



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**OPTIMASI PENGATURAN WAKTU FILTRASI DALAM  
MENINGKATKAN PRODUKSI BIOMASSA DAN BIOFIKSASI CO<sub>2</sub>  
OLEH *CHLORELLA VULGARIS* MELALUI PERLAKUAN KONTINU  
PADA FOTOBIOREAKTOR**

**SKRIPSI**

**PONCO WIDODO  
0606076702**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**OPTIMASI PENGATURAN WAKTU FILTRASI DALAM  
MENINGKATKAN PRODUKSI BIOMASSA DAN BIOFIKSASI CO<sub>2</sub>  
OLEH *CHLORELLA VULGARIS* MELALUI PERLAKUAN KONTINU  
PADA FOTOBIOREAKTOR**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**PONCO WIDODO  
0606076702**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2010**

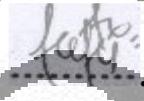
## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Ponco Widodo**

**NPM : 0606076702**

**Tanda Tangan**

  
: .....

**Tanggal : 5 Juli 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Ponco Widodo

NPM : 0606076702

Program Studi : Teknik Kimia

Judul Skripsi : Optimasi Pengaturan Waktu Filtrasi Dalam Meningkatkan  
Produksi dan Biofiksasi CO<sub>2</sub> Oleh *Chlorella vulgaris* Melalui  
Perlakuan Kontinu Pada Fotobioreaktor

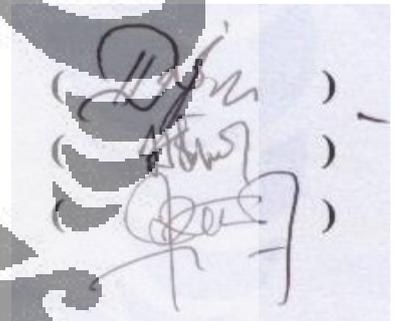
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Dianursanti, MT

Penguji I : Dr. Ir. Heri Hermansyah, M.Eng

Penguji II : Ir. Rita Arbianti, M.Si



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 5 Juli 2010

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan YME, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi dengan judul Optimasi Pengaturan Waktu Filtrasi Dalam Meningkatkan Produksi Biomassa dan Biofiksasi CO<sub>2</sub> Oleh *Chlorella vulgaris* Melalui Perlakuan Filtrasi Kontinu Pada Fotobioreaktor dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Ibu Ir. Dianursanti, M.T selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- (2) Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA., selaku kepala Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- (3) Bapak Dr. Slamet, MT. selaku pembimbing akademis.
- (4) Orangtua, Mas, Ustadz yang telah memberikan dukungan tanpa henti
- (5) Para laboran, Mbak tiwi, Professor Ijal, Kang Jajat, Mas Eko, Pak Masturo, Mas Taufik, dan para karyawan DTK yang telah memberikan bantuan selama penulis menyelesaikan penelitian dan makalah skripsi
- (6) Keluarga dan teman – teman Teknik Kimia 2006, 2007, atas semangatnya pada waktu mengambil data dan menyelesaikan skripsi ini.

Saya menyadari bahwa makalah skripsi ini masih jauh dari sempurna dengan segala keterbatasan yang ada. Oleh karena itu, semua saran dan kritik yang membangun sangat saya harapkan.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu dan semoga makalah skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu

Depok, 5 Juli 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ponco Widodo  
NPM : 0606076702  
Program Studi : Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**OPTIMASI PENGATURAN WAKTU FILTRASI DALAM  
MENINGKATKAN PRODUKSI BIOMASSA DAN BIOFIKSASI CO<sub>2</sub>  
OLEH *CHLORELLA VULGARIS* MELALUI PERLAKUAN KONTINU  
PADA FOTOBIOREAKTOR**

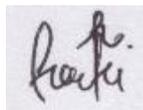
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 5 Juli 2010

Yang Menyatakan



(Ponco Widodo)

## ABSTRAK

Nama : Ponco Widodo  
Program studi : Teknik Kimia  
Judul : Optimasi Pengaturan Waktu Filtrasi Dalam Meningkatkan Produksi Dan Biofiksasi CO<sub>2</sub> Oleh *Chlorella vulgaris* Melalui Perlakuan Kontinu Pada Fotobioreaktor

Pengaturan waktu filtrasi sangat diperlukan untuk mengatasi masalah *self shading* dalam pengembangbiakan *Chlorella vulgaris*. Dengan adanya filtrasi, terjadi pemerataan cahaya dan CO<sub>2</sub> yang diterima oleh sel sehingga proses fotosintesis dapat berjalan optimal. Variasi waktu filtrasi yang dilakukan adalah 2,3 serta 4 jam. Dari hasil penelitian, diperoleh bahwa waktu filtrasi yang tepat dan seimbang antara laju pertumbuhan sel di dalam fotobioreaktor dan laju penyaringan sel dapat meningkatkan produksi biomassa. Produksi biomassa terbesar tertinggi terdapat pada waktu filtrasi 3 jam. Pada sistem filtrasi 3 jam secara kontinu dengan laju alir filtrasi 3 L/menit dapat meningkatkan produksi biomasa 18,58% dibandingkan dengan proses tanpa filtrasi dengan kerapatan yang sama dan mempertahankan laju pertumbuhan sel yang konstan. Perlakuan Filtrasi 3 jam juga menghasilkan fiksasi CO<sub>2</sub> terbesar ( $\Delta\text{CO}_2$  rata-rata 1,36%) dari CO<sub>2</sub> input 5%.

Kata Kunci :  
Filtrasi, *Chlorella vulgaris*, Fotobioreaktor

## ABSTRACT

Name : Ponco Widodo  
Study Program : Chemical Engineering  
Title : Optimization of Time Adjustment in Filtration For Increasing Biomass and Biofixation of CO<sub>2</sub> From *Chlorella vulgaris* with Continu Treatment in Photobioreactor

Filtration time setting is needed to overcome the problem of self-shading in cultivation of *Chlorella vulgaris*. With the filtration, there was even distribution of light and CO<sub>2</sub> are received by the cell so that the process of photosynthesis can run optimally. Variation of filtration time taken is 2.3 and 4 hours. From the research, found that proper filtration time and the balance between cell growth rate in the photobioreactor and cell filtration rate can increase biomass production. Highest largest biomass production there at the time of filtration three hours. In the filtration system 3 hours continuously with a flow rate of filtration of 3 L / min can increase biomass production 18.58% compared with without the filtration process with the same density and maintain cell growth rate constant. Filtration 3-hour treatment also result in the largest CO<sub>2</sub> fixation ( $\Delta$ CO<sub>2</sub> average 1,36%) of 5% CO<sub>2</sub> input.

Keywords:

Filtration, *Chlorella vulgaris*, Photobioreactor

## DAFTAR ISI

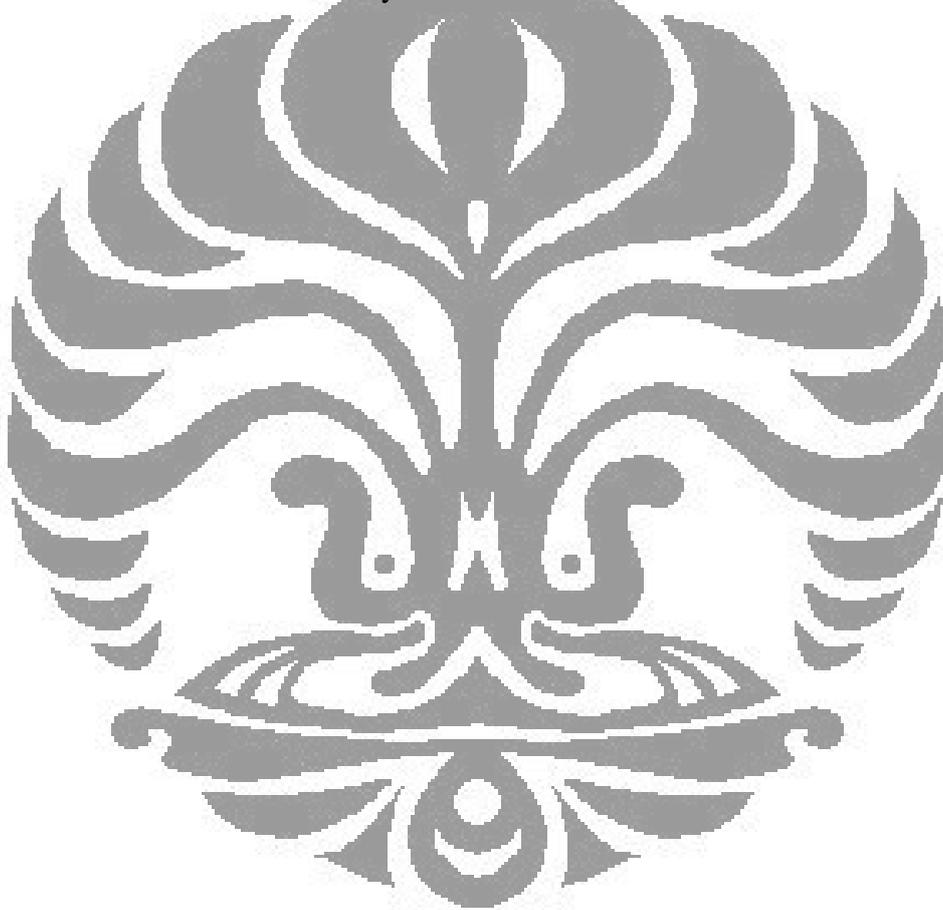
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	<a href="#">iv</a>
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR TABEL .....	x
DAFTAR GAMBAR .....	<a href="#">xi</a>
DAFTAR LAMPIRAN .....	<a href="#">xii</a>
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	6
1.3 Tujuan Penelitian .....	6
1.4 Manfaat Penelitian .....	6
1.5 Batasan Masalah .....	6
1.6 Sistematika Penulisan .....	7
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	8
2.1 Mikroalga <i>Chlorella vulgaris</i> .....	8
2.1.1 Taksonomi <i>Chlorella vulgaris</i> .....	9
2.1.1 Morfologi <i>Chlorella vulgaris</i> .....	9
2.2 Mode Kultur .....	11
2.2.1 Kultur Batch .....	11
2.2.1.1 Fase Lag .....	12
2.2.1.2 Fase Logaritmik .....	12
2.2.1.3 Fase Penurunan Laju Pertumbuhan .....	13
2.2.1.4 Fase Stasioner .....	13
2.2.1.5 Fase Kematian .....	13
2.1.2 Mode Kontinu .....	14

2.1.2 Mode Semikontinu .....	14
2.3 Faktor –Faktor Yang Mempengaruhi Pertumbuhan .....	14
2.4 Kandungan Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> .....	19
2.5 Manfaat Chlorella di Bidang Kesehatan.....	20
2.6 Fotosintesis .....	22
2.6.1 Proses Fotosintesis.....	23
2.6.1.1 Reaksi Terang.....	24
2.6.1.2 Reaksi Gelap .....	26
2.6.1.3 Siklus Calvin .....	26
2.6.1.4 Siklus Hatch Slack.....	28
2.6.2 Fotosintesis <i>Chlorella</i> .....	29
2.6.3 Faktor Yang Mempengaruhi Fotosintesis .....	30
2.6 Sistem Kultivasi Mikroalga .....	31
2.7.1 Kultivasi Sistem Terbuka.....	31
2.7.2 Sistem Kultivasi Teertutup .....	31
2.7.2.1 Karakteristik Fotobioreaktor .....	32
2.7.2.2 Peranan Fotobioreaktor.....	33
2.7.2.3 Jenis Fotobioreaktor .....	34
2.7.2.4 Fotobioreaktor Plat Gelembung .....	36
2.8 Harvesting (Pemanenan) .....	37
2.8.1 Filtrasi .....	37
2.8.2 Sentrifugasi .....	37
2.8.3 Flotasi .....	37
2.8.4 Flokulasi.....	38
2.9 Penelitian Yang Telah Dilakukan .....	38
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>8</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	40
3.2 Alat dan Bahan Penelitian .....	41
3.3 Variabel Penelitian .....	42
3.1.1 Variabel Bebas .....	42
3.1.2 Variabel Terikat.....	42
3.1.3 Variabel Tetap.....	42

3.4	Prosedur Penelitian.....	42
3.4.1	Studi Literatur .....	42
3.4.2	Persiapan Peralatan Medium.....	42
3.4.3	Pembiakan Kultur <i>Chlorella</i> .....	46
3.4.4	Penentuan Kerapatan Biomassa .....	47
3.4.5	Pelaksanaan Kegiatan Penelitian.....	47
3.4.6	Pengambilan Data.....	47
3.4.7	Pengolahan Data Penelitian.....	48
BAB 4	PEMBAHASAN .....	50
4.1	Pembahasan Umum.....	51
4.2	Data Penelitian .....	54
4.2.1	Pengaruh Waktu Filtrasi Terhadap Biomassa .....	54
4.2.2	Pengaruh Waktu Filtrasi Terhadap Laju Pertumbuhan .....	58
4.2.3	Pengaruh Waktu Filtrasi Terhadap [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] .....	61
4.2.3	Pengaruh Waktu Filtrasi Terhadap Fiksasi CO <sub>2</sub> .....	63
4.2.3	Pengaruh Waktu Filtrasi Terhadap q <sub>CO2</sub> .....	66
4.2.3	Pengaruh Waktu Filtrasi Terhadap CTR .....	67
4.2.3	Pengaruh Waktu Filtrasi Terhadap CUR.....	70
BAB 5	KESIMPULAN.....	72
5.1	Kesimpulan .....	72
5.2	Saran.....	72
DAFTAR	PUSTAKA.....	73
LAMPIRAN	.....	76

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1.1 Road Map Penelitian <i>Chlorella</i> .....	4
Tabel 2.1 Taksonomi <i>Chlorella</i> .....	9
Tabel 2. 2 Perbandingan Nutrisi.....	16
Tabel 2.3 Kandungan Biomassa.....	19
Tabel 2.4 Perbandingan antara beberapa sistem kultivasi mikroalga...	35
Tabel 2.5 Penelitian Yang Telah Dilakukan.....	38
Tabel 3.1 Bahan Medium Benceck.....	45
Tabel 3.2 Elemental Ananlysis <i>Chlorella</i> .....	50

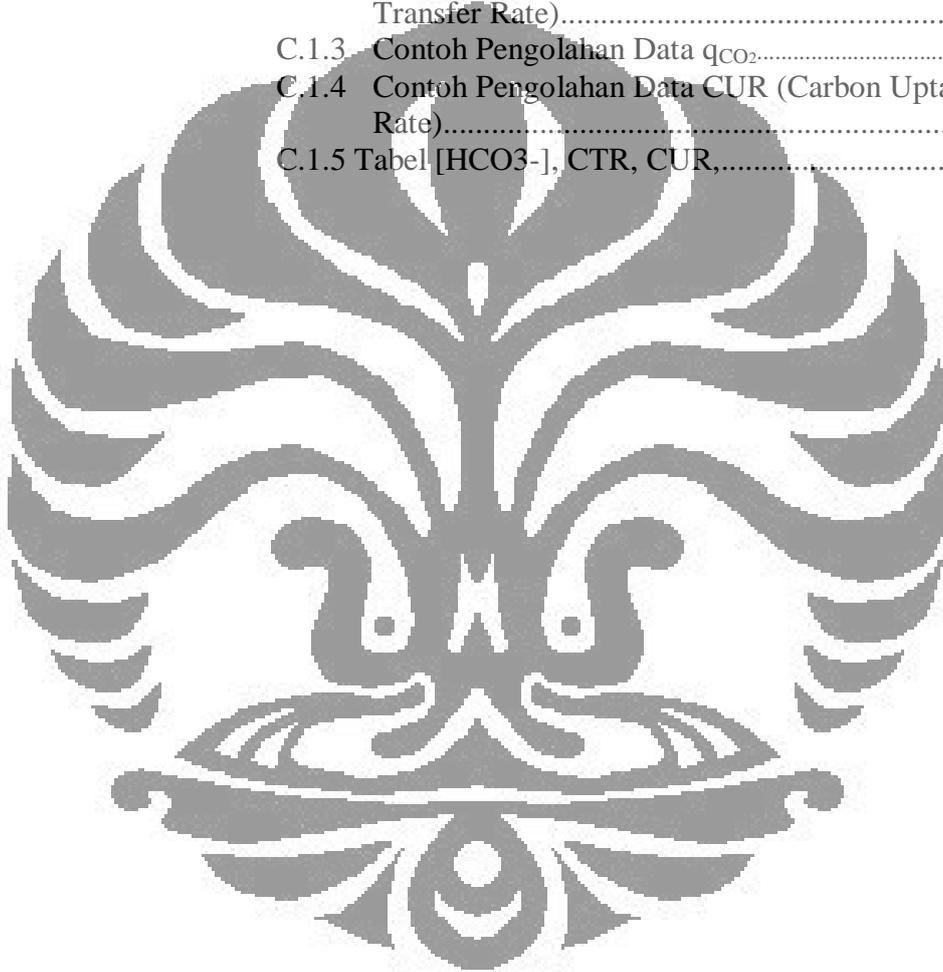


## DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 2.1	Struktur <i>Chlorella</i> .....	9
Gambar 2.2	Struktur Sel <i>Chlorella</i> .....	10
Gambar 2.3	Kurva Pertumbuhan <i>Chlorella</i> .....	13
Gambar 2.4	Reaksi Terang.....	25
Gambar 2.5	Siklus Calvin Benson.....	28
Gambar 2.6	Siklus Hatch Slack.....	29
Gambar 2.7	Fotobioreaktor Terbuka.....	31
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	40
Gambar 3.2	Skema Alat Penelitian.....	44
Gambar 4.1	Berat Kering.....	55
Gambar 4.2	Perbandingan X.....	56
Gambar 4.3	Pengaruh Pengaturan Waktu Filtrasi dan non Filtrasi Terhadap $\mu_x$ .....	60
Gambar 4.4	Pengaruh Pengaturan Filtrasi dan non Filtrasi Terhadap $[HCO_3^-]$ .....	62
Gambar 4.5	Konsentrasi Gas $CO_2$ ( $y_{CO_2}$ ) yang Masuk dan Keluar Reaktor...65	
Gambar 4.6	Pengaruh Pengaturan Waktu Hisap dalam Perlakuan Filtrasi Serta non Filtrasi terhadap Laju Fiksasi Karbondioksida ( $q_{CO_2}$ ) .....67	
Gambar 4.7	Pengaruh Pengaturan Waktu Hisap dalam Perlakuan Filtrasi Serta non Filtrasi Terhadap Carbon Transfer Rate (CTR).....69	
Gambar 4.8	Pengaruh Pengaturan Waktu Hisap dalam Perlakuan Filtrasi Serta non Filtrasi Terhadap Carbon Uptake Rate (CUR).....71	

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A	Data Hasil Penelitian.....76
Lampiran B	Pengolahan Data OD <sub>600</sub> .....81
B.1	Pengolahan Data X dan N Sel Reaktor.....81
B.2	Pengolahan Data X dan N sel Filtrat.....81
Lampiran C	Contoh dan Hasil Perhitungan CTR, CUR, q <sub>CO<sub>2</sub></sub> dan [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ].....83
C.1	Contoh Pengolahan Data.....83
C.1.1	Contoh Pengolahan Data [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ].....83
C.1.2	Contoh Pengolahan Data CTR (Carbondioxide Transfer Rate).....83
C.1.3	Contoh Pengolahan Data q <sub>CO<sub>2</sub></sub> .....83
C.1.4	Contoh Pengolahan Data CUR (Carbon Uptake Rate).....83
C.1.5	Tabel [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ], CTR, CUR,.....84



# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Karbondioksida merupakan gas tidak berwarna yang terdapat pada atmosfer dengan jumlah mencapai 300 ppm dan paling banyak berasal dari pembakaran bahan bakar fosil (Making the World Sustainable Energy Bulletin\_net Peak Oil News Cleatinghouse.htm, Februari 2007). Peningkatan emisi gas rumah kaca ini menyebabkan efek pemanasan global yang ditandai dengan naiknya suhu atmosfer dan iklim yang tidak stabil. Bahkan Pada bulan Juli 2009, permukaan darat dan samudera dunia telah mencapai 0,57°C lebih tinggi di atas suhu rata-rata 16,4 °C (<http://blogs.zdnet.com/green>, Oktober 2009). Hal tersebut 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)-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. Akan tetapi, 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 diperbincangkana 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). Dalam proses fotosintesis, *Chlorella vulgaris* membutuhkan CO<sub>2</sub> sehingga *Chlorella* dapat tumbuh dan berkembang biak secara cepat. Dengan berkembangnya *Chlorella* berarti CO<sub>2</sub> yang difiksasi semakin besar. Kemampuan

inilah yang secara tidak langsung berdampak positif terhadap penurunan efek pemanasan global.

Selain menguntungkan dalam penurunan efek pemanasan global, pertumbuhan *Chlorella vulgaris* juga menghasilkan produksi biomassa dalam jumlah yang besar. Biomassa dari *Chlorella vulgaris* banyak mengandung vitamin, karbohidrat terutama protein sehingga mempunyai potensia Secara komersial untuk dimanfaatkan sebagai suplemen makanan (Surawiria, 2005). Hal ini juga menjawab permasalahan kurangnya asupan gizi bagi masyarakat, khususnya masyarakat perkotaan. Biomassa *Chlorella vulgaris* dapat dibuat menjadi *food supplement* yang dapat memberikan zat nutrisi bagi tubuh manusia.

Mengingat banyaknya manfaat *Chlorella vulgaris* terutama fiksasi CO<sub>2</sub>, perlu dilakukan studi lebih lanjut tentang pembudidayaan mikroalga ini agar didapatkan kemampuan fiksasi yang optimal dan produksi biomassa yang lebih besar. Variabel penting yang perlu diperhatikan dalam adalah pencahayaan. Pencahayaan berperan penting dalam peristiwa fotosintesis mikroalga. Dengan pencahayaan yang optimum, fiksasi dan produksi biomassa menjadi lebih besar. Akan tetapi, efek *self shading* yaitu peristiwa penutupan satu sel lain akibat tidak meratanya cahaya dan CO<sub>2</sub> yang didapatkan oleh alga mempengaruhi proses fotosintesis mikroalga. Di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia telah dilakukan berbagai penelitian yang berkaitan dengan kemampuan fiksasi CO<sub>2</sub> dan produksi biomassa.

Awalnya, peningkatan fiksasi CO<sub>2</sub> dilakukan dengan pencahayaan alterasi pada reaktor kolom gelembung namun pengaruh penambahan cahaya (alterasi) yang melebihi cahaya yang dibutuhkan alga akan merusak kloroplas yang dimiliki sel dan akhirnya mati. Selain itu, pencahayaan alterasi pada peningkatan jumlah sel menyebabkan fiksasi CO<sub>2</sub> ( $q_{CO_2}$ ) oleh *Chlorella vulgaris* Buitenzorg menurun (Paramitha, 2005). Hal ini disebabkan fotobioreaktor bertambah padat dengan adanya peristiwa *self shading* (penutupan cahaya sebagian sel oleh sel yang lain) sehingga cahaya yang diterima hanya pada bagian depan sel saja/tidak seluruh sel menyerap cahaya yang merupakan faktor penting untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dan nutrisi yang diperlukan *Chlorella* semakin habis sehingga kemampuan fiksasi CO<sub>2</sub> yang dibutuhkan untuk proses fotosintesis

menurun. Selain itu penggunaan pencahayaan alterasi membutuhkan energi yang besar. Lalu, penelitian dilakukan dengan menggunakan metode kolom gelembung seri dan menghasilkan kemampuan fiksasi CO<sub>2</sub> yang lebih baik dibandingkan dengan kolom gelembung tunggal. Penggunaan metode reaktor kolom gelembung seri menunjukkan nilai CTR (*Carbon Transfer Rate*) rata-rata pada reaktor seri sebesar 22,1 g/dm<sup>3</sup> jam dan qCO<sub>2</sub> rata-rata sebesar 2,43/jam yang lebih besar daripada kolom gelembung tunggal yang hanya memiliki nilai CTR sebesar 18,4 g/dm<sup>3</sup> jam dan qCO<sub>2</sub> sebesar 1,95/jam (Muryanto, 2006). Akan tetapi, seiring bertambahnya waktu, kemampuan fiksasi CO<sub>2</sub> akan mengalami penurunan disebabkan laju pertumbuhan sel menurun.

Pada penelitian kali ini, metode yang akan dilakukan adalah penggunaan proses filtrasi pada kultivasi *Chlorella vulgaris*. Perlakuan filtrasi pada aliran sirkulasi bertujuan untuk 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 dalam fotobioreaktor dapat diatasi. Penelitian ini diperlukan sebagai pembandingan dengan proses non filtrasi untuk mengetahui proses yang lebih efektif dalam meningkatkan fiksasi CO<sub>2</sub> dan produksi biomassa.

Mengingat banyaknya manfaat *Chlorella vulgaris*, perlu dilakukan studi lebih lanjut tentang pembudidayaan mikroalga ini agar didapatkan hasil yang optimal. Di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia telah dilakukan beberapa penelitian untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Penelitian-penelitian sebelumnya di Laboratorium Rekayasa Bioproses Universitas Indonesia lebih banyak memfokuskan diri pada efek pencahayaan pada pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzorg, seperti tampak pada tabel berikut ini.

**Tabel 1.1 Road map penelitian tentang produksi biomassa mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzorg di Laboratorium Rekayasa Bioproses Universitas Indonesia**

Peneliti (tahun)	Fokus Penelitian			Studi Hidrodinamika	Kandungan Biomassa
	Pencahayaan	Filtrasi	Kecepatan superficial ( $U_G$ )		
Rahayu (2006) & Apriyati N. (2006)	pencahayaan alami				
Valentino (2006)	siklus harian atau terang gelap (flip-flop)				
Muryanto (2006)	pencahayaan periodik				
Sujarwo (2006)	pencahayaan kontinyu				
Andika (2005), Yudi.S (2006), Syahri (2008), Nisa.G (2009)	alterasi pencahayaan				
Syarif (2008), Rachma (2008)		Efek filtrasi pada volume kultur 18 L			
Puteri (2007)			$U_G$ optimum untuk volume kultur 600 ml		
Isnaeni (2009)			$U_G$ optimum untuk volume kultur 18 L		
Nita (2009)				Penentuan parameter hidrodinamika	

Teryn (2009)					Uji kandungan protein
Putu (2010)				Penentuan parameter hidrodinamika	
Heru (2010)		Pengaruh Kecepatan hisap Filter Pada Fotobioreaktor 18 L			

Di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia telah dilakukan beberapa penelitian untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan menggunakan teknik filtrasi pada kultur *Chlorella vulgaris*. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa saat digunakan filtrasi maka setiap waktu tertentu akan dilakukan pemindahan sejumlah sel mikroalga yang tersaring pada filter yang ada hal ini akan mengakibatkan jumlah sel mikroalga pada fotobioreaktor akan berkurang, pengurangan ini akan mengurangi peluang terjadinya perebutan CO<sub>2</sub> dan dengan kondisi ini diharapkan masalah tidak meratanya intensitas cahaya yang diterima sel dapat teratasi sehingga peningkatan jumlah sel akan lebih baik.

Pada penelitian kali ini, metode yang akan dilakukan adalah dengan pengaturan waktu filtrasi dalam kultur *Chlorella vulgaris*. Pengaturan waktu filtrasi digunakan untuk mengetahui kapasitas maksimum filter yang digunakan serta keefektifan filter dalam menjaga laju pertumbuhan *Chlorella* di dalam fotobioreaktor. Dengan berkurangnya kepadatan sel di dalam fotobioreaktor maka intensitas cahaya yang selalu konstan dapat mereduksi penggunaan cahaya serta didapatkan laju pertumbuhan yang maksimum. Hal ini mengingat bahwa secara alamiah laju pertumbuhan mikroalga pada saat fase eksponensial akan menurun. Penelitian ini diperlukan sebagai pembandingan dengan proses tanpa filtrasi untuk mengetahui proses yang lebih efektif dalam meningkatkan pertumbuhan biomassa *Chlorella* dalam fotobioreaktor dan diharapkan dapat dijadikan acuan dalam penelitian-penelitian selanjutnya, dalam mengoptimalkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam skala besar.

## 1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh waktu filtrasi terhadap produksi biomassa dan kemampuan fiksasi CO<sub>2</sub> nya.
2. Bagaimana menentukan waktu filtrasi yang optimum agar laju pertumbuhan maksimum dari mikroalga dapat dijaga konstan dan menghasilkan peningkatan produksi biomassa yang besar.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh waktu filtrasi pada kultivasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg terhadap produksi biomasnya (X).
2. Mengetahui waktu filtrasi yang paling optimum dalam fotobioreaktor agar didapatkan laju pertumbuhan mikroalga yang konstan.
3. Mengetahui pengaruh waktu filtrasi terhadap kemampuan fiksasi CO<sub>2</sub>

## 1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan penelitian berikutnya seperti memperbesar produksi biomassa dengan teknik kultivasi yang optimum

## 1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Bioproses
2. Penelitian ini hanya akan dilakukan untuk mengetahui pengaruh filtrasi pada produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg.
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 *Benneck*

6. Sistem reaktor yang digunakan adalah fotobioreaktor tunggal dengan volume 18 L
7. Konsentrasi CO<sub>2</sub> yang digunakan sebesar 5%

## 1.6 Sistematika Penulisan

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

### **BAB I           PENDAHULUAN**

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

### **BAB II          TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini menjelaskan mengenai teori umum tentang mikroalga *Chlorella vulgaris*, proses fotosintesis, fotobioreaktor 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 menyajikan data-data hasil pengamatan dan pengolahannya beserta pembahasannya.

### **BAB V         KESIMPULAN**

Bab terakhir ini menyajikan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan berdasarkan hasil yang telah didapat pada bab sebelumnya.

## BAB 2 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 *Chlorella vulgaris*, serta fotobioreaktor yang digunakan.

### 2.1 Mikroalga *Chlorella vulgaris*

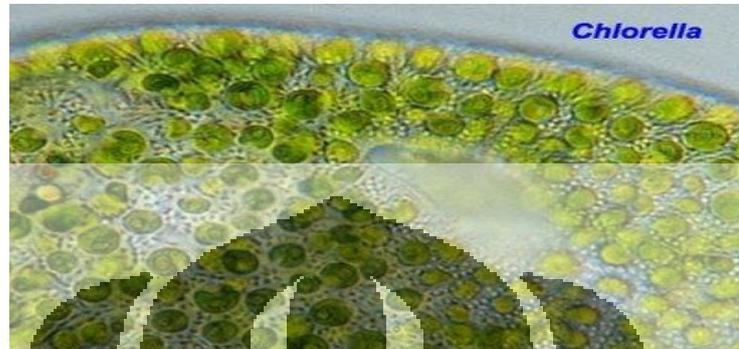
*Chlorella* berasal dari bahasa Yunani yaitu "chloros" yang berarti hijau dan "ella" yang berarti kecil. *Chlorella* merupakan alga dengan kategori sel eukariotik yang hidup dalam air bersih sebagai tanaman bersel tunggal yang mengandung nukleus dan klorofil. bentuk *Chlorella* bulat lonjong, bergaris tengah 2-8 mikron (1 mikron setara 0,001 milimeter), ukuran ini kira-kira sebesar sel eritrosit manusia (sel darah merah).

Menurut ahli geologi, *chlorella* sudah ada di dunia sejak 2,5 milyar tahun yang lalu. Ini dibuktikan dengan adanya penemuan fosil *chlorella* dari zaman pre-kambium. *Chlorella* mampu bertahan terhadap segala perubahan alam sejak zaman pre-kambium karena punya ketahanan genetik dengan mekanisme perbaikan DNA yang sangat tinggi, serta bentuk, ukuran dan sifat dinding sel yang tersusun dari senyawa selulosa dan ligma yang kuat. Semua ini membuat *chlorella* mudah menyesuaikan diri pada cuaca ekstrem dan bisa bertahan terhadap pengaruh luar dalam waktu lama. Hal ini membuat *Chlorella* dapat ditemukan di perairan tropis, sub-tropis, sampai kutub sekalipun.

*Chlorella Vulgaris* merupakan tumbuhan yang belum mempunyai akar, batang, dan daun yang sebenarnya, tetapi sudah memiliki klorofil sehingga bersifat autotrof atau dapat mensintesis makanan sendiri melalui reaksi fotosintesis dengan bantuan energi dari cahaya matahari. Mikroalga ini berkembang biak dengan pembelahan sel dan dengan pembentukan spora. Meskipun demikian waktu generasinya sangat cepat (<http://www.chlorella-word.com/yaeyama.html>). *Chlorella* hidup secara berkoloni dalam jumlah besar.

Habitatnya adalah air atau tempat basah, sebagai epifit atau sebagai endofit (<http://www.Bebas.vlsm.org/>).

Secara umum, struktur *Chlorella* dapat dilihat pada gambar



Gambar 2.1. Struktur Sel *Chlorella*  
(<http://evolutionlist.blogspot.com/>)

### 2.1.1 Taksonomi *Chlorella vulgaris*

Berdasarkan taksonominya, *Chlorella vulgaris* memiliki klasifikasi sebagai berikut

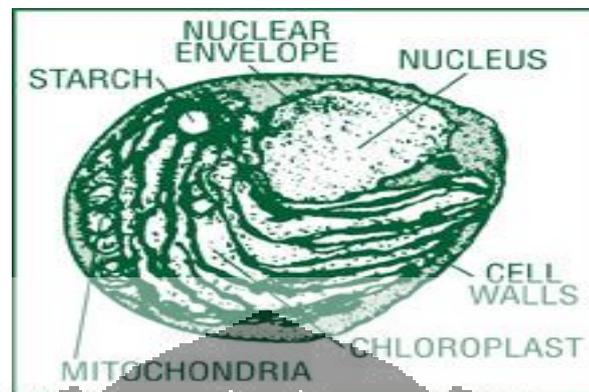
Tabel 2.1. Taksonomi *Chlorella vulgaris* (<http://www.en.wikipedia.org/wiki/Chlorella>)

Chlorella	
<u>Klasifikasi ilmiah</u>	
Kerajaan:	<a href="#">Plantae</a>
Divisi:	<a href="#">Chlorophyta</a>
Kelas:	<a href="#">Chlorophyceae</a>
Ordo:	<a href="#">chlorococcales</a>
Familia:	<a href="#">Oocystaceae</a>
Genus:	<i>Chlorella</i>
Spesies	
* <i>Chlorella vulgaris</i> <i>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

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



Gambar 2.2 Struktur Sel *Chlorella* ([www.tuberose.com](http://www.tuberose.com))

#### a. Mitokondria

Mitokondria merupakan organel sel yang sangat kompleks, berukuran 1-5 mikrometer, berbentuk oval, berdiameter 0,5-1  $\mu\text{m}$ , memiliki panjang 3  $\mu\text{m}$ . Selain itu, mitokondria memiliki 2 membran yaitu membran dalam yang terdiri atas protein dan membrane luar.

#### b. Vakuola

Vakuola merupakan ruang dalam sel yang berisi cairan. Cairan ini adalah air dan berbagai zat yang terlarut di dalamnya. Vakuola ditemukan pada semua sel tumbuhan. Bagi tumbuhan, vakuola berperan sangat penting dalam kehidupan karena mekanisme pertahanan hidupnya bergantung pada kemampuan vakuola menjaga konsentrasi zat-zat terlarut di dalamnya. Dalam vakuola terkumpul pula sebagian besar bahan-bahan berbahaya bagi proses metabolisme dalam sel karena tumbuhan tidak mempunyai sistem ekskresi yang efektif (<http://id.wikipedia.org/wiki/Vakuola>).

#### c. Kloroplas

Kloroplas merupakan jaringan berbenuk cangkir yang terletak di tepi sel. Kloroplas memiliki struktur yang dibungkus oleh suatu seludang yang terdiri atas 2 membran. Kloroplas mengandung lapisan membran protein dan fase aqueous. Membran tilakoid kloroplas sel eukariotik disebut tilakoid dan mengandung dua komponen lipid utama yaitu mono dan digalactosyl diacylglycerol (MGDG dan

DGDG). Kloroplas juga memiliki klorofil, ribosom serta DNA sendiri (Iriawati, 2008). Kloroplas adalah tempat terjadinya fiksasi  $\text{CO}_2$  dan memiliki kandungan protein (Campbell, 2008).

#### **d. Dinding Sel**

Didinding sel mengandung mikrofibril selulosa dan metrik non selulosa (senyawa pektin, hemiselulosa, lignin dan protein). Organel ini berfungsi untuk memberi bentuk kepada sel, memperkuat sel dan sebagai pelindung. Dinding sel tumbuh apabila masih memiliki kontak dengan protoplas. (Iriawati, 2008)

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

Inti sel adalah suatu struktur berukuran besar yang dikelilingi oleh sitoplasma dan dilindungi oleh sebuah membran. Di dalam inti ruang berada dalam stadium interfase terdapat kromosom, matriks inti, satu atau lebih nukleolus dan nukleoplasma. Inti sel ini berperan dalam mengatur seluruh aktivitas sel seperti berfotosintesis dan berkembang biak.

## **2.2 Mode Kultur**

### **2.2.1 Kultur Batch**

Metode ini adalah paling umum dalam kultivasi sel mikroalga. Dalam sistem kultur sederhana, medium kultur terbatas dan inokulum alga ditempatkan pada vessel kultur serta diinkubasi pada lingkungan yang baik untuk pertumbuhan. Dalam fotosintesis,  $\text{CO}_2$  dialirkan secara kontinu ke dalam kultur dengan dicampur udara yang mengandung  $\text{CO}_2$ . Contohnya 5% v/v  $\text{CO}_2$  dalam udara. Kultur dapat diiluminasi dengan cahaya buatan atau sinar matahari melalui fiber optik yang diletakkan pada kultur vessel.

Kultur batch secara luas digunakan untuk kultivasi komersial alga karena operasinya mudah dan sistem kulturnya sederhana. Karena prosesnya batch, kebutuhan untuk sterilisasi lengkap rendah. Untuk produksi kultur alga misal, bagian kultur disimpan sebagai inokulum untuk proses batch selanjutnya.

Ada beberapa fase berbeda yang terjadi pada kultur batch, menggambarkan atau menandakan perubahan biomassa dan lingkungannya.

### 2.2.1.1 Fase Lag

*Lag phase* adalah suatu tahap setelah pemberian inokulum ke dalam media kultur dimana terjadi penundaan pertumbuhan yang dikarenakan *Chlorella vulgaris* memerlukan pembelahan. Pada fase ini laju pertumbuhan spesifik adalah pada level sub-maximum yang sering diamati. Pertumbuhan lag terjadi karena adanya sel non viable dan spora dalam inokulum. Pertumbuhan lag juga terjadi karena adanya masa adaptasi fisiologis akibat perubahan kondisi nutrisi untuk alga. Fase lag tidak terjadi dalam kultivasi jika inokulum yang digunakan sudah berada pada fase eksponensial.

. Dalam fase ini tidak terjadi penambahan jumlah sel. Fasa ini adalah fasa 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.

### 2.2.1.2 Fasa Pertumbuhan Logaritmik (*log phase*)

Pada fase ini, sel-sel membelah dengan cepat dan terjadi penambahan dalam jumlah sel. Selama fasa 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 dari satu atau dua hal yang terjadi, yaitu apabila tidak atau lebih zat makanan dalam pembenihan habis maka hasil metabolisme yang beracun akan tertimbun dan menghambat pertumbuhan. Kultur dalam fasa 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 fasa eksponensial. Hal ini dikarenakan mikroorganisme tersebut tidak akan mengalami fasa pertumbuhan sebelum fasa eksponensial dalam media yang baru.

### 2.2.1.3 Fase Penurunan Laju Pertumbuhan

Pada fasa ini, tetap terjadi penambahan 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 fasa eksponensial sehingga hanya sebagian dari populasi yang mendapatkan makanan yang cukup dan dapat tumbuh serta membelah.

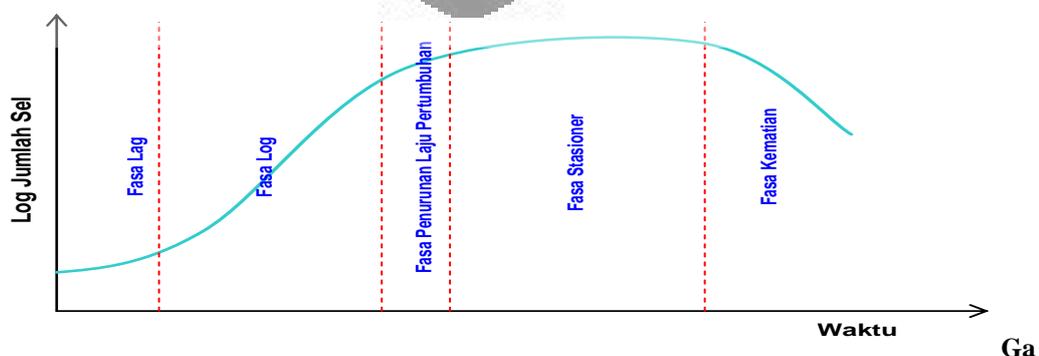
### 2.2.1.4 Fase Stasioner

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

### 2.2.1.5 Fase Kematian

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

Kelima fasa tersebut dapat ditunjukkan dengan kurva jumlah sel vs waktu



mbar 2.3. Kurva Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* (Sumber : Wirosaputro, 2002)

### 2.2.2 Kultur Kontinu

Metode kultur kontinu memberikan medium yang diperlukan dalam kultivasi mikroalga secara terus menerus yang dipompa dari reservoir medium ke dalam reaktor tempat kultivasi mikroalga agar dapat mencapai laju pertumbuhan maksimum.

Terdapat dua kategori kultur :

- a. Kultur turbidostat adalah kultur dengan konsentrasi alga dengan tingkat yang telah ditetapkan melalui pengenceran kultur dengan medium segar melalui sistem otomatis
- b. Kultur chemostat adalah kultur dengan aliran medium segar yang dimasukkan ke dalam kultur pada keadaan steady sebelum laju ditetapkan. Jenis ini dilakukan dengan cara menambahkan nutrisi yang penting seperti nitrat pada laju pertumbuhan tetap dan bukan menjaga kepadatan sel konstan.

Kekurangan dari sistem ini adalah biaya yang relatif tinggi dan kompleksitas. Kebutuhan iluminasi dan suhu yang konstan hanya layak untuk skala produksi kecil. Namun, kelebihanannya adalah kualitas alga yang diproduksi lebih baik. Selain itu, kebutuhan akan tenaga kerja menjadi sedikit karena sistem dilakukan secara otomatis.

### 2.2.3 Kultur semikontinu

Kultur ini dilakukan pemanenan secara berkala dan ditambahkan nutrisi ke dalam kultur mikroalga. Kultur semikontinu dapat dilakukan di dalam ataupun di luar rumah tapi durasi kultivasinya tidak dapat diprediksi. Karena kultur semikontinu tidak dipanen penuh, maka hasil produksi mikroalga system ini lebih baik daripada system batch untuk ukuran tangki yang sama.

## 2.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pertumbuhan *Chlorella vulgaris*

Organisme autotrofik seperti *Chlorella* membutuhkan cahaya, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, nutrient, 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.

a) Jenis Medium

Mikroalga sama dengan makhluk hidup lainnya, memerlukan suplai nutrisi sebagai sumber energi dan pertumbuhan selnya. Unsur-unsur dasar tersebut adalah : karbon, nitrogen, hidrogen, oksigen, sulfur, fosfor, zat besi dan sejumlah kecil logam lainnya. Sumber nutrisi untuk mikroalga diperoleh dari medium yang diberikan. Ketiadaan atau kekurangan sumber-sumber nutrisi ini dapat mempengaruhi pertumbuhan mikroalga hingga pada akhirnya dapat menyebabkan kematian.

Kondisi tidak bersih dan higienis pada lingkungan adalah kondisi yang menyediakan sumber nutrisi bagi pertumbuhan mikroba sehingga mikroba dapat tumbuh berkembang di lingkungan seperti ini. Oleh karena itu, prinsip daripada menciptakan lingkungan bersih dan higienis adalah untuk mengeliminir dan meminimalisir sumber nutrisi bagi mikroalga agar pertumbuhannya terkendali.

Medium yang diperlukan untuk perkembangan *Chlorella* relatif lebih sederhana dan hanya memerlukan jenis nutrisi yang lebih sedikit dibandingkan dengan medium untuk jenis alga lainnya. Medium yang digunakan oleh mikroalga mengandung unsur-unsur makro seperti N, K, Mg, S, P dan Cl. Sedangkan unsur mikronya adalah seperti Cu, Fe, Zn, Mn, B dan Mo. Unsur hara tersebut diperoleh dalam bentuk dengan persenyawaan lain. Tiap unsur hara memiliki fungsi-fungsi khusus yang tercermin dalam pertumbuhan dan kepadatan yang dicapai oleh organisme yang dikultur tanpa mengesampingkan pengaruh dari lingkungan.

Ada beberapa medium yang biasanya digunakan untuk pembiakan *Chlorella*. Yaitu Benneck, Detmer, Pupuk komersial dan Walne. Komposisi untuk masing-masing medium ditunjukkan pada tabel 2.2.

**Tabel 2.2. Perbandingan Komposisi Nutrisi Medium Pemiakan *Chlorella vulgaris*. (Sumber :Wirosaputro, 2002)**

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

b) Pencahayaan

Seperti tumbuhan, alga berjenis autotrof dapat melakukan fotosintesis dengan mengasimilasi karbon anorganik menjadi karbon organik. Intensitas cahaya berperan penting namun kebutuhannya tergantung dari kedalaman dan kepadatan kultur alga. Pada kedalaman dan kepadatan kultur yang tinggi, intensitas cahaya yang diberikan harus ditingkatkan agar dapat menembus kultur dan menghindari adanya efek *self shading*. Cahaya yang digunakan dapat berupa pencahayaan alami (sinar matahari) untuk kultivasi outdoor dan pencahayaan buatan (lampu TL) dalam kultivasi indoor/skala lab. Pada skala Lab, penggunaan lampu TL/fluorescent sebagai pengganti cahaya matahari didasarkan pada kebutuhan cahaya yang dapat diatur sesuai dengan volum, kedalaman serta kepadatan dari kultur mikroalga. Pengaturan cahaya ini bertujuan untuk menghindari intensitas cahaya yang terlalu tinggi pada kultur mikroalga sehingga menghambat pertumbuhan mikroalga. Selain itu, alasan penggunaan tabung

fluorescent ini adalah karena tabung jenis ini mampu memancarkan spektrum biru atau lampu merah dengan baik. Spektrum ini merupakan bagian paling aktif dari spectrum cahaya untuk fotosintesis. Durasi pencahayaan buatan minimal 18 jam.

c) **Kondisi Operasi**

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

1. **Konsentrasi**

Dalam proses fotosintesis, CO<sub>2</sub> merupakan unsur paling penting. Tersedianya CO<sub>2</sub> yang cukup dalam media akan memperlancar proses fotosintesis yang akan berimbas pada pertumbuhan *Chlorella vulgaris*, itu sendiri. Konsentrasi CO<sub>2</sub> yang optimal untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris*, adalah sekitar 3-5% (Wirosaputro, 2002).

2. **Temperatur**

Kisaran temperatur yang optimal bagi perkembangan *Chlorella* adalah antara 25-30°C. Temperatur mempengaruhi proses fisika, kimia, biologi yang berlangsung dalam sel mikroalga. Peningkatan temperatur hingga batas tertentu akan merangsang aktifitas molekul, meningkatnya laju difusi, dan juga laju fotosintesis. Pengaruh suhu berhubungan dengan aktivitas enzim. Suhu rendah menyebabkan aktifitas enzim menurun dan jika suhu terlalu tinggi dapat mendenaturasi protein enzim.

3. **Derajat Keasaman (pH)**

Nilai pH medium kultur merupakan faktor pengontrol yang menentukan kemampuan biologis mikroalga dalam memanfaatkan unsure hara. Nilai pH yang tinggi akan mengurangi aktifitas fotosintesis mikroalga. Derajat keasaman (pH) akan mempengaruhi kinerja kerja suatu enzim. Menurut Round (1973), pH media berkisar antara 7.0 – 8.0 cukup baik digunakan dalam kultur alga di laboratorium. *Chlorella vulgaris* sendiri tahan terhadap lingkungan yang asam dengan pH mencapai 2. Untuk mencegah terjadinya perubahan pH dalam media kultur alga, perlu ditambahkan EDTA (*Ethyl Diamine Tetra Acetate*) ke dalam media, karena EDTA berfungsi sebagai *buffer* sehingga pH media akan tetap stabil.

#### 4. Aerasi/Pencampuran

Penggunaan sistem aerasi ini bertujuan untuk menghindari sedimentasi pada kultur mikroalga dan untuk memastikan bahwa semua sel-sel dalam populasi mikroalga mendapat cahaya dan nutrisi secara merata. Selain itu aerasi juga bertujuan untuk menghindari stratifikasi termal dan meningkatkan pertukaran gas antara medium dan udara. Pencampuran yang digunakan harus berada dalam keadaan optimum agar tingkat pertumbuhan mikroalga baik. Sistem aerasi yang terlalu besar akan menghambat pertumbuhan mikroalga karena adanya efek *shear stress* pada kultur mikroalga. Selain itu, tidak semua jenis alga dapat mentolerir pencampuran kuat. Jenis system aerasi yang digunakan, tergantung dari kedalaman, kepadatan kultur mikroalga serta fotobioreaktor atau sistem kultur yang digunakan.

#### 5. Laju Alir dan CO<sub>2</sub>

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

#### 6. Pre-Culture

Tahapan ini sangat penting dalam pembiakan *Chlorella vulgaris* pada tahap ini mikroalga dikenalkan pada medium baru agar lebih terbiasa hingga dapat melewati fasa lag-nya. Setelah itu *Chlorella* siap untuk dibiakkan pada fasa log. Tahap ini juga bertujuan untuk mengetahui apakah medium yang digunakan sesuai.

#### 7. Kontaminasi

Sedikit kontaminan yang ada akan mempengaruhi pertumbuhan *Chlorella vulgaris* kontaminan dapat berebut makanan dengan *Chlorella* itu sendiri dan yang lebih berbahaya jika kontaminan yang ada menjadi predator bagi mikroalga itu sendiri. Oleh karena itu, seluruh kegiatan kultivasi *Chlorella vulgaris* harus dilakukan secara steril untuk mencegah adanya kontaminan.

## 8. Salinitas

*Chlorella sp* memiliki toleransi salinitas yang tinggi dan dapat hidup pada kisaran salinitas 0-35 ppt (dari air tawar sampai air laut). Salinitas yang paling optimal bagi pertumbuhan *Chlorella* air tawar adalah 10-20 ppt. Peningkatan salinitas akan menyebabkan kandungan lipid dalam mikroalga meningkat.

### 2.4 Kandungan Biomassa *Chlorella vulgaris*

*Chlorella vulgaris* memiliki komposisi biomassa yang sangat bermanfaat. Walaupun ukurannya kecil, tetapi kandungan gizi sangat tinggi. 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 macam jenis asam amino, peptida, protein, vitamin dan glukoprotein. CGF dapat digunakan sebagai obat antitumor dan dapat merangsang hormon pertumbuhan. Secara umum kandungan biomassa dari *Chlorella vulgaris* dapat dilihat pada tabel 2.3

**Tabel 2.3. 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	94.2-95.1
Klorofil	g/100g	0.7-2.1
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	0.8-2
Mineral		
Kalsium	mg/100g	321-604
Magnesium	mg/100g	273-325
Seng	mg/100g	0.4-1.6
Besi	mg/100g	40-70
Kalium	mg/100g	1000-2900
Iodium	mg/100g	<0.0005
Selenium	µg/100g	0.2-0.8
Vitamin		
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

## 2.5 Manfaat *Chlorella vulgaris* dalam Bidang Kesehatan

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

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

### a) Dinding Sel

Dinding sel yang sangat tebal dan komposisinya terdiri dari 27% protein, 9,2% lemak, 15,4% selulosa, 31% hemiselulosa, 3,3% glukosamin, dan abu yang banyak mengandung besi serta kapur. Khasiat dinding sel ini adalah (Sargowo dan Ratmawati, 2005) :

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

### b) Klorofil

Klorofil yang jumlahnya 3% dengan bantuan cahaya matahari, mampu mengubah air dan zat asam arang menjadi oksigen serta bahan makanan yang sangat dibutuhkan oleh manusia. Manfaat klorofil bagi kesehatan yang telah diteliti diantaranya adalah (Sargowo dan Rahmawat, 2005) :

- menghambat pertumbuhan bakteri jahat di dalam saluran cerna dan merangsang pertumbuhan bakteri yang berguna untuk pencernaan makanan sehingga tidak mudah sariawan dan diare.

- Bersifat deodoran, sehingga dapat mengurangi bau badan, bau mulut, bau nafas, juga bau yang berasal dari gas perut (flatus).
  - Merangsang tumbuhnya fibroblast sehingga dapat mempercepat penyembuhan luka.
  - Memperbaiki fungsi hati sehingga dapat menjalankan fungsi metabolisme makanan dan detoksifikasi racun.
  - Merangsang pembentukan sel darah merah (eritrosit)
  - Mencegah dan memperbaiki pengerasan pembuluh darah, untuk mencegah tekanan darah tinggi, penyakit reumatik dan jantung.
  - Memperlancar aliran darah.
  - Bersifat anti-proteolitik, untuk mencegah penyakit alergi, dan tumor atau kanker.
  - Bersifat antioksidan sehingga dapat mengikat radikal bebas.
- c). **Beta karoten**
- Beta karoten terdapat dalam jumlah 18-20 kali lebih banyak dari pada beta karoten dalam wortel, pepaya atau tomat. Manfaat beta karoten adalah sebagai berikut (Sargowo dan Ratnawati, 2005) :
- Sebagai antioksidan.
  - Merangsang kekebalan tubuh.
  - Sumber vitamin A
- d) **CGF (*Chlorella Growth Factor*)**
- CGF terkandung dalam nukleus pada sel *Chlorella*. CGF ini mengandung bahan pertumbuhan yang disebut *Ribo Nucleic Acid* (RNA) sebanyak 10% dan *Deoxy Ribo Nucleic Acid* (DNA) 3%. Dengan adanya RNA dan DNA dalam jumlah yang cukup, *Chlorella vulgaris* mampu berkembang biak dengan sangat cepat, menjadi 4 kali lipat hanya dalam waktu 16-20 jam. Satu sel *Chlorella vulgaris* baru mati setelah berkembang biak menjadi 10.000 sel (Jensen, 1990). Manfaat CGF adalah (Sargowo dan Ratnawati, 2005) :
- menghambat pertumbuhan tumor ganas (kanker).
  - Meningkatkan regenerasi atau peremajaan sel-sel tubuh yang rusak.

## e) Protein

Protein dalam *Chlorella vulgaris* terdiri dari asam amino esensial yang sangat diperlukan oleh tubuh karena tidak bisa disintesis oleh tubuh manusia sendiri. Selain berguna bagi pertumbuhan, kandungan protein alami yang dimiliki *Chlorella vulgaris* juga membantu menjaga gula dalam darah. ([www.chlorellafactor.com](http://www.chlorellafactor.com)).

## 2.6 FOTOSINTESIS

Fotosintesis adalah suatu proses biokimia pembentukan zat makanan atau energi yaitu glukosa yang dilakukan tumbuhan, alga dan beberapa jenis bakteri dengan menggunakan zat hara, karbondioksida, dan air serta dibutuhkan bantuan energi cahaya matahari. 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 (*photos* berarti cahaya) disebut sebagai fototrof. Fotosintesis merupakan salah satu cara asimilasi karbon karena dalam fotosintesis karbon bebas dari CO<sub>2</sub> diikat (difiksasi) menjadi gula sebagai molekul penyimpan energi.

Tumbuhan bersifat autotrof. Autotrof artinya dapat mensintesis makanan langsung dari senyawa anorganik. Tumbuhan menggunakan karbon dioksida 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.

### 2.6.1 Proses Fotosintesis

Pada dasarnya, rangkaian reaksi fotosintesis dapat dibagi menjadi dua bagian utama: **reaksi terang** (karena memerlukan cahaya) dan **reaksi gelap** (tidak memerlukan cahaya tetapi memerlukan karbon dioksida).

Reaksi terang terjadi pada grana (tunggal: granum), sedangkan reaksi gelap terjadi di dalam stroma. Dalam reaksi terang, terjadi konversi energi cahaya menjadi energi kimia dan menghasilkan oksigen ( $O_2$ ). Sedangkan dalam reaksi gelap terjadi seri reaksi siklik yang membentuk gula dari bahan dasar  $CO_2$  dan energi (ATP dan NADPH). Energi yang digunakan dalam reaksi gelap ini diperoleh dari reaksi terang. Pada proses reaksi gelap tidak dibutuhkan cahaya matahari. Reaksi gelap bertujuan untuk mengubah senyawa yang mengandung atom karbon menjadi molekul gula. 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).

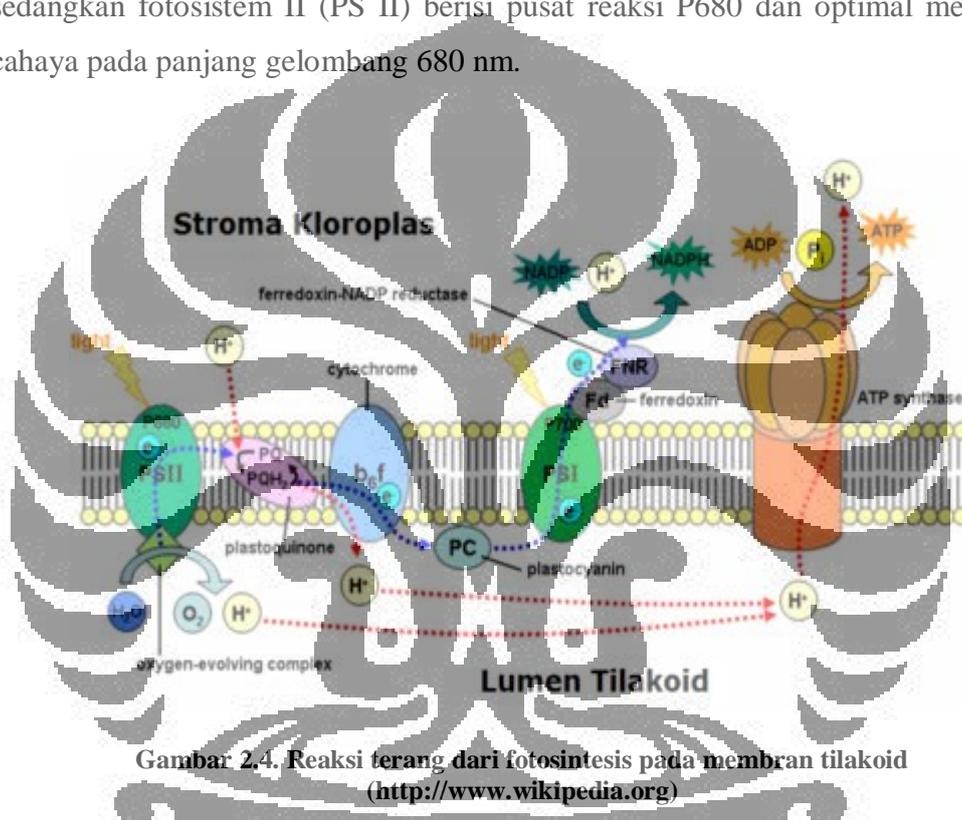
Cahaya tampak terbagi atas cahaya merah (610 - 700 nm), hijau kuning (510 - 600 nm), biru (410 - 500 nm) dan violet (< 400 nm). Masing-masing jenis cahaya berbeda pengaruhnya terhadap fotosintesis. Hal ini terkait pada sifat pigmen penangkap cahaya yang bekerja dalam fotosintesis. Pigmen yang terdapat pada membran grana menyerap cahaya yang memiliki panjang gelombang tertentu. Pigmen yang berbeda menyerap cahaya pada panjang gelombang yang berbeda.

Kloroplas 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. Proses absorpsi energi cahaya menyebabkan lepasnya elektron berenergi tinggi dari klorofil a yang selanjutnya akan disalurkan dan ditangkap oleh akseptor elektron. Proses ini merupakan awal dari rangkaian panjang reaksi fotosintesis.

### 2.6.1.1 Reaksi Terang

Reaksi terang adalah proses untuk menghasilkan ATP dan reduksi  $\text{NADPH}_2$ . Reaksi ini memerlukan molekul air dan cahaya matahari. Proses diawali dengan penangkapan foton oleh pigmen sebagai antena.

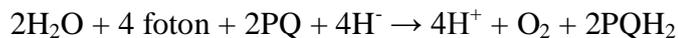
Reaksi terang melibatkan dua fotosistem yang saling bekerja sama, yaitu fotosistem I dan II. Fotosistem I (PS I) berisi pusat reaksi P700, yang berarti bahwa fotosistem ini optimal menyerap cahaya pada panjang gelombang 700 nm, sedangkan fotosistem II (PS II) berisi pusat reaksi P680 dan optimal menyerap cahaya pada panjang gelombang 680 nm.



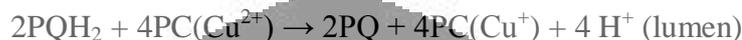
Gambar 2.4. Reaksi terang dari fotosintesis pada membran tilakoid (<http://www.wikipedia.org>)

Mekanisme reaksi terang diawali dengan tahap dimana fotosistem II menyerap cahaya matahari sehingga elektron klorofil pada PS II tereksitasi dan menyebabkan muatan menjadi tidak stabil. Untuk menstabilkan kembali, PS II akan mengambil elektron dari molekul  $\text{H}_2\text{O}$  yang ada disekitarnya. Molekul air akan dipecahkan oleh ion mangan (Mn) yang bertindak sebagai enzim. Hal ini akan mengakibatkan pelepasan  $\text{H}^+$  di lumen tilakoid. Dengan menggunakan elektron dari air, selanjutnya PS II akan mereduksi plastokuinon (PQ) membentuk  $\text{PQH}_2$ . Plastokuinon merupakan molekul kuinon yang terdapat pada membran lipid bilayer tilakoid. Plastokuinon ini akan mengirimkan elektron dari PS II ke

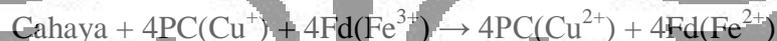
suatu pompa  $H^+$  yang disebut sitokrom  $b_6-f$  kompleks. Reaksi keseluruhan yang terjadi di PS II adalah:



Sitokrom  $b_6-f$  kompleks berfungsi untuk membawa elektron dari PS II ke PS I dengan mengoksidasi  $PQH_2$  dan mereduksi protein kecil yang sangat mudah bergerak dan mengandung tembaga, yang dinamakan plastosianin (PC). Kejadian ini juga menyebabkan terjadinya pompa  $H^+$  dari stroma ke membran tilakoid. Reaksi yang terjadi pada sitokrom  $b_6-f$  kompleks adalah:



Elektron dari sitokrom  $b_6-f$  kompleks akan diterima oleh fotosistem I. Fotosistem ini menyerap energi cahaya terpisah dari PS II, tapi mengandung kompleks inti terpisahkan, yang menerima elektron yang berasal dari  $H_2O$  melalui kompleks inti PS II lebih dahulu. Sebagai sistem yang bergantung pada cahaya, PS I berfungsi mengoksidasi plastosianin tereduksi dan memindahkan elektron ke protein Fe-S larut yang disebut feredoksin. Reaksi keseluruhan pada PS I adalah:



Selanjutnya elektron dari feredoksin digunakan dalam tahap akhir pengangkutan elektron untuk mereduksi  $NADP^+$  dan membentuk NADPH. Reaksi ini dikatalisis dalam stroma oleh enzim feredoksin- $NADP^+$  reduktase. Reaksinya adalah:



Ion  $H^+$  yang telah dipompa ke dalam membran tilakoid akan masuk ke dalam ATP sintase. ATP sintase akan menggandengkan pembentukan ATP dengan pengangkutan elektron dan  $H^+$  melintasi membran tilakoid. Masuknya  $H^+$  pada ATP sintase akan membuat ATP sintase bekerja mengubah ADP dan fosfat anorganik (Pi) menjadi ATP. Reaksi keseluruhan yang terjadi pada reaksi terang adalah sebagai berikut:



### 2.6.1.2 Reaksi Gelap

Reaksi gelap pada tumbuhan dapat terjadi melalui dua jalur, yaitu **siklus Calvin-Benson** dan **siklus Hatch-Slack**. Pada siklus Calvin-Benson tumbuhan

mengubah senyawa ribulosa 1,5 bisfosfat menjadi senyawa dengan jumlah atom karbon tiga yaitu senyawa 3-phosphogliserat. Oleh karena itulah tumbuhan yang menjalankan reaksi gelap melalui jalur ini dinamakan tumbuhan C-3. Penambatan CO<sub>2</sub> sebagai sumber karbon pada tumbuhan ini dibantu oleh enzim rubisco. Tumbuhan yang reaksi gelapnya mengikuti jalur Hatch-Slack disebut tumbuhan C-4 karena senyawa yang terbentuk setelah penambatan CO<sub>2</sub> adalah oksaloasetat yang memiliki empat atom karbon. Enzim yang berperan adalah phosphoenolpyruvate carboxilase.

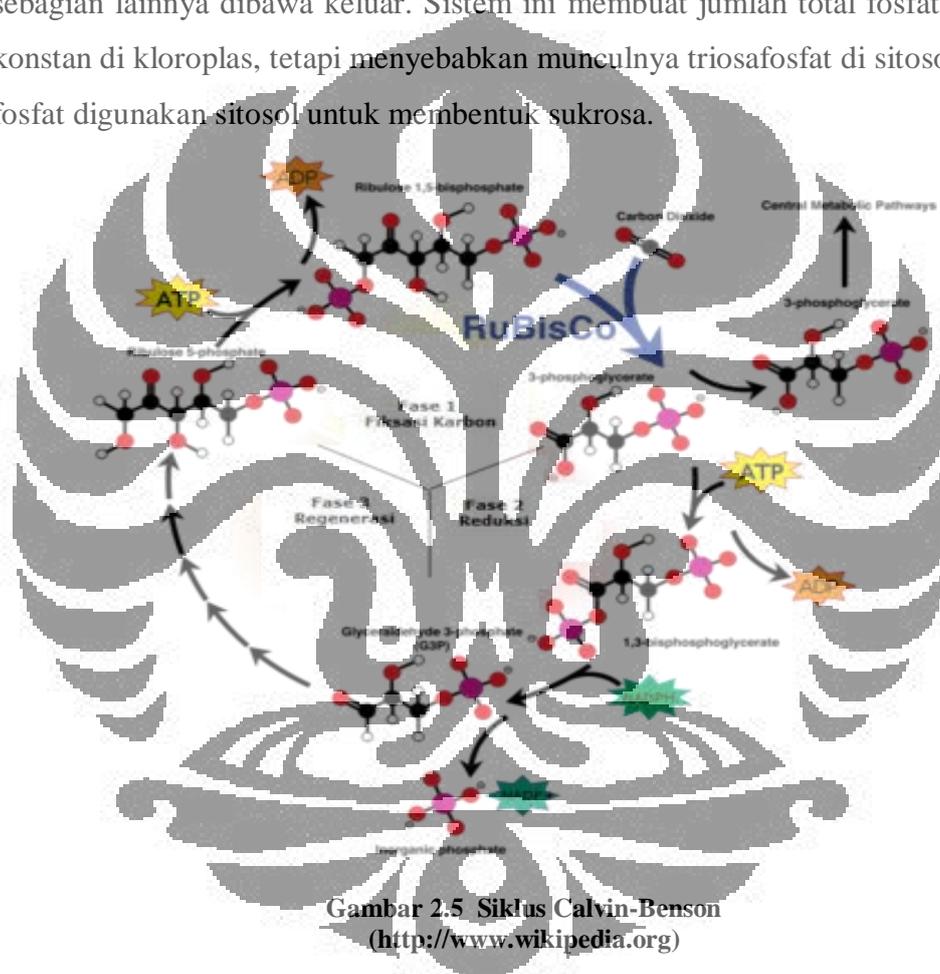
### 2.6.1.3. Siklus Calvin-Benson

Mekanisme siklus Calvin-Benson dimulai dengan fiksasi CO<sub>2</sub> oleh ribulosa difosfat karboksilase (RuBP) membentuk 3-fosfogliserat. RuBP merupakan enzim alosetrik yang distimulasi oleh tiga jenis perubahan yang dihasilkan dari pencahayaan kloroplas. Pertama, reaksi dari enzim ini distimulasi oleh peningkatan pH. Jika kloroplas diberi cahaya, ion H<sup>+</sup> ditranspor dari stroma ke dalam tilakoid menghasilkan peningkatan pH stroma yang menstimulasi enzim karboksilase, terletak di permukaan luar membran tilakoid. Kedua, reaksi ini distimulasi oleh Mg<sup>2+</sup>, yang memasuki stroma daun sebagai ion H<sup>+</sup>, jika kloroplas diberi cahaya. Ketiga, reaksi ini distimulasi oleh NADPH, yang dihasilkan oleh fotosistem I selama pemberian cahaya.

Fiksasi CO<sub>2</sub> ini merupakan reaksi gelap yang distimulasi oleh pencahayaan kloroplas. Fiksasi CO<sub>2</sub> melewati proses karboksilasi, reduksi, dan regenerasi. Karboksilasi melibatkan penambahan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O ke RuBP membentuk dua molekul 3-fosfogliserat (3-PGA). Kemudian pada fase reduksi, gugus karboksil dalam 3-PGA direduksi menjadi 1 gugus aldehida dalam 3-fosfogliseradehida (3-Pgaldehida). Reduksi ini tidak terjadi secara langsung, tapi gugus karboksil dari 3-PGA pertama-tama diubah menjadi ester jenis anhidrida asam pada asam 1,3-bifosfogliserat (1,3-bisPGA) dengan penambahan gugus fosfat terakhir dari ATP. ATP ini timbul dari fotofosforilasi dan ADP yang dilepas ketika 1,3-bisPGA terbentuk, yang diubah kembali dengan cepat menjadi ATP oleh reaksi fotofosforilasi tambahan. Bahan pereduksi yang sebenarnya adalah NADPH, yang menyumbang 2 elektron. Secara bersamaan, Pi dilepas dan digunakan kembali untuk mengubah ADP menjadi ATP.

Pada fase regenerasi, yang diregenerasi adalah RuBP yang diperlukan untuk bereaksi dengan  $\text{CO}_2$  tambahan yang berdifusi secara konstan ke dalam dan melalui stomata. Pada akhir reaksi Calvin, ATP ketiga yang diperlukan bagi tiap molekul  $\text{CO}_2$  yang ditambat, digunakan untuk mengubah ribulosa-5-fosfat menjadi RuBP, kemudian daur dimulai lagi.

Tiga putaran daur akan menambatkan 3 molekul  $\text{CO}_2$  dan produk akhirnya adalah 1,3-Pgaldehida. Sebagian digunakan kloroplas untuk membentuk pati, sebagian lainnya dibawa keluar. Sistem ini membuat jumlah total fosfat menjadi konstan di kloroplas, tetapi menyebabkan munculnya triosa fosfat di sitosol. Triosa fosfat digunakan sitosol untuk membentuk sukrosa.

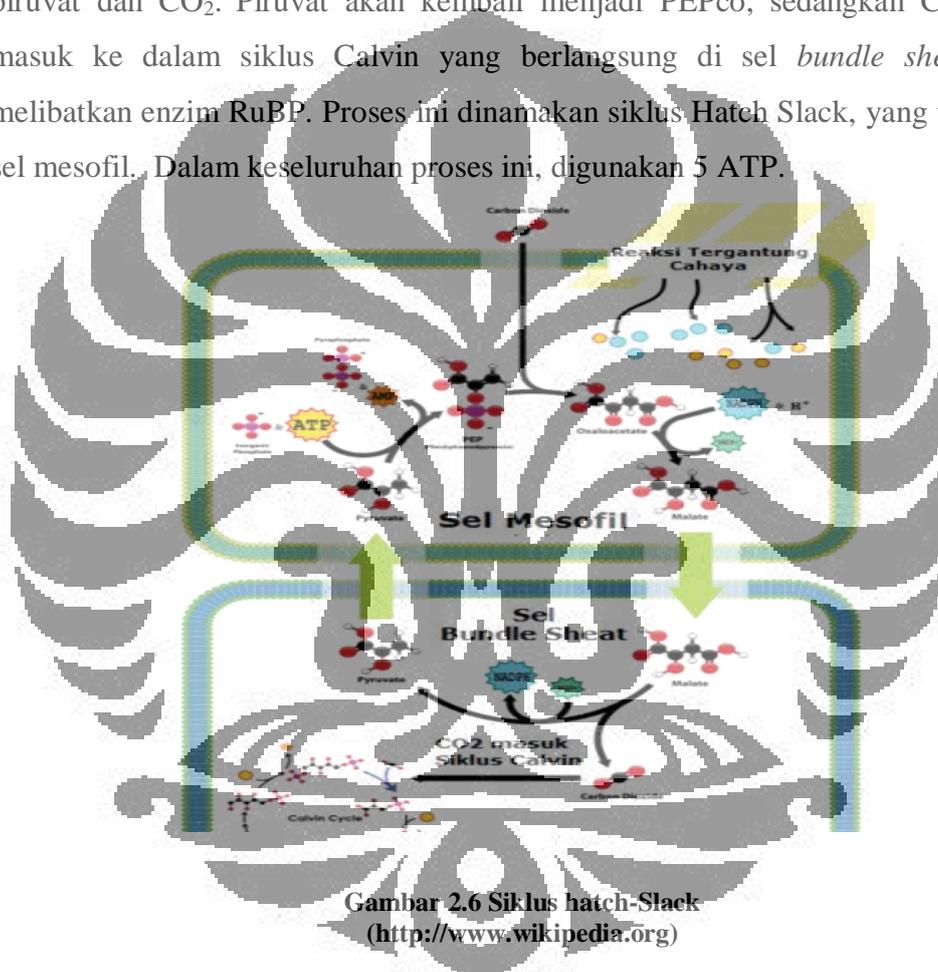


#### 2.6.1.4 Siklus Hatch-Slack

Berdasarkan cara memproduksi glukosa, tumbuhan dapat dibedakan menjadi tumbuhan C<sub>3</sub> dan C<sub>4</sub>. Tumbuhan C<sub>3</sub> merupakan tumbuhan yang berasal dari daerah subtropis. Tumbuhan ini menghasilkan glukosa dengan pengolahan  $\text{CO}_2$  melalui siklus Calvin, yang melibatkan enzim Rubisco sebagai penambat  $\text{CO}_2$ . Tumbuhan C<sub>3</sub> memerlukan 3 ATP untuk menghasilkan molekul glukosa. Namun, ATP ini dapat terpakai sia-sia tanpa dihasilkannya glukosa. Hal ini dapat

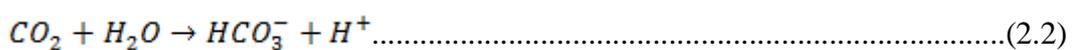
terjadi jika ada fotorespirasi, di mana enzim Rubisco tidak menambat CO<sub>2</sub> tetapi menambat O<sub>2</sub>.

Tumbuhan C<sub>4</sub> adalah tumbuhan yang umumnya ditemukan di daerah tropis. Tumbuhan ini melibatkan dua enzim di dalam pengolahan CO<sub>2</sub> menjadi glukosa. Enzim phosphoenolpyruvate carboxylase (PEPco) adalah enzim yang akan mengikat CO<sub>2</sub> dari udara dan kemudian akan menjadi oksaloasetat. Oksaloasetat akan diubah menjadi malat. Malat akan terkarboksilasi menjadi piruvat dan CO<sub>2</sub>. Piruvat akan kembali menjadi PEPco, sedangkan CO<sub>2</sub> akan masuk ke dalam siklus Calvin yang berlangsung di sel *bundle sheath* dan melibatkan enzim RuBP. Proses ini dinamakan siklus Hatch Slack, yang terjadi di sel mesofil. Dalam keseluruhan proses ini, digunakan 5 ATP.

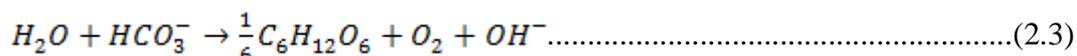


### 2.6.2 Fotosintesis Mikroalga Hijau *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Pada mikroalga hijau *Chlorella* yang termasuk organisme renik air, fotosintesis dilakukan di dalam air/media hidupnya. CO<sub>2</sub> yang dibutuhkan sebagai carbon *source*-nya 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, 2004)



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



Sehingga diketahui bahwa hasil fotosintesis dari mikroalga hijau *Chlorella* adalah ion  $\text{OH}^-$ , oksigen molekular, dan senyawa organik yang akan digunakan sebagai cadangan makanan, apabila tidak mendapatkan cahaya dan  $\text{CO}_2$  untuk pertumbuhan dan pembelahaan sel-nya (heterotrof)

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

### 2.6.3 Faktor yang mempengaruhi fotosintesis

- a) Intensitas cahaya  
Laju fotosintesis maksimum ketika banyak cahaya.
- b) Konsentrasi karbon dioksida  
Semakin banyak karbon dioksida di udara, makin banyak jumlah bahan yang dapat digunakan tumbuhan untuk melangsungkan fotosintesis.
- c) Suhu  
Enzim-enzim yang bekerja dalam proses fotosintesis hanya dapat bekerja pada suhu optimalnya. Umumnya laju fotosintensis meningkat seiring dengan meningkatnya suhu hingga batas toleransi enzim.
- d) Kadar air  
Kekurangan air atau kekeringan menyebabkan stomata menutup, menghambat penyerapan karbon dioksida sehingga mengurangi laju fotosintesis.
- e) 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.

f) Tahap pertumbuhan

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

## 2.7 Sistem Kultivasi Mikroalga

Dibandingkan untuk pertumbuhan tanaman, produksi biomassa dari mikroalga relatif lebih mahal. Oleh karena itu, banyak sistem kultivasi menggunakan sinar matahari dan air laut yang ada, walaupun tiap hari terdapat variasi musim karena level penyinaran. Untuk setiap koloni alga, pertumbuhan bergantung pada kondisi lingkungan, temperatur 20-30°C, medium esensial nitrogen, fosfor, besi yang umumnya tidak mahal. Banyak kultivasi menghasilkan biomassa sekitar 50% karbon dengan berat kering yang dihasilkan dari CO<sub>2</sub>. Ada 2 jenis operasi kultivasi mikroalga yaitu sistem terbuka dan tertutup.

### 2.7.1 Kultivasi Sistem Terbuka

Sistem terbuka menggunakan raceway (kolam) dan sinar matahari sebagai sumber energi utama dan sistem ini lebih murah daripada fotobioreaktor. Akan tetapi, sistem terbuka mudah terkontaminasi, sulit untuk mengontrol kontaminan, menghasilkan produktivitas rendah, kehilangan air besar, kebutuhan ruang besar dan inhibisi O<sub>2</sub> tinggi. Namun, 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.



Gambar 2.7. Fotobioreaktor Terbuka untuk Pemiakan *Chlorella vulgaris*

([www.energypowershift.com/developments.htm](http://www.energypowershift.com/developments.htm))

## 2.7.2 Sistem Kultivasi Tertutup

Untuk produk yang bermutu tinggi, sistem kultivasi tertutup lebih dipilih, ditinjau dari segi perkembangannya dan bervariasinya pendekatan yang dapat digunakan dalam desain. Keuntungan dari penggunaan sistem ini adalah produktivitas yang tinggi, kontaminasi yang rendah, sedikit kehilangan air, inhibisi  $O_2$  rendah, konsentrasi biomassa tinggi dan ruang yang dibutuhkan lebih kecil. Dalam sistem kultivasi tertutup terdapat berbagai jenis dan karakteristik fotobioreaktor yang digunakan.

### 2.7.2.1 Karakteristik Fotobioreaktor

Berikut ini akan dijelaskan beberapa karakteristik dari fotobioreaktor :

#### a) 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  $\mu E/m^2$  dan mengalami *photoinhibition* pada 130  $\mu E/m^2$  (Pulz, 2001).

Pada jenis fotobioreaktor tubular atau *plate-type* dengan *surface-to-volume ratio* 20-80  $m^2/m^3$  dan besarnya pencahayaan mencapai 1.15  $\mu E/m^2 s$  dengan *layer thickness* sampai 5 mm, produktivitas dapat mencapai 2-5 g berat kering per hari.

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.

b) Keseimbangan CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>

Untuk laju fotosintesis yang tinggi, keseimbangan 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 sub-optimal 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 *suspense* 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)

c) 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 *suspense* pada kondisi penurunan CO<sub>2</sub> dan kelarutan O<sub>2</sub> pada kenaikan temperatur (Pulz, 2001).

d) Nutrien dan Nilai pH

Suplai nutrient yang cukup untuk mikroalga adalah pre-kondisi untuk fotosintesis yang optimal. Defisiensi nutrient 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).

### 2.7.2.2 Peranan Fotobioreaktor

Baik mikro maupun mikroalga mempunyai peranan yang sangat penting dalam perekonomian dunia dengan nilai perkiraan *turn over* sebesar US\$ 5 milyar/tahun. Mikroalga merupakan organisme yang unik dan berharga dalam beberapa aplikasi, dimana organisme ini merupakan organisme yang pertama *biological CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> exchanger* pada planet ini, penghasil biomassa dan merupakan suatu grup organisme ekologi yang beragam. Bakteri fotosintesis dan mikroalga telah menjadi suatu ketertarikan dalam beberapa penelitian, industrial dan kepentingan lingkungan hayati. Dasar dari penelitian-penelitian tersebut adalah untuk mendalami pemahaman proses fotosintesis secara selular pada organisme fotosintetik, tetapi beberapa penelitian juga telah diarahkan untuk keperluan industri komersial yang dapat memasarkan produk yang dihasilkan dari proses ini. Mikroalga memiliki potensial bioteknologi yang besar untuk memproduksi substansi berharga untuk aplikasi makanan, kesehatan, kosmetika, industri farmasi dan juga untuk proses bioteknologi lainnya. Proses reaksi yang menghasilkan produk-produk komersial tersebut dijalankan dalam sebuah sistem yang dinamakan fotobioreaktor. Proses *biological C-fixation* untuk mengurangi emisi industri relatif lebih mahal dibandingkan dengan teknik penghilangan CO<sub>2</sub> secara konvensional, tetapi akan dapat bernilai ekonomis dengan pemilihan jenis spesies mikroalga yang menghasilkan produk yang bernilai komersial tinggi. Sehingga basis bioteknologi untuk produksi yang paling efisien dari biomassa mikroalga merupakan kunci keberhasilan untuk masa depan organisme ini. Sistem teknis untuk produksi mikroorganisme fototropik diformulasikan dalam bentuk fotobioreaktor. Sistem ini telah dievaluasi pada berbagai konsep konfigurasi dengan pertimbangan potensial produktivitas dan prospek ekonominya. Desain secara teknik dan basis teknologi untuk fotobioreaktor merupakan pokok yang

paling penting untuk keberhasilan ekonomi dalam lapangan bioteknologi fototropik.

### 2.7.2.3 Jenis Fotobioreaktor

Sistem kultur alga bisa diberikan perlakuan cahaya dengan cahaya buatan, cahaya matahari atau dengan keduanya. Pencahayaan sistem kultur alga secara alami dengan luas permukaan pencahayaan yang luas meliputi *open ponds* (Hase et al., 2000), *flat-plate* (Hu et al., 1996), *horizontal/serpentine tubular airlift* (Camacho Rubio et al., 1999), dan *inclined tubular photobioreactors* (Ugwu et al., 2002). Secara umum, fotobioreaktor skala laboratorium diberi cahaya buatan (baik secara internal maupun eksternal) menggunakan lampu *fluorescent* atau distributor cahaya lainnya. Beberapa jenis dari fotobioreaktor ini meliputi *bubble column* (Degen et al., 2001; Ogonna et al., 2002; Chini Zittelli et al., 2003), *airlift column* (Harker et al., 1996; Kaewpintong et al., 2007), *stirred-tank* (Ogonna et al., 1999), *helical tubular* (Hall et al., 2003), *conical* (Watanabe and Saiki, 1997), *torus* (Pruvost et al., 2006), dan fotobioreaktor tipe *seaweed* (Chetsumon et al., 1998). Dari beberapa jenis fotobioreaktor yang dikembangkan untuk memproduksi biomassa mikroalga, masing-masing memiliki kelebihan dan keterbatasan. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Perbandingan antara beberapa sistem kultivasi mikroalga

Sistem Kultur	Kelebihan	Keterbatasan
<i>Vertical-column photobioreactors</i>	Perpindahan massa yang tinggi, pencampuran yang baik dengan <i>shear</i> yang rendah, konsumsi energi rendah, sangat potensial untuk penskalaan, mudah disterilisasi, baik untuk immobilisasi alga, mengurangi fotoinhibisi dan fotooksidasi	Kecilnya luas permukaan yang mendapat cahaya, konstruksinya butuh bahan yang kompleks, <i>shear stress</i> pada kultur alga, berkurangnya luas permukaan yang mendapat cahaya saat <i>scale-up</i>
<i>Flat-plate photobioreactors</i>	Besarnya luas permukaan yang mendapat cahaya, cocok untuk kultur di luar ruangan, baik untuk immobilisasi alga, jalan peninarannya baik, produktivitas biomasnya baik, relative murah, mudah dibersihkan, kecil akumulasi oksigen	<i>Scale up</i> membutuhkan banyak suku cadang dan bahan pendukung, sulit dalam mengontrol temperature kultur, terdapat tingkat pertumbuhan di dinding, kemungkinan <i>hydrodynamic stress</i> pada beberapa jenis alga
<i>Tubular photobioreactors</i>	Besarnya luas permukaan yang mendapat cahaya, cocok untuk kultur di luar ruangan, produktivitas biomasnya baik, relative murah	Terdapat gradient/perbedaan p, <i>dissolved oxygen</i> dan CO <sub>2</sub> di sepanjang pipa, kerak, dan ada pertumbuhan di dinding, membutuhkan lahan tanah yang luas

Sumber : <http://www.oilgae.com/algae/cult/pbr/typ/flp/flp.html>

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

Fotobioreaktor sistem tertutup mempunyai berbagai bentuk, ukuran dan panjang yang disesuaikan dengan material yang digunakan (Pulz, O, 2001). Ada

beberapa jenis fotobioreaktor sistem tertutup (dibedakan berdasarkan bentuk, *flow regime*, efisiensi cahaya dan luas permukaan kontakannya) yang biasanya digunakan dalam kultivasi mikroorganisme yaitu :

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

#### 2.7.2.4 Fotobioreaktor Flat Gelembung

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

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

Intensitas penerangan dalam fotobioreaktor kolom gelembung system *batch* harus dipertahankan pada tingkat yang sesuai dengan jumlah inokulum. Hal ini dikarenakan semakin bertambahnya waktu maka jumlah mikroorganisme dalam fotobioreaktor tersebut akan semakin banyak karena terjadi proses pembelahan sel. Semakin banyak jumlah mikroorganisme tersebut maka kemungkinan bagi mikroorganisme yang berada di bagian tengah dan belakang untuk memperoleh cahaya semakin minim karena tertutup oleh mikroorganisme yang berada di depannya. Distribusi yang tidak seimbang ini menyebabkan laju pertumbuhan mikroorganisme terganggu. Peristiwa ini dikenal dengan *self-shading of light*. Dalam reaksi fotosintesis dihasilkan gas O<sub>2</sub> yang dapat menyebabkan kenaikan tekanan dan merusak fotobioreaktor. Dengan

menggunakan sistem titrasi katalitik menggunakan gas H<sub>2</sub> atau menggunakan sistem aerasi dengan aerator, konsentrasi O<sub>2</sub> dalam fotobioreaktor dapat dihilangkan.

## **2.8 Harvesting (pemanenan)**

### **2.8.1 Filtrasi**

Filtrasi dilakukan umumnya pada membran selulosa termodifikasi, dengan bantuan pompa hisap. Keuntungan terbesar dari metode ini adalah bahwa mampu mengumpulkan sel mikroalga atau densitas sangat rendah. Namun, konsentrasi dengan filtrasi terbatas pada volume kecil dan terbatas pada kapasitas filter yang digunakan dan dapat menyumbat filter oleh sel-sel padat saat vakum diterapkan.

Beberapa metode telah dirancang yang menghindari masalah ini. Salah satunya melibatkan penggunaan vakum reverse-aliran di mana tekanan beroperasi dari atas, membuat proses lebih lembut dan menghindari pengumpulan sel. Proses kedua menggunakan vakum langsung tetapi melibatkan pisau aduk dalam termos di atas filter yang mencegah partikel menetap di semua selama proses konsentrasi.

### **2.8.2 Sentrifugasi**

Sentrifugasi adalah metode memisahkan alga dari media dengan menggunakan *centrifuge* sehingga menyebabkan alga mengendap di bagian bawah sedangkan media tetap berada di bagian atas. Sentrifugasi dan pengeringan saat ini dianggap terlalu mahal untuk penggunaan pribadi, namun bermanfaat untuk digunakan dalam skala industri.

### **2.8.3 Flotasi**

Flotasi biasanya digunakan dalam kombinasi dengan flokulasi untuk panen alga dalam air limbah. Ini adalah metode yang sederhana untuk membuat alga dapat dibuat mengapung di permukaan medium. Flotasi yang digunakan dapat berupa flotasi udara terlarut yang menggunakan tawas sebagai flokulan dan gelembung udara. bentuk flotasi lainnya menggunakan flotasi buih tetapi biaya flotasi diperkirakan terlalu tinggi untuk kebutuhan komersial.

### **2.8.4 Flokulasi**

Flokulasi adalah metode untuk memisahkan alga dari media dengan menggunakan bahan kimia untuk memaksa ganggang untuk membentuk

flok/gumpalan. Kerugian utama dari metode ini adalah pemisahan bahan kimia tambahan sulit untuk dihilangkan dari alga yang telah dipisahkan, mungkin membuatnya tidak ekonomis tidak efisien untuk penggunaan komersial, meskipun mungkin praktis untuk penggunaan pribadi. Biaya untuk menghapus bahan kimia ini mungkin terlalu mahal untuk komersial. Flokulan yang digunakan adalah alum dan besi klorida. Pemanenan oleh flokulasi kimia merupakan metode yang sering terlalu mahal untuk operasi besar. Mengganggu pasokan karbon dioksida ke sistem alga serta dapat menyebabkan ganggang untuk *flocculate* sendiri, yang disebut "autoflocculation".

## 2.9 Penelitian yang Telah Dilakukan

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 (peristiwa penutupan satu sel oleh sel lain yang menyebabkan tidak meratanya cahaya dan CO<sub>2</sub> yang didapatkan oleh alga) yang terjadi dalam kultur alga di dalam reaktor dapat diatasi. Berikut adalah beberapa penelitian dengan perlakuan filtrasi yang telah dilakukan :

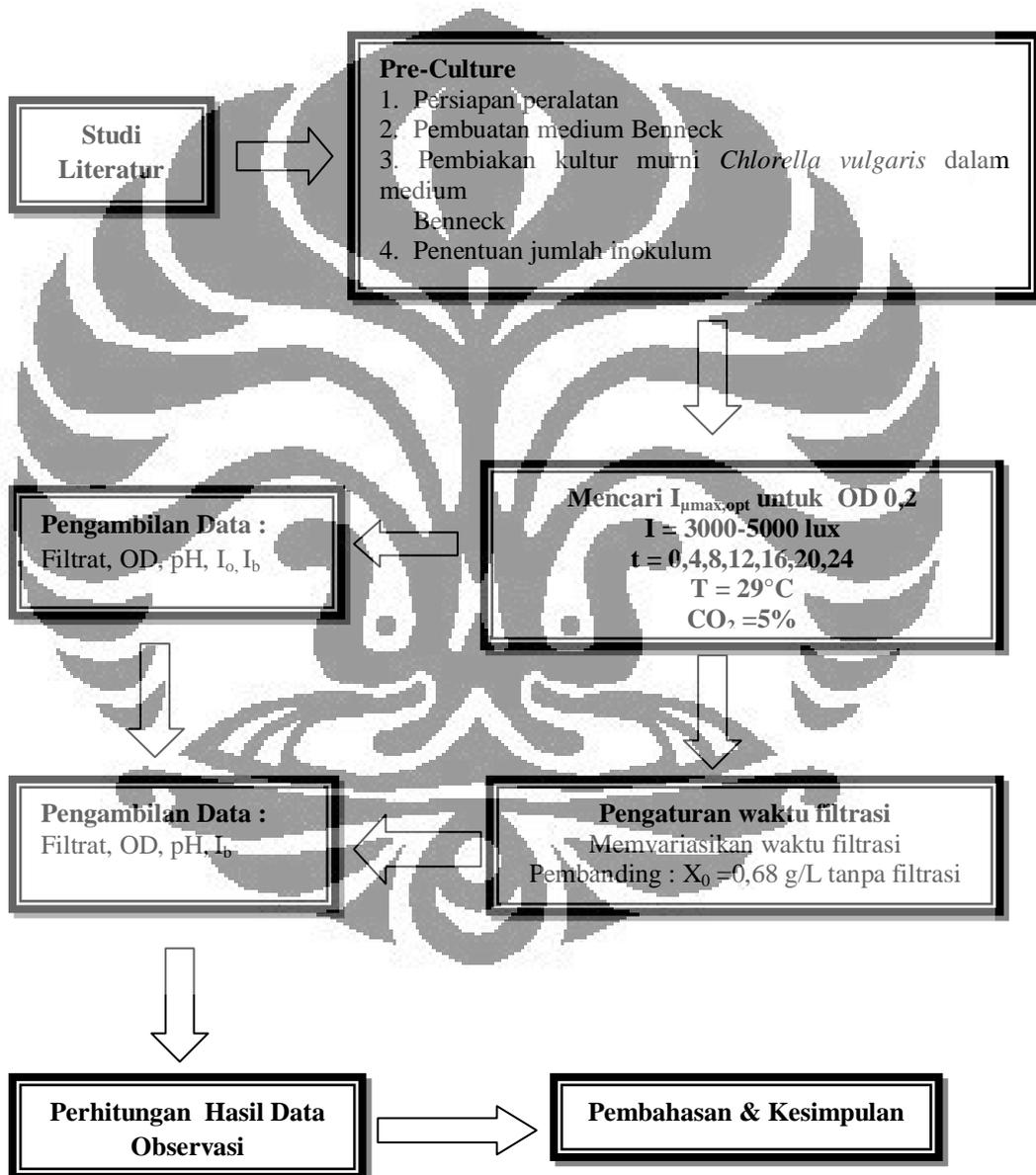
Tabel 2.5. Penelitian dengan Perlakuan Filtrasi yang Telah Dilakukan

Peneliti / Tahun	Judul Penelitian	Kesimpulan
Ahmed Syarif, 2008	Peningkatan Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg dengan Perlakuan Aliran Sirkulasi Media Kultur Pada Pencahayaan Alterasi	Penggunaan pencahayaan alterasin akan menghasilkan jumlah sel 1,27 kali lebih banyak dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu dengan menggunakan sama-sama perlakuan filtrasi aliran sirkulasi media
Rachma Nuzulliany, 2008	Perlakuan Filtrasi Aliran Sirkulasi Media Kultur Untuk Peningkatan Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg Melalui Pencahayaan Kontinyu dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah	Penggunaan perlakuan filtrasi memberikan peningkatan terhadap biomassa yang dihasilkan sekitar 1,03 kali lipat dibandingkan dengan reaktor tanpa filtrasi,
Heru Darmawan, 2010	Pengaturan Kecepatan Aliran Hisap Dalam Perlakuan Filtrasi Media Kultur Untuk Peningkatan Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg	Perlakuan filtrasi dengan pengaturan kecepatan aliran hisap pada kultivasi <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg berhasil meningkatkan produksi biomassa sebesar 1,43 kali lipat atau mengalami peningkatan sebesar 43% dibandingkan dengan biomassa yang dihasilkan pada kultivasi tanpa filtrasi dengan kerapatan dan jenis pencahayaan yang sama.

### BAB 3 METODOLOGI 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. *Air Flow* kapasitas 140 L/m merek resun LP-100
3. Tabung CO<sub>2</sub> yang dilengkapi dengan regulator
4. Flowmeter udara dan flowmeter CO<sub>2</sub>
5. Rangkaian filtrasi
6. *Spons*
7. Lampu Philips Halogen 20W/12V/50Hz (sebagai sumber pencahayaan) dan transformator 220 V primer/12 V sekunder.
8. T-septum yang terbuat dari bahan gelas (sebagai titik indikator konsentrasi CO<sub>2</sub> input fotobioreaktor).
9. 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>.
10. Selang silikon dan selang plastik (sebagai rangkaian peralatan dan konektor rangkaian).
11. Syringe 1001 RT Hamilton 1 cm<sup>3</sup> (*inlet-outlet*)(untuk mengambil sampel dari *input* dan *output* CO<sub>2</sub>)
12. Set Lightmeter Lxtron LX-103 (sebagai penghitung kekuatan intensitas cahaya, dengan satuan Lx ataupun Foot-Candle).
13. pH meter HANNA Model HI 8014 dengan larutan buffer 4 dan 7
14. Lemari kerja ultraviolet (sebagai transfer box)
15. Spectro UV-VIS RS Spectrometer, LaboMed. Inc (untuk menghitung OD/absorbansi pada 600 nm).
16. Unit Gas Chromatography TCD Shimadzu GC-8A (untuk mengukur konsentrasi gas CO<sub>2</sub> input dan output fotobioreaktor), Recorder C-R6A

Chromatopac (untuk mendapatkan *print out* dari hasil GC), tabung gas (*carrier gas*) Helium.

Sedangkan untuk bahan penelitian yang digunakan adalah :

1. Starter mikroalga hijau *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan usia  $\pm$  60 jam yang telah dihitung kerapatannya (berat kering/volume) 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 ( $t$ ), kerapatan awal ( $X_0$ ), variasi waktu filtrasi.

#### 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 ( $X$ ), konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  dalam udara input dan output ( $y_{\text{CO}_2}$ ), pH dan besar intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh reaktor ( $I_b$ ).

#### 3.3.3. Variabel Tetap

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

### 3.4 Prosedur Penelitian

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

#### 3.4.1. Studi Literatur

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

### 3.4.2. Persiapan Peralatan dan Medium

Peralatan seperti fotobioreaktor kolom gelembung (aquarium), filter udara, filter biomassa, multi sparger, peralatan *venture* 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.

#### a) Pembuatan Rangkaian Peralatan

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

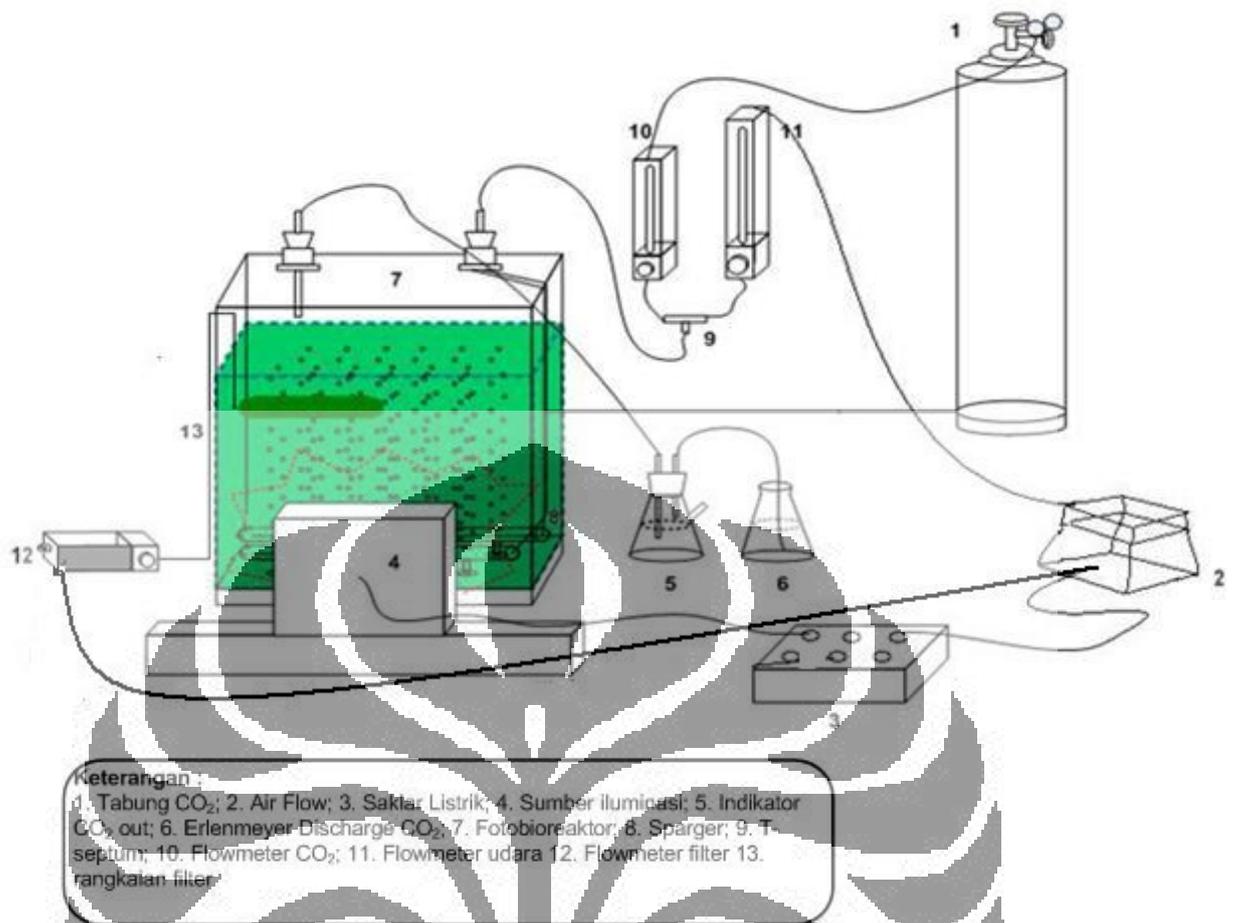
Untuk penghubung rangkaian digunakan selang silikon dan selang plastik. Pada tiap sambungan selang dilapisi dengan selotip untuk memastikan tidak ada sambungan yang bocor sekaligus mencegah kontaminan masuk ke dalam rangkaian.

Kemudian dipasang rangkaian alat filtrasi di dinding dalam reaktor, untuk penghubung rangkaian filtrasi digunakan selang silikon dan satu buah flowmeter udara yang dihubungkan dengan satu buah air flow.

Kalibrasi flowmeter juga dilakukan agar dapat diketahui dengan tepat skala dari masing-masing flowmeter. Hal ini penting karena  $\text{CO}_2$  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.

Berikut adalah ilustrasi rangkaian alat penelitian yang akan digunakan pada penelitian ini yaitu :



**Gambar 3.2. Skema Alat Penelitian**

b) 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 lagi sisa sabun pada peralatan yang akan digunakan.

2. Pengeringan

Peralatan yang telah dicuci kemudian dibilas sampai bersih, selanjutnya dikeringkan menggunakan tisu kering atau dengan kompresor 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°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.

#### c). 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 yaitu :

**Tabel 3.1 Bahan – Bahan Pembuatan Medium Benneck**

Bahan	(mg/dm <sup>3</sup> aquadest)
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	200
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	100
NaNO <sub>3</sub>	500
FeCl <sub>3</sub>	3-5

Pertimbangan penggunaan medium ini antara lain karena stok *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 dan 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,  $\text{FeCl}_3$  3-5 mg. 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.

#### 3.4.3 Pembiakan Kultur *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam Medium Benneck

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

Cara pembiakan medium kultur murni :

1. Menyiapkan medium serta peralatan pembiakan (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. Pindahan 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  $1 \text{ v/vm}$ . Pada tahap ini juga harus diberikan cahaya namun dengan intensitas yang kecil  $\pm 1000 \text{ lx}$ .
4. Pembiakan dapat dilakukan selama satu minggu atau lebih bila bertujuan untuk memperbanyak stok yang ada, tetapi jika hanya untuk melewati *lag time* dapat dilakukan selama 2-3 hari atau  $\pm 60$  jam, tergantung jumlah selnya.

### 3.4.4 Penentuan Kerapatan Biomassa *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 inokulum stok 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  $N_{sel}$ .

### 3.4.5 Pelaksanaan Kegiatan Riset

Tahap pertama yang dilakukan adalah pre-culture kemudian dilakukan pencarian intensitas optimum untuk OD 0,2. Setelah itu, dilakukan kultivasi dengan variasi waktu filtrasi 2, 3, 4 jam serta non filtrasi sebagai control.

### 3.4.6 Pengambilan Data

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

- pH kultur media dalam fotobioreaktor
- Intensitas cahaya dibalik reaktor/ $I_b$  (Lx)
- Kerapatan biomassa dalam kultur media dalam fotobioreaktor (g/L)
- Kerapatan biomassa yang terperangkap dalam filter (g/L)
- Konsentrasi gas  $CO_2$  dalam udara input dan output ( $y_{CO_2}$ )

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, konsentrasi gas  $CO_2$  dalam udara input dan output ( $y_{CO_2}$ ) 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 dalam 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, selama 4 jam sekali dan filtrat selama 4 jam sekali)

### 3.4.7. Pengolahan Data Penelitian

Variabel penelitian yang diambil yaitu OD<sub>600</sub>, pH dan I<sub>b</sub> akan diolah menggunakan beberapa metode perhitungan, antara lain :

#### a) Pengolahan Data OD<sub>600</sub>

Nilai OD yang didapatkan dari hasil penelitian akan dikonversi menjadi nilai N sel dan X dimana N sel adalah jumlah sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang terdapat di dalam satu satuan volume, sedangkan berat kering biomassa (X) adalah berat dari *Chlorella vulgaris* Buitenzorg 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 Nsel 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 dan merupakan waktu yang diperlukan untuk sekali pembelahan sel. Pada pengolahan ini model yang digunakan adalah persamaan kinetika monod, yaitu :

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

dimana :

$\mu$  = laju pertumbuhan spesifik ( $h^{-1}$ )

N = jumlah sel ( $sel/cm^3$ )

X = berat kering sel/biomassa ( $g/dm^3$ )

t = waktu (h)

#### b) Pengolahan Data pH

Nilai pH digunakan untuk menghitung besar konsentrasi  $[HCO_3^-]$  dalam reaktor dengan menggunakan persamaan Henderson-Hasellbach, yaitu :

$$[HCO_3^-] = \left( \frac{K_{CO_2}}{H_{CO_2}} \right) \left( \frac{y_{CO_2} \cdot P_T}{10^{-pH}} \right) \left( \frac{\text{EXP}[A_k(1-T_0/T) + B_k \ln(T/T_0) + C_k(T/T_0 - 1)]}{\text{EXP}[A_h(1-T_0/T) + B_h \ln(T/T_0) + C_h(T/T_0 - 1)]} \right) \dots\dots\dots(3.2)$$

Dimana :

- P<sub>T</sub> = tekanan operasi (atm)
- y<sub>CO2</sub> = konsentrasi gas CO<sub>2</sub> yang diumpankan (5%)
- K<sub>CO2</sub> = 4,38 x 10<sup>-7</sup>
- H<sub>CO2</sub> = 2900 KPa/mol
- T = temperatur operasi
- T<sub>0</sub> = temperatur standar

c) Pengolahan Data CTR, CUR, dan q<sub>CO2</sub>

CTR (Carbondioxide Transfer Rate) merupakan banyaknya gas CO<sub>2</sub> yang ditransferkan dalam suatu volum medium yang dibutuhkan oleh metabolisme sel selama satu satuan waktu tertentu. q<sub>CO2</sub> adalah laju gas CO<sub>2</sub> yang ditransfer dalam suatu volum medium karena adanya aktivitas kehidupan biologi dalam satu satuan waktu tertentu.

$$q_{CO_2} = \frac{\Delta y_{CO_2} \cdot \alpha_{CO_2}}{X} \quad (h^{-1})$$

dimana :

- X = berat kering 1 sel *Chlorella vulgaris* B. x jumlah sel/cm<sup>3</sup> (g/dm<sup>3</sup>)
- Δy<sub>CO2</sub> = selisih antara konsentrasi CO<sub>2</sub> pada gas keluaran dan gas masukan bioreaktor tembus cahaya

$$CTR = \Delta y_{CO_2} \cdot \alpha_{CO_2} \quad (g/dm^3 \cdot h) \dots\dots\dots(3.3)$$

Dalam penelitian ini :

$$\alpha_{CO_2} = \frac{U_g \cdot A \cdot M_{CO_2} \cdot P}{V_{msd} \cdot R \cdot T}$$

$$\alpha_{CO_2} = \frac{151,5 \frac{dm^3}{h} \cdot 3,384 \frac{dm^3}{dm^3} \cdot 44 \frac{g}{mol} \cdot 1 \text{ atm}}{18 \frac{dm^3}{dm^3} \cdot 0,082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K} \cdot 302 \text{ K}}$$

$$\alpha_{CO_2} = 50,61 \frac{g}{dm^3 \cdot h}$$

CUR (Carbon Uptake Rate) merupakan laju penggabungan CO<sub>2</sub> menjadi suatu biomaterial yang ditentukan berdasarkan laju pertumbuhan (Ohtaguchi et al, 1997).

$$CUR = \frac{44}{\beta} \cdot \frac{dX}{dt}$$

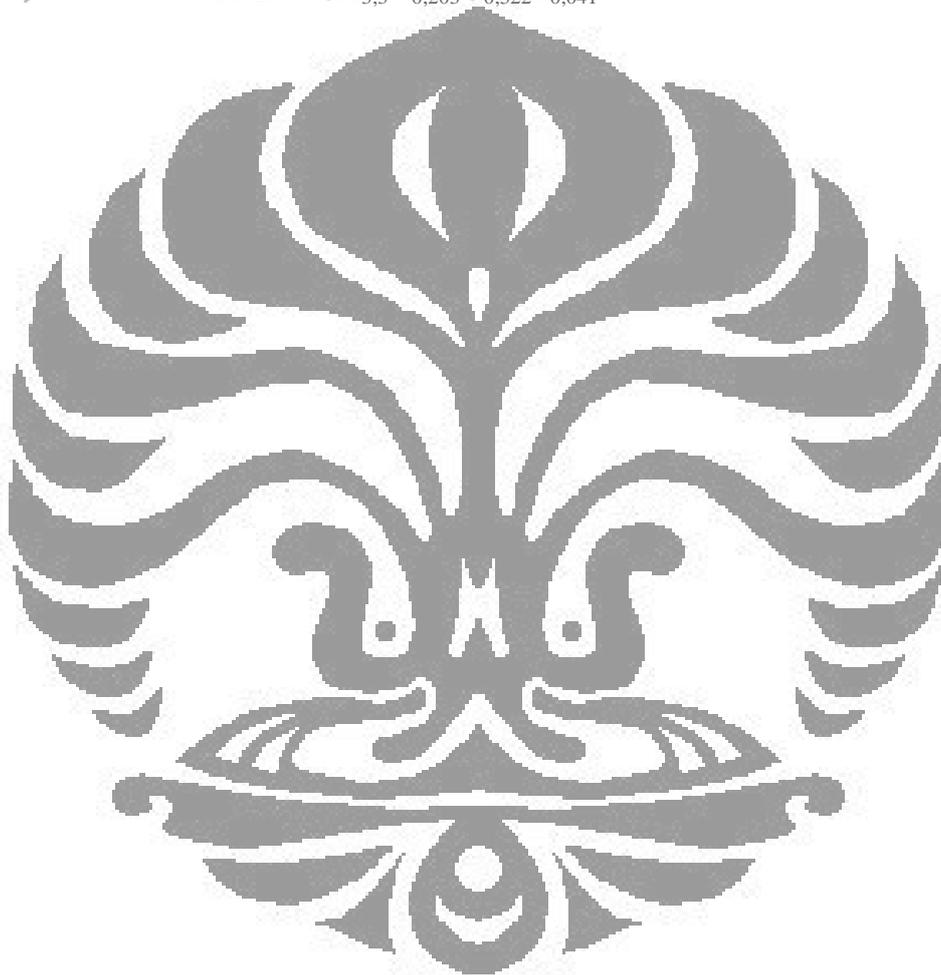
(g/dm<sup>3</sup>.h)..... (3.4)

Tabel 3.2  
*Elemental Analysis Sel Chlorella vulgaris Buitenzorg*

Elemen (% berat)				
C	H	N	O	P
22	6,05	5,2	9,45	2,36

dimana :

$$\beta = 24,565$$



## 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 penelitian ini, mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dikultivasi dalam sebuah fotobioreaktor flat dengan sistem aerasi menggunakan sparger melalui teknik filtrasi secara kontinu untuk mendapatkan waktu yang optimum dalam pemanenan mikroalga. Pembahasan mengenai hasil penelitian ini akan ditekankan pada pengaruh waktu filtrasi terhadap peningkatan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Penelitian ini dilakukn sesuai dengan saran dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Rachma nuzulliany dalam skripsinya yang berjudul “Perlakuan Aliran Sirkulasi Media Kultur Untuk Peningkatan Produksi Biomasa *Chlorella* sp Melalui Pencahayaan Kontinu Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah “pada tahun 2008. Melalui perlakuan aliran filtrasi, dapat meningkatkan produksi biomassa hingga 1,03 kali lipat dibandingkan tanpa filtrasi dengan kerapatan dan jenis pencahayaan yang sama. Akan tetapi, waktu filtrasi yang dilakukan Rachma dalam penelitiannya 12 jam sekali sehingga laju pertumbuhan *Chlorella* tidak dapat diimbangi oleh kemampuan filter. Berdasarkan inilah, waktu pemanenan yang optimum diharapkan menjadi suatu metode alternatif baru untuk menghasilkan produksi biomassa yang lebih besar dengan mengefektifkan kapasitas maksimum filter serta cahaya yang diberikan ke dalam kultur *Chlorella*. Oleh karena itu, dilakukan observasi mengenai waktu yang optimum dari alat filter yang memiliki bentuk dan ukuran yang sama. Untuk itu, variabel-variabel yang menjadi bahasan hanya terbatas pada variabel yang merupakan parameter pertumbuhan.

Pada penelitian ini, mikroalga yang digunakan adalah jenis *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang berasal dari dari koleksi kultur Sub Balai Penelitian Perikanan Air Tawar Depok. Penamaan nomenclature Buitenzorg diambil untuk identitas jenis *Chlorella* ini karena berasal dari daerah Bogor yang pada Zaman Belanda disebut Buitenzorg. Penelitian ini menggunakan fotobioreaktor tembus cahaya dengan sistem aerasi berupa gelembung skala menengah bervolume 18 L dengan ukuran reaktor (38,5 x 10 x 60) cm<sup>3</sup>. Desain dengan ukuran ini bertujuan agar cahaya yang diberikan

dari sumber iluminasi dapat secara merata diterima oleh kultur mikroalga sehingga efek self shading tidak terjadi dan proses fotosintesis mikroalga dapat berlangsung optimum. Penggunaan fotobioreaktor flat tembus cahaya dilakukan karena fotobioreaktor flat 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).

Fotobioreaktor flat yang digunakan dilengkapi dengan filter berupa busa berpori. Tujuan penggunaan filter ini adalah menyerap biomassa yang dihasilkan *Chlorella* akibat pembelahan sel yang terjadi. Dengan diserap sebagian biomassa maka kepekatan atau kepadatan sel dalam fotobioreaktor berkurang sehingga terjadi pengurangan kompetisi mikroalga dalam menggunakan nutrisi serta mengurangi efek *self shading*. Dengan berkurangnya kompetisi dan efek *self shading* maka pencahayaan yang diterima mikroalga optimal sehingga proses fotosintesis yang berlangsung pada mikroalga juga optimal.

Selain itu penggunaan filter akan memperbesar jumlah biomassa yang dihasilkan. Biomassa yang dihasilkan merupakan jumlah biomassa yang ada dalam fotobioreaktor dan filtrat. Oleh karena itu diharapkan biomassa yang dihasilkan dalam kultivasi secara *batch* akan menghasilkan biomassa yang lebih besar daripada kultivasi tanpa filter pada bentuk, ukuran, dan volum fotobioreaktor yang sama.

Dengan teknik filtrasi diharapkan juga pencahayaan yang diberikan lebih sedikit sehingga terjadi penghematan energi dari sumber iluminasi. Pencahayaan yang optimal akan membuat fotosintesis pada kultur mikroalga juga optimal. Jika cahaya yang diberikan berlebih dapat membuat pertumbuhan mikroalga terhambat.

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan. Tahapan awal penelitian ini dimulai dengan melakukan kultur awal pada *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Tahapan ini mencakup sterilisasi peralatan, pembuatan medium Benneck, dan pembiakan kultur murni *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Alasan Pemilihan medium Benneck sebagai nutrisi untuk pertumbuhan mikroalga adalah karena medium ini mengandung unsur makro dan mikro yang sangat dibutuhkan oleh mikroalga. Unsur makro yang dibutuhkan berasal dari senyawa  $MgSO_4$ ,  $NaNO_3$ ,  $KH_2PO_4$ , sedangkan unsur mikro berasal dari senyawa  $FeCl_3$ . pembiakan kultur murni *Chlorella vulgaris* Buitenzorg bertujuan untuk memperoleh kondisi mikroalga yang seragam sebagai stock yang

akan digunakan, memperbanyak sel serta membiasakan mikroalga berada pada kondisi operasi yang akan digunakan dalam proses ini.

Pada tahap awal penelitian, dilakukan pembuatan kurva  $OD_{600}$  Vs X. Pembuatan kurva  $OD_{600}$  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 hanya mengetahui absorbansinya (OD) yang kemudian dihubungkan dengan kurva  $OD_{600}$  Vs X. Pembuatan kurva kalibrasi ini dilakukan pada panjang gelombang 600 nm.

Tahapan penelitian berikutnya adalah pencarian intensitas cahaya yang memberikan laju pertumbuhan maksimum ( $I_{\mu\max, \text{opt}}$ ) dari tiap OD inokulum yang telah ditentukan. OD inokulum yang divariasikan adalah 0,2 ; 0,4 ; 0,8.  $I_{\mu\max, \text{opt}}$  akan diperoleh saat didapat laju pertumbuhan maksimum pada OD tertentu dari mikroalga. Variasi intensitas cahaya yang diberikan antara 3000 lx – 8000 lx. Setelah mendapatkan harga  $I_{\mu\max, \text{opt}}$  dari tiap OD inokulum untuk OD 0,2 ; 0,4; 0,8 maka data  $I_{\mu\max, \text{opt}}$  ini akan digunakan dalam kultivasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Proses selanjutnya adalah kultivasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Tahap ini diawali dengan pembuatan kerapatan awal dari mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yaitu pada OD 0,2 ( $\pm 0,71$  g/L). Pembuatan OD inokulum ini adalah dengan cara menuangkan *Chlorella* dari hasil *pre-culture* 6 L dan ditambahkan medium 12 L. Selanjutnya, kultur mikroalga dialirkan udara dan 5%  $CO_2$ . Selain itu berdasarkan data yang diperoleh pada tahap penentuan  $I_{\mu\max, \text{opt}}$  pada OD 0,2 maka intensitas cahaya yang digunakan adalah 4000 lx ( $983,33 \text{ W/m}^2$ ) dan laju alir hisap filter 3 L/menit pada OD 0,2 didasarkan pada data yang diperoleh oleh Heru Darmawan dalam skripsinya.

Setelah semua kondisi operasi ditetapkan, penelitian kemudian dilaksanakan. Data yang diambil dalam penelitian ini adalah  $OD_{\text{sel}}$ ,  $OD_{\text{filtrat}}$ , pH,  $I_{\text{back}}$ ,  $y_{CO_2 \text{in}}$  dan  $y_{CO_2 \text{out}}$  untuk rentang waktu yang telah ditentukan. Pada penelitian ini dilakukan pemvariasian waktu hisap filter. Waktu yang divariasikan dalam pengambilan data adalah 2,3 dan 4 jam sekali. Data *Optical Density* baik yang berada pada fotobioreaktor maupun filtrat dapat menunjukkan perubahan berat kering sel selama masa kultivasi. Berat kering sel cenderung meningkat selama waktu kultivasi dalam jangka waktu tertentu.

Pemvariasian waktu hisap filter ini bertujuan untuk mengurangi kepadatan sel dalam fotobioreaktor sehingga diperoleh laju penyaringan dan laju pertumbuhan sel

dalam fotobioreaktor yang sama dan intensitas cahaya yang diberikan menjadi optimal untuk pertumbuhan mikroalga pada kepadatan 0,2. Akan tetapi, jika laju penyaringan lebih besar daripada pertumbuhan, maka akan terjadi pengurangan jumlah sel yang ada di dalam fotobioreaktor sehingga tidak dapat menghasilkan produktivitas biomassa yang besar. Sebaliknya, jika laju penyaringan lebih kecil daripada laju pertumbuhan maka efek *self shading* dalam fotobioreaktor akan terjadi sehingga akan terjadi kompetisi dalam perebutan nutrisi oleh mikroalga dan berakibat pada cahaya yang diterima oleh mikroalga menjadi tidak merata. Karena keterbatasan cahaya dan nutrisi inilah yang menyebabkan fotosintesis pada mikroalga tidak optimal sehingga pertumbuhan mikroalga menjadi terhambat.

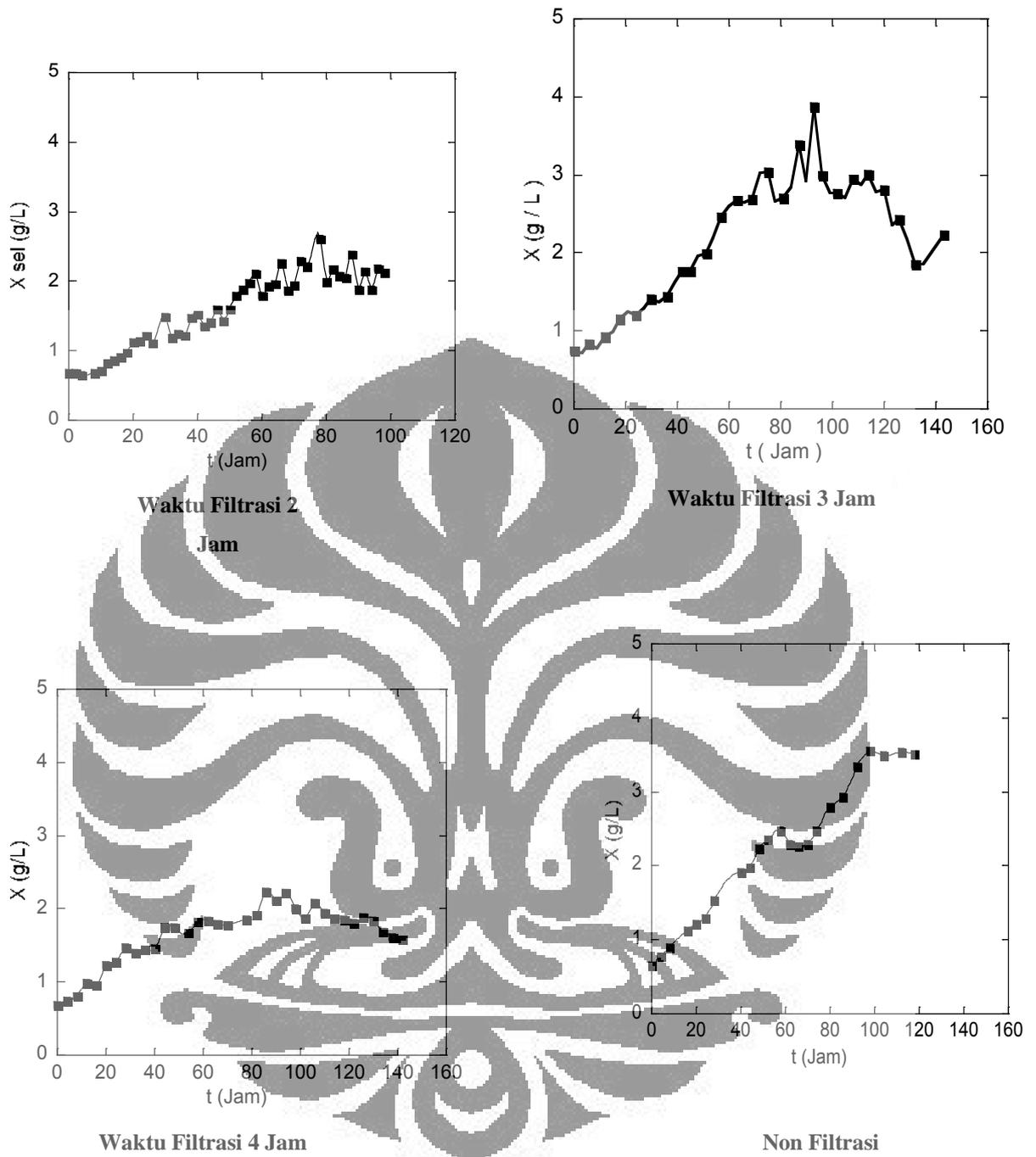
Data pH digunakan untuk melakukan perhitungan terhadap konsentrasi substrat  $\text{HCO}_3^-$  yang terdapat dalam medium. konsentrasi menunjukkan kemampuan aktivitas sel dalam fotobioreaktor sedangkan data  $I_0$  dan  $I_{\text{back}}$  digunakan untuk mengetahui besarnya energi cahaya yang tersedia dan dikonversi untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg digunakan data  $I_0$  dan  $I_{\text{back}}$ . Besarnya fiksasi  $\text{CO}_2$  oleh *Chlorella* diketahui dari data  $y_{\text{CO}_2\text{in}}$  dan  $y_{\text{CO}_2\text{out}}$ .

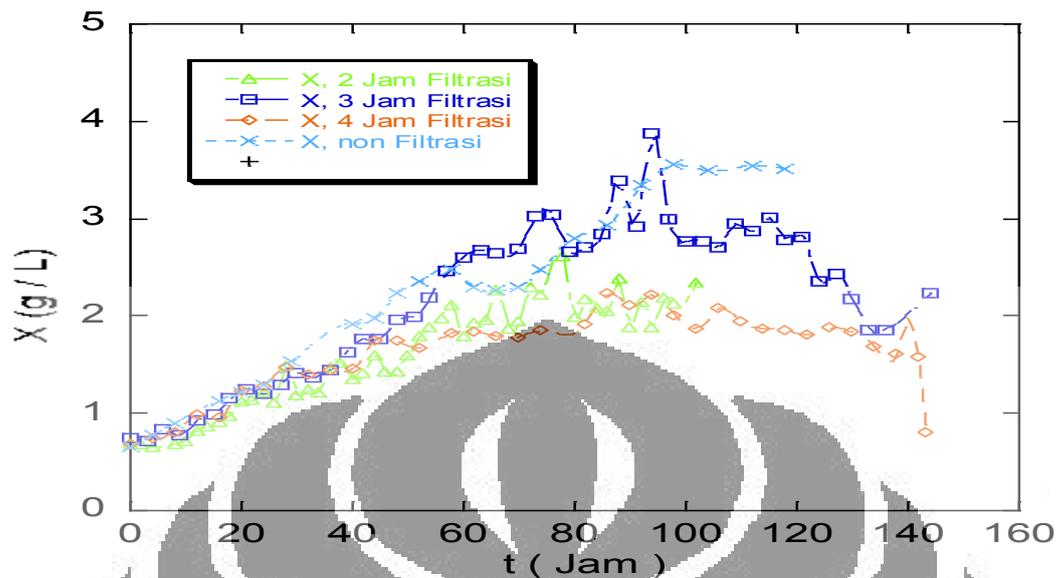
#### 4.2. Data Penelitian

Data hasil pengamatan yang didapat dari penelitian ini disajikan dalam dua bentuk yaitu data dalam bentuk angka dan data dalam bentuk grafik. Berikut adalah data grafik yang didapat dari pengamatan terhadap reaktor dengan perlakuan filtrasi dan tanpa perlakuan filtrasi :

##### 4.2.1 Pengaruh Waktu Filtrasi Terhadap Produksi Biomassa (X) *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Data yang diperoleh dari penelitian ini adalah dalam nilai OD yang diukur menggunakan spektrofotometer. *Optical Density* merupakan parameter penting untuk menghitung berat kering sel *Chlorella*. Nilai OD ini dikonversikan menjadi nilai berat kering (X) menggunakan persamaan yang terdapat pada kurva kalibrasi  $\text{OD}_{600\text{nm}}$  vs X. Semakin tinggi *Optical Density* (kerapatan sel) semakin besar berat kering *Chlorella*. Dengan bertambahnya periode kultvasi *Chlorella* maka berat kering sel bertambah besar. . Berikut adalah grafik berat kering vs t.





Gambar 4.1 Perbandingan X (berat kering)

Pada penelitian ini, digunakan inokulum awal dengan berat kering (0,681 g/L) atau *Optical Density* (OD) 0,2. Intensitas cahaya yang digunakan diatur konstan sebesar 4000 lux (8,878 W/m<sup>2</sup>) berdasarkan hasil yang diperoleh pada pengujian intensitas optimum untuk laju pertumbuhan maksimum pada OD 0,2. Kultur *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan perlakuan kontinu (intensitas tetap) digunakan sebagai data pembandingan. Yang membedakan hanya terletak pada penggunaan filter dan waktu pengambilan filter.

Pada grafik tersebut, terlihat bahwa berat kering biomassa cenderung naik dengan bertambahnya waktu. Hal ini diindikasikan dari bertambahnya nilai berat kering (X) dari *Chlorella vulgaris* akibat dari proses reproduksi aseksual yang dilakukan oleh *Chlorella* berupa pembelahan sel dengan pembentukan autospora. Tiap satu sel induk akan membelah 4, 8, atau 16 autospora yang selanjutnya akan menjadi sel-sel anak dan melepaskan dari induknya. Pada awal-awal kultivasi, *Chlorella vulgaris* dengan waktu filtrasi 4 jam dan non filtrasi meningkat dengan pesat daripada dengan kultur *Chlorella vulgaris* menggunakan teknik filtrasi waktu filtrasi 2 dan 3 jam. Pada awal kultivasi dengan waktu filtrasi 2 dan 3 jam, berat kering *Chlorella* (X) tidak mengalami peningkatan signifikan/lambat. Pengaruh dari penyerapan *Chlorella* dalam 2 dan 3 jam awal menghambat pertumbuhan *Chlorella*

*vulgaris* karena sel-sel *Chlorella* belum membelah secara maksimal sehingga mengurangi kerapatan sel *Chlorella* yang ada di dalam fotobioreaktor.

Akan tetapi, setelah jam ke – 40, berat kering (X) lebih besar terjadi pada waktu filtrasi 3 Jam. Hal ini disebabkan laju penyaringan dan pertumbuhan sel di dalam fotobioreaktor seimbang. Sel-sel yang baru dapat tumbuh karena cahaya dan nutrisi yang diberikan tetap dapat diterima secara merata oleh *Chlorella* di dalam kultur. Sedangkan untuk filtrasi 2 jam, penyaringan *Chlorella* terlalu cepat sehingga sel-sel yang ada di dalam fotobioreaktor belum sempat membelah secara sempurna. Akibatnya kerapatan sel (*Optical Density*) yang berada di dalam fotobioreaktor semakin lama turun. Dengan berkurangnya kerapatan sel, maka berat kering pun menjadi turun. Sedangkan dalam filtrasi 4 jam, pada saat jam 80 laju penyaringan *Chlorella* lebih besar dibandingkan laju pertumbuhan di dalam fotobioreaktor sehingga OD di dalam fotobioreaktor menjadi turun/lebih kecil. Akibatnya semakin lama periode kultivasi, OD di dalam fotobioreaktor cenderung turun sehingga berat kering *Chlorella* menjadi tetap dan semakin lama turun.. Akan tetapi berat kering terbesar masih lebih tinggi pada perlakuan non filtrasi. Pada perlakuan non filtrasi sel-sel *Chlorella* yang bagus untuk membelah tetap berada di dalam fotobioreaktor dan tidak ada kontak tangan dengan kultur *Chlorella*. Hal ini yang menyebabkan kepadatan sel *Chlorella* dalam fotobioreaktor lebih tinggi.

Selain faktor biotik (kompetisi antar alga) dan laju penyaringan, frekuensi pemanenan juga mempengaruhi produksi berat kering *Chlorella*. Frekuensi pemanenan yang semakin sering mempengaruhi volume yang ada di dalam fotobioreaktor. Volum kultur akan mempengaruhi aerasi/mixing di dalam fotobioreaktor. Karakteristik gas dan liquid memiliki pengaruh yang kuat dalam sistem *mixing*.

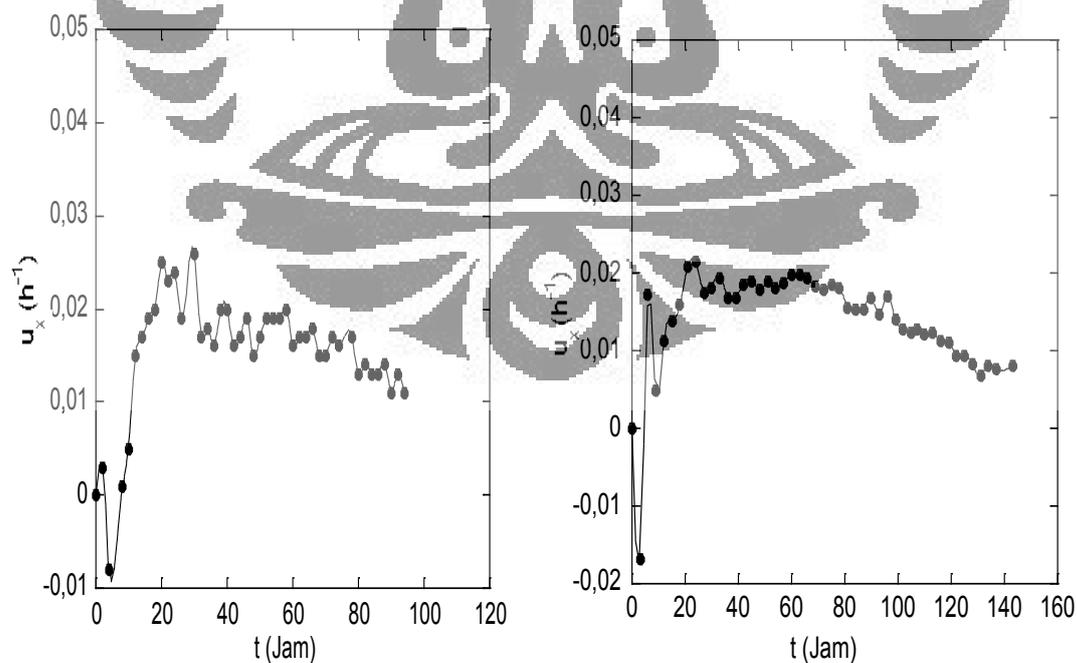
Frekuensi filtrasi 2 jam menyebabkan volum kultur di dalam fotobioreaktor berkurang lebih banyak dibandingkan pada frekuensi pemanenan 3 dan 4 jam. Sedangkan pada perlakuan non filtrasi, volume di dalam fotobioreaktor tetap. Volum kultur filtrasi 2 jam menyebabkan turbulensi dan shear stress yang lebih besar di dalam fotobioreaktor dibandingkan filtrasi 3 dan 4 jam. Turbulensi dan shear stress ini mempengaruhi transfer massa dan difusi medium ke dalam sel *Chlorella* sehingga dapat mempengaruhi struktur *Chlorella* berupa perubahan dinding sel, ukuran sel, vakuola yang besar serta kecenderungan agregasi sel. Turbulensi dan *shear stress* yang besar merusak struktur sel dan perubahan perilaku *Chlorella*. Oleh karena itu

fase stasioner pada filtrasi 2 jam terjadi lebih cepat dibandingkan filtrasi 3 jam. Selain itu, pada filtrasi 4 jam, ketinggian kultur di dalam fotobioreaktor menyebabkan ruang gerak *Chlorella* menjadi sedikit sehingga filter menyerap lebih banyak *Chlorella*. Akibatnya adalah laju penyaringan *Chlorella* melebihi laju pertumbuhan di dalam fotobioreaktor dan fase stasioner menjadi lebih cepat.

Secara keseluruhan, fase stasioner dalam perlakuan filtrasi lebih cepat dibandingkan perlakuan non filtrasi. Hal ini disebabkan laju penyaringan pada perlakuan filtrasi lebih besar dibandingkan laju pertumbuhan *Chlorella* di dalam fotobioreaktor.

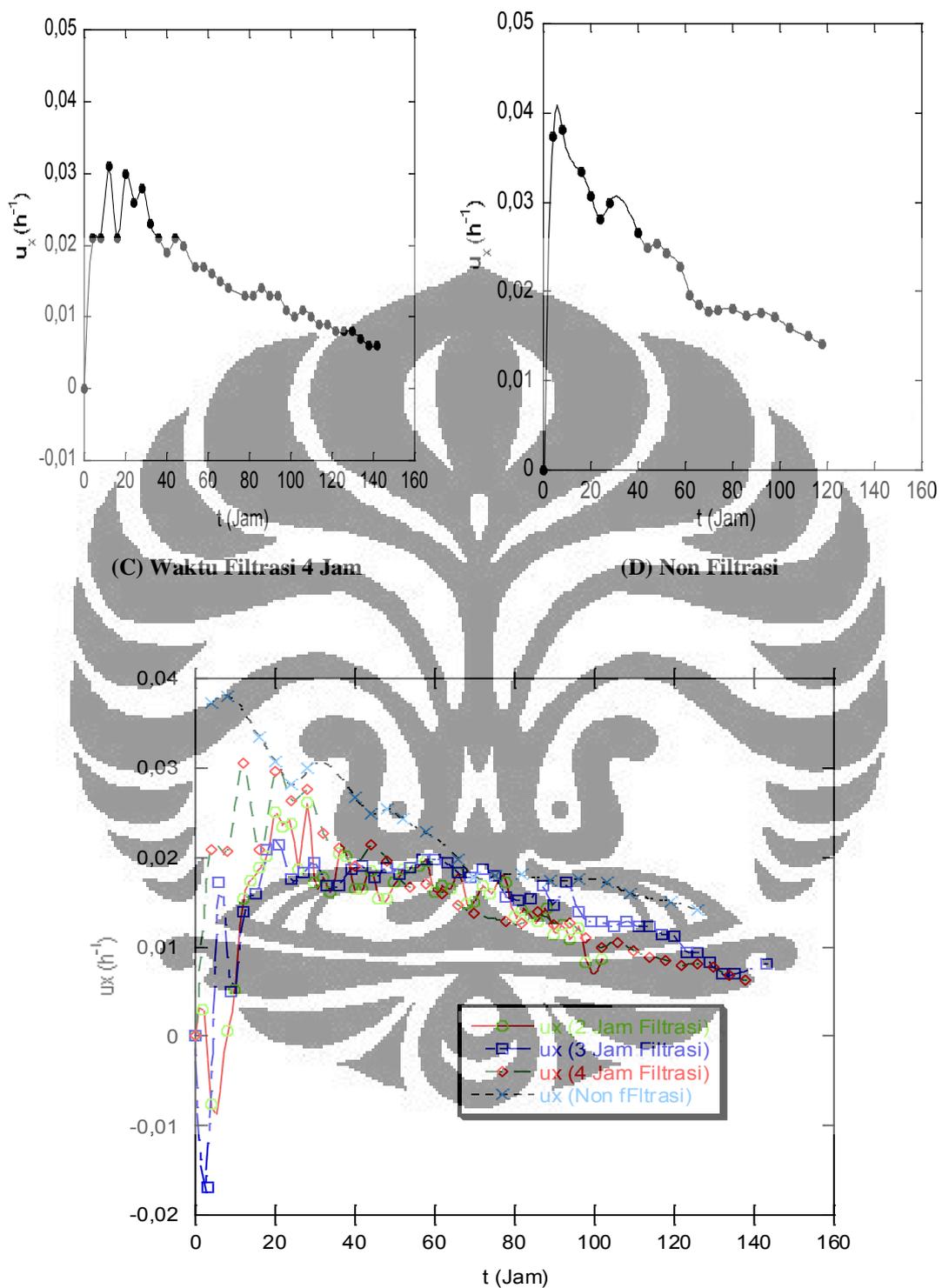
#### 4.2.2 Pengaruh Waktu Filtrasi Terhadap Produksi Laju Pertumbuhan ( $\mu_x$ ) *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Laju pertumbuhan spesifik ( $\mu_x$ ) adalah laju pertumbuhan sel/produksi biomassa pada fasa logaritmik, yang merupakan waktu yang diperlukan untuk sekali pembelahan sel. Berikut adalah kurva laju pertumbuhan spesifik pada perlakuan variasi waktu filtrasi dan non filtrasi terhadap waktu.



(A) Waktu Filtrasi 2 Jam

(B) Waktu Filtrasi 3 Jam



**Gambar 4.2 Pengaruh Pengaturan Waktu Filtrasi dan non Filtrasi Terhadap  $\mu_x$**

Fase yang dialami oleh *Chlorella* adalah fase logaritmik (pertumbuhan). Seiring dengan bertambahnya waktu laju pertumbuhan akan mencapai titik maksimal

(laju pertumbuhan maksimum), kemudian laju pertumbuhan akan mencapai fase stasioner hingga fase penurunan. Fenomena ini juga dapat dipahami dari persamaan yang digunakan untuk menentukan laju pertumbuhan ( $\mu$ ), yaitu :

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

dimana :

$\mu$  = laju pertumbuhan spesifik ( $h^{-1}$ )

$N$  = jumlah sel ( $sel/cm^3$ )

$X$  = berat kering sel/biomassa ( $g/dm^3$ )

$t$  = waktu (h)

Persamaan di atas menunjukkan bahwa laju pertumbuhan dipengaruhi waktu dan berat kering sel. Pada waktu tertentu (awal-awal kultivasi), laju pertumbuhan *Chlorella* sebanding dengan peningkatan waktu kultivasi dan berbanding terbalik pada rentang waktu tertentu (setelah melewati waktu tertentu untuk laju pertumbuhan maksimal).

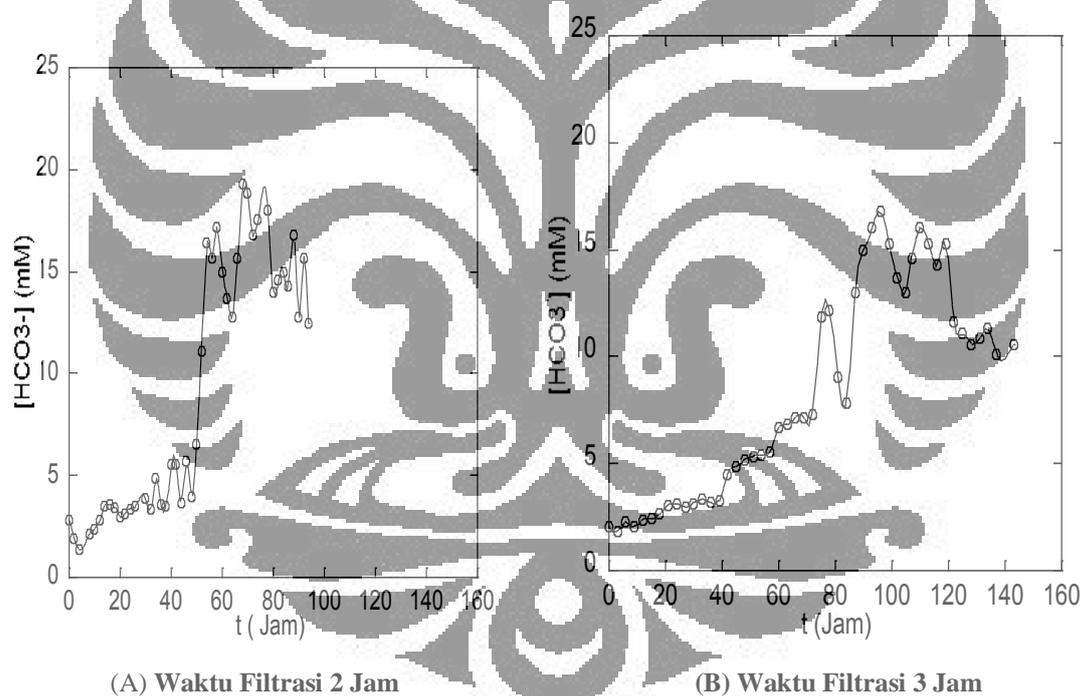
Dari grafik terlihat bahwa waktu filtrasi mempengaruhi laju pertumbuhan *Chlorella*. Pada awal-awal kultivasi, laju pertumbuhan pada teknik waktu filtrasi 2 dan 3 jam memberikan nilai yang negatif. Hal ini menunjukkan bahwa laju penyaringan filter menghambat pertumbuhan *Chlorella* dikarenakan kepadatan sel yang ada di dalam fotobioreaktor menurun sehingga cahaya yang diberikan ke dalam kultur menghambat pertumbuhan. Pada awal-awal kultivasi, waktu yang terlalu singkat mempengaruhi pertumbuhan *Chlorella* karena sel-sel *Chlorella* belum membelah secara optimal sehingga kerapatan sel *Chlorella* pun turun. Sedangkan pada awal-awal kultivasi teknik waktu filtrasi 4 jam memberikan laju pertumbuhan yang positif karena 4 jam adalah waktu yang optimal untuk sel *Chlorella* melakukan reproduksi aseksualnya (pembelahan). Sedangkan laju pertumbuhan terbesar berada pada perlakuan non filtrasi. Pada saat kultivasi, laju pertumbuhan maksimum perlakuan non filtrasi paling tinggi dan hanya membutuhkan waktu 8 jam untuk mencapai  $\mu_{max}$  (0,3808) sedangkan pada perlakuan filtrasi 4 jam membutuhkan waktu 12 jam (0,0305) . Bahkan pada perlakuan filtrasi 2 jam, untuk mencapai  $\mu_{max}$  (0,026) membutuhkan waktu 30 jam. Sedangkan untuk mencapai  $\mu_{max}$  (0,0214) pada filtrasi 3 jam membutuhkan waktu 24 jam.

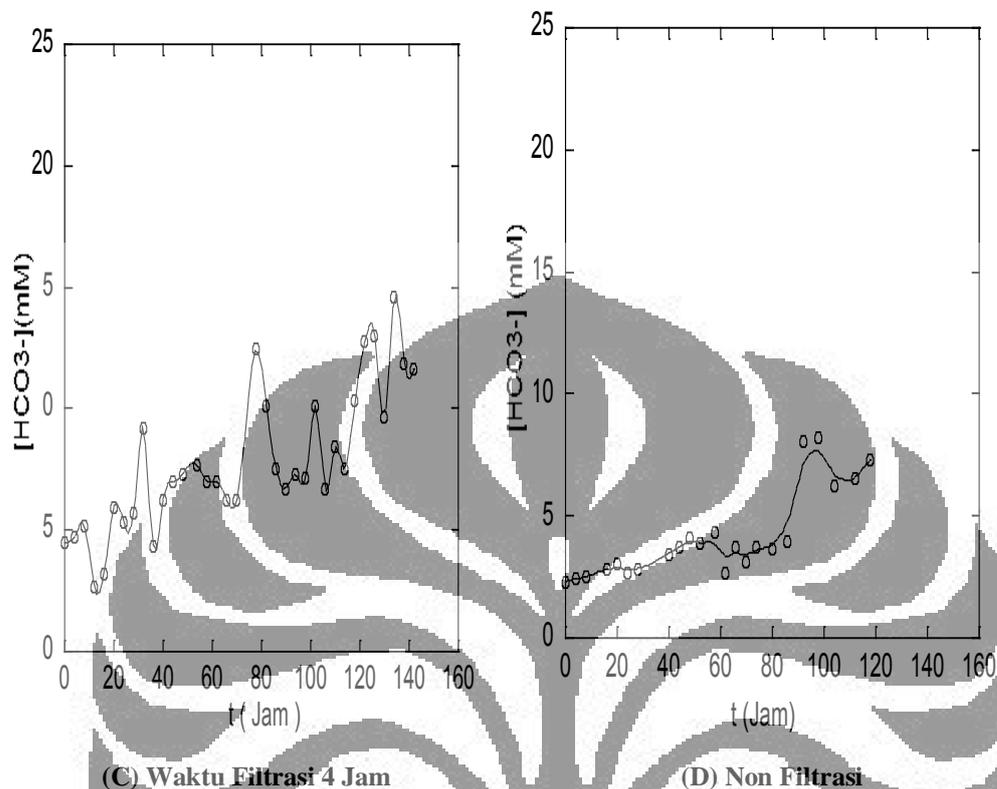
Pada grafik di atas terlihat bahwa setelah jam ke-50, laju pertumbuhan *Chlorella* dengan teknik filtrasi 3 jam secara keseluruhan lebih baik dibandingkan

teknik filtrasi 2 dan 4 jam. Hal ini disebabkan laju penyaringan dapat mengimbangi laju pertumbuhan di dalam fotobioreaktor. Hal inilah menunjukkan bahwa berat kering pada sel *Chlorella* dengan teknik filtrasi 3 jam lebih besar daripada teknik filtrasi 2 dan 4 jam. Dari keseluruhan grafik, laju pertumbuhan non filtrasi masih lebih baik dibandingkan dengan laju pertumbuhan teknik filtrasi.

#### 4.2.3 Pengaruh Waktu Filtrasi dalam Perlakuan Filtrasi Terhadap $[\text{HCO}_3^-]$ *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

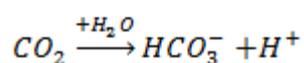
$[\text{HCO}_3^-]$  adalah parameter untuk mengetahui jumlah karbonat yang tersedia yang dapat dikonsumsi oleh sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam pertumbuhannya. Berikut adalah kurva  $[\text{HCO}_3^-]$  terhadap waktu pada perlakuan filtrasi dan non filtrasi



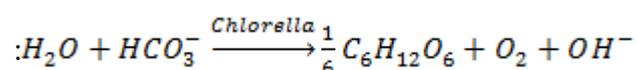


**Grafik 4.3 Pengaruh Pengaturan Filtrasi dan non Filtrasi Terhadap [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]**

Pada proses fotosintesis *Chlorella vulgaris*, CO<sub>2</sub> tidak diserap dalam bentuk gas tetapi dalam bentuk karbonat. Hal ini disebabkan *Chlorella vulgaris* adalah organisme akuatik yaitu organisme yang melakukan proses fotosintesis dalam air. Proses fotosintesis adalah proses yang dilakukan untuk menghasilkan energi yang dibutuhkan dalam pertumbuhan *Chlorella*. Proses fotosintesis yang terjadi di dalam kultur *Chlorella* diawali dengan pembentukan ion karbonat akibat reaksi antara CO<sub>2</sub> dengan air.



[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] inilah yang berperan penting dalam proses fotosintesis *Chlorella*. Selanjutnya [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] bereaksi dengan air yang terdapat dalam sel membentuk senyawa organik seperti glukosa dan ion OH<sup>-</sup>, seperti yang tergambar pada reaksi berikut ini



Nilai  $[\text{HCO}_3^-]$  dipengaruhi oleh nilai pH yang diukur dengan menggunakan pH meter. pH dalam medium kultur adalah faktor penting dalam kultivasi *Chlorella*. pH ini menentukan kelarutan dan ketersediaan  $\text{CO}_2$  dalam kultur dan dapat secara langsung ataupun tidak langsung mempengaruhi metabolisme *Chlorella*. Perhitungan terhadap  $[\text{HCO}_3^-]$  bertujuan untuk mengetahui jumlah  $[\text{HCO}_3^-]$  yang dapat dikonsumsi oleh sel *Chlorella* dalam pertumbuhannya. Senyawa  $[\text{HCO}_3^-]$  merupakan ion yang terbentuk akibat reaksi  $\text{CO}_2$  dengan air dalam kultur *Chlorella vulgaris*.

Sistem filtrasi yang digunakan dalam kultivasi menyebabkan kepadatan sel di dalam fotobioreaktor berkurang sehingga kebutuhan sel akan bikarbonat yang merupakan sumber karbon untuk pertumbuhan sel menjadi meningkat. Hal ini diindikasikan dari meningkatnya pH selama waktu kultivasi. Dengan ketersediaan  $[\text{HCO}_3^-]$  yang cukup ini menyebabkan aktivitas metabolisme sel pada fotosintesis semakin baik dan diindikasikan dengan meningkatnya pH akibat meningkatnya  $\text{OH}^-$  yang merupakan hasil fotosintesis.

Dari grafik atas terlihat bahwa dengan bertambahnya waktu kultivasi, pH dari kultur teknik filtrasi dan nonfiltrasi semakin naik. Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas metabolisme pada kultur meningkat selama bertambahnya waktu kultivasi sehingga membutuhkan  $[\text{HCO}_3^-]$  yang semakin besar. Sel-sel *Chlorella* melakukan aktivitas pembelahan sel nya yang menambah kerapatan sel di dalam kultur. Aktivitas pembelahan sel nya ini menghasilkan ion  $\text{OH}^-$  yang menaikkan nilai pH. Berdasarkan pendekatan hukum Henry besarnya  $[\text{HCO}_3^-]$  yang terbentuk dalam kultur meningkat seiring dengan bertambahnya nilai pH.

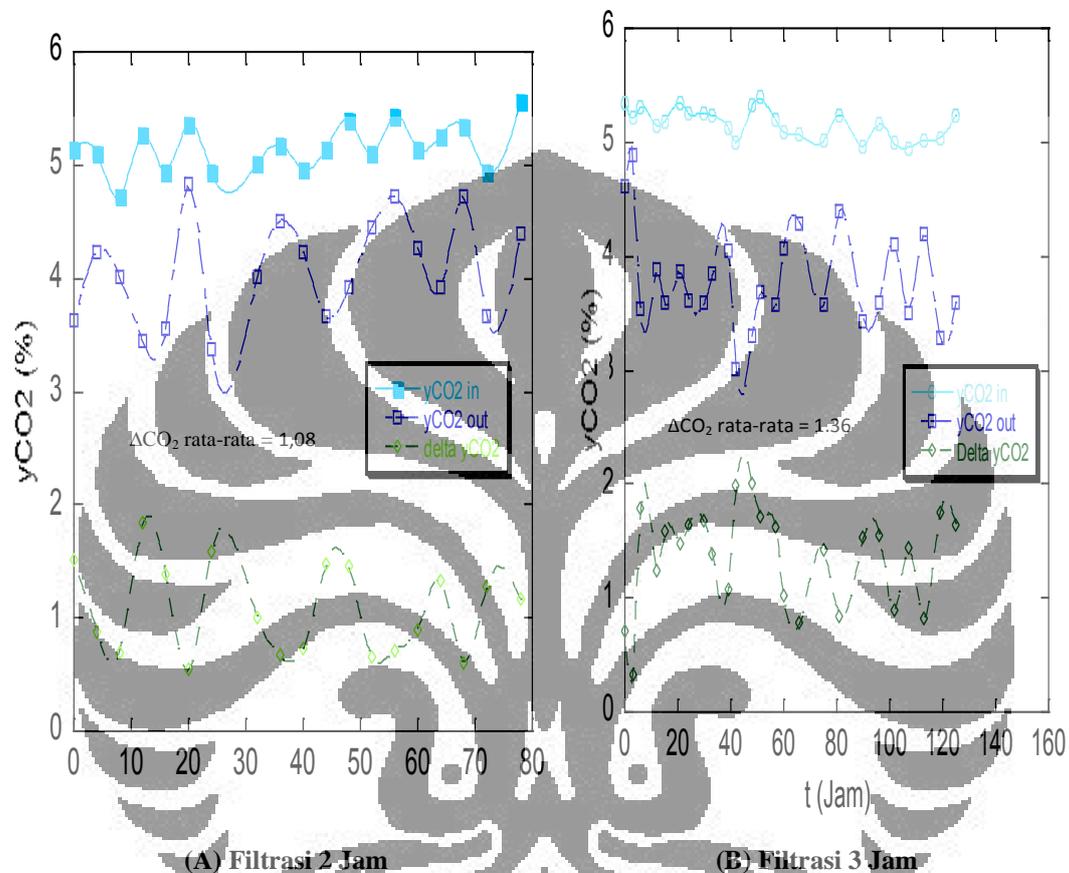
Berdasarkan grafik di atas, nilai  $[\text{HCO}_3^-]$  pada filtrasi 3 jam memberikan nilai yang paling besar sehingga menunjukkan bahwa aktivitas pertumbuhan yang terjadi lebih besar dibandingkan dengan filtrasi 2 dan 4 jam serta perlakuan non filtrasi. Filtrasi 3 jam memberikan pengaruh yang lebih baik dalam mengurangi kepadatan sel dalam kultur sehingga aktivitas pertumbuhannya menjadi lebih besar.

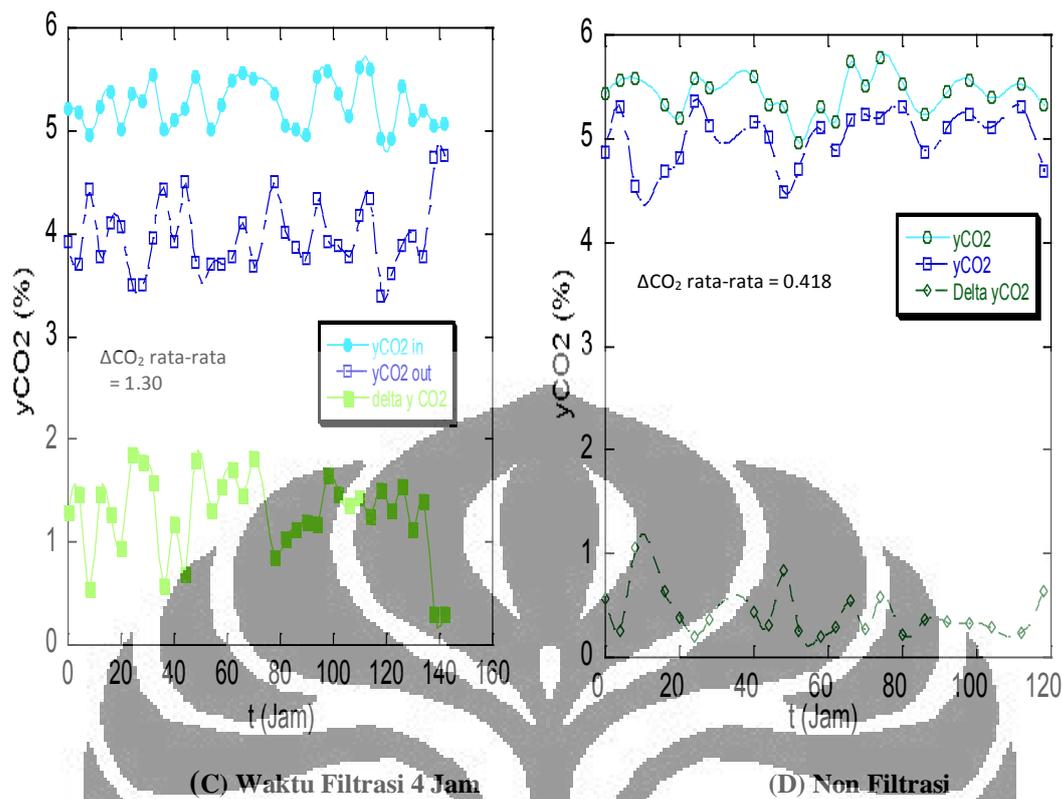
#### 4.2.4 Pengaruh Waktu Filtrasi dalam Perlakuan Filtrasi Terhadap Fiksasi $\text{CO}_2$

Proses fotosintesis yang dilakukan oleh *Chlorella* membutuhkan unsur karbon. Sumber karbon yang digunakan dalam penelitian ini adalah gas  $\text{CO}_2$ . Gas  $\text{CO}_2$  yang dialirkan bersama udara ke dalam fotobioreaktor ini kemudian diserap oleh *Chlorella*. Proses ini yang dinamakan fiksasi. Besarnya fiksasi  $\text{CO}_2$  ditunjukkan dari perubahan antara konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  inlet dengan konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  outlet. Selisih dari

konsentrasi gas CO<sub>2</sub> inlet dengan konsentrasi gas CO<sub>2</sub> outlet adalah besarnya konsentrasi gas CO<sub>2</sub> yang terfiksasi atau terserap oleh *Chlorella*.

Grafik hubungan antara Konsentrasi gas CO<sub>2</sub> ( $y_{CO_2}$ ) terhadap waktu (t) yang didapat dari penelitian ini sebagai berikut :





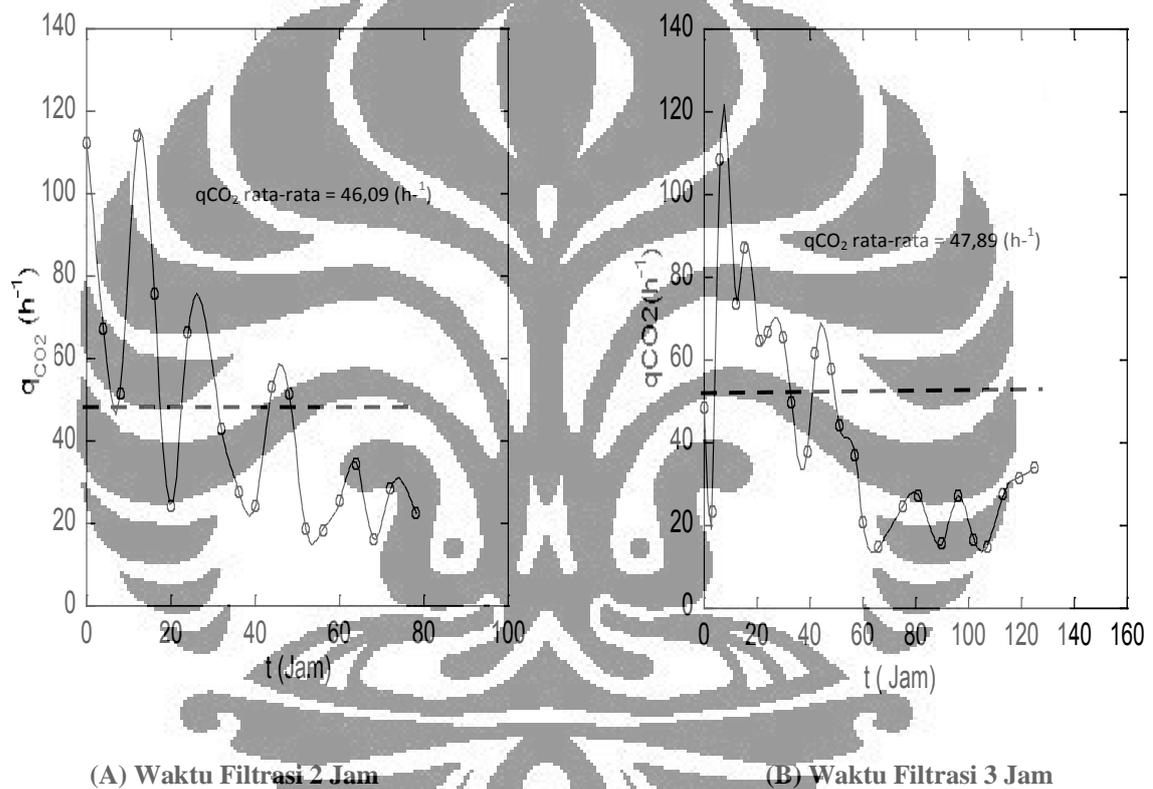
**Gambar 4.4** Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> (y<sub>CO2</sub>) yang Masuk dan Keluar Reaktor

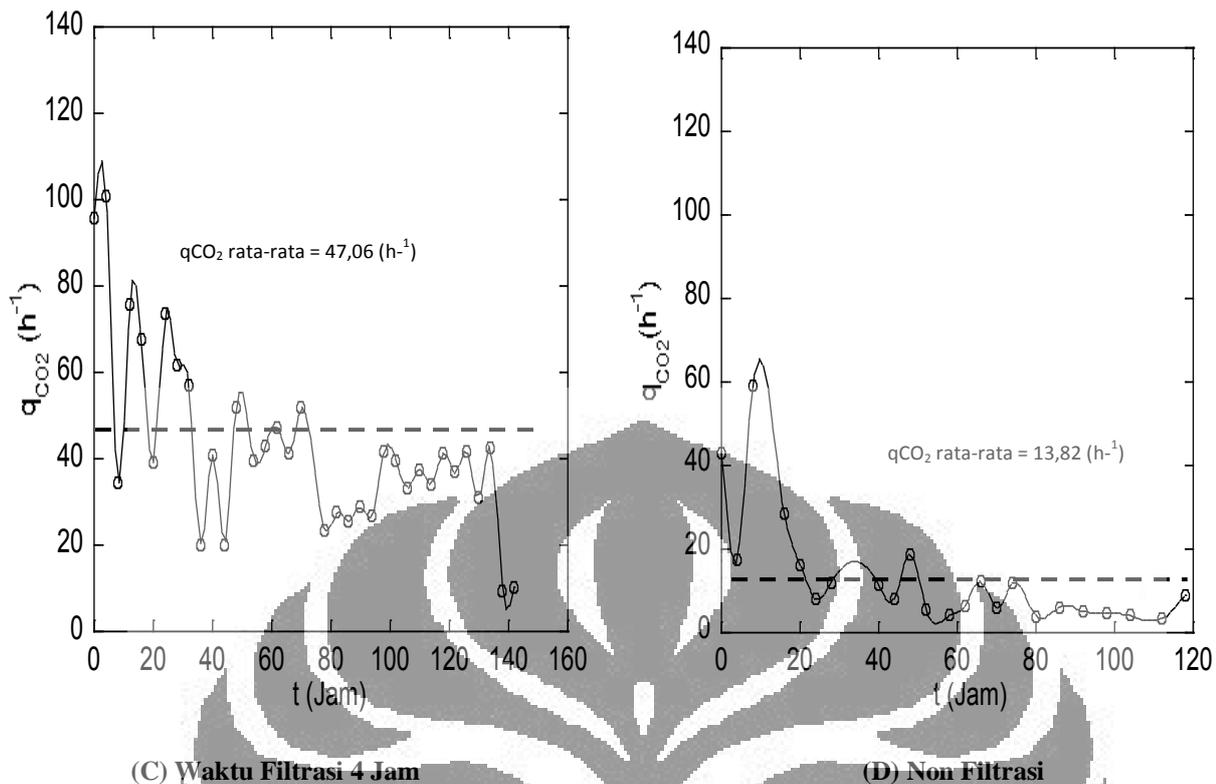
A : Filtrasi 2 Jam ; B : Filtrasi 3 Jam ; C : 4 Jam; D : Non Filtrasi

Dari gambar terlihat bahwa fiksasi CO<sub>2</sub> yang dilakukan *Chlorella* mengalami fluktuasi. Hal ini disebabkan aktivitas sel yang berada dalam fotobioreaktor berubah-ubah selama periode kultivasi. Pada awal kultivasi filtrasi 3 Jam, fiksasi CO<sub>2</sub> besar dan meningkat setelah jam 40 karena laju pertumbuhan sel yang cenderung konstan terhadap laju pertumbuhan maksimum. Filtrasi 3 jam menghasilkan fiksasi CO<sub>2</sub> rata-rata ( $\Delta\text{CO}_2$  rata-rata) terbesar yaitu 1,36. Hal ini disebabkan waktu filtrasi 3 jam efektif untuk memerangkap sebagian sel yang berada di dalam fotobioreaktor sehingga kepadatan sel di dalam fotobioreaktor berkurang. Dengan berkurangnya kepadatan sel maka kebutuhan akan bikarbonat dipenuhi dengan memfiksasi CO<sub>2</sub> yang lebih banyak akibat OH<sup>-</sup> yang dihasilkan *Chlorella* meningkat. Sedangkan filtrasi 2 jam kurang efektif disebabkan medium dan air yang berada dalam fotobioreaktor lebih cepat dan banyak berkurang daripada filtrasi 3 jam. Medium menjadi cepat jenuh dengan CO<sub>2</sub> sehingga CO<sub>2</sub> sedikit yang difiksasi dan banyak yang dilepas ke atas fotobioreaktor. Secara keseluruhan, dari gambar 4.4 fiksasi CO<sub>2</sub> pada perlakuan filtrasi lebih baik daripada non filtrasi.

#### 4.2.5 Pengaruh Pengaturan Waktu Filtrasi Terhadap Laju Fiksasi Karbondioksida ( $q_{CO_2}$ ) oleh *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

$q_{CO_2}$  adalah laju gas  $CO_2$  yang ditransfer dalam suatu volume medium karena adanya aktivitas kehidupan biologi dalam satu satuan waktu tertentu. Nilai  $q_{CO_2}$  didapatkan dari pengolahan data CTR di mana nilai  $q_{CO_2}$  dapat didefinisikan sebagai CTR per satuan biomassa (Wijanarko et al, 2004). Berikut adalah kurva  $q_{CO_2}$  terhadap waktu kultivasi.





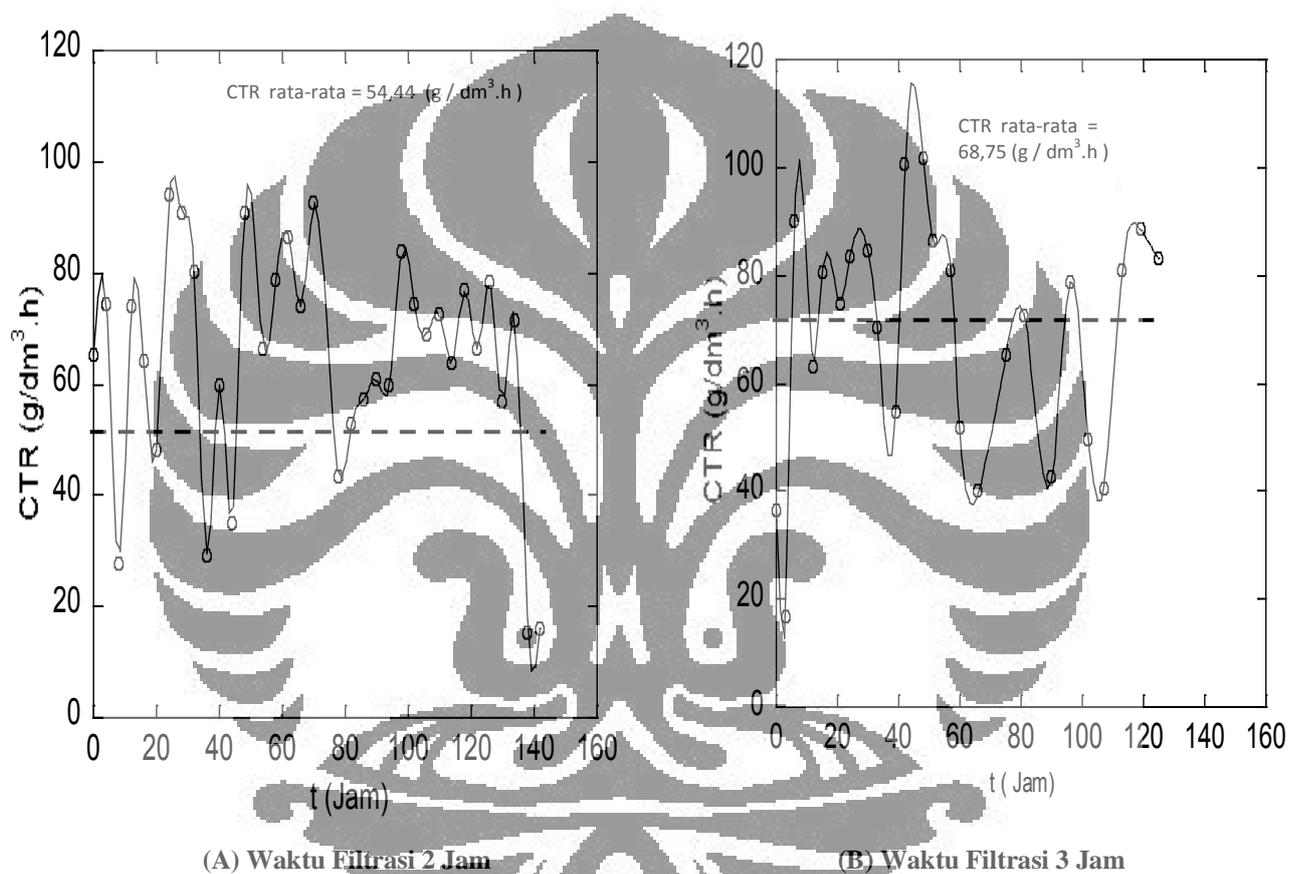
**Gambar 4.5 Pengaruh Pengaturan Waktu Hisap dalam Perlakuan Filtrasi Serta non Filtrasi terhadap Laju Fiksasi Karbondioksida ( $q_{CO_2}$ )**  
**A : Filtrasi 2 Jam ; B : Filtrasi 3 Jam; C: Filtrasi 4 Jam; D : Non Filtrasi**

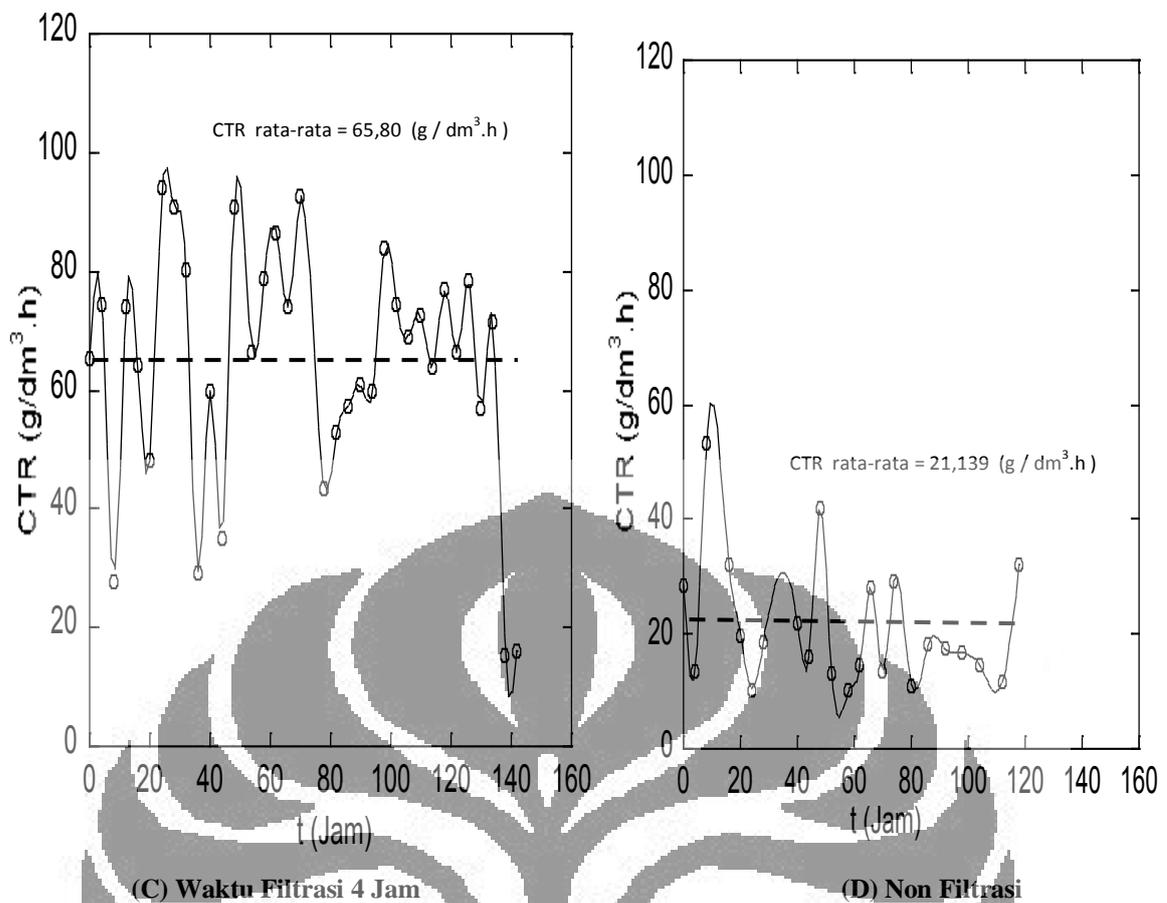
Gambar 4.5 menunjukkan bahwa laju fiksasi  $CO_2$  mengalami penurunan saat bertambahnya waktu kultivasi. Hal ini disebabkan kepadatan sel *Chlorella* semakin meningkat saat bertambahnya periode kultivasi sehingga berat kering *Chlorella* pun meningkat. Hubungan Laju fiksasi  $CO_2$  dengan berat kering sel adalah berbanding terbalik. Semakin tinggi berat sel maka semakin rendah laju fiksasi  $CO_2$ . Hal ini disebabkan produksi biomassa yang meningkat mengakibatkan karbondioksida yang tersedia untuk setiap sel semakin sedikit sehingga selama periode kultivasi tidak diimbangi dengan kemampuan fiksasi  $CO_2$  akibatnya laju fiksasi  $CO_2$  menurun. Secara keseluruhan pada gambar 4.5, laju fiksasi  $CO_2$  rata-rata pada perlakuan filtrasi lebih besar dibandingkan dengan non filtrasi dan yang terbesar terdapat pada filtrasi 3 jam.

#### 4.2.6 Pengaruh Waktu Filtrasi Terhadap CTR

Parameter yang digunakan untuk mengetahui banyaknya gas  $CO_2$  yang ditransfer dalam suatu volum medium dan dibutuhkan oleh metabolisme sel selama

satu satuan waktu tertentu adalah CTR. Sebagian  $\text{CO}_2$  yang ditransfer digunakan untuk metabolisme sel selama periode kultivasi. Nilai CTR merupakan perkalian antara besarnya fiksasi  $\text{CO}_2$  ( $\Delta\text{CO}_2$ ) dengan  $\alpha\text{CO}_2$ . Besarnya fiksasi  $\text{CO}_2$  ini merupakan perhitungan dari perubahan konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  yang masuk ke dalam fotobioreaktor dengan konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  yang keluar fotobioreaktor. Pengujian konsentrasi gas ini menggunakan Analizer Kromtografi Gas. Sedangkan konstanta  $\alpha\text{CO}_2$  adalah  $50,61 \text{ g / dm}^3 \cdot \text{h}$ . Berikut ini adalah grafik antara CTR dengan waktu.





**Gambar 4.6 Pengaruh Pengaturan Waktu Hisap dalam Perlakuan Filtrasi Serta non Filtrasi Terhadap Carbon Transfer Rate (CTR)**

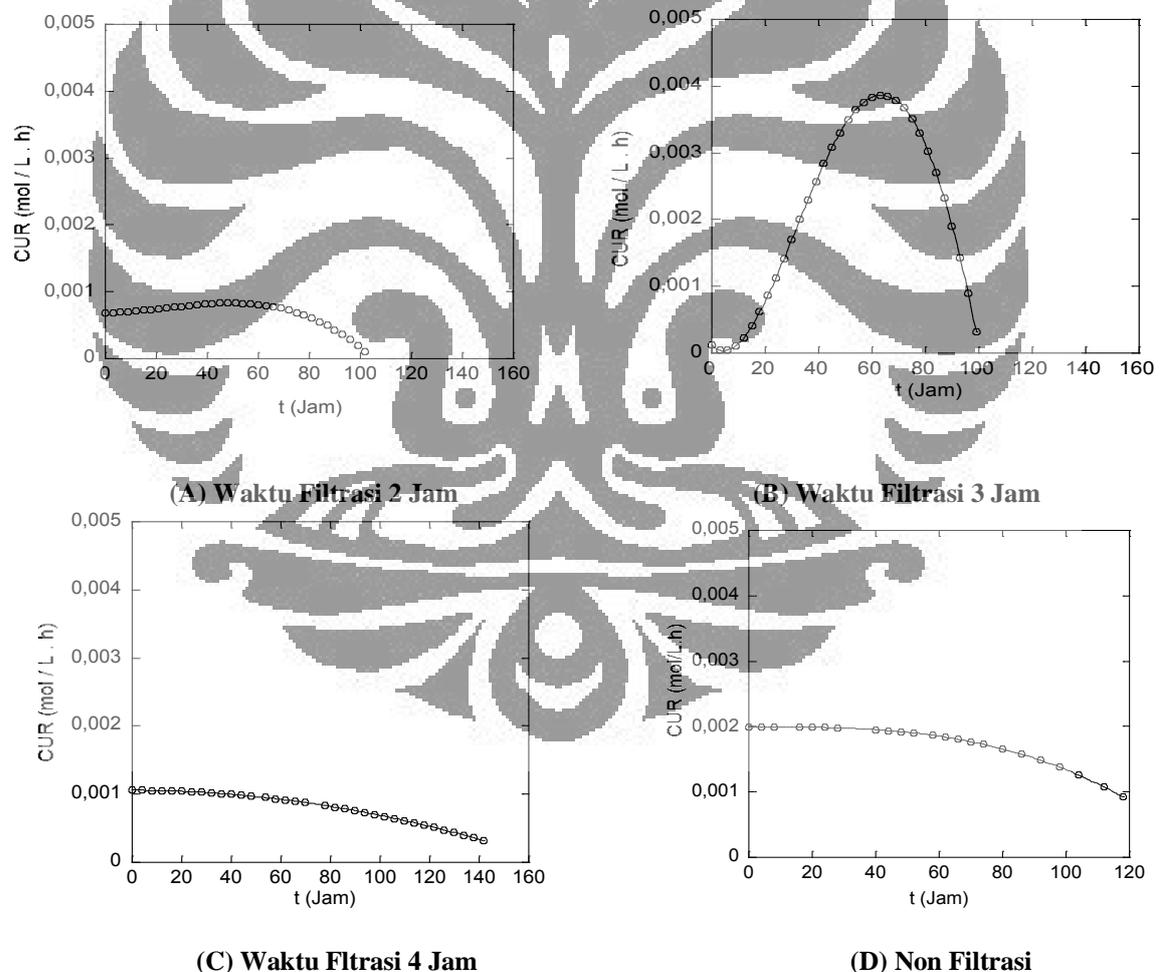
A : Filtrasi 2 Jam ; B : Filtrasi 3 Jam; C: Filtrasi 4 Jam; D : Non Filtrasi

Nilai CTR sebanding dengan besarnya fiksasi CO<sub>2</sub>. Akan tetapi nilai CTR cenderung turun dengan bertambahnya waktu kultivasi. Dari grafik terlihat bahwa CTR memiliki nilai yang tinggi pada awal masa pertumbuhan karena konsentrasi CO<sub>2</sub> di dalam medium kultur masih di bawah ambang batas kejenuhan, sehingga gas CO<sub>2</sub> lebih mudah larut dalam medium kultur. Dengan semakin lama waktu kultivasi kultur *Chlorella*, besarnya fiksasi CO<sub>2</sub> cenderung mengalami penurunan. Hal ini disebabkan medium sudah jenuh dengan CO<sub>2</sub> sehingga CO<sub>2</sub> yang seharusnya larut dalam air menjadi bikarbonat yang digunakan sel untuk melakukan fotosintesis hanya sebagian kecil saja serta terjadinya ketidakseimbangan antara peningkatan jumlah sel dengan besarnya fiksasi CO<sub>2</sub>. Sebagian besar CO<sub>2</sub> hanya lewat medium dan berada dalam bagian atas fotobioreaktor. Pada kondisi ini, transfer CO<sub>2</sub> dari aliran masukan ke fotobioreaktor menurun karena proses respirasi *Chlorella* meningkat seiring dengan terjadinya peningkatan densitas sel dalam medium kultur. Secara keseluruhan pada

gambar 4.6, laju transfer karbon pada filtrasi lebih baik daripada non filtrasi dan terbesar adalah pada filtrasi 3 jam. Hal ini menunjukkan bahwa aktifitas sel yang terjadi pada filtrasi dan fiksasi CO<sub>2</sub> lebih baik daripada non filtrasi.

#### 4.2.7 Pengaruh Waktu Filtrasi dalam Perlakuan Filtrasi Terhadap CUR

Karbon adalah nutrisi yang penting untuk pertumbuhan dan merupakan sumber fotosintesis tunggal pada *Chlorella*. Oleh karena itu perlu adanya suatu parameter untuk mengetahui kemampuan *Chlorella* dalam mengambil karbon ini. Parameter yang digunakan adalah CUR. CUR merupakan laju penggabungan CO<sub>2</sub> menjadi suatu biomaterial yang ditentukan berdasarkan laju pertumbuhan (Ohtaguchi et al, 1997). Berikut adalah kurva CUR terhadap waktu pada variasi waktu hisap filter



**Gambar 4.9 Pengaruh Pengaturan Waktu Hisap dalam Perlakuan Filtrasi terhadap Laju Uptake Carbon (CUR)**

**A : Filtrasi 2 Jam ; B : Filtrasi 3 Jam; C: Filtrasi 4 Jam; D : Non Filtrasi**

Nilai CUR didapatkan dengan mengalikan suatu faktor yang didapat dari pengujian *elemental analysis* dengan nilai  $dX/dt$ . Nilai CUR dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$CUR = \frac{44}{\beta} \cdot \frac{dX}{dt}$$

Dimana  $\beta$  merupakan berat dari formula sel. Rumus formula sel dari *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dapat diketahui dengan elemental analysis sebagai  $CH_{3,3}N_{0,203}O_{0,322}P_{0,041}$  dalam medium Benneck sedangkan nilai  $dX/dt$  didapatkan dengan memplot data waktu kultivasi dan X. Meningkatnya laju pertumbuhan sel menunjukkan karbon yang diserap sel untuk digunakan dalam metabolisme sel khususnya fotosintesis semakin tinggi.

Dari gambar terlihat bahwa nilai CUR memiliki *trend* yang sama dengan laju pertumbuhan spesifik yaitu naik hingga waktu yang dicapai untuk laju pertumbuhan maksimum ( $\mu_{max}$ ) dan kemudian turun. Hal ini berarti kebutuhan sel akan karbon naik hingga waktu tertentu seiring dengan kenaikan laju pertumbuhan. Kemudian menurun saat laju pertumbuhan sel turun. Pada waktu filtrasi 3 jam nilai CUR, mengalami peningkatan dari awal kultivasi hingga waktu 60 jam dan cenderung konstan hingga jam 72 kemudian turun. Pada saat 60 jam pertama, karbon yang diserap sel untuk digunakan dalam proses fotosintesis meningkat seiring dengan meningkatnya laju pertumbuhan sel di dalam fotobioreaktor kemudian cenderung konstan akibat laju pertumbuhan yang juga konstan. Setelah 72 jam, karbon yang diserap sel menurun disebabkan laju pertumbuhan sel mengalami penurunan. *Trend* yang sama juga dialami pada waktu filtrasi 2 jam. Pada saat 36 jam pertama, karbon yang diserap sel untuk digunakan dalam proses fotosintesis meningkat seiring dengan meningkatnya laju pertumbuhan sel di dalam fotobioreaktor kemudian cenderung konstan akibat laju pertumbuhan yang juga konstan kemudian mengalami penurunan.

Sedangkan untuk filtrasi 4 jam dan non filtrasi memiliki *trend* yang sama yaitu dengan bertambahnya waktu kultivasi, nilai CUR semakin turun karena laju pertumbuhan maksimum sudah berada pada awal-awal kultivasi. Hal ini menunjukkan kebutuhan sel akan karbon paling besar terdapat saat-saat awal kultivasi. Secara keseluruhan, CUR pada perlakuan filtrasi 3 jam masih lebih tinggi daripada filtrasi 2 dan 3 jam serta non filtrasi pada waktu yang sama.

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini dengan mengkultivasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg pada Fotobioreaktor Kolom Gelembung dalam medium Benneck, temperatur 29°C, tekanan operasi 1 atm, sumber pencahayaan lampu Phillip Halogen 20W/12V/50Hz, dan konsentrasi CO<sub>2</sub> 5 % adalah :

1. Perlakuan filtrasi dengan pengaturan waktu filtrasi 3 jam menghasilkan peningkatan biomasa sebesar 18,58 % dan laju pertumbuhan *Chlorella* yang konstan
2. Perlakuan filtrasi dengan pengaturan waktu hisap pada kultivasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg ini juga menghasilkan fiksasi CO<sub>2</sub> yang lebih baik dibandingkan dengan perlakuan tanpa filtrasi dengan kerapatan dan jenis pencahayaan yang sama.
3. Perlakuan filtrasi 3 jam menghasilkan fiksasi CO<sub>2</sub> terbesar sebesar 1,36% dari gas masukan CO<sub>2</sub> 5%.

### 5.2 Saran

1. Perlu adanya kombinasi antara pencahayaan alterasi dan filtrasi agar didapat produksi biomassa yang lebih besar
2. Untuk filtrasi pada laju alir hisap yang tetap, waktu filtrasi yang digunakan sebaiknya lebih dari 4 jam

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. <http://www.wikipedia.org>. (Maret 2010).
- Anonim. <http://www.lemlit.undip.ac.id/abstrak/content/view/534/263/> (Juni 2010)
- Anonim. [http://wiki.answers.com/Q/What\\_factors\\_influence\\_the\\_rate\\_of\\_photosynthesis&alreadyAsked=1&rttitle=What\\_factors\\_affect\\_photosynthesis](http://wiki.answers.com/Q/What_factors_influence_the_rate_of_photosynthesis&alreadyAsked=1&rttitle=What_factors_affect_photosynthesis) (Juni 2010)
- Anonim. <http://www.chlorella-world.com/yaeyama.html>. (April 2008).
- Anonim. <http://www.nhm.ac.uk> (April 2009)
- Anonim. [http://www.gtamart.com/mart/products/chlorella\\_vulgaris/](http://www.gtamart.com/mart/products/chlorella_vulgaris/) (April 2009)
- Anonim. <http://www.chlorellafactor.com> (Mei 2009)
- Anonim. <http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html> (Juni 2009)
- Anonim <http://www.biology.arizona.edu> (Juni 2009)
- Anonim. <http://www.inhavisoin.inha.ac.kr/leeeg/lumostat.pdf> (Mei 2009)
- Anonim. 2009. *Reaksi Terang*. <http://metabolismelink.freshotia.com>. (12 April 2009).
- Anonim. 2009. *Vakuola*. <http://wikipedia.org.html>. (12 Februari 2009).
- Anonim. 2009. *Composition of Chlorella*. (<http://www.chlorella.com>). (12) Februari 2009.
- Anonim. 2009). *Kloroplas*. (<http://www.bio.mtu.edu/campbell>). (12 Februari 2009).
- Anonim. 2009. *Struktur Sel Chlorella*. <http://www.tuberose.com>. (12 Februari 2009).
- Pulz, O. 2001. *Photobioreactor : Production System for Phototropic Mikroorganism*.
- Andika, Sang Made Kresna. 2005. *Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg Dengan Alterasi Pencahayaan Pada Fotobioreaktor Kolom Gelembung*. Departemen Gas dan Petrokimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Syarif, Ahmed. 2004. Skripsi : “*Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dengan Perlakuan Aliran Sirkulasi Medium Kultur Pada Pencahayaan Alterasi*”. Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
- Wijanarko, A., dkk. Jurnal Teknologi “ *Effect Of photoperiodicity On CO<sub>2</sub> Fixation \ By Chlorella vulgaris Buitenzorg In Bubble ColoumnPhotobioreactor For food supplement Production* ”. Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2004.

- Nuzulliany, Rachma. 2006. Skripsi : *“Perlakuan Filtrasi Aliran Sirkulasi Medium Kultur Untuk Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella sp. Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah”*. Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
- Wijanarko, A., dkk. Jurnal Teknologi *“ Enhancement of Carbon Dioxide Fixation by Alteration of Illumination during Chlorella vulgaris-Buitenzorg’ Growth”*.Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2006.
- Muryanto.2006. Skripsi’ *Produksi Biomassa Chlorella sp. Dengan Pencahayaan Periodik Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri”*. Departemen Gas dan Petrokimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2006.
- Permata, Indah. 2007. Seminar *“Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella sp. Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah Melalui Pengaturan Kerapatan Fluks Cahaya”*. Departemen Gas dan Petrokimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
- Nuzulliany, A., dkk. 2006. Jurnal Teknologi : *“Pengaruh Pencahayaan Siklus Harian Terhadap Produksi Biomassa Chlorella vlgaris Buitenzorg Dalam Fotobioreaktor kolom Gelembung”*. Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
- Darmawan, Heru. 2009. Skripsi : *“Pengaturan Kecepatan Aliran Hisap Dalam Perlakuan Filtrasi Pada Sirkulasi Aliran Media Kultur Untuk Peningkatan Produksi Biomassa Filtrasi Aliran Sirkulasi Medium Kultur Untuk Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg”*. Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
- Prabowo.Danang 2009. Skripsi : *“Optimasi Pengembangan Media Untuk Pertumbuhan Chlorella sp. Pada Skala Laboratorium”*. Program Studi Ilmu dan Teknologi Kelautan.Fakultas Perikanan dan Kelautan, Institut Pertanian Bogor.
- Suriawiria, Unus. 2005. *Chlorella Untuk Kesehatan dan Kebugaran*. Jakarta : Papis Sinar Sinanti.
- Wirosaputro, Sukiman. 2002. *Chlorella Untuk Kesehatan Global*. Gajah Mada University Press.
- Ohtaguchi K and A. Wijanarko, *“Elevation of the efficiency of cyanobacterial carbon dioxide removal by monoethanolamine solution”*, Technology, 8 (2002) pp. 267-286

- Wijanarko A., K. Asami and K. Ohtaguchi, "*The Kinetics of Growth and The CO<sub>2</sub> Concentrating Mechanism of the Filamentous Cyanobacterium Anabaena cylindrica in a Bubble Column*", Journal of Chemical Engineering of Japan, 37 (2004) pp. 1019-1025
- Wijanarko A., Dianursanti, Heidi, R. W. Soemantojo and K. Ohtaguchi, "*Effect of Light illumination alteration on Chlorella vulgaris Buitenzorg's CO<sub>2</sub> fixation in bubble column photobioreactor*", International Journal for Algae, 8 (2006) 1, pp. 53-60
- Wijanarko A., Dianursanti, M. Gozan, S. M. K. Andika, P. Widiastuti, H. Hermansyah, A. B. Witarto, K. Asami, R. W. Soemantojo, K. Ohtaguchi, S. K. Song, "*Enhancement of carbon dioxide fixation by alteration of illumination during Chlorella vulgaris Buitenzorg's growth*", Biotechnology and Bioprocess Engineering, 11 (2006) pp. 484-488
- Wijanarko A., Dianursanti, A. Y. Sendjaya, H. Hermansyah, A. B. Witarto, B. T. Sofyan, K. Asami, K. Ohtaguchi, R. W. Soemantojo, S. K. Song, "*Enhanced Chlorella vulgaris Buitenzorg Growth by Photon Flux Density Alteration in Serial Photobioreactors*", Biotechnology and Bioprocess Engineering, 13 (2008) pp. 476-482
- Falkowsky P. G. and T. G. Owens, "*Light-Shade Adaptation*", Plant Physiol. 66 (1980) pp. 592-595
- Wijanarko and Dianursanti, "*Simulated flue gas fixation for large-scale biomass production of Chlorella vulgaris Buitenzorg*", International Journal for Algae, 11 (2009) 4, 351-358

**LAMPIRAN A**  
**DATA HASIL PENELITIAN**

**Filtrasi 2 Jam**

<b>t</b>	<b>OD</b> <small>sebenarnya</small>	<b>Xsel</b>	<b>Xfiltrat</b>	<b>Xsel+filtrat</b> <b>(g/liter)</b>	<b>pH</b>	<b>Yco2 in</b>	<b>Yco2 out</b>
0	0.209	0.681		0.68	6.6	5.142	3.36
2	0.199	0.646	0.04	0.68	6.43		
4	0.184	0.595	0.07	0.66	6.27	5.114	4.235
8	0.198	0.642	0.04	0.68	6.48	4.721	4.024
10	0.209	0.680	0.04	0.72	6.52		
12	0.244	0.799	0.02	0.82	6.6	5.284	3.442
14	0.258	0.846	0.02	0.87	6.69		
16	0.273	0.895	0.03	0.92	6.7	4.938	3.559
18	0.290	0.951	0.03	0.98	6.68		
20	0.333	1.096	0.03	1.12	6.62	5.367	4.825
22	0.339	1.116	0.02	1.14	6.64		
24	0.353	1.166	0.04	1.21	6.67	4.944	3.367
26	0.330	1.087	0.019	1.11	6.69		
30	0.443	1.468	0.022	1.49	6.73		
32	0.352	1.161	0.020	1.18	6.67	5.007	4.0074
34	0.366	1.208	0.037	1.24	6.83		
36	0.363	1.197	0.018	1.22	6.7	5.176	4.507
38	0.442	1.464	0.015	1.48	6.69		
40	0.447	1.480	0.038	1.52	6.89	4.968	4.241
42	0.404	1.336	0.019	1.36	6.89		
44	0.415	1.372	0.040	1.41	6.71	5.144	3.66
46	0.469	1.554	0.043	1.60	6.9		
48	0.420	1.390	0.041	1.43	6.74	5.394	3.933
50	0.476	1.578	0.025	1.60	6.96		
52	0.525	1.742	0.050	1.79	7.19	5.114	4.451
54	0.555	1.845	0.038	1.88	7.36		
56	0.579	1.925	0.049	1.97	7.34	5.439	4.717
58	0.621	2.067	0.045	2.11	7.38		
60	0.531	1.765	0.021	1.79	7.32	5.154	4.257
62	0.573	1.904	0.031	1.93	7.28		
64	0.579	1.926	0.037	1.96	7.25	5.26	3.922
66	0.666	2.218	0.050	2.27	7.34		
68	0.557	1.852	0.022	1.87	7.43	5.339	4.733
70	0.578	1.922	0.033	1.95	7.42		
72	0.664	2.211	0.080	2.29	7.37	4.94	3.657
74	0.649	2.161	0.057	2.22	7.39		
78	0.757	2.524	0.097	2.62	7.4	5.559	4.399
80	0.578	1.922	0.067	1.99	7.29		

82	0.634	2.110	0.066	2.18	7.31		
84	0.603	2.006	0.076	2.08	7.32		
86	0.598	1.989	0.060	2.05	7.3		
88	0.703	2.343	0.050	2.39	7.37		
90	0.547	1.817	0.074	1.89	7.25		
92	0.622	2.070	0.083	2.15	7.34		
94	0.553	1.839	0.045	1.88	7.24		
96	0.648	2.157	0.03	2.19	7.42		
98	0.625	2.081	0.053	2.13	7.39		

### Filtrasi 3 Jam

T	OD sebenarnya	Xsel	Xfiltrat	Xsel+filtrat (g/liter)	$\mu_x$ (h <sup>-1</sup> )	pH	yCO <sub>2</sub> in	yCO <sub>2</sub> out
0	0.229	0.748		0.748	0.0000	6.450	5.34	4.62
3	0.211	0.688	0.024	0.711	-0.0169	6.400	5.21	4.88
6	0.244	0.796	0.033	0.829	0.0172	6.500	5.31	3.53
9	0.236	0.771	0.012	0.783	0.0050	6.460		
12	0.252	0.824	0.033	0.857	0.0113	6.520	5.14	3.89
15	0.274	0.900	0.022	0.921	0.0139	6.530	5.18	3.59
18	0.296	0.973	0.023	0.996	0.0159	6.570		
21	0.344	1.134	0.025	1.159	0.0208	6.630	5.35	3.87
24	0.369	1.217	0.034	1.251	0.0214	6.640	5.26	3.61
27	0.353	1.163	0.036	1.200	0.0175	6.620		
30	0.385	1.271	0.022	1.293	0.0182	6.640	5.26	3.59
33	0.419	1.385	0.033	1.418	0.0194	6.670	5.24	3.85
36	0.407	1.347	0.025	1.373	0.0169	6.650		
39	0.429	1.421	0.022	1.444	0.0169	6.660	5.13	4.05
42	0.483	1.603	0.030	1.633	0.0186	6.800	5.0025	3.01
45	0.514	1.706	0.053	1.760	0.0190	6.830		
48	0.519	1.724	0.037	1.761	0.0178	6.860	5.32	3.31
51	0.575	1.913	0.050	1.963	0.0189	6.870	5.39	3.68
54	0.582	1.935	0.060	1.995	0.0182	6.880		
57	0.647	2.154	0.030	2.184	0.0188	6.890	5.19	3.57
60	0.723	2.410	0.048	2.458	0.0198	6.970	5.09	4.07
63	0.757	2.524	0.075	2.600	0.0198	6.980		
66	0.782	2.608	0.072	2.680	0.0193	7.000	5.07	4.28
69	0.785	2.619	0.023	2.642	0.0183	7.000		
72	0.798	2.662	0.024	2.687	0.0178	7.010		
75	0.872	2.911	0.109	3.020	0.0186	7.220	5.014	3.58
78	0.883	2.947	0.092	3.039	0.0180	7.230		
81	0.781	2.606	0.049	2.656	0.0156	7.100	5.24	4.4
84	0.784	2.615	0.087	2.703	0.0153	7.040		
87	0.843	2.813	0.037	2.850	0.0154	7.260		
90	0.964	3.221	0.176	3.397	0.0168	7.320	4.97	3.43

93	0.864	2.885	0.032	2.916	0.0146	7.350		
96	1.132	3.787	0.094	3.881	0.0171	7.370	5.16	3.6
99	0.861	2.876	0.123	2.998	0.0140	7.330		
102	0.792	2.642	0.122	2.764	0.0128	7.280	4.99	4.1
105	0.792	2.642	0.066	2.709	0.0123	7.260		
107	0.872	2.911	0.035	2.947	0.0128	7.310	4.95	3.5
110	0.831	2.772	0.097	2.869	0.0122	7.350		
113	0.864	2.885	0.128	3.013	0.0123	7.330	5.017	4.2
116	0.785	2.620	0.164	2.784	0.0113	7.300		
119	0.777	2.593	0.223	2.816	0.0111	7.330	5.03	3.28
122	0.660	2.198	0.165	2.363	0.0094	7.210		
125	0.679	2.261	0.171	2.431	0.0094	7.190	5.24	3.6
128	0.600	1.996	0.175	2.170	0.0083	7.170		
131	0.532	1.767	0.089	1.855	0.0069	7.180		
134	0.661	2.201	0.030	2.231	0.0082	7.200		
137	0.625	2.081	0.054	2.135	0.0077	7.150		
143	0.684	2.279	0.064	2.343	0.0080	7.170		

#### Filtrasi 4 Jam

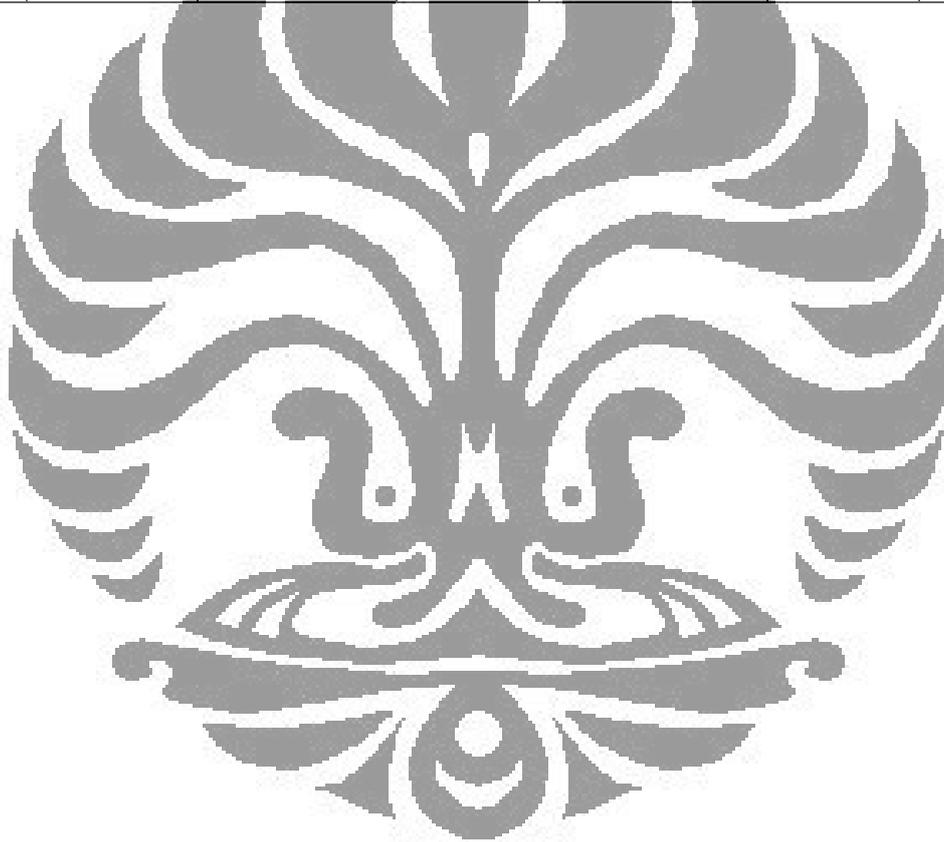
t	OD sebenarnya	Xsel	Xfiltrat	Xsel+filtrat (g/liter)	pH	yCO <sub>2</sub> in	yCO <sub>2</sub> out	$\mu_x (h^{-1})$
0	0.209	0.681		0.681	6.80	5.21	3.93	0.000 0
4	0.215	0.701	0.039	0.740	6.82	5.18	3.71	0.020 9
8	0.238	0.778	0.025	0.803	6.86	4.97	4.43	0.020 6
12	0.287	0.941	0.041	0.982	6.57	5.24	3.77	0.030 5
16	0.282	0.927	0.024	0.951	6.65	5.38	4.11	0.020 9
20	0.366	1.208	0.024	1.232	6.92	5.02	4.07	0.029 7
24	0.377	1.244	0.037	1.281	6.87	5.36	3.50	0.026 4
28	0.429	1.419	0.054	1.473	6.90	5.29	3.50	0.027 6
32	0.411	1.359	0.048	1.406	7.11	5.55	3.96	0.023
36	0.432	1.430	0.020	1.450	6.78	5.01	4.44	0.021
40	0.429	1.421	0.035	1.456	6.94	5.10	3.92	0.019
44	0.520	1.727	0.023	1.749	6.99	5.21	4.51	0.021
48	0.503	1.670	0.076	1.746	7.010	5.52	3.72	0.020
54	0.478	1.585	0.090	1.676	7.03	5.01	3.70	0.017
58	0.535	1.776	0.050	1.826	6.99	5.26	3.71	0.017
62	0.547	1.816	0.022	1.838	6.99	5.49	3.78	0.016

66	0.511	1.697	0.096	1.793	6.94	5.56	4.10	0.015
70	0.508	1.686	0.093	1.779	6.94	5.51	3.68	0.014
78	0.535	1.776	0.073	1.849	7.24	5.36	4.50	0.0128
82	0.564	1.875	0.042	1.916	7.15	5.05	4.01	0.0126
86	0.643	2.141	0.098	2.239	7.02	5.01	3.87	0.0138
90	0.606	2.016	0.092	2.108	6.97	4.97	3.76	0.0126
94	0.639	2.127	0.091	2.218	7.01	5.52	4.34	0.0126
98	0.588	1.955	0.052	2.007	7.00	5.59	3.93	0.0110
102	0.547	1.817	0.053	1.870	7.15	5.36	3.89	0.0099
106	0.595	1.978	0.104	2.082	6.97	5.15	3.78	0.0105
110	0.547	1.817	0.122	1.939	7.070	5.62	4.18	0.0095
114	0.520	1.727	0.148	1.875	7.020	5.60	4.34	0.0089
118	0.540	1.794	0.064	1.858	7.16	4.92	3.40	0.0085
122	0.515	1.711	0.094	1.805	7.25	4.92	3.61	0.0080
126	0.523	1.736	0.144	1.879	7.26	5.44	3.89	0.0081
130	0.522	1.733	0.109	1.842	7.13	5.10	3.98	0.0077
134	0.481	1.594	0.094	1.688	7.31	5.19	3.784	0.007
138	0.450	1.491	0.124	1.615	7.22	5.05	4.74	0.006
142	0.444	1.471	0.114	1.584	7.21	5.07	4.76	0.006

### Non Filtrasi

t	OD sebenarnya	Xsel (g/liter)	$\mu_x$ ( $h^{-1}$ )	pH	yCO <sub>2</sub> in	yCO <sub>2</sub> out
0	0.204	0.66	0.00000	6.5	5.439	4.878
4	0.235	0.77	0.03734	6.53	5.563	5.299
8	0.274	0.90	0.03808	6.54	5.590	4.540
16	0.343	1.13	0.03343	6.6	5.320	4.688
20	0.371	1.22	0.03075	6.63	5.205	4.814
24	0.393	1.30	0.02807	6.57	5.576	5.371
28	0.461	1.53	0.02991	6.59	5.490	5.123
40	0.479	1.92	0.02665	6.68	5.593	5.157
44	0.595	1.98	0.02491	6.72	5.323	5.009

48	0.672	2.24	0.02539	6.76	5.312	4.482
52	0.704	2.35	0.02434	6.73	4.961	4.700
58	0.744	2.48	0.02278	6.78	5.300	5.100
62	0.688	2.29	0.01968	6.7	5.166	4.880
66	0.677	2.26	0.01858	6.72	5.737	5.182
70	0.690	2.30	0.01779	6.71	5.504	5.236
74	0.745	2.48	0.01788	6.72	5.781	5.201
80	0.840	2.80	0.01805	6.71	5.531	5.313
86	0.881	2.94	0.01735	6.74	5.234	4.875
92	1.000	3.34	0.01760	7.05	5.454	5.108
98	1.063	3.55	0.01715	7.07	5.569	5.240
104	0.739	3.49	0.01599	6.94	5.394	5.106
112	1.084	3.54	0.01498	6.92	5.530	5.300
118	1.049	3.51	0.01414	6.96	5.330	4.696



## LAMPIRAN B

### PENGOLAHAN DATA OD<sub>600</sub>

#### B.1 Pengolahan Data X dan N Sel Reaktor

Pada penelitian sebelumnya telah didapatkan kurva kalibrasi antara X Vs OD untuk menentukan berat kering sel pada volume tertentu atau kurva kalibrasi N Vs OD untuk menentukan jumlah sel pada volume tertentu.

##### ❖ Penentuan Berat Kering Sel (X)

Dari kurva kalibrasi X Vs OD didapatkan persamaan garis lurus yang menempatkan OD di sumbu x dan X di sumbu y. Persamaan tersebut adalah :

$$y = 0.0033662x - 2.3882 \times 10^{-5}$$

Dengan memasukan nilai OD ke X maka akan kita dapatkan berat kering sel.

Misal besar OD pada detik ke 0 sebesar 0,218. Maka :

$$y = (0.0033662 \times 0.218) - 2.3882 \times 10^{-5}$$

$$y = 0.71 \text{ gram/liter}$$

$$X = 0.71 \text{ gram/liter}$$

##### ❖ Penentuan Jumlah Sel (sel/ml)

Dari kurva kalibrasi N Vs OD didapatkan persamaan garis lurus yang menempatkan OD di sumbu x dan N di sumbu y. Persamaan tersebut adalah :

$$y = 4.719 \times 10^6 x - 33480$$

Dengan memasukan nilai OD ke x maka kita akan mendapatkan berat kering sel.

Misal besar OD pada detik ke 0 sebesar 0.218. Maka :

$$y = 4.719 \times 10^6 \times 0.24 - 33480$$

$$y = 995262 \text{ sel/ml}$$

#### B.2 Pengolahan Data X dan Nsel Filtrat

Dengan cara yang sama kita dapat menentukan berat kering sel yang ada di filtrat. Hanya saja pada filtrat kita harus memperhitungkan faktor pengenceran. Pengenceran perlu dilakukan karena alat pembaca OD (spektrofotometer) hanya akurat untuk rentang pembacaan 0.2-0.4. Maka itu filtrat harus diencerkan sehingga pembacaan pada spektro berada pada rentang tersebut. Maka persamaan di atas menjadi

$$y = (0.0033662x - 2.3882 \times 10^{-5}) \times a$$

Dimana  $x$  adalah OD setelah pengenceran (berada pada rentang 0.2-0.4) dan  $a$  adalah faktor/jumlah pengenceran. Misal pada 4 jam pertama, OD dari filtrat menunjukkan nilai over, setelah dilakukan pengenceran sebanyak 8 kali maka nilai OD didapatkan sebesar 0.232. Maka besar  $X$  dapat dihitung :

$$y = (0.0033662 \times 0.279 - 2.3882 \times 10^{-5}) \times 8$$

$$y = 6,215 \text{ g/liter}$$

$$X = 6,215 \text{ g/liter}$$

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

$$6,215 \text{ gr/L filtrat} \times \text{volume filtrat} = 6,215 \text{ gr/L} \times 0,32 \text{ L} = 1,9888$$

$$\text{Maka berat kering filtrat pada volume reaktor} = 1,9888 \text{ gr} / 17,88 \text{ L} = 0,111227 \text{ gr/L}$$



**LAMPIRAN C**  
**CONTOH dan HASIL PERHITUNGAN**  
**CTR, CUR,  $q_{CO_2}$  dan  $[HCO_3^-]$**

**C.1 Contoh Pengolahan Data**

**C.1.1 Contoh Pengolahan Data  $[HCO_3^-]$**

Seperti telah dijelaskan pada bab 3 bahwa nilai pH dapat digunakan untuk menghitung  $[HCO_3^-]$ . Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

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

Dimana :

$P_T$  = tekanan operasi (atm)

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

$K_{CO_2}$  =  $4,38 \times 10^{-7}$

$H_{CO_2}$  = 2900 KPa/mol

$T$  = temperatur operasi

$T_0$  = temperatur standar

$A_k = 40,557$

$B_k = -36,782$

$C_k = 0$

$A_h = 22,771$

$B_h = -11,452$

$C_h = -3,117$

Konsentrasi bikarbonat  $[HCO_3^-]$  pada jam ke-0 didapatkan dengan memasukan nilai pH pada pengaturan kecepatan hisap jam ke-0 yaitu 6,01 ke dalam persamaan di atas dengan nilai variabel-variabel lain yang telah disebutkan diatas, sehingga akan didapatkan nilai  $[HCO_3^-]$  pada jam ke-0 adalah 0,73 mM

**C.1.2 Contoh Pengolahan Data CTR (Carbondioxide Transfer Rate)**

Contoh perhitungan konsentrasi bikarbonat CTR pada penelitian ini :

Rumus yang digunakan :

$$CTR = \Delta y_{CO_2} \times \alpha_{CO_2} \quad (g/dm^3 \cdot h)$$

Dalam penelitian ini :

$$\alpha_{CO_2} = \frac{U_g \cdot A \cdot M_{CO_2} \cdot P}{V_{mes} \cdot R \cdot T}$$

$$\alpha_{CO_2} = \frac{151,5 \text{ dm}^3/\text{h} \cdot 3,384 \text{ dm}^2 \cdot 44 \text{ g/mol} \cdot 1 \text{ atm}}{18 \text{ dm}^3 \cdot 0,082 \text{ L atm/mol}^\circ\text{K} \cdot 302^\circ\text{K}}$$

$$\alpha_{CO_2} = 50,61 \text{ g/dm}^3 \cdot \text{h}$$

CTR pada pengaturan kecepatan hisap jam ke-0 didapatkan dengan memasukan nilai  $\Delta y_{CO_2}$  pada pengaturan kecepatan hisap jam ke-0 yaitu 1,77 ke dalam persamaan di atas, sebagai berikut :

$$CTR_{t=0} = 1,77 \times 50,61 = 89,58 \text{ g/dm}^3 \cdot \text{h}$$

### C.1.3 Contoh Pengolahan Data $q_{CO_2}$

Contoh perhitungan konsentrasi bikarbonat  $q_{CO_2}$  pada penelitian ini :

Rumus yang digunakan :

$$q_{CO_2} = \frac{\Delta y_{CO_2} \cdot \alpha_{CO_2}}{X} \quad (\text{h}^{-1})$$

$q_{CO_2}$  pada pengaturan kecepatan hisap jam ke-0 didapatkan dengan memasukan nilai  $\Delta y_{CO_2}$  dan X pada pengaturan kecepatan hisap jam ke-0 yaitu 1,77 dan 0,71  $\text{g/dm}^3 \cdot \text{h}$  ke dalam persamaan di atas, sebagai berikut :

$$q_{CO_2} = \frac{1,77 \cdot 50,61 \text{ g/dm}^3 \cdot \text{h}}{0,71 \text{ g/dm}^3 \cdot \text{h}} = 126,18 \text{ h}^{-1}$$

### C.1.4 Contoh Pengolahan Data CUR (Carbon Uptake Rate)

Contoh perhitungan CUR pada penelitian ini :

$$CUR = \alpha \cdot \frac{dX}{dt} \quad (\text{g/dm}^3 \cdot \text{h}) \quad \text{Dimana : } \alpha = \frac{44}{\beta}$$

Maka :

$$CUR = \frac{44}{\beta} \cdot \frac{dX}{dt}$$

dimana  $\beta$  merupakan berat formula sel, untuk mendapatkan nilai  $\beta$ , *Chlorella vulgaris* harus dikeringkan terlebih dahulu, pada penelitian kali ini *Chlorella* dikeringkan di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) di Cibinong, Bogor. Setelah dikeringkan barulah kita dapat melakukan Elemental Analysis untuk mengetahui elemen dasar dari *Chlorella*, Elemental Analysis dilakukan di dua tempat yaitu di Lemigas dan di Departemen Metalurgi Universitas Indonesia, Pengukuran dilakukan di dua tempat karena pengukuran Elemental Analysis yang dilakukan di Lemigas hanya bisa untuk mengukur elemen seperti C, H, dan N saja sedangkan pengukuran Elemental Analysis di Departemen Metalurgi Universitas Indonesia tidak bisa mengukur elemen H.

Berikut ini merupakan perhitungan untuk mendapatkan Rumus Formula Sel (RMF) dari *Chlorella vulgaris* Buitenzorg :

Komposisi % berat :

$$C = 22\%$$

$$H = 6,05\%$$

$$N = 5,2\%$$

$$O = \frac{48,54}{26,71} \times 5,2\% = 9,45\%$$

$$P = \frac{12,10}{26,71} \times 5,2\% = 2,36\%$$

Maka :

Komposisi sel kering  $CH_xN_yO_zP_A$

Basis : 1 mol karbon

$$C = \frac{22}{45,06} \times 100\% = 48,82\%$$

$$C = \frac{48,82}{12} \times \frac{12}{48,82} = 1 \text{ mol}$$

$$H = \frac{6,05}{45,06} \times 100\% = 13,43\%$$

$$H = \frac{13,43}{1} \times \frac{12}{48,82} = 3,3 \text{ mol}$$

$$N = \frac{5,2}{45,06} \times 100\% = 11,54\%$$

$$N = \frac{11,54}{12} \times \frac{12}{48,82} = 0,203 \text{ mol}$$

$$O = \frac{9,45}{45,06} \times 100\% = 20,97\%$$

$$O = \frac{20,97}{12} \times \frac{12}{48,82} = 0,322 \text{ mol}$$

$$P = \frac{2,36}{45,06} \times 100\% = 5,24\%$$

$$P = \frac{5,24}{12} \times \frac{12}{48,82} = 0,041 \text{ mol}$$

Dari perhitungan didapatkan :

$$C = 1 \text{ mol}$$

$$H = 3,3 \text{ mol}$$

$$N = 0,203 \text{ mol}$$

$$O = 0,322 \text{ mol}$$

$$P = 0,041 \text{ mol}$$

Dari hasil perhitungan maka Rumus Formula sel dapat diketahui, Rumus Formula sel untuk *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yaitu :



Setelah mendapatkan rumus formula sel maka  $\beta$  dapat diketahui,

$$\beta = \text{RMF} = 1 (12) + 3,3 (1) + 0,203 (14) + 0,322 (16) + 0,041 (31) = 24,565$$

$$\beta = 24,565$$

dengan memasukan nilai  $\beta$  ke dalam persamaan awal, maka nilai CUR dapat diketahui,

$$\text{CUR} = \frac{44}{24,565} \cdot \frac{dX}{dt}$$

$$\text{CUR} = 1,79 \cdot \frac{dX}{dt}$$

### C.1.5 Tabel [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>], CTR, CUR,

#### Filtrasi 2 Jam

t	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (mM)	yCO <sub>2</sub> in	yCO <sub>2</sub> out	ΔyCO <sub>2</sub>	CTR (g/dm <sup>3</sup> .h)	qCO <sub>2</sub> (h <sup>-1</sup> )	CUR (mol/L.h)
0	2.852	5.14	3.36	1.51	76.52	112.40	0.000692
2	1.928						0.000691
4	1.334	5.11	4.24	0.88	44.49	67.34	0.000694
8	2.163	4.72	4.02	0.70	35.28	51.57	0.000705
10	2.372						0.000714
12	2.852	5.28	3.44	1.84	93.22	113.86	0.000723
14	3.508						0.000734
16	3.590	4.94	3.56	1.38	69.79	75.80	0.000746
18	3.428						0.000758
20	2.986	5.37	4.83	0.54	27.43	24.39	0.000770
22	3.127						0.000782
24	3.350	4.94	3.37	1.58	79.81	66.22	0.000793
26	3.508						0.000804
30	3.847						0.000821
32	3.350	5.01	4.01	1.00	50.59	42.83	0.000827
34	4.843						0.000831
36	3.590	5.18	4.51	0.67	33.86	27.86	0.000833
38	3.508						0.000832
40	5.560	4.97	4.24	0.73	36.79	24.25	0.000828
42	5.560						0.000821
44	3.674	5.14	3.66	1.48	75.11	53.21	0.000810
46	5.690						0.000795
48	3.936	5.39	3.93	1.46	73.94	51.68	0.000776
50	6.533						0.000753
52	11.094	5.11	4.45	0.66	33.55	18.72	0.000724
54	16.409						0.000690

56	15.671	5.44	4.72	0.72	36.54	18.51	0.000651
58	17.183						0.000606
60	14.966	5.15	4.26	0.90	45.40	25.43	0.000555
62	13.649						0.000497
64	12.738	5.26	3.92	1.34	67.72	34.50	0.000433
66	15.671						0.000361
68	19.279	5.34	4.73	0.61	30.67	16.36	0.000283
70	18.841						0.000196
72	16.792	4.94	3.66	1.28	64.93	28.34	0.000102
74	17.583						-0.000001
78	17.993	5.56	4.40	1.16	58.71	22.40	-0.000233
80	13.967						-0.000363
82	14.625						-0.000502
84	14.966						-0.000651
86	14.292						-0.000811
88	16.792						-0.000980
90	12.738						-0.001161
92	15.671						-0.001353
94	12.448						-0.001556
96	18.841						-0.001771
98	17.583						-0.001998

### Filtrasi 3 Jam

t (Jam)	pH	[HCO <sup>3-</sup> ] (mM)	y <sub>CO<sub>2</sub></sub> <sub>in</sub>	y <sub>CO<sub>2</sub></sub> <sub>out</sub>	Δ CO <sub>2</sub>	CTR (g/dm <sup>3</sup> .h)	qCO <sub>2</sub> (h <sup>-1</sup> )	CUR (mol/L.h)
0	6.450	2.019	5.34	4.62	0.72	36.44	48.71	0.0001261
3	6.400	1.799	5.21	4.88	0.33	16.70	23.49	4.626E-05
6	6.500	2.265	5.31	3.53	1.78	90.09	108.64	4.397E-05
9	6.460	2.066						0.0001093
12	6.520	2.372	5.14	3.89	1.25	63.26	73.82	0.0002327
15	6.530	2.427	5.18	3.59	1.59	80.47	87.33	0.0004049
18	6.570	2.661						0.0006173
21	6.630	3.056	5.35	3.87	1.48	74.90	64.65	0.0008614
24	6.640	3.127	5.26	3.61	1.65	83.51	66.74	0.0011293
27	6.620	2.986						0.0014135
30	6.640	3.127	5.26	3.59	1.67	84.52	65.35	0.0017066
33	6.670	3.350	5.24	3.85	1.39	70.35	49.61	0.002002
36	6.650	3.200						0.0022932
39	6.660	3.274	5.13	4.05	1.08	54.66	37.86	0.0025742
42	6.800	4.520	5.00	3.01	1.99	100.84	61.75	0.0028395
45	6.830	4.843						0.0030838
48	6.860	5.189	5.32	3.31	2.01	101.73	57.77	0.0033023
51	6.870	5.310	5.39	3.68	1.71	86.54	44.08	0.0034907
54	6.880	5.434						0.0036448
57	6.890	5.560	5.20	3.60	1.60	80.98	37.08	0.0037611

60	6.970	6.685	5.10	4.07	1.02	51.82	21.08	0.0038363
63	6.980	6.841						0.0038676
66	7.000	7.163	5.07	4.28	0.79	39.98	14.92	0.0038526
69	7.000	7.163	5.07	3.78	1.29	65.29	24.71	0.0037892
72	7.010	7.330						0.0036757
75	7.220	11.888						0.003511
78	7.230	12.165						0.0032941
81	7.100	9.018	5.01	3.58	1.43	72.57	27.33	0.0030246
84	7.040	7.854	5.24	4.40	0.84	42.51	15.73	0.0027025
87	7.260	13.035						0.002328
90	7.320	14.966						0.0019019
93	7.350	16.036	5.16	3.60	1.56	78.95	27.07	0.0014253
96	7.370	16.792						0.0008997
99	7.330	15.314	5.16	4.18	0.98	49.60	16.54	0.0003271
102	7.280	13.649						-0.0002903
105	7.260	13.035	4.90	4.10	0.80	40.49	14.95	-0.0009498
107	7.310	14.625	4.95	3.35	1.60	80.98	27.48	-0.0014113
110	7.350	16.036						-0.0021338
113	7.330	15.314						-0.0028892
116	7.300	14.292						-0.0036733
119	7.330	15.314	5.03	3.28	1.75	88.57	31.45	-0.0044817
122	7.210	11.617						-0.0053094
125	7.190	11.094	5.24	3.60	1.64	83.00	34.14	-0.006151
128	7.170	10.595						-0.0070008
131	7.180	10.842						-0.0078526
134	7.200	11.353						-0.0087001
137	7.150	10.118						-0.0095361
143	7.170	10.595						-0.0111445

#### Filtrasi 4 Jam

t	y <sub>in</sub>	y <sub>out</sub>	ΔyCO <sub>2</sub>	CTR (g/dm <sup>3</sup> .h)	qCO <sub>2</sub> (h <sup>-1</sup> )	CUR (mol/L.h)	pH	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (mM)
0	5.21	3.93	1.289	65.236	95.826	0.0010577	6.80	4.520
4	5.18	3.71	1.473	74.549	100.728	0.0010571	6.82	4.733
8	4.97	4.43	0.549	27.785	34.602	0.0010554	6.86	5.189
12	5.24	3.77	1.467	74.245	75.626	0.0010525	6.57	2.661
16	5.38	4.11	1.272	64.381	67.720	0.0010484	6.65	3.200
20	5.02	4.07	0.949	48.019	38.963	0.0010431	6.92	5.958
24	5.36	3.50	1.863	94.266	73.566	0.0010366	6.87	5.310
28	5.29	3.50	1.794	90.794	61.651	0.0010290	6.90	5.690
32	5.55	3.96	1.585	80.217	57.051	0.0010202	7.11	9.228
36	5.01	4.44	0.579	29.308	20.209	0.0010103	6.78	4.316
40	5.10	3.92	1.181	59.760	41.046	0.00099914	6.94	6.239
44	5.21	4.51	0.692	35.022	20.020	0.00098684	6.99	7.000
48	5.52	3.72	1.797	90.956	52.094	0.00097337	7.01	7.330

54	5.01	3.70	1.315	66.552	39.717	0.00095096	7.03	7.675
58	5.26	3.71	1.558	78.850	43.173	0.00093456	6.99	7.000
62	5.49	3.78	1.712	86.644	47.133	0.00091698	6.99	7.000
66	5.56	4.10	1.463	74.047	41.297	0.00089824	6.94	6.239
70	5.51	3.68	1.829	92.561	52.018	0.00087832	6.94	6.239
78	5.36	4.50	0.857	43.378	23.465	0.00083497	7.24	12.448
82	5.05	4.01	1.045	52.867	27.587	0.00081154	7.15	10.118
86	5.01	3.87	1.135	57.417	25.648	0.00078693	7.02	7.501
90	4.97	3.76	1.201	60.783	28.829	0.00076116	6.97	6.685
94	5.52	4.34	1.183	59.872	26.993	0.00073421	7.01	7.330
98	5.59	3.93	1.658	83.896	41.792	0.00070609	7.00	7.163
102	5.36	3.89	1.468	74.316	39.736	0.00067680	7.15	10.118
106	5.15	3.78	1.364	69.052	33.166	0.00064634	6.97	6.685
110	5.62	4.18	1.438	72.777	37.525	0.00061470	7.07	8.416
114	5.60	4.34	1.259	63.698	33.978	0.00058190	7.02	7.501
118	4.92	3.40	1.521	76.978	41.431	0.00054792	7.16	10.354
122	4.92	3.61	1.314	66.502	36.842	0.00051277	7.25	12.738
126	5.44	3.89	1.549	78.395	41.714	0.00047645	7.26	13.035
130	5.10	3.98	1.125	56.936	30.908	0.00043896	7.13	9.663
134	5.1979	3.784	1.414	71.557	42.388	0.00040029	7.31	14.625
138	5.05	4.74	0.3055	15.461	9.574	0.00036046	7.22	11.888
142	5.07	4.76	0.31	16.10	10.16	0.00031945	7.21	11.617

### Non Filtrasi

t (Jam)	pH	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (mM)	yCO <sub>2</sub> in	out	delta	CTR	qCO <sub>2</sub>	CUR
0	6.5	2.214	5.439	4.878	0.561	28.397	42.916	0.0019934
4	6.53	2.318	5.563	5.299	0.264	13.351	17.377	0.0019934
8	6.54	2.427	5.590	4.540	1.050	53.141	59.220	0.0019931
16	6.6	2.427	5.320	4.688	0.633	32.031	28.356	0.0019907
20	6.63	2.601	5.205	4.814	0.391	19.804	16.181	0.0019882
24	6.57	2.114	5.576	5.371	0.205	10.385	8.001	0.0019844
28	6.59	2.372	5.490	5.123	0.367	18.574	12.147	0.0019791
40	6.68	2.265	5.593	5.157	0.435	22.025	11.461	0.0019518
44	6.72	3.350	5.323	5.009	0.314	15.892	8.026	0.0019380
48	6.76	3.428	5.312	4.482	0.831	42.032	18.779	0.0019214
52	6.73	2.601	4.961	4.700	0.261	13.209	5.631	0.0019019
58	6.78	3.428	5.300	5.100	0.200	10.122	4.081	0.0018664
62	6.57	2.661	5.166	4.880	0.286	14.459	6.451	0.0018383
66	6.72	3.759	5.737	5.182	0.555	28.099	12.460	0.0018063
70	6.64	3.127	5.504	5.236	0.269	13.589	5.911	0.0017701
74	6.72	3.759	5.781	5.201	0.580	29.359	11.819	0.0017296
80	6.71	3.936	5.531	5.313	0.219	11.063	3.946	0.0016601
86	6.74	4.316	5.234	4.875	0.359	18.169	6.174	0.0015794

92	7.05	4.843	5.454	5.108	0.346	17.511	5.239	0.0014866
98	7.07	3.508	5.569	5.240	0.329	16.651	4.686	0.0013808
104	6.72	3.759	5.394	5.106	0.289	14.601	4.183	0.0012612
112	6.78	4.316	5.530	5.300	0.230	11.640	3.284	0.0010789
118	6.71	4.316	5.330	4.696	0.634	32.097	9.149	0.00092394

