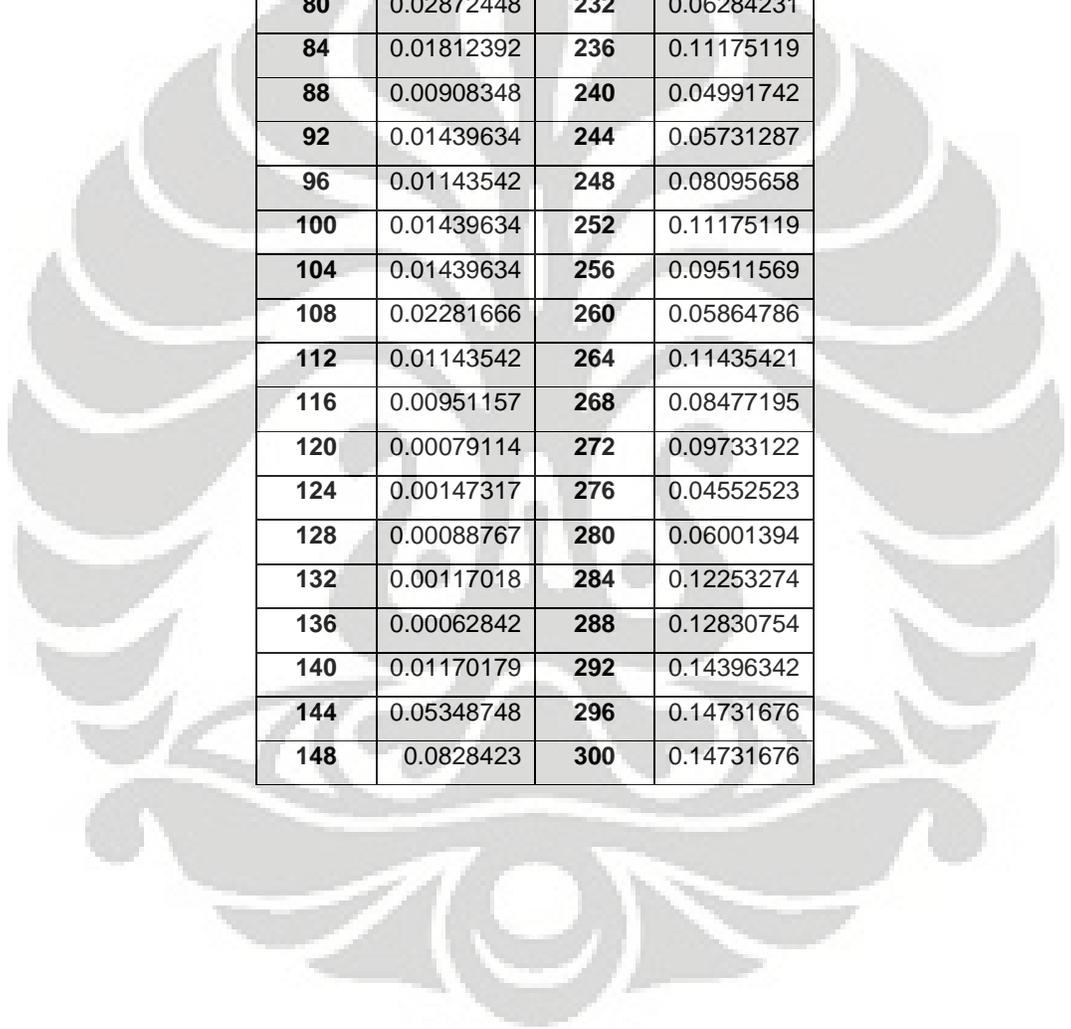
Tabel-tabel di bawah ini merupakan hasil pengolahan data  $[HCO_3^-]$  untuk kedua reaktor.

### E.2.1. Reaktor dengan Filtrasi

Jam	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	Jam	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]
0	0.058648	104	0.020809
4	0.061412	108	0.045525
8	0.068905	112	0.045525
12	0.065804	116	0.045525
20	0.001653	120	0.010429
24	0.001473	124	0.014396
28	0.001543	128	0.012253
32	0.001473	132	0.031496
36	0.001615	136	0.033748
40	0.002081	140	0.036162
44	0.001987	144	0.004152
48	0.002389	148	0.013130
52	0.003008	152	0.030779
56	0.003223	156	0.041520
60	0.003616	160	0.020809
64	0.003534	164	0.028071
68	0.006431	168	0.005227
72	0.012831	172	0.018978
76	0.016914	176	0.028724
80	0.003700	180	0.012253
84	0.004659	184	0.022297
88	0.001375	188	0.030078
92	0.003875	192	0.014396
96	0.003078	196	0.028724
100	0.003223	200	0.018124

### E.2.2. Reaktor tanpa Filtrasi

Jam	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (M)	Jam	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (M)
0	0.00039651	152	0.11701786
4	0.00054733	156	0.14731676
8	0.00068905	160	0.00185461
12	0.00122533	164	0.00287245
16	0.00062842	168	0.00181239
20	0.00054733	172	0.00228167
24	0.02743166	176	0.0036162
28	0.08876713	180	0.00573129
32	0.21789746	184	0.0415195
36	0.1253869	188	0.00908348
40	0.04658565	192	0.00228167



<b>44</b>	0.15425959	<b>196</b>	0.0023892
<b>48</b>	0.06141185	<b>200</b>	0.00222973
<b>52</b>	0.07215263	<b>204</b>	0.00064306
<b>56</b>	0.02872448	<b>208</b>	0.00073833
<b>60</b>	0.03374832	<b>212</b>	0.01019183
<b>64</b>	0.04448895	<b>216</b>	0.15074821
<b>68</b>	0.02872448	<b>220</b>	0.09959835
<b>72</b>	0.03077883	<b>224</b>	0.08674654
<b>76</b>	0.0370043	<b>228</b>	0.04767077
<b>80</b>	0.02872448	<b>232</b>	0.06284231
<b>84</b>	0.01812392	<b>236</b>	0.11175119
<b>88</b>	0.00908348	<b>240</b>	0.04991742
<b>92</b>	0.01439634	<b>244</b>	0.05731287
<b>96</b>	0.01143542	<b>248</b>	0.08095658
<b>100</b>	0.01439634	<b>252</b>	0.11175119
<b>104</b>	0.01439634	<b>256</b>	0.09511569
<b>108</b>	0.02281666	<b>260</b>	0.05864786
<b>112</b>	0.01143542	<b>264</b>	0.11435421
<b>116</b>	0.00951157	<b>268</b>	0.08477195
<b>120</b>	0.00079114	<b>272</b>	0.09733122
<b>124</b>	0.00147317	<b>276</b>	0.04552523
<b>128</b>	0.00088767	<b>280</b>	0.06001394
<b>132</b>	0.00117018	<b>284</b>	0.12253274
<b>136</b>	0.00062842	<b>288</b>	0.12830754
<b>140</b>	0.01170179	<b>292</b>	0.14396342
<b>144</b>	0.05348748	<b>296</b>	0.14731676
<b>148</b>	0.0828423	<b>300</b>	0.14731676

**LAMPIRAN F**  
**PENGOLAHAN DATA I**

Data intensitas cahaya digunakan untuk menentukan efisiensi produksi biomassa dari kultivasi dengan menggunakan persamaan :

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

$$\text{dimana } E_x = \frac{\int_0^1 I_t dt}{\Delta X \cdot s} \text{ dan } E = \frac{\int_0^1 (I_i - I_t) dt}{\Delta X \cdot s}$$

dengan  $I_i = I_0 \cdot \alpha_{kaca}$        $\alpha_{kaca} = 0.758$   
 $I_t = I_b / \alpha_{kaca}$        $s = 10 \text{ cm} = 0.1 \text{ m}$

**F.1. Hasil Pengolahan Data**

Tabel-tabel di bawah ini merupakan hasil pengolahan data I untuk kedua reaktor.

**F.1.1. Reaktor dengan Filtrasi**

Jam	I <sub>0</sub> (lux)	I back (lux)	I <sub>i</sub> (lux)	I <sub>t</sub> (lux)	Ex (J/gr)	E (J/gr)
0	5000	670	3788.237	884.316284	0	0
4	5000	670	3788.237	884.316284	14.90705	48.9518127
8	5000	650	3788.237	857.918783	28.92412	98.7935982
12	5000	540	3788.237	712.732528	36.0439	155.532674
20	5000	443	3788.237	584.704648	49.28225	270.012044
24	5000	430	3788.237	567.546272	57.40325	325.7499
28	5000	370	3788.237	488.353769	57.62574	389.386265
32	5000	340	3788.237	448.757518	60.51816	450.352712
36	5000	290	3788.237	382.763765	58.07073	516.658996
40	5000	210	3788.237	277.173761	46.72358	591.865009
44	5000	200	3788.237	263.97501	48.94851	653.498936
48	5000	180	3788.237	237.577509	48.05854	718.247767
52	5000	150	3788.237	197.981258	43.38618	786.778983
56	5000	110	3788.237	145.186256	34.26396	859.760064
60	5000	90	3788.237	118.788755	30.03659	927.846294
64	5000	80	3788.237	105.590004	28.47913	993.262605
68	5000	80	3788.237	105.590004	30.25908	1055.34152
72	5000	80	3788.237	105.590004	32.03902	1117.42043
76	5000	70	3788.237	92.3912536	29.5916	1183.72671
80	5000	70	3788.237	92.3912536	31.14905	1246.02812
84	5000	70	3788.237	92.3912536	32.7065	1308.32953

88	5000	68	3788.237	89.7515035	33.28499	1371.6099
92	5000	68	3788.237	89.7515035	34.79794	1433.95581
96	5000	68	3788.237	89.7515035	36.31089	1496.30171
100	5000	65	3788.237	85.7918783	36.15515	1560.31632
104	5000	54	3788.237	71.2732528	31.23805	1629.09228
108	5000	52	3788.237	68.6335027	31.23805	1692.95113
112	5000	48	3788.237	63.3540025	29.90309	1758.14495
116	5000	48	3788.237	63.3540025	30.97106	1820.93584
120	5000	48	3788.237	63.3540025	32.03902	1883.72673
124	5000	48	3788.237	63.3540025	33.10699	1946.51763
128	5000	45	3788.237	59.3943773	32.03902	2011.44445
132	5000	40	3788.237	52.7950021	29.36911	2077.97323
136	5000	37	3788.237	48.8353769	27.98965	2143.21155
140	5000	35	3788.237	46.1956268	27.25542	2207.80463
144	5000	28	3788.237	36.9565014	22.42732	2276.49159
148	5000	28	3788.237	36.9565014	23.0503	2339.72747
152	5000	25	3788.237	32.9968763	21.13686	2405.49977
156	5000	23	3788.237	30.3571262	19.95764	2470.53784
160	5000	22	3788.237	29.0372511	19.5794	2534.77494
164	5000	21	3788.237	27.7173761	19.15667	2599.05654
168	5000	19	3788.237	25.077626	17.75496	2664.3171
172	5000	17	3788.237	22.4378759	16.26425	2729.66667
176	5000	14	3788.237	18.4782507	13.70558	2796.0842
180	5000	12	3788.237	15.8385006	12.01463	2861.634
184	5000	12	3788.237	15.8385006	12.28163	2925.22587
188	5000	11	3788.237	14.5186256	11.5029	2989.86345
192	5000	10	3788.237	13.1987505	10.67967	3054.54554
196	5000	10	3788.237	13.1987505	10.90217	3118.1819
200	5000	9	3788.237	11.8788755	10.0122	3182.93074

**Jumlah      1484.542      79680.07**

#### F.1.2. Reaktor tanpa Filtrasi

Jam	Io (lux)	Ib (lux)	li (lux)	It (lux)	Ex (J/gr)	E (J/gr)
0	5000	960	3788.237	1267.08	0	0
4	5000	830	3788.237	1095.496	55.40081	136.1758
8	5000	720	3788.237	950.31	64.07805	191.3574
12	5000	610	3788.237	805.1238	67.86043	251.4339
16	5000	470	3788.237	620.3413	62.74309	320.4101
20	5000	390	3788.237	514.7513	60.74065	386.2714
24	5000	360	3788.237	475.155	64.07805	446.7928
28	5000	330	3788.237	435.5588	66.08049	508.6492
32	5000	260	3788.237	343.1675	57.84824	580.7403
36	5000	230	3788.237	303.5713	56.29079	646.1567
40	5000	180	3788.237	237.5775	48.05854	718.2478
44	5000	160	3788.237	211.18	46.27859	783.8866
48	5000	150	3788.237	197.9813	46.72358	847.3004
52	5000	150	3788.237	197.9813	50.06098	907.8219

56	5000	110	3788.237	145.1863	39.15881	982.5829
60	5000	70	3788.237	92.39125	26.47669	1059.124
64	5000	50	3788.237	65.99375	20.02439	1129.435
68	5000	30	3788.237	39.59625	12.68211	1200.636
72	5000	20	3788.237	26.3975	8.899729	1268.277
76	5000	12	3788.237	15.8385	5.606829	1335.429
80	5000	12	3788.237	15.8385	5.873821	1399.021
84	5000	12	3788.237	15.8385	6.140813	1462.613
88	5000	12	3788.237	15.8385	6.407805	1526.205
92	5000	12	3788.237	15.8385	6.674797	1589.797
96	5000	12	3788.237	15.8385	6.941789	1653.389
100	5000	12	3788.237	15.8385	7.20878	1716.98
104	5000	12	3788.237	15.8385	7.475772	1780.572
108	5000	12	3788.237	15.8385	7.742764	1844.164
112	5000	12	3788.237	15.8385	8.009756	1907.756
116	5000	12	3788.237	15.8385	8.276748	1971.348
120	5000	12	3788.237	15.8385	8.54374	2034.94
124	5000	11	3788.237	14.51863	8.076504	2099.266
128	5000	10	3788.237	13.19875	7.56477	2163.636
132	5000	10	3788.237	13.19875	7.787263	2227.273
136	5000	10	3788.237	13.19875	8.009756	2290.909
140	5000	10	3788.237	13.19875	8.232249	2354.546
144	5000	10	3788.237	13.19875	8.454742	2418.182
148	5000	9	3788.237	11.87888	7.809512	2482.686
152	5000	7	3788.237	9.239125	6.22981	2548.125
156	5000	6	3788.237	7.91925	5.473333	2612.74
160	5000	4	3788.237	5.2795	3.737886	2678.334
164	5000	4	3788.237	5.2795	3.826883	2742.104
168	5000	3	3788.237	3.959625	2.936911	2806.853
172	5000	2	3788.237	2.63975	2.002439	2871.646
176	5000	2	3788.237	2.63975	2.046938	2935.461
180	5000	2	3788.237	2.63975	2.091436	2999.275
184	5000	1	3788.237	1.319875	1.067967	3064.157
188	5000	1	3788.237	1.319875	1.090217	3127.994
192	5000	1	3788.237	1.319875	1.112466	3191.83
196	5000	1	3788.237	1.319875	1.134715	3255.667
200	5000	1	3788.237	1.319875	1.156965	3319.504
204	5000	0	3788.237	0	0	3384.52
208	5000	0	3788.237	0	0	3448.378
212	5000	0	3788.237	0	0	3512.237
216	5000	0	3788.237	0	0	3576.096
220	5000	0	3788.237	0	0	3639.955
224	5000	0	3788.237	0	0	3703.814
228	5000	0	3788.237	0	0	3767.673
232	5000	0	3788.237	0	0	3831.532
236	5000	0	3788.237	0	0	3895.39
240	5000	0	3788.237	0	0	3959.249
244	5000	0	3788.237	0	0	4023.108
248	5000	0	3788.237	0	0	4086.967

252	5000	0	3788.237	0	0	4150.826
256	5000	0	3788.237	0	0	4086.967
260	5000	0	3788.237	0	0	4150.8258
264	5000	0	3788.237	0	0	4214.6847
268	5000	0	3788.237	0	0	4278.5435
272	5000	0	3788.237	0	0	4342.4024
276	5000	0	3788.237	0	0	4406.2612
280	5000	0	3788.237	0	0	4470.1201
284	5000	0	3788.237	0	0	4533.979
288	5000	0	3788.237	0	0	4597.8378
292	5000	0	3788.237	0	0	4661.6967
296	5000	0	3788.237	0	0	4725.5555
300	5000	0	3788.237	0	0	4789.4144

**Jumlah      1095.8681    135881.38**

Nilai efisiensi produksi biomassa untuk masing-masing reaktor adalah :

**1. Reaktor dengan Filtrasi**

$$\eta_{bp} = \frac{1484.542}{79680.07} \times 100\% = 1.86\%$$

**2. Reaktor tanpa Filtrasi :**

$$\eta_{bp} = \frac{1095.8681}{135881.38} \times 100\% = 0.81\%$$