



UNIVERSITAS INDONESIA

PENGEMBANGAN SISTEM PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* DALAM REAKTOR PLAT DATAR MELALUI OPTIMASI PENCAHAYAAN MENGGUNAKAN TEKNIK FILTRASI PADA ALIRAN KULTUR MEDIA

DISERTASI

**DIANURSANTI
0806475063**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA**

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

PENGEMBANGAN SISTEM PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* DALAM REAKTOR PLAT DATAR MELALUI OPTIMASI PENCAHAYAAN MENGGUNAKAN TEKNIK FILTRASI PADA ALIRAN KULTUR MEDIA

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor Teknik

**DIANURSANTI
0806475063**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA**

DEPOK

JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Dianursanti
NPM : 0806475063

Tanda tangan: 

Tanggal : Juni 2012



HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :
 Nama : Dianursanti
 NPM : 0806475063
 Program Studi : Teknik Kimia
 Judul Disertasi : Pengembangan Sistem Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* dalam Reaktor Plat Datar melalui Optimasi Pencahayaan Menggunakan Teknik Filtrasi pada Aliran Media Kultur

Telah disetujui untuk dipresentasikan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Promotor : Prof. Dr. Ir. Muhammad Nasikin, M.Eng.

Ko-Promotor : Prof.Dr.Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng

Penguji I : Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc, Ph.D

Penguji II : Dr. Luthfiralda Sjahfirdi, M.Biomed

Penguji III : Dr. Ir. Rizal Alamsyah, M.Sc

Penguji IV : Prof.Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA

Penguji V : Dr. Ir. Sukirno, M.Eng



(M. Nasikin)
 (Anondho)
 (Sutrasno)
 (Luthfiralda)
 (Rizal Alamsyah)
 (Setijo Bismo)
 (Sukirno)

Ditetapkan di : Depok
 Tanggal : Januari 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kepada Allah SWT atas karunia-Nya, makalah disertasi ini dapat diselesaikan. Disertasi dengan judul “Pengembangan Sistem Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* dalam Reaktor Plat Datar melalui Optimasi Pencahayaan Menggunakan Teknik Filtrasi pada Aliran Media Kultur” ini diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Doktor Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Pada kesempatan ini, saya mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Muhammad Nasikin, M.Eng selaku promotor dan Prof. Dr. Ir. Anondho Wijanarko selaku ko-promotor, yang telah banyak menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya sejak awal hingga penyusunan disertasi ini.
2. Dr. Yopi (Lipi Cibinong), Aryanti Oetari, Ph.D (FMIPA UI), Prof. Dr. Sutrasno, M.Sc, atas masukan-masukannya dan pengarahannya yang sangat berguna dan membantu saya dalam pelaksanaan penelitian yang dilakukan.
3. Dr. Luthfirda Sjahfirdi, M.Biomed, Dr.Ir. Rizal Alamsyah, M.Sc, Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA, dan Dr. Ir. Sukirno, M.Eng, selaku tim penguji yang juga memberikan masukan-masukan serta koreksi yang sangat berharga untuk perbaikan disertasi saya.
4. Agus Priambodo, suami tercinta serta Muhammad Naufaldi dan Naufalya Nur Azizah, anak-anakku tersayang yang selalu memberikan cinta kasih yang besar, setia menemani dan mendukung dalam suka dan duka.
5. Bapak M.Ismail N dan Ibu Pujiati (orangtua tercinta), Bapak Roemintoyo (ayah mertua), kakak-kakak, beserta adik-adik saya yang tak pernah putus memberikan doa dan semangat.
6. Dr. Ir. Praswasti PDK.Wulan, M.T, Dr. Tania Surya Utami, S.T, M.T, Dr. Ir. Setadi, M.Sc, dan Dr. rer.nat. Yuswan Muharam, atas dorongan semangatnya dan menjadi inspirasi saya untuk berkeinginan menyegerakan penyelesaian sekolah saya.
7. Ir. Rita Arbianti, M.Si, Ir. Eva Fathul Karamah, M.T, Ir. Yuliusman, M.Sc, dan Ir. Bambang Heru, M.T, teman-teman senasib seperjuangan dalam menjalani peran sebagai dosen tugas belajar.
8. Prof. Dr. Roekmijati Widaningrum, M.Si dan Ir. Tilani, M.Sc, Ibunda-ibunda tercinta yang senantiasa memberikan doa dan dukungan yang berarti buat saya.
9. Kamarza Mulia, Ph.D dan Elsa K. Mulia, Ph.D, yang selalu siap menyediakan telinga untuk mendengar keluh kesah dan memberi semangat baru.
10. Rekan Dosen lainnya dan Karyawan Departemen Teknik Kimia UI yang selalu siap memberikan dukungan tenaga dan moral.
11. Ius, Kang Jajat, Mas Turo, Mas Ijal, Mas Mugeni, dan mahasiswa-mahasiswa tim alga yang telah banyak membantu saya dalam melaksanakan penelitian.
12. Pihak-pihak lain dan mahasiswa yang tak mungkin saya sebutkan satu persatu dalam menebarkan semangat dan iklim yang kondusif.

Akhir kata, penulis berharap semoga disertasi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan ke depannya.

Depok, 20 Juni 2012
Penulis

Universitas Indonesia

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

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

Nama : Dianursanti
NPM : 08064075063
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Disertasi

demikian 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:

Pengembangan Sistem Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* dalam Reaktor Plat Datar melalui Optimasi Pencahayaan Menggunakan Teknik Filtrasi pada Aliran Media Kultur

berserta 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 mempublikasikan 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 : 20 Juli 2012

Yang menyatakan



(Dianursanti)

ABSTRAK

Nama : Dianursanti
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pengembangan Sistem Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* dalam Reaktor Plat Datar melalui Optimasi Pencahayaan Menggunakan Teknik Filtrasi pada Aliran Media Kultur.

Pengembangan sistem produksi *C. vulgaris* dengan menggunakan teknik filtrasi dilakukan sebagai salah satu upaya untuk meningkatkan produksi biomasanya. Dengan teknik filtrasi ini, pengaruh *self shading* yang terjadi dalam kultur alga di dalam reaktor dapat diatasi. Pelaksanaan kegiatan penelitian ini diawali dengan studi awal perancangan reaktor dan optimasi kondisi operasinya. Tahap berikutnya adalah pengembangan teknik filtrasi dalam sistem kultivasi *C. vulgaris* yang meliputi pengaturan densitas sel melalui pengaturan laju hisap filter, optimasi sistem aerasi media kultur menggunakan membran serat berongga, optimasi sistem filtrasi menggunakan mikrofiltrasi dan perbandingan antara sistem filtrasi kontinu dan semikontinu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik filtrasi secara kontinu terbukti berhasil meningkatkan produksi biomassa hingga 1,25 kali dari proses kultivasi biasa. Sementara itu penggunaan membran serat berongga sebagai aerator dan mikrofiltrasi sebagai media filternya dalam sistem pemerangkapan sel kontinu, mampu meningkatkan produksi biomassa *C.vulgaris* hingga 2,55 kali dari sistem kultivasi biasa. Demikian pula dengan sistem pemerangkapan sel semi kontinu telah terbukti mampu meningkatkan produksi biomasanya hingga 2,04 kali dari sistem kultivasi biasa. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa penggunaan teknik filtrasi dalam sistem kultivasi *C. vulgaris* sangat potensial untuk dikembangkan sebagai upaya peningkatan produksi biomasanya.

Kata kunci:

Chlorella vulgaris, produksi biomassa, teknik filtrasi, sistem kultivasi, reaktor plat datar

ABSTRACT

Name : Dianursanti
Study Program : Chemical Engineering
Title : Development of *Chlorella vulgaris* Biomass Production System in a Flat Plate Reactor through Lighting Optimization using Filtration Technique in Culture Media Flow.

Development of *C. vulgaris* production system using filtration techniques carried out as part of efforts to increase biomass production. By using filtration techniques, self-shading effect that occurs in algae culture could be overcome. Implementation of this research activity started with a preliminary study design and optimization of reactor operating conditions. The next stage was the development of filtration techniques in the cultivation system of *C. vulgaris* which includes arrangement of cell density by suction rate adjustment, optimization of culture medium aeration system using hollow fiber membranes, optimization of the process filtration using microfiltration and filtration system comparisons between the continuous and discontinuous. The results showed that continuous filtration technique proved successful in increasing the production of biomass to 1.25 times that of ordinary cultivation process. Meanwhile, the use of hollow fiber membrane as an aerator and a microfiltration as filter media in continuous filtration system could increase biomass production up to 2.55 times. Similarly, the discontinuous filtration system has been shown to increase biomass production up to 2.04 times. Therefore, it can be said that the use of filtration techniques in the *C. vulgaris* cultivation system, potential to be developed as an effort to increase biomass production.

Key words:

Chlorella vulgaris, biomass production, filtration technique, cultivation system, flat plate reactor.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR NOTASI	xiv
DAFTAR ISTILAH	xv
LAMPIRAN	
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Penelitian	1
1.2. Rumusan Masalah	8
1.3. Tujuan Penelitian	9
1.3.1. Tujuan umum	9
1.3.2. Tujuan khusus	9
1.4. Batasan Masalah	10
1.5. Sistematika Penulisan	10
BAB II TELAAH PUSTAKA	12
2.1. Mikroalga	12
2.2. Komposisi Kimia Mikroalga	14
2.3. Fase Pertumbuhan Mikroalga	15
2.3.1. Fase Tunda (Fase Lag)	15
2.3.2. Fase Eksponensial (Logaritmik)	15
2.3.3. Fase Penurunan Laju Pertumbuhan	16
2.3.4. Fase Stasioner	16
2.3.5. Fase Kematian (Death Phase)	16
2.4. Berbagai Jenis Kultivasi Alga	17
2.4.1. Sistem kultivasi terbuka (open ponds)	17
2.4.2. Sistem kultivasi tertutup (Fotobioreaktor)	16
2.4.2.1 Sistem Kultivasi dengan Menggunakan Reaktor Plat Datar	18
2.4.2.2 Sistem kultivasi dengan Menggunakan Reaktor <i>Tubular</i>	19
2.4.2.3 Sistem Kultivasi dengan Menggunakan Reaktor Kolom Vertikal	21
2.5. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan <i>Chlorella</i> sp	23
2.5.1. Kondisi Pencahayaan	23
2.5.2. Perpindahan Massa	29

2.6. Perhitungan Dasar dalam Laju Pertumbuhan dan Fiksasi CO ₂ Mikroalga	35
2.6.1. Perhitungan Laju pertumbuhan spesifik (μ , μ_{\max})	35
2.6.2. Prediksi Model Laju Pertumbuhan Spesifik <i>Chlorella</i> terhadap Jumlah [HCO ₃ ⁻] dalam medium	41
2.6.3. Perhitungan Berat Kering Sel (X)	43
2.6.4. Perhitungan [HCO ₃ ⁻] di dalam Medium Kultur Mikroalga	44
BAB III METODE PENELITIAN	46
3.1. Lingkup Penelitian	46
3.2. Rancangan Kegiatan Penelitian	48
3.3. Metode Pelaksanaan	49
3.3.1. Kondisi Operasi	49
3.3.2. Material	49
3.3.3. Prosedur Penelitian	50
3.3.4. Metode Pengukuran	58
3.3.5. Metode Analisis Lipid	59
3.3.6. Metode Analisis Klorofil dan Karotenoid	59
3.3.7. Metode Analisis Protein	60
3.3.8. Metode Perhitungan	61
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	63
4.1. Perancangan Sistem Reaktor dan Studi Awal Peningkatan Skala Reaktor Berbasis Parameter Hidrodinamik dalam Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> .	66
4.1.1. Penentuan Nilai K_{La} sebagai Parameter Hidrodinamik dan Pengaruhnya pada Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i>	71
4.1.2. Pengaruh Model Iso- K_{La} dan Iso- U_g terhadap Konsumsi [HCO ₃ ⁻] oleh <i>Chlorella vulgaris</i> dalam Media Kultur	75
4.1.3. Pengaruh Model Iso- K_{La} dan Iso- U_g terhadap Laju Fiksasi CO ₂ (q_{CO_2}), Laju Transfer Karbon (CTR) dan Laju Konsumsi Carbon (CUR) oleh <i>C. vulgaris</i> dalam Media Kultur	76
4.1.4. Analisis Kandungan Esensial dari Sel <i>Chlorella vulgaris</i> Hasil Kultivasi	81
4.2. Pengaturan Laju Hisap Filter untuk Mengendalikan Densitas sel dalam Kultur Media melalui Teknik Filtrasi secara Kontinyu untuk Meningkatkan Produksi Biomassa dan Fiksasi CO ₂ oleh <i>Chlorella vulgaris</i>	83
4.2.1 Pengaruh Pengaturan Laju Hisap dalam Filtrasi secara Kontinyu terhadap Perolehan Berat Kering Sel (X)	84
4.2.2 Pengaruh Perlakuan Filtrasi dengan Pengaturan Laju Hisap Filter terhadap Laju Pertumbuhan (μ)	89
4.2.3 Pengaruh Perlakuan Filtrasi dengan Pengaturan Laju Hisap Filter terhadap Konsumsi [HCO ₃ ⁻] oleh Sel <i>C. vulgaris</i> dalam Media Kultur	91
4.2.4 Pengaruh Pengaturan Aliran Hisap (σ) terhadap Laju Fiksasi CO ₂ (q_{CO_2}), Laju Transfer Karbon (CTR) dan Laju Konsumsi Carbon (CUR) oleh Sel <i>Chlorella vulgaris</i> dalam Media Kultur	93

4.3. Optimasi Sistem Aerasi dalam Kultur Media untuk Meningkatkan Produksi Biomassa dan Fiksasi CO ₂ dari <i>Chlorella vulgaris</i>	96
4.3.1. Pengaruh Penggunaan Membran Serat Berongga sebagai <i>Sparger</i> terhadap Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i>	98
4.3.2. Pengaruh Penggunaan perpaduan antara Membran sebagai <i>Sparger</i> dan Sistem Pemerangkapan Sel terhadap Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i>	101
4.3.3. Pengaruh Penggunaan <i>Sparger</i> Membran Serat Berongga dalam Sistem Kultivasi <i>Chlorella vulgaris</i> dengan Perlakuan Pemerangkapan Sel terhadap Proses Fiksasi CO ₂	103
4.4. Optimasi Media Filter dalam Peningkatan Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> melalui Perlakuan Teknik Filtrasi dalam Aliran Sirkulasi Media Kultur	106
4.4.1. Pengaruh Penggunaan Mikrofiltrasi dalam Sistem Filtrasi pada Aliran Medium Kultur Terhadap Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i>	107
4.4.2. Pengaruh penggunaan Mikrofiltrasi dalam Sistem Filtrasi pada Aliran Medium Kultur Terhadap Laju Pertumbuhan (μ) <i>Chlorella vulgaris</i>	110
4.4.3. Pengaruh Penggunaan Mikrofiltrasi dalam Sistem Filtrasi pada Aliran Medium Kultur Terhadap CTR dari <i>C. vulgaris</i>	112
4.4.4. Pengaruh Penggunaan Mikrofiltrasi dalam Sistem Filtrasi pada Aliran Medium Kultur Terhadap [HCO ₃ ⁻] dalam Medium	113
4.5. Peningkatan Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Menggunakan Teknik Filtrasi Semikontinu dalam Fotobioreaktor	116
4.5.1. Pengaruh Sistem Filtrasi Semikontinu terhadap Peningkatan Produksi Biomassa <i>C. vulgaris</i>	117
4.5.2. Pengaruh Sistem Filtrasi Semikontinu terhadap Laju Pertumbuhan Sel <i>C. vulgaris</i>	118
4.5.3. Pengaruh Sistem Filtrasi Semikontinu terhadap [HCO ₃ ⁻] dalam Medium	120
4.5.4. Pengaruh Sistem Filtrasi Semikontinu terhadap Laju Transfer Karbon (CTR) pada Medium	121
4.5.5. Analisis Kandungan Esensial dari Sel <i>C. vulgaris</i> Hasil Kultivasi	122
4.6. Pembudidayaan <i>Chlorella vulgaris</i> dalam Berbagai Jenis Media Kultur untuk Tujuan Aplikasi Industri.	125
4.6.1. Pengaruh Jenis Media kultur terhadap Perolehan Kandungan Lipid dalam mikroalga <i>C. vulgaris</i>	125
4.6.2. Pemanfaatan Gas Buang yang diperkaya dengan kandungan gas NO _x dalam budidaya Mikoalga <i>C. vulgaris</i>	135
BAB V	143
DAFTAR PUSTAKA	147

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.1.	Skema Pemanfaatan Mikroalga Secara Umum	2
Gambar 1.1.2.	Beberapa fokus riset yang telah dicapai dalam produksi biomassa alga	3
Gambar 2.1.1.	Koloni <i>Chlorella vulgaris</i>	13
Gambar 2.3.1.	Kurva Pertumbuhan <i>C. Vulgaris</i>	15
Gambar 2.4.1.	Tambak terbuka (open ponds) pembiakan alga <i>Dunaliella</i> sp di Nature Beta Technologies Ltd	18
Gambar 2.4.2.	(a) Reaktor panel alveolar; (b) sistem fotobioreaktor di Jerman; (c) Reaktor plat datar di Israel	19
Gambar 2.4.3.	(a) Sistem fotobioreaktor di Departemen Bioteknologi Pertanian dari University of Florence (Itali); (b) Sistem reaktor aliran paralel di Ben Gurion dari University of the Negev (Israel) (Flickinger, Drew,1999); (c) Sistem fotobioreaktor di Departemen Bioteknologi dari National University of Singapore (Lee,2003).	21
Gambar 2.4.4.	(a) Sistem reaktor di <i>Institute for Applied Research</i> (Beer-Sheva, Israel); (b) Kolom anular di Departemen Bioteknologi Pertanian dari University of Florence (Italia) (Lee,2003)	22
Gambar 2.5.1.	Skema Reaksi Fotosintesis	24
Gambar 2.5.2.	Nilai $I_{\mu max, opt}$ pada berbagai berat kering sel (X)	25
Gambar 2.5.3.	Grafik Pengaruh kondisi Pencahayaan terhadap Produksi Biomassa; A, Pengaturan intensitas cahaya ; B, Pencahayaan dijaga tetap 5,000 lx	26
Gambar 2.5.4.	Diagram tahapan perpindahan gas CO ₂ dari gelembung udara menuju bagian dalam sel	30
Gambar 2.5.5.	Skema perpindahan CO ₂ dari fase gas ke fase cair	31
Gambar 2.6.1.	Ilustrasi Kinetika Kolom Gelembung	39
Gambar 2.6.2.	Grafik Pendekatan Model Kinetik Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i>	43
Gambar 2.6.3.	Kurva Kalibrasi X vs OD ₆₀₀	43
Gambar 3.1.1.	Skema Lingkup Penelitian	46
Gambar 3.3.3.1.	Prosedur penelitian perancangan sistem reaktor dan studi awal peningkatan skala reaktor berbasis parameter hidrodinamik dalam produksi biomassa <i>Chlorella vulgaris</i>	51
Gambar 3.3.3.2.	Prosedur penelitian pengaturan laju hisap filter untuk mengendalikan densitas sel dalam kultur media pada sistem filtrasi produksi biomassa dan fiksasi CO ₂ oleh <i>Chlorella vulgaris</i>	52
Gambar 3.3.3.3.	Skema fotobioreaktor kultivasi filtrasi kontinu.	53
Gambar 3.3.3.4.	Prosedur penelitian optimasi sistem aerasi dalam kultur media untuk meningkatkan produksi biomassa dan fiksasi CO ₂ dari <i>C. vulgaris</i>	53
Gambar 3.3.3.5.	Skema reaktor <i>sparger</i> biasa (a) dan <i>sparger</i> membran (b)	54
Gambar 3.3.3.6.	Skema sistem reaktor kultivasi <i>Chlorella vulgaris</i> dengan perlakuan filtrasi semikontinu.	56
Gambar 3.3.3.7.	Filter ultra setelah dialiri kultur <i>Chlorella vulgaris</i>	57

Gambar 3.3.3.8.	Prosedur penelitian kultivasi <i>C. vulgaris</i> pada variasi jenis medium	58
Gambar 3.3.3.9.	Prosedur penelitian kultivasi <i>C. vulgaris</i> menggunakan asupan gas yang diperkaya dengan NOx	58
Gambar 4.1.1.	Skema Perancangan Fotobioreaktor untuk Kultivasi <i>Chlorella vulgaris</i>	68
Gambar 4.1.2.	Profil Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> pada Beberapa Nilai U_g	71
Gambar 4.1.3.	Grafik Korelasi antara K_{LA} dan U_g	72
Gambar 4.1.4.	Profil Produksi Biomassa <i>C. vulgaris</i> pada model iso- K_{LA} dan iso- U_g dalam reaktor 40 L	73
Gambar 4.1.5.	Laju Pertumbuhan Spesifik <i>C. vulgaris</i> pada model iso- K_{LA} dan iso- U_g dalam reaktor 40 L	74
Gambar 4.1.6.	Profil $[HCO_3^-]$ dalam medium kultur pada model iso- K_{LA} dan iso- U_g	76
Gambar 4.1.7.	Profil q_{CO_2} dan CTR pada model iso- K_{LA} dan iso- U_g	77
Gambar 4.1.8.	Mekanisme Akumulasi CO_2 intra sel	78
Gambar 4.1.9.	Profil CUR dan $d[HCO_3^-]/dt$ pada model iso- K_{LA} dan iso- U_g	80
Gambar 4.2.2.	Studi Awal Produksi Biomassa <i>C. vulgaris</i> pada perlakuan pemerangkapan sel dalam aliran sirkulasi media kultur	84
Gambar 4.2.3.	Profil laju pertumbuhan spesifik <i>Chlorella vulgaris</i> pada berbagai variasi kecepatan aliran hisap	85
Gambar 4.2.4.	Nilai $\sigma_{\mu_{max,opt}}$ pada Berbagai Berat Kering Sel (X)	86
Gambar 4.2.5.	Profil Produksi Biomassa <i>C. vulgaris</i> pada perlakuan alterasi dan filtrasi dibandingkan dengan kondisi kultivasi tanpa perlakuan	87
Gambar 4.2.6.	Profil perolehan berat kering sel <i>Chlorella vulgaris</i> dalam sistem kultivasi menggunakan teknik filtrasi secara kontinu.	89
Gambar 4.2.7.	Profil laju pertumbuhan <i>C. vulgaris</i> pada perlakuan alterasi dan filtrasi dibandingkan dengan kondisi kultivasi tanpa perlakuan	90
Gambar 4.2.8.	Pengaruh sistem pemerangkapan sel terhadap profil $[HCO_3^-]$ dalam medium kultur dengan A: kontrol; B:kultivasi alterasi; C:kultivasi filtrasi	92
Gambar 4.2.9.	Pengaruh pengaturan kecepatan hisap dalam sistem pemerangkapan sel terhadap profil CTR dalam medium kultur. A: Kultivasi biasa (kontrol); B: Kultivasi dengan alterasi; C: Kultivasi dengan teknik pemerangkapan sel	93
Gambar 4.2.10.	Pengaruh pengaturan kecepatan hisap dalam sistem pemerangkapan sel terhadap profil q_{CO_2} dalam medium kultur: A: Kultivasi biasa (kontrol); B: Kultivasi dengan alterasi; C:Teknik Pemerangkapan sel	94
Gambar 4.3.1.	Skema reaktor <i>sparger</i> biasa (a) dan <i>sparger</i> membran (b)	92
Gambar 4.3.2.	Grafik Korelasi antara K_{LA} dan U_g pada <i>sparger</i> biasa (A) dan <i>sparger</i> membran (B)	98
Gambar 4.3.3.	Profil Pertumbuhan Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> pada <i>sparger</i> biasa (A) dan <i>sparger</i> membran (B).	99
Gambar 4.3.4.	Profil Laju Pertumbuhan spesifik <i>Chlorella vulgaris</i> pada <i>sparger</i> biasa (A) dan <i>sparger</i> membran (B)	100
Gambar 4.3.5.	Profil Pertumbuhan <i>C. vulgaris</i> pada beberapa perlakuan kultivasi	102
Gambar 4.3.6.	Profil Laju Pertumbuhan Spesifik <i>C. vulgaris</i> pada beberapa	102

	perlakuan kultivasi	
Gambar 4.3.7.	Profil Biofiksasi CO ₂ <i>C. vulgaris</i> pada kultivasi biasa (kontrol) (A) dan <i>Sparger</i> membran berfilter (B)	104
Gambar 4.3.8.	Profil Laju Transfer Carbon per berat kering sel dalam Medium Kultur pada kultivasi biasa (kontrol) (A) dan <i>Sparger</i> membran berfilter (B)	104
Gambar 4.4.1.	Nilai $\sigma_{\mu\max, \text{opt}}$ pada Berbagai Berat Kering Sel (X)	108
Gambar 4.4.2.	Pengaruh Perlakuan Mikrofiltrasi terhadap Produksi Biomassa <i>C. vulgaris</i>	109
Gambar 4.4.3.	Pengaruh Perlakuan Berbagai Jenis Media Filter terhadap Densitas Sel <i>C. vulgaris</i> dalam Reaktor Selama Kultivasi: [A] Kontrol, [B] Kultivasi dengan filter busa dan <i>sparger</i> biasa, [C] kultivasi dengan filter busa dan <i>sparger</i> membran, dan [D] Kultivasi dengan mikrofiltrasi.	110
Gambar 4.4.4.	Pengaruh Perlakuan Mikrofiltrasi terhadap Laju Pertumbuhan (μ) <i>C. vulgaris</i> Dibandingkan dengan Perlakuan Kultivasi Lainnya	111
Gambar 4.4.5.	Kurva CTR Pada Medium Kultur <i>C. vulgaris</i> , [A]:Proses Kultivasi kontrol, [B]: Proses kultivasi dengan filter busa dan [C]: Proses Kultivasi menggunakan mikrofiltrasi	112
Gambar 4.4.6.	Profil [HCO ₃ ⁻] dalam Medium Kultur <i>C. vulgaris</i> pada: [A] Proses kultivasi kontrol, [B] Proses kultivasi dengan filter busa dan [C]:Proses kultivasi dengan mikrofiltrasi	114
Gambar 4.5.1.	Profil pertumbuhan sel <i>C. vulgaris</i> selama masa kultivasi dengan [A]: sistem kultivasi alga tanpa perlakuan, dan [B]: sistem kultivasi filtrasi semikontinu.	117
Gambar 4.5.2.	Profil laju pertumbuhan spesifik <i>C. vulgaris</i> selama masa kultivasi dengan [A]: sistem kultivasi alga tanpa perlakuan, dan [B]: sistem kultivasi filtrasi semikontinyu.	119
Gambar 4.5.3.	Profil [HCO ₃ ⁻] selama masa kultivasi dengan [A]: sistem kultivasi alga tanpa perlakuan, dan [B]: sistem kultivasi filtrasi semikontinyu.	120
Gambar 4.5.4.	Kurva CTR vs t, (kiri: kontrol, kanan: filtrasi semi kontinu)	121
Gambar 4.6.1.1	Profil Pertumbuhan biomassa <i>C. vulgaris</i> pada beberapa jenis media	126
Gambar 4.6.1.2.	Profil Laju Pertumbuhan <i>C. vulgaris</i> pada kultivasi dengan beberapa jenis medium	131
Gambar 4.6.1.3.	Pengaruh Variasi Medium Pertumbuhan terhadap CTR	132
Gambar 4.6.1.4.	Presentase Lipid <i>C. vulgaris</i> dalam berbagai media kultur	133
Gambar 4.6.2.1.	Hasil Produksi Biomassa <i>C. vulgaris</i> dengan asupan Gas yang mengandung gas NO ₂ dan dibandingkan dengan proses kultivasi tanpa NO ₂	137

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1.1.	Jejak Rekam Penelitian Budidaya Alga dalam Berbagai Konsentrasi CO ₂ dan Temperatur	5
Tabel 1.1.2.	Jejak Rekam Penelitian Budidaya Alga dalam Berbagai Sistem Reaktor dan Pencahayaan.	6
Tabel 2.2.1.	Kandungan Esensial Sumber Nabati dan Beberapa Mikroalga (% Berat Kering)	14
Tabel 3.2.1.	Rancangan kegiatan penelitian	48
Tabel 3.2.	Penentuan kadar protein dengan metode Lowry	61
Tabel 4.1.	Pencapaian Pelaksanaan Kegiatan Penelitian	64
Tabel 4.1.1.	Hasil Evaluasi terhadap Beberapa Jenis Reaktor yang Dipilih untuk Kultivasi Alga	67
Tabel 4.1.2.	Beberapa Nilai K _L a pada Berbagai Jenis dan Ukuran Reaktor	70
Tabel 4.1.3.	Hasil uji elemental analisis <i>C. vulgaris</i>	79
Tabel 4.1.4.	Hasil Uji Kandungan Esensial dari <i>C. vulgaris</i>	82
Tabel 4.2.1.	Nilai rata-rata CTR kultivasi <i>C. vulgaris</i> pada beberapa perlakuan	93
Tabel 4.2.2.	Nilai rata-rata q_{CO_2} kultivasi <i>C. vulgaris</i> pada beberapa perlakuan	94
Tabel 4.3.1.	Tabel Perolehan Hasil Kultivasi dalam Besaran Lain	100
Tabel 4.3.2.	Tabel Perolehan Hasil Kultivasi dalam Besaran Lain	103
Tabel 4.3.3.	Perolehan Nilai rata-rata dari CTR dan q_{CO_2}	104
Tabel 4.5.1.	Perbandingan kandungan nutrisi dalam % berat kering	122
Tabel 4.6.2.1.	Hasil analisa kandungan <i>C. vulgaris</i>	138

DAFTAR NOTASI

A	Luas permukaan reaktor yang menghadap ke sumber cahaya
α_{CO_2}	Tetapan konversi CTR/ q_{CO_2}
CTR	Laju tranfer CO_2 ke medium kultur
CTR_{max}	Laju maksimum tranfer CO_2 ke medium kultur
Δy_{CO_2}	Fraksi CO_2 yang terfiksasi karena proses pertumbuhan mikro alga
$[HCO_3^-]$	Konsentrasi bikarbonat dalam medium kultur
H_{CO_2}	Tetapan Henry untuk CO_2
I	Intensitas cahaya
I_i dan I_T	Intensitas cahaya yang diterima dan ditransmisikan medium kultur
$I_{CTR_{max, opt}}$	Intensitas yang menunjukkan nilai optimum dari CTR_{max}
$I_{\mu_{max, opt}}$	Intensitas yang menunjukkan nilai optimum dari μ_{max}
$I_{q_{CO_2 max, opt}}$	Intensitas yang menunjukkan nilai optimum dari $q_{CO_2 max}$
K_{CO_2}	Tetapan kesetimbangan CO_2
K_1, K_2	Tetapan Haldane hasil <i>curve fitting</i>
$K_L a$	Koefisien transfer massa gas dalam media kultur
M_{CO_2}	Massa molekul relative CO_2
μ	Laju pertumbuhan spesifik mikro alga
μ_{max}	Laju maksimum pertumbuhan mikro alga pada awal fasa logaritmik pertumbuhan
OD_{600} dan OD_{680}	Nilai <i>optical density</i> yang diukur pada 600 dan 680 nm
P_{CO_2}	Tekanan parsial CO_2
pH	pH medium kultur
q_{CO_2}	Laju fiksasi CO_2 spesifik mikro alga
R	Konstanta Rydberg ($0,08205 \text{ dm}^3 \cdot \text{atm/mol K}$)
T	Suhu
t	Waktu
U_G	Kecepatan superficial gas yang diumpankan
V_{medium}	Volume medium
X	Kerapatan biomassa kering
X_0	Kerapatan biomassa kering awal
$y_{CO_2, i}$ dan $y_{CO_2, e}$	Persentasi CO_2 masuk dan keluar medium kultur

DAFTAR ISTILAH

Alterasi	Pengaturan Intensitas Cahaya
ATP	Adenosin tri fosfat
ADP	Adenosin di fosfat
CCM	CO ₂ Concentrating Mechanism
Chlorofil	Pigmen hijau daun untuk penyerapan energi cahaya pada proses fotosintesis
CTR	Carbon dioxide Transferred Rate
DNA	Asam deoxiribo nukleat
IR	Infra merah
PFD	Photon Flux Density
<i>Pre-Culture</i>	Pengkondisian mikro alga hingga tercapai kondisi pertumbuhan eksponensial
PS I	Fotosistem I
PS II	Fotosistem II
RNA	Asam ribo nukleat
RTD	Residence Time Distribution
Rubisco	Ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase
Strain	Jenis atau species mikro organisme
UV	Ultraviolet
VIS	Cahaya tampak

BAB I

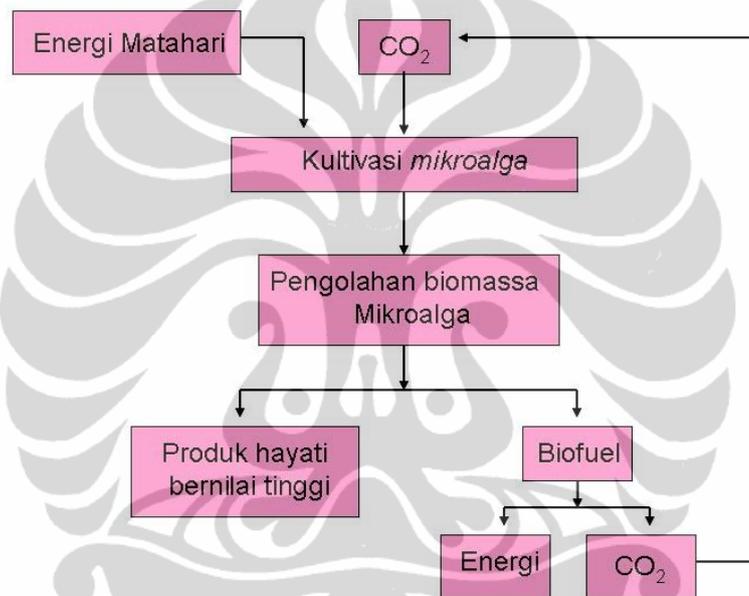
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Penelitian

Jumlah penduduk dunia yang semakin bertambah dari waktu ke waktu, memunculkan dua permasalahan global, yakni adanya ancaman krisis pangan dan pemanasan global. Ancaman krisis pangan ditandai dengan semakin menurunnya hasil pangan akibat berkurangnya lahan pertanian dan perkebunan. Sebagian besar lahan terserap untuk pembangunan industri dan perumahan. Sementara itu perkembangan industri yang semakin pesat dan aktivitas manusia yang semakin meningkat berpotensi menggiring manusia dalam menggunakan bahan bakar fosil secara berlebihan. Hal ini menimbulkan masalah peningkatan kandungan CO₂ di atmosfer. Peningkatan kadar gas yang dikenal sebagai gas rumah kaca inilah yang memicu terjadinya pemanasan global. Perubahan iklim dan meningkatnya temperatur di permukaan bumi merupakan efek dari adanya pemanasan global. Efek ini pada akhirnya akan memberikan dampak besar pada sektor pertanian, kehutanan, kesehatan dan dampak akibat kenaikan permukaan laut. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kedua permasalahan ini lambat laun dapat mengancam keberadaan makhluk hidup secara menyeluruh.

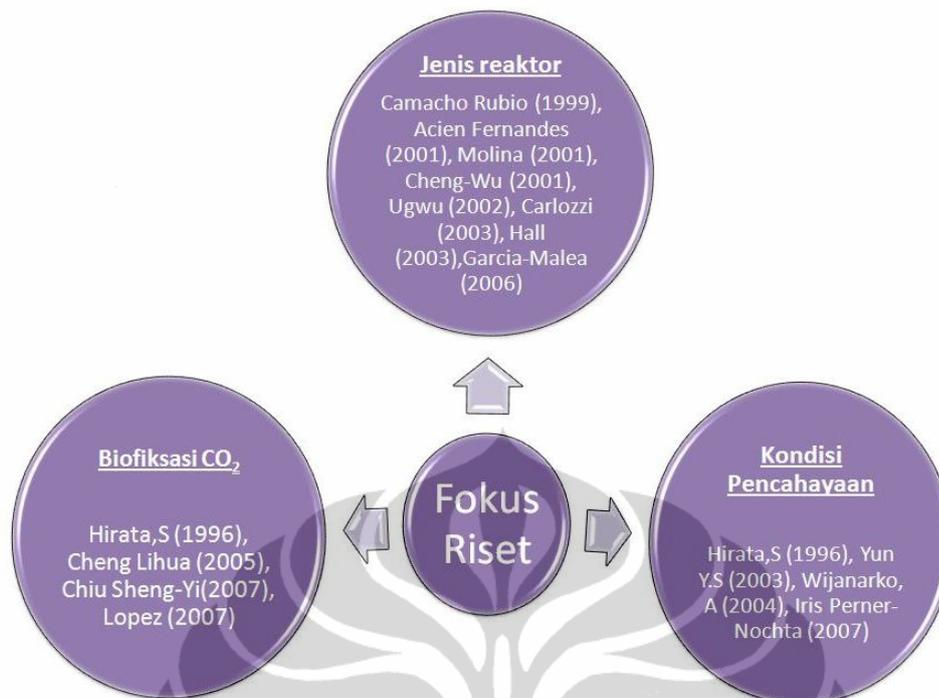
Indonesia menjadi salah satu aktor penting dalam masalah ini. Dengan semakin meningkatnya proses industrialisasi di Indonesia memungkinkan dihasilkannya gas rumah kaca lebih banyak lagi, bahkan melebihi dari kapasitas gas yang mampu diserap oleh hutan Indonesia. Kondisi saat ini menjadi lebih parah lagi, mengingat semakin sedikitnya jumlah hutan yang mampu menyerap gas CO₂ tersebut, akibat semakin maraknya pembalakan dan pembakaran hutan-hutan secara liar. Kerusakan alam akibat eksploitasi illegal dan tidak terkendali berimplikasi langsung pada penurunan daya dukung alam dalam mengeliminasi keberadaan emisi CO₂ yang juga terkait erat dengan penurunan produksi pertanian, perkebunan dan kehutanan. Penurunan produksi pertanian dan perkebunan ini pada akhirnya dapat menimbulkan krisis pangan.

Pemanfaatan biomassa mikroalga dirasakan dapat menjawab tantangan permasalahan di atas. Mikroalga merupakan suatu mikroorganisme fotosintetik yang kaya akan kandungan esensial dan memiliki kemampuan mengeliminasi CO₂. Penelitian mengenai alga cukup banyak menarik minat beberapa peneliti mengingat potensinya baik sebagai bahan makanan pelengkap nutrisi, bahan makanan alternatif, komponen bioaktif dan kegunaan lainnya untuk mendukung kebersihan lingkungan. Gambar 1.1.1. ini memberikan gambaran tentang konsep pemanfaatan mikroalga dalam mengatasi kedua permasalahan di atas.



Gambar 1.1.1. Skema Pemanfaatan Mikroalga Secara Umum

Penelitian mengenai pemanfaatan mikroalga untuk biofiksasi CO₂ dan produksi biomasnya sudah banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti, sebagaimana yang tercantum dalam Gambar 1.1.2. Secara umum hasil yang dicapai menunjukkan bahwa mikroalga memang sangat potensial dalam mereduksi kandungan gas CO₂ dan hasil pengolahan biomasnya dapat menghasilkan produk hayati bernilai ekonomis. Beberapa fokus riset yang telah dicapai di bidang penelitian alga terkait dengan produksi biomassa dan fiksasi CO₂ dapat dilihat pada gambar 1.1.2. berikut ini:



Gambar 1.1.2. Beberapa fokus riset yang telah dicapai oleh peneliti-peneliti dalam produksi biomassa alga

Dari Gambar 1.1.2. dapat dijabarkan, bahwa beberapa fokus riset yang berkaitan dengan produksi biomassa alga dan proses biofiksasi CO₂ adalah jenis reaktor yang digunakan, kemampuan fiksasi CO₂ mikroalga, dan pengaturan kondisi pencahayaan. Berikut ini akan dijelaskan beberapa hal yang terkait dengan ketiga fokus riset di atas.

Fotobioreaktor merupakan reaktor yang berfungsi sebagai tempat pembudidayaan mikroalga dan bersifat tembus cahaya. Jenis-jenis reaktor yang telah digunakan dalam berbagai penelitian yang telah dilaporkan tersebut antara lain meliputi fotobioreaktor tubular (Camacho, 1999; Ugwu, 2002), fotobioreaktor tabung konsentris *airlift*, fotobioreaktor plat datar (Zhang, 2002), dan fotobioreaktor kolom gelembung (Merchuk, 2000; Garcia dan Lopez, 2006; Choi, 2003). Pada penelitian ini reaktor yang digunakan adalah reaktor gelembung berbentuk plat datar.

Rancangan atau desain reaktor yang digunakan sangat berhubungan erat dengan tinjauan aspek hidrodinamika. Jenis reaktor, ukuran dan desain sistem yang berbeda akan mempengaruhi pola aliran fluida yang terlibat di dalamnya. Pola aliran yang terbentuk akan mempengaruhi kondisi atau proses transfer massa

yang terjadi selama proses kultivasi. Hal ini diindikasikan dengan perolehan nilai K_{La} nya sebagaimana dilaporkan oleh beberapa peneliti antara lain sebagai berikut: fotobioreaktor *airlift tubular* untuk budidaya alga *Porphyridium cruentum* dengan kapasitas volume 200 L, kecepatan superfisial 0,16 m/detik dan nilai $K_{La} = 0,0164 \text{ detik}^{-1}$ (Camacho, 1999), fotobioreaktor kolom gelembung untuk budidaya *Porphyridium sp* dengan kapasitas volume 13 L, kecepatan superfisial $5,4 \times 10^{-4}$ m/detik dan nilai $K_{La} = 1,7 \times 10^{-3} \text{ detik}^{-1}$ (Merchuk, 2000) dan fotobioreaktor plat datar untuk budidaya *Synechocystis aquatilis* dengan kapasitas volume 3 L, kecepatan superfisial 0,009 m/detik dan nilai $K_{La} = 0,002 \text{ detik}^{-1}$ (Zhang, 2002). Untuk proses kultivasi alga ini diperlukan nilai K_{La} gas yang optimal. Nilai K_{La} gas untuk setiap jenis reaktor berbeda-beda, tergantung pada ukuran dan desain sistemnya. Nilai K_{La} yang tinggi menunjukkan proses transfer massa gas, terutama CO_2 , yang lebih baik dalam kultur mikroalga. Namun tidak selamanya nilai K_{La} gas yang besar baik untuk pertumbuhan kultur alga. Nilai K_{La} gas yang terlalu besar sangat mungkin menyebabkan terjadinya *shear stress* pada alga (Ugwu, 2007). Fenomena ini dapat menghambat pertumbuhan alga, sehingga harus dihindari. Oleh sebab itu pada penelitian ini dilakukan kajian terhadap aspek hidrodinamika pada reaktor yang digunakan, agar diperoleh kondisi operasi sistem reaktor yang optimal.

Setiap jenis alga cenderung memiliki kemampuan fiksasi CO_2 yang berbeda-beda. Dengan demikian penelitian yang berfokus pada produksi biomassa alga dengan berbagai variasi konsentrasi CO_2 akan memberikan pengetahuan tentang ketahanan mikroalga dalam konsentrasi CO_2 yang tinggi dan pengembangan sistem untuk meningkatkan ketahanan alga tersebut dalam konsentrasi CO_2 tertentu. Pada penelitian ini konsentrasi CO_2 yang digunakan adalah 10%. Berikut ini adalah jejak rekam dari beberapa penelitian yang telah dilakukan terkait dengan jenis alga dan besarnya konsentrasi gas CO_2 yang digunakan.

Tabel 1.1.1. Jejak Rekam Penelitian Budidaya Alga dalam Berbagai Konsentrasi CO₂ dan Temperatur

Mikroalga	CO ₂ (%)	T (°C)	Peneliti
<i>Chlorococcum littorale</i>	40	30	Iwasaki (1998)
<i>Chlorella kessleri</i>	18	30	de Morais (2007)
<i>Chlorella sp. UK001</i>	15	35	Yun (1997)
<i>Chlorella vulgaris</i>	10	25	Scragg (2002) Wijanarko (2008)
<i>Dunaliella</i>	3	27	Kishimoto (1994)
<i>Haematococcus pluvialis</i>	16-34	20	Huntley (2007)
<i>Spirulina sp</i>	12	30	de Morais (2007)

Kondisi pencahayaan juga menjadi salah satu fokus riset yang penting, terutama bagi *Chlorella* sp. Sistem kultur alga dapat dikultivasi dengan pencahayaan alami, pencahayaan buatan atau kombinasi keduanya. Berbagai penelitian yang dilakukan dengan mengatur kondisi pencahayaan sedemikian rupa bertujuan untuk dapat mengurangi terjadi efek *self shading* yang dapat mengganggu pertumbuhan alga. Berikut ini adalah jejak rekam dari beberapa penelitian yang telah dilakukan terkait dengan jenis reaktor dan sistem pencahayaan yang digunakan.

Tabel 1.1.2. Jejak Rekam Penelitian Budidaya Alga dalam Berbagai Sistem Reaktor dan Pencahayaan.

Sistem Reaktor	Sistem Pencahayaan			
	Intensitas tetap	Alterasi	Alami	Terang Gelap
Tubular	Camacho (1999), Acien (2001), Ugwu (2002), Mollina (2006).		Vonshak dan Torzil (2004)	
Reaktor Plat datar	Samson dan Leduy (1985)		Hu (1996), Zhang (2002)	
Kolom Gelembung (KG)	Yun (1997), Iwasaki (1998), De Morraais (2007)	Falkowsky (2007) Wijanarko (2006, 2009)	Hirata (1996)	Wijanarko, (1998), Ogbona (1996), Foy (1976)
KG + <i>discontinuous pressure filter</i>	Mohn (1980), Oh (2001)			
KG+ <i>discontinuous vacuum filter</i>	Mohn (1980), Oh (2001)			
Reaktor Plat Datar + filtrasi kontinyu .	Riset yang dilakukan			

Pada penelitian yang dilakukan ini, mikroalga yang digunakan adalah *Chlorella vulgaris*. Mikroalga jenis *Chlorella* diketahui banyak mengandung zat esensial seperti β karoten, zat hijau daun, phycocyanin (anti oksidan dan pemacu sistem kekebalan), asam folat (vitamin M), asam pantotenat, protein, vitamin B-12, zat besi dan mineral, vitamin E, γ linolenic Acid (GLA) dengan komposisi berimbang dan layak konsumsi secara oral oleh manusia (Van Eykelenburg, 1979). Selain itu, *C.vulgaris* ini merupakan mikroalga domestik dari perairan Depok. Dengan demikian adanya pembudidayaan mikroalga *C. vulgaris* ini diharapkan dapat membawa dampak positif, yaitu meningkatkan pemberdayaan potensi sumber alam asli Depok dengan menghasilkan produk biomassa alga yang dapat menjadi alternatif penyediaan sumber pangan dilihat dari kandungan proteinnya. Selain itu, mikroalga *C. vulgaris* adalah mikroorganisme fotosintetik yang dapat menggunakan energi matahari untuk mengubah CO₂ menjadi biomassa. *Chlorella* dapat dengan efisien mereduksi CO₂ karena dapat tumbuh dengan sangat cepat

dan dapat dengan mudah diadaptasikan ke dalam rekayasa sistem seperti fotobioreaktor. (Carvalho, 2006; Lee, 2003).

Dengan meninjau bahwa *Chlorella vulgaris* adalah mikroorganisme fotosintesis yang mengubah energi cahaya menjadi senyawa karbon untuk pertumbuhannya, maka faktor cahaya menjadi sangat penting bagi pertumbuhannya. Semakin tinggi intensitas cahaya yang diberikan pada organisme fotosintesis maka laju pertumbuhan spesifik dan produksi biomasanya juga akan semakin tinggi sampai pada titik maksimumnya (Hirata, 1996). Konsep inilah yang mendasari penelitian yang dilakukan. Pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, produksi biomassa dan biofiksasi CO₂ mikroalga *C. vulgaris* dilakukan dengan pengaturan intensitas pencahayaan (alterasi). Metode alterasi ini adalah perlakuan pencahayaan kontinu dengan meningkatkan besarnya intensitas cahaya yang disesuaikan dengan besarnya penambahan jumlah sel dari *C. vulgaris*. Hasil yang diperoleh dengan metode pencahayaan alterasi pada skala laboratorium (volume reaktor 600 mL) adalah peningkatan produksi biomassa *Chlorella* yang cukup besar hingga mencapai 60 % (Wijanarko, 2006). Disamping itu metode alterasi ini telah berhasil menjaga kondisi laju pertumbuhan optimum *C. vulgaris* dalam rentang waktu 180 jam (Wijanarko, 2008).

Peningkatan produksi biomassa *C. vulgaris* dengan metode alterasi sulit diaplikasikan pada skala yang lebih besar. Tidak mudah mengatur peningkatan intensitas cahaya di luar ruangan, untuk aplikasi kultivasi *Chlorella* pada densitas sel dan volume reaktor yang lebih besar. Salah satu cara yang mungkin dilakukan adalah dengan mengatur densitas sel dalam reaktor pada nilai intensitas cahaya yang dijaga tetap. Hal inilah yang menjadi ide awal dilakukannya pengaturan densitas sel melalui sistem filtrasi sel secara kontinu dalam proses kultivasi *C. vulgaris* pada intensitas cahaya yang dijaga tetap.

Perlakuan filterisasi kultur alga ini bertujuan untuk pemerangkap sebagian biomassa dalam kultur untuk mengurangi kepadatan sel. Pemerangkapan ini dilakukan secara kontinu selama berlangsungnya proses kultivasi *C. vulgaris*. Dengan berkurangnya kepadatan sel, pengaruh *self shading* yang terjadi dalam kultur alga di dalam reaktor dapat diatasi. Hal ini berarti intensitas cahaya yang diberikan dapat mencukupi kebutuhan sel selama kultivasi. Oleh karena itu tidak

lagi diperlukan peningkatan intensitas cahaya untuk dapat meningkatkan produksi biomassa, sebagaimana yang dilakukan pada penelitian dengan metode alterasi. Dengan kata lain adanya perlakuan pemerangkapan ini memungkinkan pemberian intensitas cahaya yang lebih rendah dibandingkan dengan metode alterasi dengan tetap menghasilkan peningkatan produksi biomassa yang lebih baik.

Beberapa hal yang menjadi perhatian dalam pengembangan sistem filtrasi untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* ini adalah sistem filtrasi dengan pengaturan: aliran hisap filter, sistem aerator dalam kultur, dan media filter yang digunakan. Pada penelitian ini juga dilakukan sistem filtrasi semikontinu sebagai alternatif lain dari jenis proses sistem filtrasi yang dikembangkan. Selain itu pengujian terhadap kandungan esensial dari produksi *Chlorella* ini juga dilakukan. Pengujian ini masih menggunakan metode-metode dasar yang umum digunakan dan belum dilakukan optimasi terhadap tingkat kemurnian produk esensialnya. Dengan demikian perolehan kandungan esensial terutama lipid dari hasil ekstraksi, masih dimungkinkan juga mengandung senyawa-senyawa yang lain. Namun demikian, pengujian ini dimaksudkan agar dapat diketahui kecenderungan kualitas sel yang dihasilkan dari sistem kultivasi pada kondisi operasi yang diberikan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah tersebut, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

- Bagaimana mendesain dan mengoptimalkan sistem filtrasi dalam fotobioreaktor pada intensitas cahaya yang dijaga tetap, agar dihasilkan kondisi densitas sel sedemikian rupa sehingga intensitas cahaya yang diberikan dapat mencukupi kebutuhan sel selama kultivasi? Kondisi ini akan memberikan pengaruh yang signifikan pada peningkatan produksi biomassa *C.vulgaris* dan fiksasi CO₂ yang efisien.
- Bagaimana menentukan kondisi operasi optimum untuk reaktor yang didesain seperti kecepatan superfisial gas CO₂ dan sistem aerasinya agar mendukung proses kultivasi *C.vulgaris* yang optimal.

1.3. Tujuan Penelitian

1.3.1. Tujuan umum

Secara umum penelitian ini bertujuan merancang dan menghasilkan sistem filtrasi yang efektif dalam fotobioreaktor dengan kondisi intensitas cahaya yang dijaga tetap, agar dihasilkan:

- kondisi peningkatan densitas sel yang dijaga tetap atau tidak mengalami peningkatan yang terlalu tinggi agar intensitas cahaya yang diberikan dapat tetap mencukupi kebutuhan sel selama kultivasi.
- Peningkatan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* dan fiksasi CO₂ yang lebih besar sebagai akibat dari pengaturan densitas sel selama masa kultivasi.

1.3.2. Tujuan khusus

Secara khusus penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan kondisi operasi optimum sistem kultivasi *C. vulgaris* melalui studi parameter hidrodinamik dari reaktor dan jenis sistem aerator yang digunakan. Kondisi optimum ini akan digunakan untuk kultivasi selanjutnya dalam sistem menggunakan filtrasi.
2. Merancang sistem filtrasi yang digunakan dalam penelitian ini melalui serangkaian perlakuan, untuk mendapatkan:
 - Laju hisap filter optimum yang dapat menjaga kondisi densitas sel yang tetap atau tidak mengalami peningkatan yang terlalu tinggi agar intensitas cahaya yang diberikan dapat tetap mencukupi kebutuhan sel selama kultivasi.
 - Sistem aerasi yang optimum yang mampu meningkatkan nilai K_{La} (CO₂) pada rentang nilai yang optimum untuk pertumbuhan *C. vulgaris*. Nilai K_{La} yang tinggi menunjukkan proses transfer massa CO₂ yang lebih baik dalam kultur mikroalga.
 - Jenis media filter yang memiliki kekuatan hisap dan kapasitas filter yang baik, sehingga mampu menjaga densitas sel pada kondisi yang sesuai dengan besarnya intensitas cahaya yang diberikan selama masa kultivasi.

3. Menentukan kandungan esensial dari produksi *Chlorella vulgaris* agar dapat diketahui kualitas sel yang dihasilkan dari sistem kultivasi pada kondisi operasi optimal yang diberikan.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bioproses lantai 4 Departemen Teknik Kimia FTUI.
2. Mikroalga yang digunakan adalah *C.vulgaris* yang digunakan berasal dari kultur sub balai Perikanan Air Tawar kota Depok.
3. Jenis medium yang digunakan adalah *Benneck* (khusus untuk kegiatan inti terkait dengan topik pengembangan sistem filtrasi untuk kultivasi alga). Sementara medium lain digunakan untuk kegiatan penelitian yang diarahkan pada aplikasi industri.
4. Sistem reaktor yang digunakan adalah fotobioreaktor tunggal dengan volume 18 L.
5. Metode pencahayaan yang digunakan adalah pencahayaan kontinu.
6. Kondisi operasi proses kultivasi menggunakan laju alir gas asupan CO₂ sebesar 5% dan berada pada rentang suhu 27 – 30°C.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Pada bab pendahuluan ini terdiri atas latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka berisikan ulasan mengenai *C. vulgaris*, fotobioreaktor, fotosintesis, dan metode pemanenan.

Bab III Metode Penelitian

Pada bab ini berisi tentang diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, dan prosedur penelitian.

Bab IV Pembahasan

Bab ini berisikan mengenai analisis penelitian, baik dari data yang diperoleh, hasil pengamatan dan pembahasan untuk tiap metode pemanenan serta pengaruhnya terhadap nutrisi yang dikandung.

Bab V Kesimpulan



BAB II TELAAH PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai beberapa topik yang mendasari penelitian yang akan dilakukan. Beberapa informasi yang akan dibahas adalah mengenai mikroalga, khususnya *Chlorella vulgaris* dan potensi pemanfaatan serta perkembangan produksinya.

2.1. Mikroalga

Mikroalga sesungguhnya telah lama dimanfaatkan oleh penduduk setempat di berbagai negara selama ratusan tahun yang lalu. Namun upaya pengembangan untuk proses kultivasinya baru muncul sekitar puluhan tahun yang lalu. Pada awal tahun 1950-an adanya fenomena peningkatan jumlah penduduk dunia dan prediksi tentang adanya kekurangan suplay protein (bahan makanan) menjadi suatu awalan bagi pencarian alternatif sumber protein baru (Spolaore, 2006). Biomassa alga hadir saat itu sebagai kandidat yang potensial sebagai sumber protein (Becker, 2004)

Penelitian mengenai alga cukup banyak menarik minat beberapa peneliti mengingat potensinya baik sebagai *food suplement*, bahan makanan alternatif, komponen bioaktif dan kegunaan lainnya untuk mendukung kebersihan lingkungan. Namun demikian, belum semua jenis mikroalga yang ada optimal dalam pemanfaatannya, bahkan masih banyak jenis mikroalga yang belum termanfaatkan dengan baik. Adanya perbaikan genetik dari alga dimungkinkan juga sebagai celah potensial yang perlu dikembangkan. Melihat perkembangan penelitian mengenai alga, pemanfaatannya lebih banyak diarahkan sebagai bahan asupan pangan dan biofiksasi CO₂. Saat ini potensi pemanfaatannya juga berkembang ke arah energi.

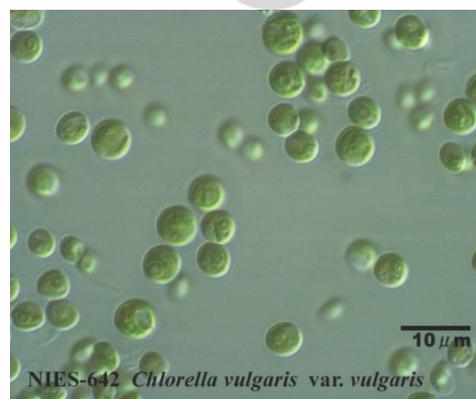
Ada beberapa jenis mikro alga baik dari jenis prokariotik alga biru-hijau seperti salah satu strain dari genus *Anacystis*, *Anabaena*, *Spirulina*, *Dunnaliela*, *Synechocistis*, *Oscillatoria*, *Nostoc*, maupun jenis eukariotik alga hijau seperti genus *Melosira*, *Synedra*, *Skeletonema*, *Chlorella*, *Scenedesmus*, yang potensial

untuk digunakan dalam riset fiksasi karbon dioksida dan produksi biomassa (Aruga, 1965). *Chlorella* adalah mikro alga yang dominan di wilayah perairan darat Indonesia dan dipilih sebagai bahan kajian riset ini. *Chlorella vulgaris* merupakan salah satu species mikro alga domestik alam tropis, dan tahan mikroba *pathogen*.

C. vulgaris merupakan mikroorganisme yang cukup unik karena memiliki komponen biomassa penyerap cahaya dengan konsentrasi tinggi melebihi seluruh organisme fotoautotrof yang lain, termasuk tanaman tingkat tinggi (Adams, 2005). Mikroalga ini merupakan mikroalga primitif yang telah ada sejak 2,5 miliar tahun yang lalu. Namun populasinya masih dapat bertahan sampai sekarang karena beberapa sebab, yaitu :

1. Kestabilan sifat genetik dari pengaruh luar.
2. Memiliki daya dan mekanisme perbaikan DNA yang tinggi untuk beradaptasi dengan lingkungannya yang baru.
3. Bentuk dan sifat dinding sel yang sangat kuat sehingga tahan terhadap pengaruh luar (Suriawiria, 2005).

C. vulgaris hidup secara berkoloni dalam jumlah besar. Lingkungan tempat hidupnya secara umum akan didapatkan di mana-mana, terutama pada tempat lembab dan berair. Bahkan beberapa jenis bersimbiosis dengan jamur membentuk lumut kerak (*Lichenes*) atau hidup di antara jaringan *Hydra*. Sistem koloni *C. vulgaris* dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.1.1.



Gambar 2.1.1. Koloni *C. vulgaris*

(Sumber: <http://www.nies.go.jp/biology/mcc/images/>, (22 Februari 2012))

2.2. Komposisi Kimia Mikroalga

Mikroalga dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kandungan nutrisi dari bahan makanan, untuk memberikan efek yang positif bagi kesehatan manusia dan hewan. Tingginya kandungan protein dari berbagai macam alga, menjadi alasan utama untuk mempertimbangkan mereka sebagai sumber protein baru (Cornet, 1998; Soletto, 2005). Sementara itu karbohidrat dalam mikroalga dapat ditemukan dalam bentuk pati, glukosa, dan polisakarida lainnya. Secara umum mikroalga ini mudah dicerna, sehingga tidak ada pembatasan untuk menggunakan alga ini (dalam berat kering) dalam makanan atau umpan hewan (Becker, 2004).

Kandungan lipid dari sel alga bervariasi dari 1 sampai 70 %, bahkan dapat mencapai 90% untuk kondisi tertentu (Metting, 1996). Kandungan ini dipengaruhi oleh kondisi nutrisi alga dan lingkungannya seperti adanya kandungan nitrogen.

Mikroalga juga sebagai sumber vitamin. Besarnya kandungan vitamin ini juga sangat dipengaruhi oleh bagaimana perlakuan yang diberikan dan metode pengeringan yang dipilih (Borowitzka, 1998).

Tabel 2.2.1. Kandungan Esensial Sumber Nabati dan Beberapa Mikroalga (% Berat Kering) (Becker, 2004)

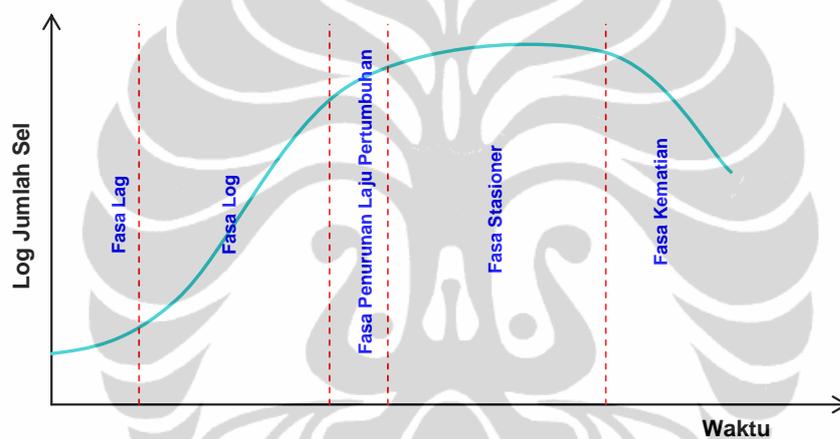
Komponen	Protein	Karbohidrat	Lipid
Daging	43	1	34
Susu	26	38	28
Beras	8	77	2
Kacang kedelai	37	30	20
<i>Anabaena cylindrica</i>	43-56	25-30	4-7
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	13-16	6-7
<i>Synechococcus sp</i>	63	15	11

Chlorella vulgaris (mikro alga domestik, tahan kadar CO₂ tinggi, habitat alam tropis, dan tahan mikroba *pathogen*). *C. vulgaris* kaya akan zat esensial dengan komposisi berimbang [b karoten, zat hijau daun, phycocyanin (anti

oksidan dan pemacu sistem kekebalan), g linolenic Acid (GLA), asam folat (vitamin M), asam pantotenat, protein, vitamin B-12, zat besi dan mineral, vitamin E], dan layak konsumsi (Wirosaputro, 2002).

2.3. Fase Pertumbuhan Mikroalga

Pertumbuhan sel dari mikroalga terdiri dari empat fase yaitu fase lag, fase eksponensial (logaritmik), fase stasioner, dan fase kematian. Keempat fase tersebut dapat ditunjukkan dengan kurva jumlah sel terhadap waktu seperti pada Gambar 2.3.1.



Gambar 2.3.1. Kurva Pertumbuhan *Chlorella vulgaris*

2.3.1. Fase Tunda (Fase Lag)

Setelah pemberian inokulum ke dalam media kultur, terjadi fase tunda karena sel memerlukan penyesuaian dengan lingkungan yang baru sebelum memulai pembiakan (pembelahan). Penyesuaian dalam hal ini berarti suatu masa ketika sel-sel kekurangan metabolit dan enzim akibat keadaan yang tidak menguntungkan dalam pembiakan sebelumnya. Pada fase ini tidak terjadi penambahan jumlah sel.

2.3.2. Fase Eksponensial (Logaritmik)

Selama fase ini sel membelah dengan cepat, sel-sel berada dalam keadaan stabil, dan jumlah sel bertambah dengan kecepatan konstan. Bahan sel baru

terbentuk dengan laju tetap, akan tetapi bahan-bahan tersebut bersifat katalitik dan massa bertambah secara eksponensial. Hal ini bergantung pada satu dari dua hal terjadi, yaitu kalau tidak satu atau lebih zat makanan dalam pembenihan habis, maka tentu hasil metabolisme beracun akan tertimbun dan menghambat pertumbuhan.

2.3.3. Fase penurunan laju pertumbuhan

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

2.3.4. Fase Stasioner

Selama fase ini jumlah sel cenderung konstan. 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 fase stasioner. Pada fase ini, adanya kehilangan sel yang lambat karena kematian yang diimbangi oleh pembentukan sel-sel yang baru melalui pembelahan. Bila hal ini terjadi, maka jumlah sel akan bertambah secara lambat, meskipun jumlah sel hidup tetap.

2.3.5. Fase Kematian

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

Chlorella sp. mempunyai waktu generasi yang sangat cepat. Dalam waktu yang relatif singkat, perbanyakan sel akan terjadi secara cepat, terutama jika tersedianya cahaya sebagai sumber energi, walaupun dalam jumlah minimal. Pada umumnya perbanyakan sel terjadi dalam waktu 4-14 jam, tergantung pada lingkungan pendukungnya (Surawiria, 1987). Pada saat sel membelah, *Chlorella* sp. memerlukan lebih banyak sulfur dibandingkan senyawa yang lain. Demikian

pula saat fotosintesis, *Chlorella* sp. memerlukan nitrogen yang terikat sulfur (Wirosaputro, 2002).

2.4. Berbagai Jenis Kultivasi Alga

Proses kultivasi alga dapat dilakukan dalam sistem kultivasi terbuka atau tertutup (fotobioreaktor). Beberapa pengalaman menunjukkan bahwa proses kultivasi alga dengan sistem tertutup lebih menguntungkan dibandingkan dengan sistem terbuka. Pertimbangan ini didasari atas kemudahan dalam mengontrol kondisi kultivasi, lebih terjaga dari adanya kontaminan yang masuk ke dalamnya, dan produksi biomassa yang diperoleh lebih besar. Untuk sistem kultivasi terbuka biasanya proses kultivasi alga dilakukan dengan menggunakan pencahayaan alami, sedangkan untuk sistem kultivasi yang tertutup, kultur alga dapat dikultivasi dengan sistem pencahayaan: alami, buatan ataupun gabungan keduanya. Dalam kegiatan penelitian untuk skala laboratorium, sistem pencahayaan yang dipilih kebanyakan adalah sistem pencahayaan buatan.

Secara umum fotobioreaktor yang diaplikasikan di luar (*outdoor*) memiliki karakteristik luas permukaan pencahayaan yang lebih besar dibandingkan fotobioreaktor. Namun sangat sulit memperoleh produktivitas yang sama pada skala yang besar, sebaik yang diperoleh pada skala laboratorium. Beberapa masalah yang sering timbul dengan penerapan bioreaktor ini di luar adalah dalam hal: kontrol terhadap kondisi kultivasi; terjadi proses evaporasi medium, rendahnya konsentrasi CO₂ yang dapat terdispersi ke dalam medium alga, dan intensitas cahaya matahari yang sampai ke dasar kolam semakin berkurang dengan semakin bertambahnya kedalaman kolam tsb, terutama bila penyinaran hanya dilakukan di satu sisi saja, yaitu permukaan.

Optimasi pertumbuhan mikroalga dalam fotobioreaktor dapat dicapai dengan memasok: sumber energi, nutrisi penting untuk memenuhi kebutuhan metabolismenya, jenis inokulum yang baik dan kondisi fisikokimiawi yang optimal. Selain itu, terdapat beberapa hal yang harus dipertimbangkan dalam suatu perancangan fotobioreaktor, agar dapat memberikan kondisi lingkungan terkendali yang baik bagi pertumbuhan mikroalga. Beberapa pertimbangan tersebut antara lain adalah (Mangunwidjaja, 1994):

1. Reaktor harus mampu dioperasikan pada suasana aseptik dalam waktu beberapa hari dan berlangsung untuk waktu yang lama.
2. Aerasi dan agitasi harus dapat diatur sehingga dapat mencukupi kebutuhan alga untuk melakukan metabolisme secara optimal. Proses ini tidak boleh mengganggu atau merusak sel.
3. Suatu sistem yang dapat mengendalikan suhu dan pH harus merupakan bagian dari perlengkapan reaktor.
4. Bioreaktor harus dilengkapi juga dengan fasilitas pengambilan sampel.
5. Bioreaktor perlu dirancang dengan jumlah kerja minimal, baik untuk pengoperasian, pemanenan produk, pembersihan dan pemeliharaan.
6. Bioreaktor harus dikonstruksi sedemikian rupa sehingga permukaan bagian dalamnya halus.
7. Untuk memudahkan penggandaan skala (*Scale up*), bioreaktor harus mempunyai bentuk geometri serupa antara yang berukuran kecil dan berukuran besar.

Berikut ini akan dipaparkan mengenai beberapa jenis sistem kultivasi alga, ditinjau dari sisi kemudahan dan kendala pengoperasiannya.

2.4.1. Sistem kultivasi terbuka (*open ponds*) (Ugwu, 2007)

- Sistem kolam terbuka ini dapat dikategorikan menjadi:
 - Sistem alami: memanfaatkan sungai, danau, kolam sebagai tempat kultivasi.
 - Sistem buatan: membuat kolam buatan atau wadah untuk kultivasi.
- Keuntungannya adalah kemudahan dalam mengkonstruksi dan mengoperasikannya.
- Kendala Utama:
 - Sering terjadi efek *selfshading* dalam sel.
 - CO₂ yang terdifusi ke atmosfer.
 - Membutuhkan area yang luas.
 - Sering terjadi kontaminasi dari luar.
 - Mekanisme pengadukan yang kurang efisien → laju transfer massa kurang baik → produktivitas biomassa rendah.



Gambar 2.4.1. Tambak terbuka (*open ponds*) pembiakan alga *Dunaliella* sp di Nature Beta Technologies Ltd

2.4.2. Sistem kultivasi tertutup (Fotobioreaktor) (Ugwu, 2007)

2.4.2.1. Sistem kultivasi dengan menggunakan reaktor plat datar.

- Secara umum reaktor jenis ini terbuat dari bahan yang transparan, mengingat adanya kebutuhan cahaya dalam proses kultivasinya.
- Keuntungannya:
 - Memiliki luas permukaan pencahayaan yang cukup luas.
 - Sesuai untuk diaplikasikan di luar (*outdoor*)
 - Memiliki jalur pencahayaan yang baik.
 - Produktivitas biomassa cukup baik
 - Relatif lebih murah
 - Baik untuk immobilisasi alga
 - Mudah untuk dibersihkan
 - Mudah dikonstruksikan
 - Akumulasi oksigen relatif rendah (aerasi berjalan dengan baik)
- Kendala: → sulit untuk digandakan skalanya (*scale-up*)
 - memerlukan banyak ruang dan material pendukung
 - Sulit dalam mengontrol temperatur kultivasi
 - Kemungkinan terjadinya banyak sel yang menempel pada dinding reaktor cukup besar
 - Kemungkinan terjadinya efek tekanan hidrodinamik pada sel alga cukup besar



Gambar 2.4.2. (a) Reaktor panel alveolar di Departemen Agrikultural Bioteknologi dari University of Florence (Itali); (b) Sistem Fotobioreaktor di Institut für Getreideverarbeitung Bergholz-Rehbrücke, Jerman (Pulz); (c) Reaktor plat datar di the Ben Gurion, University of the Negev (Israel) (Richmond).

2.4.2.2. Sistem Kultivasi dengan Menggunakan Reaktor Tubular (Ugwu, 2007)

- Secara umum reaktor ini terbuat dari bahan gelas atau plastik dan sirkulasi dalam kultivasi sel umumnya dibantu dengan pompa atau sistem pengaliran udara (*airlift sistem*).
- Keuntungannya:
 - Memiliki luas permukaan pencahayaan yang cukup luas.
 - Sesuai untuk diaplikasikan di luar (*outdoor*)
 - Relatif lebih murah.
 - Produktivitas biomassa cukup baik, walau tidak sebaik reaktor tertutup lainnya.
- Kendala: → sulit untuk digandakan skalanya (*scale-up*)
 - Kondisi pH cenderung tidak seragam
 - Akumulasi O_2 dan CO_2 sepanjang pipa (tube)/reaktor.
 - Kemungkinan terjadinya banyak sel yang menempel pada dinding reaktor cukup besar

- Sering terjadi timbulnya penimbunan alga di sepanjang pipa/reaktor (*fouling*)
- Cenderung terjadi fotoinhibisi (adanya peningkatan diameter pipa (tube) pada scale up → rasio antara luas permukaan pencahayaan dan volume reaktor menjadi berkurang)
- Sulit mengontrol temperatur, meskipun dapat digunakan termostat namun teknologinya cukup mahal dan sulit untuk diimplementasikan.
- Memerlukan lahan tanah yang cukup luas untuk pengembangannya.



Gambar 2.4.3. (a) Sistem fotobioreaktor di Departemen Bioteknologi Pertanian dari University of Florence (Itali); (b) Sistem reaktor aliran paralel di Ben Gurion dari University of the Negev (Israel) (Flickinger, Drew,1999); (c) Sistem fotobioreaktor di Departemen Bioteknologi dari National University of Singapore (Lee,2003).

2.4.2.3. Sistem Kultivasi dengan Menggunakan Reaktor Kolom Vertikal (Ugwu, 2007)

- Berbagai desain dan ukuran dari jenis reaktor ini telah diuji coba untuk kultivasi alga sebagaimana dilaporkan oleh Choi, 2003; Vega Estrada, 2005; Garcia dan Lopez, 2006; dan Kaewpintong, 2007.
- Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa reaktor jenis *bubble column* dan *airlift* (diameter hingga 0.19 m) dapat mencapai konsentrasi biomassa akhir dan laju spesifik pertumbuhan sel yang sebanding dengan hasil biomassa yang diperoleh melalui reaktor tubular yang berukuran kecil (Sanchez Miron, 2002).
- Keuntungannya:
 - Proses transfer massa yang terjadi sangat baik.
 - Proses pengadukan dengan shear stress yang rendah.
 - Sangat potensial untuk *scale-up*.
 - Mudah untuk mensterilkannya.
 - Mudah untuk dikonstruksikan.
 - Baik untuk immobilisasi alga.
 - Mereduksi efek fotoinhibisi.
- Kendala:
 - Cenderung memiliki luas permukaan pencahayaan yang kecil dibanding reaktor jenis lainnya.
 - Dalam konstruksinya cenderung diperlukan material/komponen yang canggih.
 - Saat *scale-up*, sangat mungkin terjadi *shear stress* pada alga.
 - Saat *scale-up*, luas permukaan pencahayaan menjadi semakin lebih kecil.



Gambar 2.4.4. (a) Sistem reaktor di *Institute for Applied Research* (Beer-Sheva, Israel); (b) Kolom anular di Departemen Bioteknologi Pertanian dari University of Florence (Italia) (Lee,2003)

2.5. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan *Chlorella* sp.

2.5.1. Kondisi Pencahayaan

Cahaya merupakan faktor utama yang mempunyai peranan penting untuk pertumbuhan mikroalga sebagai sumber energi untuk pertumbuhan mikroalga dan fotosintesis. Pencahayaan pada organisme yang memiliki kemampuan berfotosintesis merupakan hal yang terkait langsung dengan proses asimilasi CO₂ dengan energi cahaya matahari (*photon*) yang diserap oleh *chloroplast* yang dimiliki oleh organisme tersebut menjadi senyawa organik esensial pada proses pertumbuhan dan regenerasinya. Pengaruh pencahayaan pada kemampuan produksi biomassa berikut fiksasi CO₂ dari organisme fotosintesa bergantung pada kualitas cahaya (dalam hal ini besarnya intensitas cahaya serta berapa lama waktu pencahayaan hariannya) (Wirosaputro, 2002).

Fotosintesis adalah suatu proses biokimia yang dilakukan tumbuhan, alga, dan beberapa jenis bakteri untuk memproduksi zat-zat esensial dengan memanfaatkan energi cahaya. Hampir semua makhluk hidup bergantung dari energi yang dihasilkan dalam fotosintesis, sehingga fotosintesis menjadi sangat penting bagi kehidupan di bumi. Reaksi ini secara umum terbagi atas dua tahap, yaitu: reaksi terang (reaksi yang membutuhkan energi dari sinar matahari), reaksi yang menghasilkan sintesis ATP dan NADPH untuk senyawa organik pada fase gelap dan reaksi gelap merupakan reaksi biosintesis karbohidrat dari CO₂. Jadi

fungsi penting dari cahaya dalam fotosintesis adalah: (Mangunwidjaja dan Suryani,1994)

- Mengangkut elektron dari H₂O untuk mereduksi NADP⁺ menjadi NADPH.
- Menyediakan energi untuk membentuk ATP dari ADP.

Berikut ini dapat pula dipaparkan mekanisme reaksi yang terjadi di fase terang dan fase gelap sebagai berikut. Secara umum ada 3 reaksi utama yang terjadi pada reaksi terang: (Mangunwidjaja dan Suryani,1994)

- Oksidasi H₂O menurut persamaan:



- Reduksi NADP⁺, menurut persamaan:



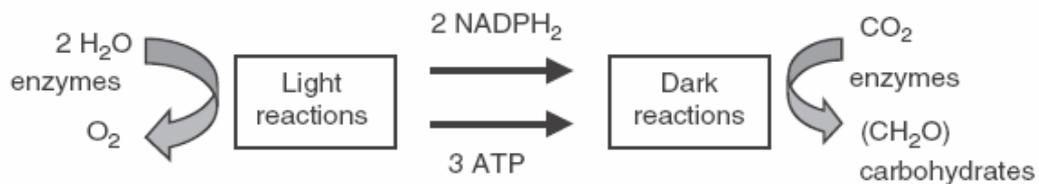
- Sintesis ATP, menurut persamaan:



Pada proses fotosintesis, banyaknya energi yang disediakan oleh energi cahaya disimpan sebagai energi bebas dalam bentuk NADPH, yang kemudian akan digunakan untuk mereduksi karbon. Tahap berikutnya adalah reaksi gelap yang merupakan serangkaian reaksi biokimia yang mereduksi karbon dan menyusun ulang ikatan menghasilkan karbohidrat dari molekul CO₂. Reaksi ini dikenal sebagai siklus Calvin. Mikroalga *Chlorella* sp menghilangkan CO₂ dari lingkungan dan mereduksinya menjadi karbohidrat melalui siklus Calvin ini. Reaksi yang terjadi secara umum dalam siklus Calvin adalah: (Mangunwidjaja, D. dan Suryani, A.,1994)

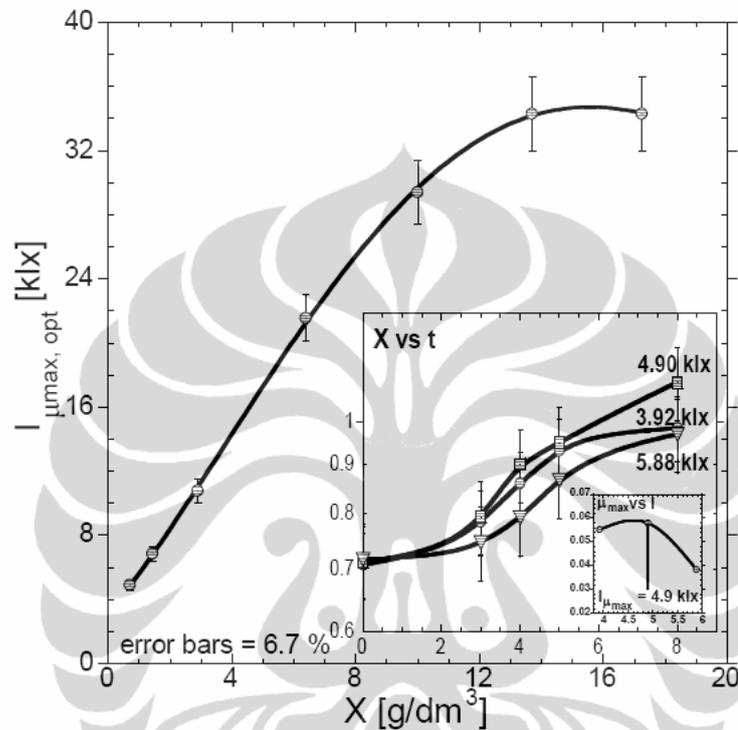


Atau dapat pula digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.5.1. Skema Reaksi Fotosintesis (Jir'i Masoji'dek dalam buku "Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology", 2004)

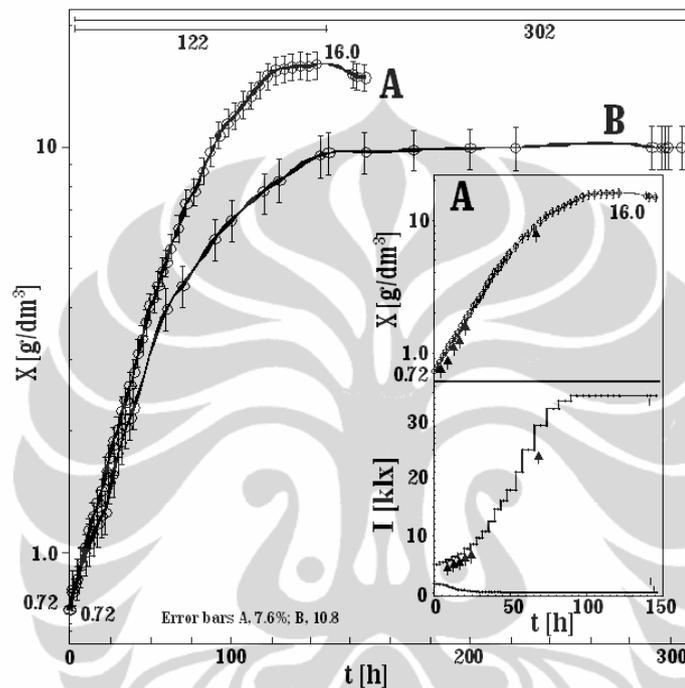
Beberapa penelitian terkait dengan pengaruh pencahayaan terhadap pertumbuhan mikroalga telah banyak dilaporkan. Berikut ini akan dilakukan pemaparan tentang pengaruh pencahayaan terhadap peningkatan pertumbuhan *Chlorella vulgaris*.



Gambar 2.5.2. Nilai $I_{\mu_{max, opt}}$ pada berbagai berat kering sel *Chlorella vulgaris* (X) (Wijanarko, 2006)

Gambar 2.5.2 di atas menunjukkan sebuah korelasi antara besarnya intensitas cahaya yang diperlukan oleh sejumlah sel *C. vulgaris* tertentu dalam suatu kultur agar dicapai laju pertumbuhan spesifik yang tinggi. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa peningkatan konsentrasi biomassa juga meningkatkan kebutuhan akan intensitas cahaya yang diperlukan untuk mencapai laju pertumbuhan spesifik alga yang maksimum (Wijanarko, 2006). Hal ini sejalan dengan yang dikemukakan oleh Hirata (1996) bahwa peningkatan intensitas cahaya yang diberikan pada kultur media akan menghasilkan laju pertumbuhan spesifik kultur yang optimum hingga mencapai nilai maksimumnya. Gambar 2.5.2 di atas menjadi basis dari pengaturan besarnya intensitas cahaya optimal yang diberikan untuk sejumlah sel *C. vulgaris* tertentu dalam suatu kultur media.

Berikut ini akan ditunjukkan hasil penelitian tentang pemberian intensitas cahaya yang disesuaikan dengan jumlah biomassa dalam media kultur. Dari gambar ini dapat dilihat bahwa dengan diatur besarnya intensitas cahaya yang diberikan pada sejumlah tertentu sel alga akan memberikan peningkatan hasil produksi biomassa yang lebih tinggi dibandingkan dengan pemberian intensitas cahaya yang tetap selama berlangsungnya kultivasi.



Gambar 2.5.3. Grafik Pengaruh kondisi Pencahayaan terhadap Produksi Biomassa; A, Pengaturan intensitas cahaya ; B, Pencahayaan dijaga tetap 5000 lx (Wijanarko, 2006)

Dari gambar ini dapat dilihat bahwa adanya pengaturan pencahayaan yang diberikan dengan penyesuaian besarnya jumlah sel alga dalam suatu kultur memberikan produksi biomassa 60 % lebih besar dibandingkan dengan pemberian intensitas cahaya yang dijaga konstan selama berlangsungnya kultivasi. Teknik pencahayaan ini dikenal sebagai Pencahayaan Alterasi (Wijanarko, 2006). Dari pemaparan hasil di atas dapat dibuktikan besarnya peranan cahaya dalam upaya peningkatan produktivitas biomassa. Pemberian intensitas cahaya yang sesuai akan menghasilkan produktivitas biomassa yang optimal.

Ada beberapa macam teknik pencahayaan. Ditinjau dari sumber pencahayaannya maka dapat terbagi atas pencahayaan alami dan pencahayaan artifisial (buatan). Pencahayaan alami dengan menggunakan sinar matahari

langsung sebagai sumber cahayanya, sementara pencahayaan buatan dengan menggunakan bantuan lampu. Ditinjau dari segi kontinuitas intensitas cahaya yang diberikan maka teknik pencahayaan terbagi atas: pencahayaan kontinu yang terbagi lagi atas: pencahayaan pada intensitas tetap dan pencahayaan alterasi, pencahayaan fotoperiodisitas/terang-gelap (*flip-flop*). Pencahayaan alterasi sudah banyak dibahas pada paragraf di atas. Pencahayaan ini sebagai salah satu upaya perbaikan untuk memenuhi kebutuhan intensitas cahaya yang optimal agar dapat dicapai laju pertumbuhan sel alga yang tinggi. Teknik pencahayaan lainnya adalah fotoperiodisitas. Teknik ini sesungguhnya mengakomodasi kondisi nyata di lapangan. Adanya kondisi cahaya di luar yang terang dan gelap juga membuat para peneliti ikut tergerak untuk mengetahui efeknya terhadap pertumbuhan sel alga dalam suatu media kultur. Berikut ini akan dibahas mengenai berbagai penelitian yang telah dilakukan terkait dengan beragam teknik pencahayaan dan jenis alga yang digunakan.

Terkait dengan rentang waktu pencahayaan harian, dibandingkan perolehan biomassa pada pencahayaan tetap, perlakuan terang-gelap pada budidaya *Synechococcus leopoliensis* menunjukkan perolehan biomassa pada pencahayaan 9 dan 12 jam per hari meningkat secara signifikan (Wijanarko, 1997, 1998). Pengubahan kondisi terang menjadi gelap maupun sebaliknya mengakibatkan terjadinya penurunan dan kenaikan secara drastis laju pertumbuhan *Synechococcus* WH 8101 (Armbrust, 1989). Pengubahan kondisi terang menjadi gelap juga menyebabkan penurunan laju pembentukan polyglucose pada mikro alga uniselular *Aphanocapsa* 6308 dan 6714 serta *Synechococcus* 6301 dan 6307 (Pelroy & Basham, 1972). Dalam suasana gelap, terjadi penurunan produksi karbohidrat selular *Chlorella pyrenoidosa* C-212 akibat tidak berlangsungnya proses fotosintesa. Secara keseluruhan perlakuan pencahayaan terang-gelap *flip-flop* 7 jam/hari yang dilakukan dengan pencahayaan terang berintensitas cahaya tetap 200 mmol/(m².detik), menunjukkan terjadinya penurunan perolehan biomassa cukup signifikan (Ogbonna & Tanaka, 1996; Post, 1985).

Perlakuan pencahayaan terang gelap alami pada beberapa cyanobacter seperti: *Anabaena flos aquae*, *Aphanizomenon flos aquae*, *Oscillatoria agardhii*

Gomont dan *Oscillatoria redekei* van Goor yang dilakukan secara *insitu* di Lough Neagh, Irlandia Utara dengan lama waktu pencahayaan harian berkisar antara 16 – 18 jam pada suhu 10 – 18°C menunjukkan laju pertumbuhan reratanya sedikit lebih rendah dibandingkan dengan hasil yang dilakukan secara laboratorium dengan intensitas cahaya tetap 1.6 klx pada suhu 10°C (Foy, 1976).

Pengaturan intensitas cahaya adalah perubahan perlakuan pencahayaan sinambung dengan memberikan intensitas cahaya yang semakin tinggi seiring dengan penambahan jumlah sel dari mikro alga. Dari pengamatan yang dilakukan pada *phytoplankton* *Skletonema costatum* dan *Dunaliella tertiolecta* menunjukkan pada medium kultur yang pekat karena kerapatan biomassa yang tinggi mengakibatkan *fluks cahaya* yang diberikan tidak lagi dapat diterima secara merata oleh semua sel, *hanya terbatas oleh sel yang berada di depan sumber cahaya saja* dan hal ini secara keseluruhan mengakibatkan secara lambat laun laju pertumbuhan reratanya menurun. Untuk mengantisipasi agar laju pertumbuhan rerata tetap tinggi upaya peningkatan intensitas cahaya dilakukan agar fluks cahaya dapat diterima oleh setiap sel dalam medium kultur dengan jumlah yang memadai (Falkowsky & Owens, 1980).

Perlakuan pengaturan intensitas cahaya pada pertumbuhan pada suhu 15°C dari *Anabaena cylindrica* berdasarkan korelasi antara intensitas cahaya optimum untuk fiksasi CO₂ dengan kandungan biomassa dalam medium kultur yang dianalisa secara periodik, menunjukkan terjadinya peningkatan perolehan biomassa yang sangat signifikan dibandingkan perolehan biomassa pada pencahayaan dengan intensitas cahaya tetap. Tingkat efisiensi pemanfaatan energi cahaya pada penyesuaian intensitas pada mikroba fotosintesa ini juga meningkat secara signifikan dibanding pencahayaan dengan intensitas cahaya tetap. Hal lain yang diperoleh dari hasil eksperimen adalah waktu yang dibutuhkan hingga pertumbuhan stasioner pada pengaturan intensitas cahaya pada mikroba fotosintesa ini hanya separuh dari waktu yang dibutuhkan pada budidaya pada pencahayaan dengan intensitas cahaya tetap (Wijanarko & Ohtaguchi, 2003).

Pengubahan intensitas cahaya yang dilakukan selama pertumbuhan dari *Spirulina platensis* pada suhu 30°C dari 25 W/m² menjadi 400 W/m² setelah

pertumbuhan berlangsung selama 338 jam menunjukkan terjadinya peningkatan laju produksi biomasa yang sangat signifikan (Hirata, 1998).

Dari semua paparan di atas dapat disimpulkan bahwa ada berbagai cara/teknik pencahayaan yang dapat diberikan pada suatu kultur alga. Pemberian besarnya cahaya dan pemilihan teknik pencahayaan yang akan digunakan oleh berbagai peneliti kebanyakan didasari oleh jenis atau sifat alga yang digunakan. Setiap jenis alga memiliki kekhasan tersendiri dalam menunjukkan kepekaannya terhadap sistem pencahayaan yang diberikan, yang ditunjukkan melalui kemampuan memproduksi biomasanya.

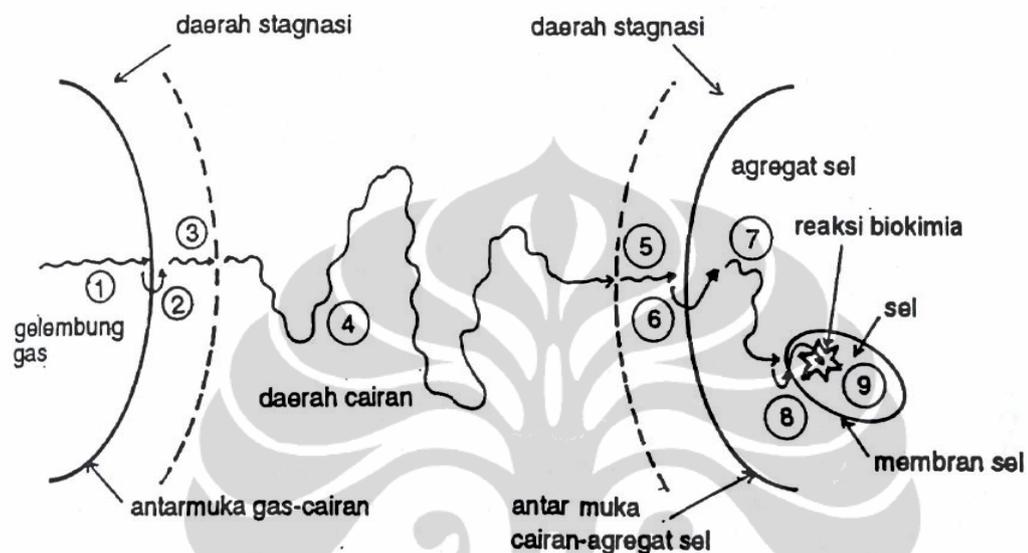
Dengan meninjau bahwa *Chlorella* adalah mikroorganisme fotosintesis yang mengubah energi cahaya menjadi senyawa karbon untuk pertumbuhannya, maka faktor cahaya menjadi sangat penting bagi pertumbuhan *Chlorella*. Semakin tinggi intensitas cahaya yang diberikan pada organisme fotosintesis maka laju pertumbuhan spesifik dan produksi biomasanya juga akan semakin tinggi sampai pada titik maksimumnya (Hirata, 1996). Konsep inilah yang mendasari penelitian terdahulu, yaitu produksi biomassa dan biofiksasi CO₂ mikroalga *Chlorella vulgaris* melalui pengaturan pencahayaan (alterasi).

2.5.2. Perpindahan Massa

Kinerja bioproduksi alga sangat tergantung pada metabolisme yang dilakukan oleh mikroalga. Proses kultivasi/produksi biomassa mikroalga memerlukan suplay CO₂ secara kontinu untuk menjaga keberlangsungan aktivitas fotosintetik dari mikroalga. Sementara itu lamanya waktu kultivasi atau besarnya volume reaktor yang diperlukan untuk mencapai produktivitas yang diinginkan sangat bergantung pada laju pertumbuhan mikroalga tersebut. Besarnya laju pertumbuhan ini sangat dipengaruhi oleh salah satu fenomena fisik yaitu perpindahan massa. Perpindahan massa akan menjadi sangat berarti manakala proses melibatkan beberapa fase.

Pada sistem heterogen yang terdiri dari beberapa fase seperti padatan dan cair, cair dan, dua cair yang tidak saling melarut, maka akan terjadi fenomena perpindahan massa antara satu fase dan fase antarmuka yang memisahkan kedua fase tersebut. Dalam kasus seperti ini perpindahan massa dari satu fase ke fase

lain terdiri atas dua perpindahan antarmuka secara seri. Mula-mula dari fase pertama menuju antarmuka. Kemudian dari antarmuka menuju fase kedua. Sebagai contoh gambaran perpindahan massa gas-cairan untuk proses kultivasi alga dapat dilihat pada gambar berikut ini.



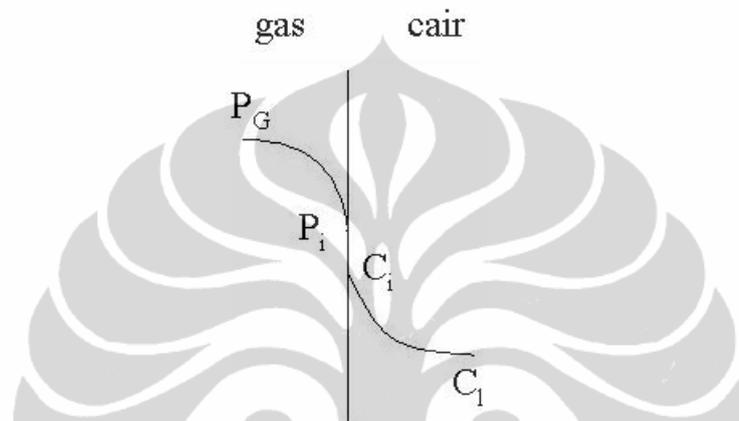
Gambar 2.5.4 Diagram tahapan perpindahan gas CO_2 dari gelembung udara menuju bagian dalam sel. (Bailey dan Ollis, 1986)

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa perpindahan satu komponen, seperti CO_2 dari fase gas ke media cair berlangsung melalui beberapa tahapan. Beberapa tahapan yang harus dilalui adalah:

1. Difusi dari gas ke antarmuka gas-cairan.
2. Pergerakan melalui antarmuka gas-cairan.
3. Difusi zat terlarut melalui daerah cairan yang tidak tercampur dengan gelembung ke dalam daerah cairan yang tercampur dengan baik.
4. Perpindahan zat terlarut melalui daerah cairan ke daerah cairan kedua yang tidak tercampur di sekeliling sel.
5. Perpindahan melalui daerah cairan kedua yang tidak tercampur yang berhubungan dengan sel alga.
6. Perpindahan secara difusi ke dalam dinding selular.
7. Perpindahan melewati dinding sel menuju sisi reaktif intraselular.

Berdasarkan teori dua film, perpindahan massa CO₂ tersebut dapat disederhanakan seperti yang disajikan pada gambar di bawah ini, melalui tiga tahapan yaitu:

- Perpindahan dari gas ke antarmuka gas-cairan.
- Perlewatan daerah antarmuka (*interface*) dan
- Perpindahan dari antarmuka gas-cairan dalam fase cairan.



Gambar 2.5.5. Skema perpindahan CO₂ dari fase gas ke fase cair

Selama budidaya *Chlorella* dilakukan, aerasi perlu diberikan agar terjadi pencampuran air, sehingga semua sel *Chlorella* bisa mendapatkan nutrisi yang diperlukan. Selain itu aerasi berguna untuk menghindari stratifikasi suhu air dan memberikan kesempatan terjadinya pertukaran gas, dimana udara adalah sebagai sumber gas CO₂ untuk keperluan fotosintesis *Chlorella*, sekaligus untuk mencegah naiknya pH air. Fitoplankton dapat mentolerir pH air 7–9 dan optimum pada pH 8,2 – 8,7.

Dari sisi kinetika, pelewatan pada area antarmuka umumnya terjadi sangat cepat karena perpindahan antar fase hanya dibatasi oleh dua perpindahan ke antarmuka. Oleh karena itu dapat diamati dua perubahan konsentrasi pada dua lapisan difusional secara terbatas pada daerah antarmuka. Konsentrasi cairan pada antarmuka adalah seimbang dengan konsentrasi gas pada antarmuka. Untuk menyatakan fluks antara dua fase dikenalkan suatu koefisien perpindahan global (k_L).

$$J = k_L (C^* - C_L) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan:

C_L = konsentrasi dalam fase cairan

C^* = konsentrasi cairan yang seimbang dengan konsentrasi gas.

Dalam penerapannya, perhitungan jumlah total massa yang dapat ditransfer melalui antar fase adalah sangat penting. Jumlah total ini tergantung pada nilai k_L dan luasan antarmuka yang terbentuk dalam sistem (a). Seperti halnya k_L dan a tergantung pada hidrodinamika sistem, dalam teori kedua parameter tersebut (k_L dan a) disatukan dan dinyatakan sebagai koefisien perpindahan satuan volume sistem (lebih sering dikenal sebagai koefisien perpindahan massa volumetrik, $k_L a$).

Jika absorpsi CO_2 tidak dipengaruhi oleh laju reaksi kimia yang terjadi pada lapisan batas antarmuka, maka nilai $k_L a$ O_2 dapat digunakan untuk menghitung besarnya nilai $K_L a$ CO_2 . Dalam sistem eksperimental yang dilaporkan oleh Grima dkk (1993), laju transfer massa global O_2 dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L^A a (C^* - C_L) + G \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana C_L dan C^* masing-masing adalah konsentrasi O_2 yang terlarut dan konsentrasi O_2 jenuh (setimbang) dalam fase cair. Sedangkan untuk fase gas yang didesorpsi adalah gas N_2 , dengan nilai $C^* = 0$, sehingga persamaan menjadi:

$$\frac{dC_L}{dt} = -k_L^D a (C_L) + G \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Ketika $t \geq t_i$, konsentrasi O_2 berada pada kondisi yang tetap ($C_L = C_{Lf}$), dimana C_{Lf} adalah konsentrasi akhir O_2 dalam fase cair untuk proses desorpsi. Dengan demikian persamaan dapat ditulis sebagai:

$$\frac{dC_L}{dt} = 0 \rightarrow G = k_L^D a \cdot C_{Lf} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

Substitusi persamaan (2) ke persamaan (3) menghasilkan:

$$\frac{dC_L}{dt} = -k_L^D a \cdot (C_L - C_{Lf}) \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

Hasil integrasi dari persamaan (4) di atas dengan kondisi batas $C_L = C_{L0}$ pada $t=0$ dan $C_L = C_L$ pada $t = t$, adalah:

$$\ln \left[\frac{C_l - C_{lf}}{C_{lo} - C_{lf}} \right] = -k_L^D a t \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

Bila didefinisikan:

$$E^D = \frac{C_{lo} - C_l}{C_{lo} - C_{lf}} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Maka persamaan (5) dapat diubah menjadi:

$$\ln \left(\frac{1}{1 - E^D} \right) = k_L^D a t \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan melakukan percobaan dan dari data-data yang dilakukan plotting nilai $\ln \left(\frac{1}{1 - E^D} \right)$ terhadap t akan diperoleh nilai $k_L^D a$. Pada akhirnya, dengan mengintegrasikan persamaan (1) di atas dan kondisi batasnya adalah $C_1 = C_{lo}$ pada $t = 0$ dan $C_1 = C_1$ pada $t = t$ diperoleh hasil:

$$-\frac{1}{k_L^A a} \ln \left[\frac{k_L^A a (C^* - C_1) + G}{k_L^A a (C^* - C_{lo}) + G} \right] = t \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan mendefinisikan:

$$E^A = \frac{C_l - C_{lf}}{C^* - C_{lf}} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

maka persamaan (8) dapat ditulis sebagai:

$$\ln \left(\frac{1}{1 - E^A} \right) = k_L^A a t \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

Plotting $\ln \left(\frac{1}{1 - E^A} \right)$ terhadap t akan diperoleh nilai $k_L^A a$. Nilai $k_L^A a$ ini adalah nilai $k_L a(O_2)$. Untuk nilai $k_L a(CO_2)$ dapat diperoleh melalui persamaan:

$$k_L a(CO_2) = \left(\frac{D_{CO_2}}{D_{O_2}} \right)^{0.5} k_L a(O_2) = 0.91 k_L a(O_2). \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

Untuk proses kultivasi alga ini diperlukan nilai $k_L a(CO_2)$ yang optimal. Nilai $k_L a$ yang tinggi menunjukkan proses transfer massa CO_2 yang lebih baik dalam kultur

mikroalga. Tidak selamanya nilai K_{La} (CO_2) yang besar baik untuk pertumbuhan kultur alga. Nilai K_{La} (CO_2) yang terlalu besar sangat mungkin menyebabkan terjadinya *shear stress* pada alga. Fenomena ini dapat menghambat pertumbuhan alga, sehingga harus dihindari.

Nilai K_{La} (CO_2) merupakan parameter umum yang sering digunakan untuk menilai kinerja bioreaktor dalam proses kultivasi alga. Koefisien ini secara umum menggambarkan kondisi transfer massa yang terjadi di dalam reaktor. Koefisien ini dipengaruhi oleh: laju pengadukan, tipe distributor gas/sparger dan temperatur.

Beberapa aspek lain dari perpindahan massa yang perlu diperhatikan dalam fotobioreaktor untuk kultivasi alga adalah: laju alir gelembung gas dan gas *hold up*.

A. Laju alir gelembung gas

- Laju alir gas dan ukuran gelembung gas sangat tergantung pada kondisi laju alir liquidnya.
- Dengan semakin meningkatnya laju alir gas, ukuran diameter gelembung gas juga semakin meningkat dan kecepatan alir dari gelembung gas otomatis meningkat.
- Laju sirkulasi gas dapat terganggu manakala di dalam reaktor digunakan alat pengaduk yang berfungsi untuk meningkatkan dispersi gas. Namun pengadukan ini dapat membantu untuk memecah ukuran gelembung yang besar menjadi ukuran yang lebih kecil sehingga dapat meningkatkan laju transfer massa yang terjadi.
- Laju alir air merupakan ukuran/parameter yang menggambarkan pola aliran dalam suatu cairan dan menunjukkan tingkat turbulensi dalam reaktor.
- Faktor turbulensi dalam suatu aliran diperlukan untuk memastikan bahwa sel-sel secara berkala dapat terkena cahaya dengan baik. (Carlozzi, 2003; Pruvost, 2006)

B. Gas *holdup*

- Gas *holdup* didefinisikan sebagai fraksi dari volume reaktor yang ditempati oleh fase gas.

- Konstanta ini memegang peranan penting dalam perancangan fotobioreaktor.
- Gas *holdup* menentukan laju sirkulasi dan waktu tinggal gas.

2.6. Perhitungan Dasar dalam Laju Pertumbuhan dan Fiksasi CO₂ Mikroalga

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

2.6.1. Perhitungan Laju pertumbuhan spesifik (μ , μ_{\max})

Proses pembelahan sel alga terjadi pada fase eksponensial (fase pertumbuhan). Laju pertumbuhan jumlah sel sebanding dengan jumlah selnya. Peningkatan jumlah sel setelah m kali pembelahan mengikuti pola $2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^m$.

Pertumbuhan sel pada fase eksponensial dalam reaktor *batch* dapat ditulis sebagai: (Shuler & Kargi, 2002)

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

dimana μ = laju pertumbuhan spesifik sel.

Persamaan tersebut dapat diintegrasikan mulai dari akhir waktu fase lag ($X = X_0, t = t_{lag}$) hingga waktu tertentu pada fase eksponensial menjadi:

$$X = X_0 e^{\mu(t-t_{lag})} \quad \text{atau} \quad \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) = \mu(t-t_{lag}) \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

Laju pertumbuhan spesifik (μ) adalah laju pertumbuhan sel pada selang pertumbuhan sedangkan μ_{\max} adalah laju pertumbuhan sel pada awal fase logaritmik selang pertumbuhan dan nilainya berbanding terbalik dengan waktu yang diperlukan untuk sekali pembelahan sel. Dengan demikian berdasarkan persamaan (2.3) laju pertumbuhan sel dapat ditulis sebagai:

$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} \quad \text{atau} \quad \mu = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

dimana:

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

- N = jumlah sel (sel/cm^3)
 X = berat kering sel/biomassa (g/dm^3)
 t = waktu (jam)

Sementara itu model persamaan sederhana yang menggambarkan hubungan antara pertumbuhan sel alga dan proses penyerapan substrat di dalam fotobioreaktor kolom gelembung adalah Persamaan Monod. Persamaan ini diturunkan dari persamaan reaksi berikut:



- Dimana: X = sel alga (berat kering sel per volume)
 $[S]$ = konsentrasi substrat
 $[XS]$ = kompleks sel-substrat
 X' = sel alga baru yang terbentuk (hasil duplikasi)

Dari persamaan reaksi di atas dapat diturunkan persamaan laju reaksi sebagai berikut:

$$\frac{d[XS]}{dt} = k_1[X][S] - k_{-1}[XS] - k_2[XS] \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

$$\frac{d[X']}{dt} = k_2[XS] \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\frac{d[S]}{dt} = -k_1[X][S] + k_{-1}[XS] \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

$$[X_T] = [X] + [XS] \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

Bentuk persamaan Monod ini mengikuti persamaan kinetika enzim Michaelis-Menten. Dalam hal ini laju reaksi antara sel dan substrat membentuk kompleks sangat cepat dibandingkan dengan penguraian kompleks menjadi dua buah sel yang baru.

$$K_s = \frac{k_{-1}}{k_1} = \frac{[X][S]}{[XS]} \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

Persamaan (2.24) disusun ulang menjadi:

$$[XS] = [X_T] - [X] \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

Kombinasi persamaan (2.25) dan (2.26) menghasilkan:

$$[XS] = [X_T] - \frac{[XS]}{[S]} \cdot \frac{k_{-1}}{k_1} \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

$$[XS] \left(1 + \frac{k_{-1}}{k_1} \cdot \frac{1}{[S]} \right) = [X_T] \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

$$[XS] = \frac{[X_T][S]}{\left(\frac{k_{-1}}{k_1} \right) + [S]} = \frac{[X_T][S]}{K_s + [S]} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

$$\frac{dX'}{dt} = \frac{k_2[X_T][S]}{K_s + [S]}, \text{ bila } \mu_{\max} = k_2[X_T]$$

maka;

$$\frac{dX'}{dt} = \frac{\mu_{\max}[S]}{K_m + [S]} \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

Jika dihubungkan dengan persamaan laju pertumbuhan spesifik sel di atas maka dapat ditulis:

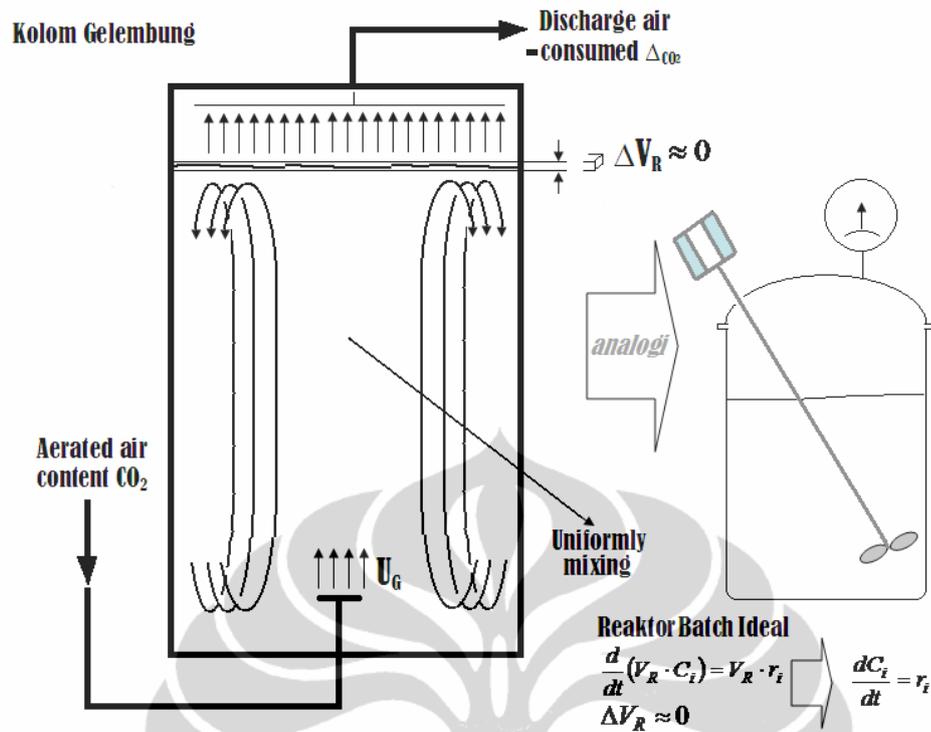
$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} = \frac{\mu_{\max}[S]}{K_s + [S]} \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

di mana μ adalah laju pertumbuhan spesifik, μ_{\max} adalah nilai maksimum dari μ , K_s adalah konstanta *Michaelis-Menten* yang nilainya sama dengan nilai

konsentrasi substrat yang esensial pada saat besar laju pertumbuhan spesifiknya adalah setengah dari laju pertumbuhan spesifik maksimumnya ($\mu = 0,5 \cdot \mu_{max}$), dan $[S]$ adalah konsentrasi substrat yang esensial.

Pada penggunaan kolom gelembung bioreaktor tembus cahaya besarnya fiksasi CO_2 oleh mikro alga, perubahan kerapatan konsentersasi substrat atau produk maupun kerapatan populasi sel yang terkait dengan laju pertumbuhan populasi sel dipengaruhi oleh faktor kondisi operasi maupun kerapatan senyawaan esensiil dalam medium kultur. Hubungan antara perubahan kerapatan konsentersasi substrat atau produk maupun kerapatan populasi sel dengan kerapatan substrat dalam kolom gelembung yang dilakukan mengikuti persamaan kinetika reaksi mikrobial yang diturunkan pada kondisi reaksi *batch* (Gambar 2.6.1) dengan beberapa alasan sebagai berikut:

1. Secara visual penggunaan laju alir superfisial gas sebesar 2.4 m/jam yang digunakan berada dalam selang laju alir yang menunjukkan terjadinya pencampuran ideal ($1.2 < U_G < 12$ m/jam).
2. Secara visual penggunaan laju alir superfisial gas sebesar 2.4 m/jam tidak menyebabkan terjadinya perubahan volume reaktor yang signifikan (< 12 m/jam).
3. Fase cairan dalam keadaan diam $U_L = 0$ sehingga bilangan Peclet fase cair Pe_L adalah 0.



Gambar 2.6.1. Ilustrasi Kinetika Kolom Gelembung

Berdasarkan alasan tersebut diatas, perubahan kerapatan konsentrasi substrat atau produk maupun kerapatan populasi sel yang terkait dengan laju pertumbuhan populasi sel yang terkait dengan reaksi biokimia di dalam kolom gelembung mengikuti pendekatan kinetika reaksi dalam reaktor *batch* ideal. Pada kolom gelembung, selain adanya aliran masuk gas, tidak ada lagi yang ditambahkan ke medium kultur atau dikeluarkan sebagai produk pertumbuhan setelah dilakukan proses penambahan medium sel pertumbuhan dan inokulum sel kedalamnya, sehingga persamaan *material balance* yang terjadi sesuai pendekatan kinetika reaksi dalam reaktor *batch* ideal menjadi:

Laju alir masuk – Laju alir keluar – Laju kehilangan reaktan = Laju akumulasi
 Reaktan reaktan karena reaksi reaktan

$$\text{Laju alir masukan} = 0$$

$$\text{Laju alir keluar} = 0$$

$$\text{Laju akumulasi Reaktan} = - \text{Laju kehilangan reaktan karena reaksi} \quad (2.32)$$

$$\frac{d}{dt}(V_R \cdot C_i) = -V_R \cdot r_i \quad (2.33)$$

Tidak ada perubahan volume medium kultur dalam kolom gelembung selama proses pertumbuhan berlangsung, V_R konstan; $dV_R/dt = 0$, sehingga perubahan kerapatan sel atau konsentrasi substrat atau produk dalam kolom gelembung sebagai fungsi kerapatan substrat dapat diturunkan menjadi:

$$-\frac{dC_i}{dt} = r_i \quad (2.34)$$

Dalam hal ini, perubahan kerapatan sel atau konsentrasi substrat atau produk dalam kolom gelembung semata-mata dapat dikatakan setara dengan laju reaksi kehilangan substrat atau laju pembentukan produk maupun laju reaksi pertumbuhan populasi sel dalam media kultur kolom gelembung.

$$-\frac{dC_i}{dt} = r_i \approx -\frac{dS}{dt} = \frac{dP}{dt} = X \cdot \mu \quad (2.35)$$

Pada kondisi operasi diusahakan tetap, laju reaksi pertumbuhan sel dalam media kultur yang ekuivalen dengan laju perubahan kerapatan sel atau konsentrasi substrat atau produk secara kinetika merupakan fungsi dari kerapatan substrat (HCO_3^- , Mg^{2+} , NO_3^- , PO_4^{3-}).

$$-\frac{dC_i}{dt} = r_i \approx X \cdot \mu = f(S) \quad (2.36)$$

Disini fungsi kerapatan substrat bisa merupakan fungsi persamaan reaksi elementer (orde bilangan bulat) maupun reaksi non elementer (persamaan reaksi empiris seperti Monod [Michaelis Menten], Contois, Jenks Carioullo, Brigg-Haldane, Aiba, multi transition reaction, Andrews [Haldane], Ierusalimsky, Webb, Yano)

$$\text{Orde-n} \quad \mu = k \cdot S^n \quad (2.37)$$

$$\text{Monod (Michaelis Menten)} \quad \mu = \frac{\mu_{\max}}{1 + \frac{K_a}{S}} \quad (2.38)$$

$$\text{Andrews (Haldane)} \quad \mu = \frac{\mu_{\max}}{1 + \frac{K_a}{S} + \frac{S}{K_i}} \quad (2.39)$$

$$\text{Ierusalimsky} \quad \mu = \frac{\mu_{\max}}{1 + \frac{K_a}{S}} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{S}{K_i}} \right] \quad (2.40)$$

Dalam hal proses fiksasi CO₂ menggunakan mikro alga fotosintesa untuk memproduksi biomassa, spesi HCO₃⁻ adalah substrat (S) yang dominan diadsorpsi oleh sel dan dikonversi membentuk berbagai macam triosa, dan bentuk sakarida lainnya maupun metabolit sel seperti asam amino, asam lemak, protein, glukoprotein, lipidprotein dan lainnya. Spesi HCO₃⁻ merupakan salah satu bentuk CO₂ terlarut dalam medium kultur yang mudah melintasi membran osmotik sel dengan mekanisme *ATP driven pump* dan *fosfat translocator* menuju *chloroplast* di permukaan sel dan vakuola dalam sitoplasma sel.

2.6.2. Prediksi Model Laju Pertumbuhan Spesifik *Chlorella* terhadap Jumlah [HCO₃⁻] dalam medium.

Model pendekatan pertumbuhan *Chlorella* dibuat sebagai upaya untuk melihat prediksi sederhana secara empiris korelasi antara pertumbuhan *Chlorella* dengan ketersediaan substratnya dalam medium. Model persamaan yang dipergunakan ada 5 jenis (Schugerl & Belgardt, 2000), yaitu:

2.6.2.1. Persamaan Monod

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{[HCO_3^-]}{K_s + [HCO_3^-]} \quad (2.41)$$

Model persamaan ini menggambarkan laju pertumbuhan sel yang dipengaruhi hanya oleh konsumsi substrat sebagai laju pembatas.

2.6.2.2. Persamaan Mason-Millis

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{[HCO_3^-]}{K_s + [HCO_3^-]} + (K_1 \cdot [HCO_3^-]) \quad (2.42)$$

Model persamaan ini menggambarkan laju pertumbuhan sel yang dipengaruhi hanya oleh proses transport dan difusi substratnya.

2.6.2.3. Persamaan Haldane

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{[HCO_3^-]}{(K_S + [HCO_3^-] + \frac{[HCO_3^-]^2}{K_I})} \quad (2.43)$$

Model persamaan ini menggambarkan laju pertumbuhan sel yang dipengaruhi oleh adanya penghambatan substrat secara kompetitif.

2.6.2.4. Persamaan Ierusalimsky

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{[HCO_3^-]}{(K_S + [HCO_3^-]) \cdot \left(1 + \frac{[HCO_3^-]}{K_I}\right)} \quad (2.44)$$

Model persamaan ini menggambarkan laju pertumbuhan sel yang dipengaruhi oleh adanya penghambatan substrat secara tidak kompetitif (*un competitive*).

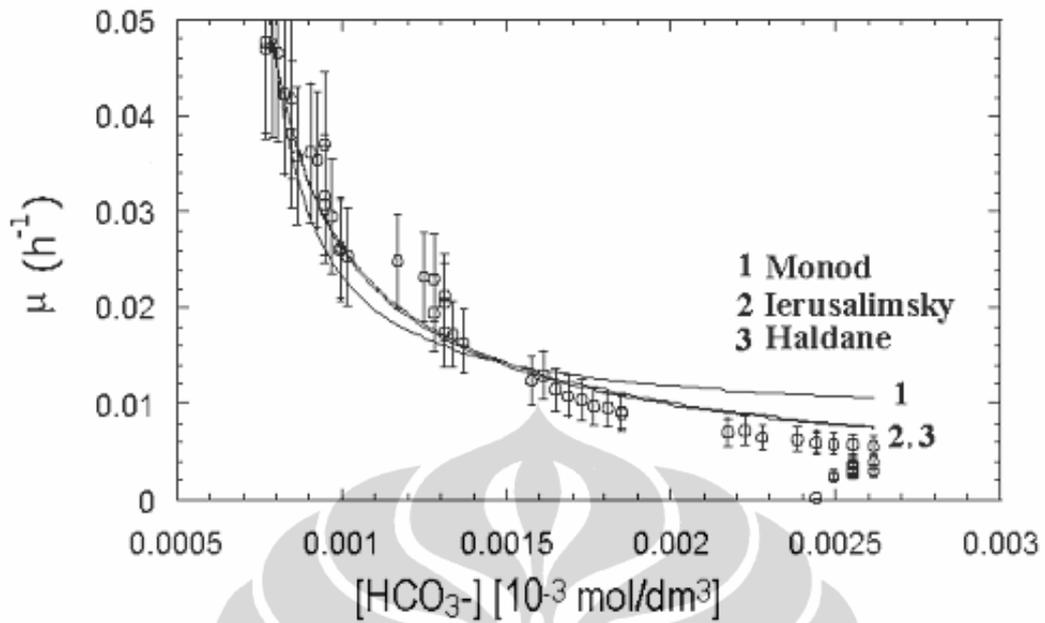
2.6.2.5. Persamaan Webb

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{[HCO_3^-] \cdot \left(1 + \frac{[HCO_3^-]}{K_{II}}\right)}{K_S + \left([HCO_3^-] \cdot \left(1 + \frac{[HCO_3^-]}{K_I}\right)\right)} \quad (2.45)$$

Model Persamaan ini merupakan pengembangan dari persamaan Ierusalimsky dan Haldane.

Dasar pemilihan terhadap persamaan-persamaan tersebut adalah berdasarkan prediksi terhadap kecenderungan kurva dari hasil penelitian yang diperoleh serta kebutuhan untuk melihat apakah faktor inhibisi substrat memiliki peranan penting dalam laju pertumbuhan sel.

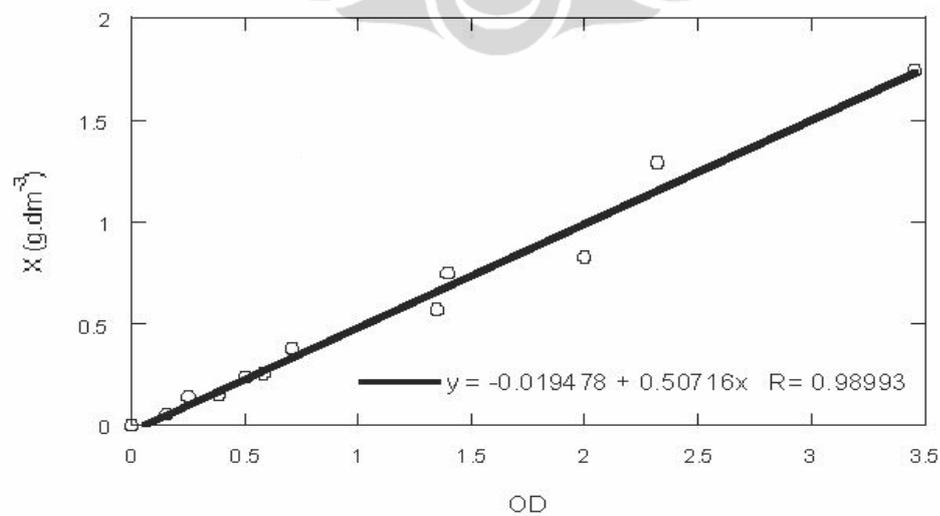
Korelasi laju pertumbuhan terhadap jumlah ketersediaan sumber karbon dalam media pertumbuhan pada budidaya *Chlorella vulgaris* dengan perlakuan pengaturan intensitas cahaya ternyata mengikuti korelasi **Haldane**. (Wijanarko, 2004). Hasil prediksi tersebut dapat dilihat pada garfik berikut ini.



Gambar 2.6.2. Grafik Pendekatan Model Kinetik Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada Pencahayaan kontinu (Wijanarko, 2004)

2.6.3. Perhitungan Berat Kering Sel (X)

Jumlah biomassa yang dihasilkan dari medium kultur mikroalga dapat dihitung secara langsung dengan mengkorelasikan hasil pengukuran *optical density* pada 600 nm (OD_{600}) dari medium kultur mikroalga dengan menggunakan kurva kalibrasi OD_{600} versus berat kering yang telah dibuat di awal penelitian.



Gambar 2.6.3. Kurva Kalibrasi X vs OD_{600}

2.6.4. Perhitungan $[HCO_3^-]$ di dalam Medium Kultur Mikroalga (Badger dan Andrewes, 1982; Wijanarko dan Ohtaguchi, 2004)

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

$$K_{CO_2} = \frac{[HCO_3^-] \cdot [H^+]}{[CO_2]} \quad \dots\dots\dots (2.46)$$

$$[HCO_3^-] = K_{CO_2} [CO_2] [H^+] \quad \dots\dots\dots (2.47)$$

$$[HCO_3^-] = K_{CO_2} [CO_2] 10^{-pH} \quad \dots\dots\dots (2.48)$$

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

$$P_{CO_2} = H_{CO_2} \cdot [CO_2] \quad \dots\dots\dots (2.49)$$

$$P_{CO_2} = Y_{CO_2} \cdot P_T \quad \dots\dots\dots (2.50)$$

$$\ln\left(\frac{H_{CO_2}}{H_{CO_2}}\right) = A_H \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + B_H \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + C_H \left(\frac{T}{T_0} - 1\right) \quad \dots\dots\dots (2.51)$$

$$\ln\left(\frac{H_{CO_2}}{H_{CO_2}}\right) = A_K \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + B_K \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + C_K \left(\frac{T}{T_0} - 1\right) \quad \dots\dots\dots (2.52)$$

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

$$[HCO_3^-] = \left(\frac{K_{CO_2}}{H_{CO_2}}\right) \left(\frac{Y_{CO_2} \cdot P_T}{10^{-pH}}\right) \left(\frac{\text{EXP}\left[A_k \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + B_k \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + C_k \left(\frac{T}{T_0} - 1\right)\right]}{\text{EXP}\left[A_h \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + B_h \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + C_h \left(\frac{T}{T_0} - 1\right)\right]}\right) \dots (2.53)$$

dengan :

P_T = temperatur operasi (atm)

Y_{CO_2} = konsentrasi gas CO_2 yang diumpankan.

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

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

T = temperatur operasi (K)

To = temperatur standar (K)

Konstanta-konstanta aktivitas gas CO₂ :

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

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

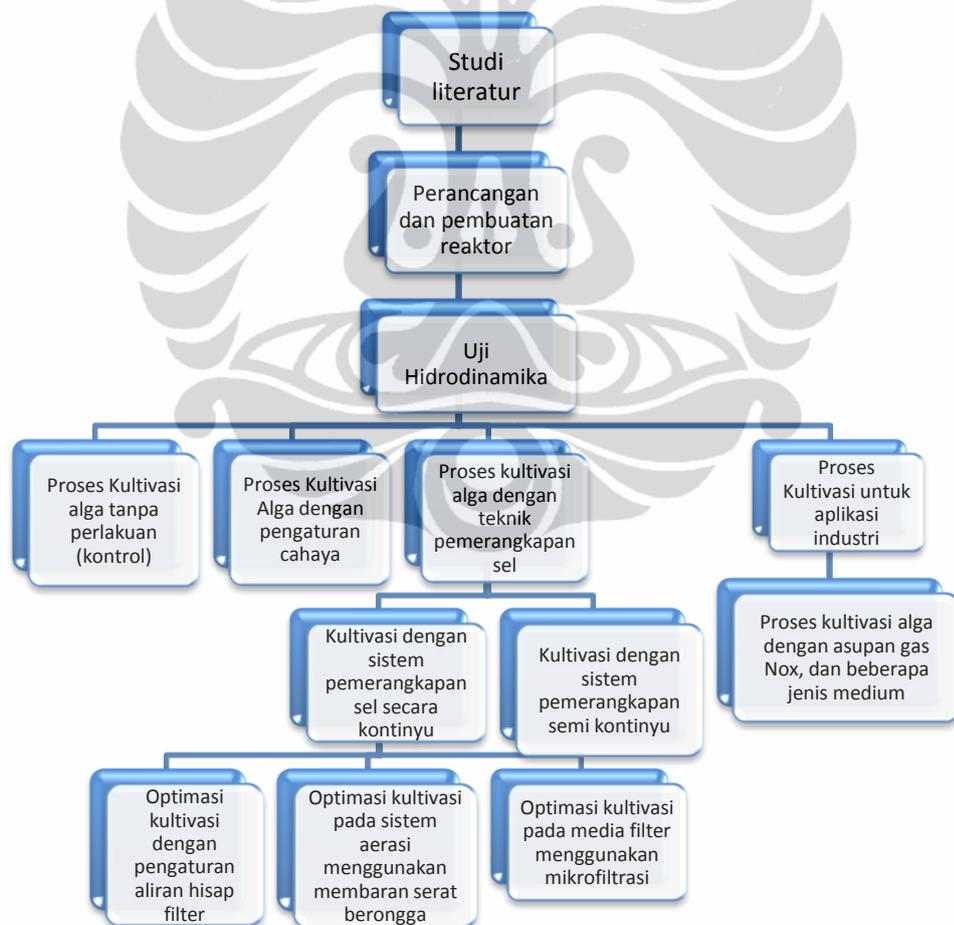


BAB III METODE PENELITIAN

Kegiatan penelitian ini dilakukan di Laboratorium Rekayasa Bioproses, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

3.1. Lingkup Penelitian

Kegiatan penelitian memiliki tema riset “Pengembangan Teknik filtrasi Secara Kontinu Dalam Media Kultur untuk Mempertahankan Kondisi Laju Pertumbuhan Maksimum *Chlorella vulgaris* dalam Fotobioreaktor”. Kegiatan yang dilakukan dalam penelitian ini didisain seperti tergambar pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1.1. Skema Lingkup Penelitian

Penelitian yang dilakukan ini diawali dengan kegiatan perancangan reaktor dan uji hidrodinamikanya. Perancangan reaktor didasari pada pertimbangan: luas

permukaan pencahayaan yang besar, laju transfer massa yang baik dalam kultur media, yield biomassa yang dihasilkan tinggi, mudah dalam mengoperasikan dan mensterilkan reaktor serta mudah untuk dilakukan *scale-up*. Volume reaktor yang digunakan berukuran 24 L dengan medium kultur didalamnya sebanyak 18 L. Sementara itu proses kultivasi/produksi biomassa mikroalga memerlukan suplay CO₂ secara kontinu untuk menjaga keberlangsungan aktivitas fotosintetiknya. Lamanya waktu kultivasi atau besarnya volume reaktor yang diperlukan untuk mencapai produktivitas yang diinginkan sangat bergantung pada laju pertumbuhan mikroalga tersebut. Besarnya laju pertumbuhan ini sangat dipengaruhi oleh salah satu fenomena fisik yaitu perpindahan massa. Nilai K_{La} (CO₂) merupakan parameter hidrodinamika umum yang sering digunakan untuk menilai kinerja bioreaktor dalam proses kultivasi alga. Koefisien ini secara umum menggambarkan kondisi transfer massa yang terjadi di dalam reaktor. Untuk dapat lebih mengoptimalkan pertumbuhan alga *Chlorella* sp. dan kemampuan biofiksasinya dalam kultur diperlukan adanya upaya peningkatan nilai K_{La} (CO₂)nya. Oleh sebab itu, dalam penelitian ini akan ditentukan berapa kecepatan superfisial gas yang optimal untuk dialirkan ke dalam kultur media, agar memberikan hasil nilai K_{La} (CO₂) yang optimum dan *yield* biomassa yang tinggi.

Tahap selanjutnya, penelitian diarahkan pada proses kultivasi mikroalga *Chlorella vulgaris* pada fotobioreaktor dengan berbagai jenis perlakuan. Sebagai kontrol atau pembanding adalah proses kultivasi pada pencahayaan intensitas tetap dan tanpa perlakuan filtrasi (filtrasi). Berbagai jenis perlakuan yang dilakukan adalah kultivasi pada pencahayaan alterasi, kultivasi dengan perlakuan filtrasi yang meliputi optimasi pada: proses filtrasi, sistem aerasi, media filter dan sistem filtrasinya, serta kultivasi pada berbagai jenis medium kultur yang divariasikan. Kultivasi pada pencahayaan alterasi tetap dilakukan agar dapat dijadikan pembanding bagi kultivasi yang pernah dilakukan sebelumnya pada skala reaktor yang lebih kecil (600 mL) dan juga bagi kultivasi *Chlorella* dengan sistem perlakuan filtrasi. Pada penelitian sebelumnya, kultivasi dengan pengaturan pencahayaan/alterasi (Wijanarko, 2006) telah mampu meningkatkan produksi biomassa hingga 60 % pada volume reaktor yang lebih kecil. Pada ukuran reaktor yang lebih besar, akan dilihat apakah masih dimungkinkan untuk memperoleh

peningkatan produksi biomassa yang sama. Sementara itu kultivasi dengan pencahayaan alterasi ini juga akan dibandingkan dengan proses kultivasi menggunakan proses filtrasi. Upaya filtrasi dimaksudkan untuk memerangkap sebagian biomassa dalam kultur sehingga efek *self shading* dapat teratasi. Hal ini berarti intensitas cahaya yang diberikan dapat mencukupi kebutuhan sel selama kultivasi. Oleh karena itu tidak lagi diperlukan peningkatan intensitas cahaya untuk dapat meningkatkan produksi biomassa, sebagaimana yang dilakukan pada proses kultivasi dengan alterasi. Dengan kata lain perbandingan kedua proses kultivasi tersebut ini dimaksudkan untuk dilihat seberapa efektifkah proses kultivasi dengan filtrasi ini dibandingkan dengan perlakuan alterasi. Sementara itu, proses kultivasi *Chlorella vulgaris* dengan jenis medium yang divariasikan adalah dimaksudkan untuk keperluan aplikasi industri. Berbagai variasi yang dilakukan adalah kultivasi dengan asupan gas NO_x dan jenis medium kultur (Benneck, Walne dan BG-11).

3.2. Rancangan Kegiatan Penelitian

Secara umum rancangan kegiatan eksperimen penelitian dilakukan secara keseluruhan dapat dipaparkan dalam Tabel 3.1. Dalam tabel tersebut dipaparkan jenis perlakuan kultivasi yang dilakukan beserta aspek proses yang diamati/dikaji (produksi biomassa dan Fiksasi CO_2).

Tabel 3.2.1. Rancangan kegiatan penelitian

Perlakuan	Produksi Biomassa	Fiksasi CO_2
A. Pembuatan kurva Korelasi OD vs X	X	
B. Korelasi $I_{\mu_{\max, \text{opt}}} - X$	X	
C. Proses Kultivasi dengan alterasi	X	x
D. Proses kultivasi dengan I tetap (kontrol)	X	x
E. Proses kultivasi dengan filtrasi (4 jenis proses)	X	x
F. Proses kultivasi dengan berbagai medium	X	x

3.3. Metode Pelaksanaan

Kegiatan riset yang dilakukan terkait dengan peningkatan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* melalui metode filtrasi secara kontinu dalam skala pilot dan pengujian kandungan esensial menggunakan kondisi operasi, bahan baku, prosedur penelitian dan metode analisis sebagai berikut:

3.3.1. Kondisi Operasi :

1. Suhu ruang (29°C) dan tekanan 1 atm.
2. Kecepatan superfisial gas U_G yang disesuaikan berdasarkan hasil uji hidrodinamik.
3. Udara mengandung 5 % CO_2
4. Penyesuaian flux cahaya (pencahayaan samping 74,4 mmol/(m².detik) simultan hingga 542 mmol/(m².detik) merujuk pada peningkatan kerapatan biomassa selama rentang kultivasinya.
5. Variasi kecepatan hisap sistem filter, lamanya waktu hisap dan jenis medium yang digunakan.

3.3.2. Material :

1. Strain domestik *C. vulgaris* (Dinas Perikanan Darat Kota Depok, Indonesia)
2. 20 liter media dalam kolom gelembung tembus cahaya untuk riset yang dilakukan terkait dengan riset produksi biomassa untuk suplemen asupan pangan skala pilot dan 200 – 600 mL dalam kolom gelembung tembus cahaya untuk riset pengayaan kandungan triglesrida/ lemak dalam produk biomassa.
3. Sumber cahaya sinar tampak berupa lampu Philip Halogen 20 W /12 V / 50 Hz (dengan Transformator 220 V Primer /12 V Sekunder) yang memiliki intensitas cahaya antara 10 s/d 50 Klx untuk tahap *main culture* dan sumber cahaya lampu TL yang memiliki intensitas cahaya rendah (3,0 s/d 9 Klx) yang digunakan pada tahap *preculture* mikro alga.
4. Pengatur laju aerasi udara/alat ukur volumetrik *Kofloc* (gas flow meter) berikut filter udara untuk aliran udara ke venturi *filtration sistem*, gas CO_2 , gas buang dan udara.

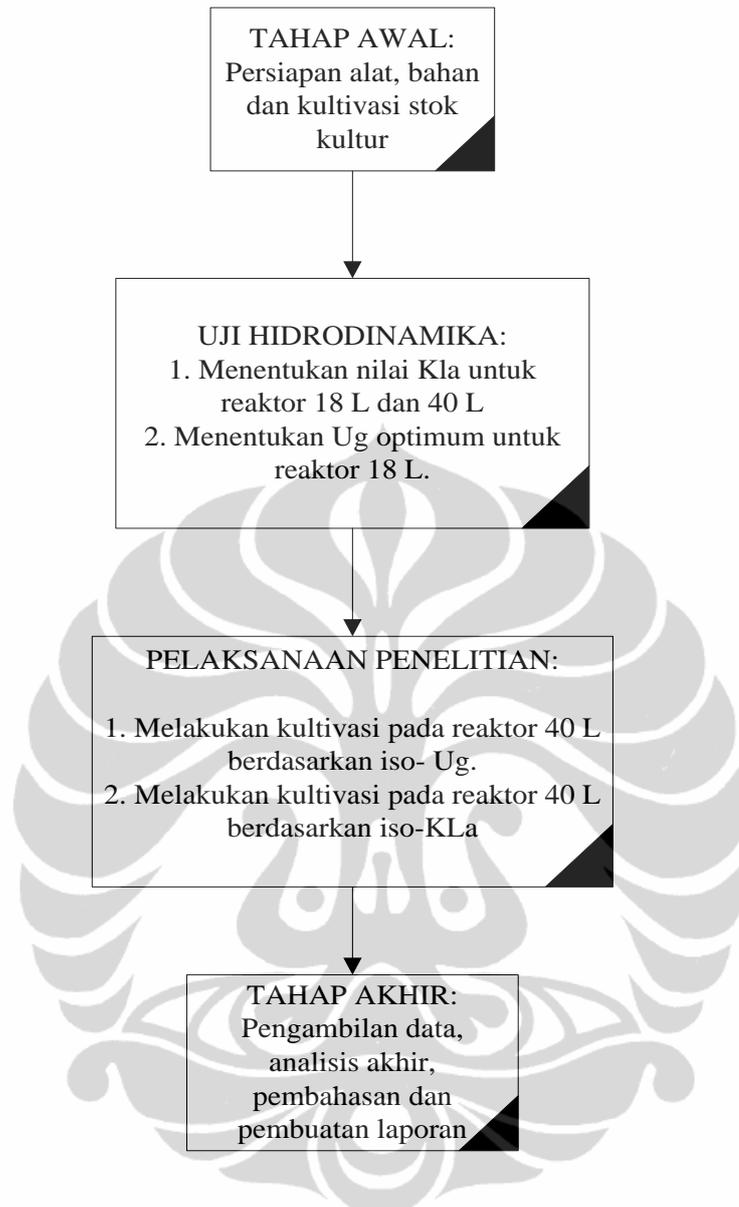
5. *Filter sistem* untuk memerangkap sel multi alga yang didisain dengan *ventury* dan membran filternya bisa diganti untuk pengukuran biomass yang terperangkap secara periodik.
6. *Exhaust Blower* untuk aliran udara ke *venturi* untuk menghisap aliran sirkulasi kultur media.
7. Blower/Kompresor udara untuk pengaerasi kultur media.
8. Medium *Benneck* untuk riset produksi biomassa untuk suplemen asupan pangan skala pilot dan medium formulasi untuk riset pengayaan kandungan triglesrida/ lemak dalam produk biomassa

3.3.3 Prosedur Penelitian

Kegiatan penelitian yang dilakukan terbagi menjadi 5 sub topik. Dengan demikian masing-masing prosedur dari setiap kegiatan dapat dilihat di bawah ini.

3.3.3.1. Prosedur Penelitian: Perancangan Sistem Reaktor Dan Studi Awal Peningkatan Skala Reaktor Berbasis Parameter Hidrodinamik Dalam Produksi Biomassa Chlorella vulgaris

Penelitian ini merupakan kegiatan pendahuluan yang meliputi perancangan sistem reaktor dan studi awal tentang peningkatan skala reaktor. Perancangan terhadap sistem reaktor dilakukan dengan melakukan evaluasi kajian terhadap beberapa jenis bentuk reaktor. Evaluasi ini ditinjau dari luas permukaan pencahayaan, laju transfer massa yang terjadi, *yield* biomassa yang dihasilkan, tingkat kemudahan dalam mengoperasikan dan mensterilkan reaktor serta untuk dilakukan *scale-up*. Sementara itu, prosedur dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

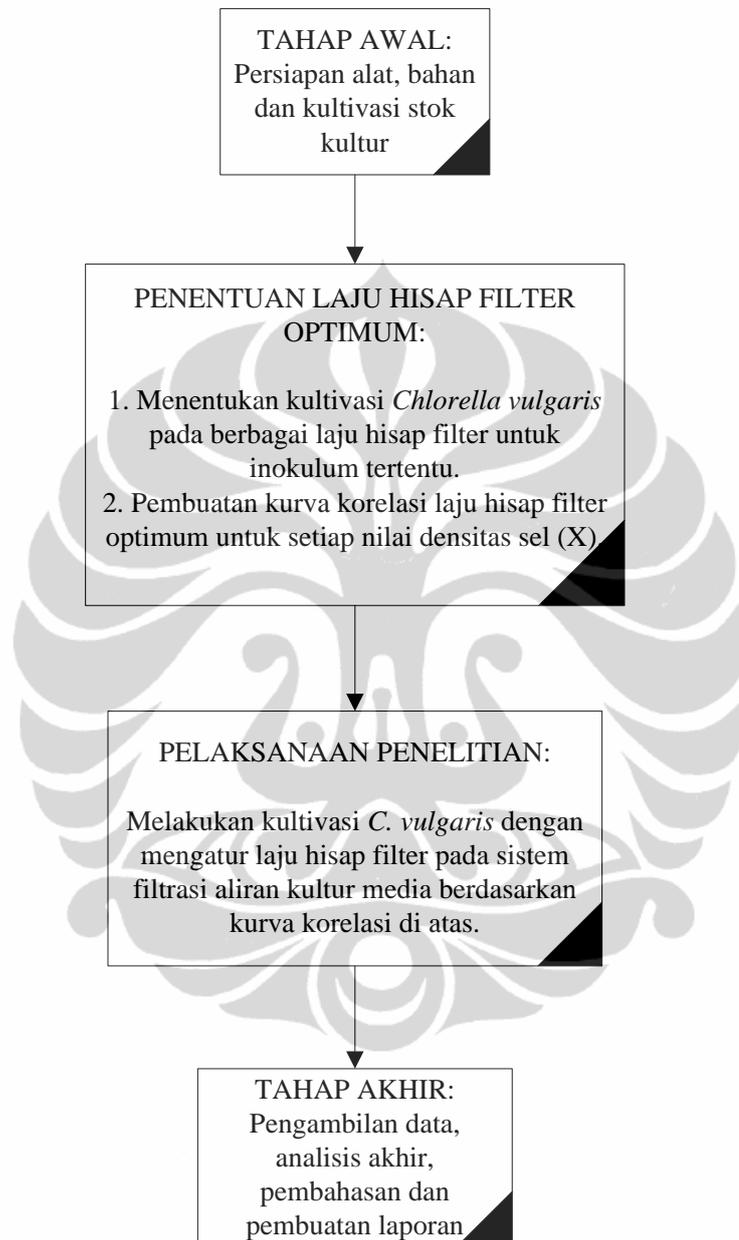


Gambar 3.3.3.1. Prosedur penelitian perancangan sistem reaktor dan studi awal peningkatan skala reaktor berbasis parameter hidrodinamik dalam produksi biomassa *Chlorella vulgaris*

3.3.3.2. Prosedur Penelitian Pengaturan Laju Hisap Filter Untuk Mengendalikan Densitas Sel Dalam Kultur Media Pada Sistem Filtrasi Produksi Biomassa Dan Fiksasi CO₂ oleh C. vulgaris

Penelitian ini merupakan kegiatan awal yang dilakukan pada sistem filtrasi produksi biomassa dan fiksasi CO₂ oleh *C. vulgaris*. Pengaturan laju hisap ini

diperlukan untuk mengoptimalkan kemampuan filter dalam memerangkap sel secara kontinu dalam media kultur. Prosedur penelitian ini adalah sebagai berikut:

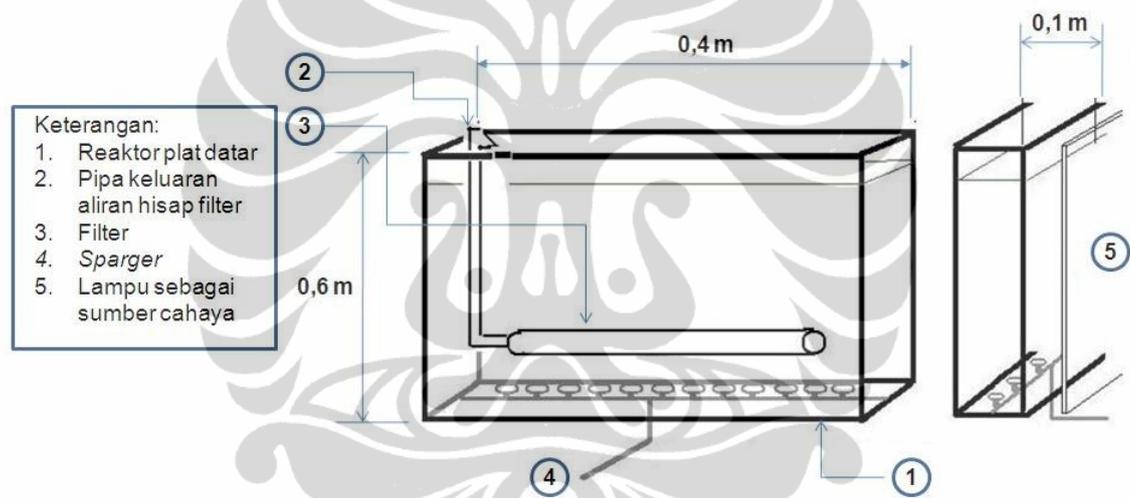


Gambar 3.3.3.2. Prosedur penelitian pengaturan laju hisap filter untuk mengendalikan densitas sel dalam kultur media pada sistem filtrasi produksi biomassa dan fiksasi CO₂ oleh *Chlorella vulgaris*

Pada penelitian ini sistem filtrasi dilakukan secara kontinu dan pengambilan filter dilakukan setiap 6 jam sekali. Dibutuhkan waktu sekitar 5

menit untuk proses penggantian filter (setiap per 6 jam tersebut). Dengan demikian aktivitas penggantian filter ini dapat dikatakan tidak mengganggu proses kultivasi yang sedang berlangsung.

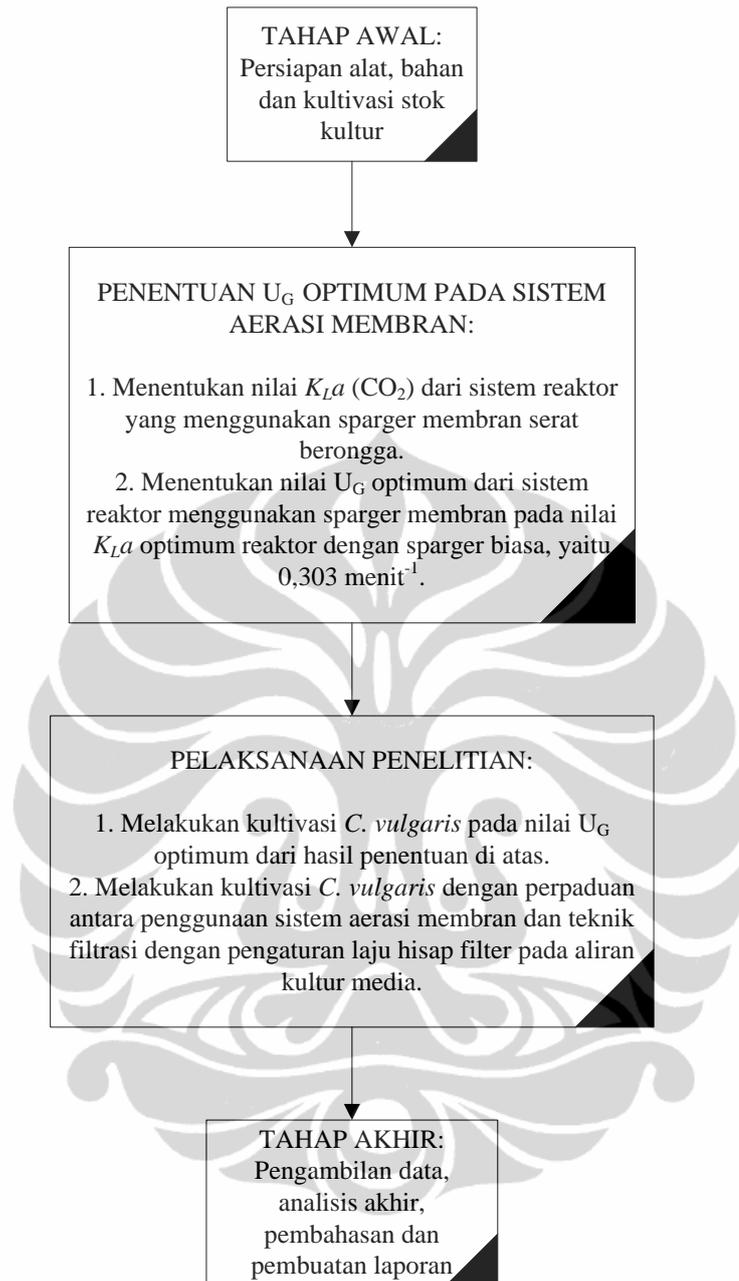
Penelitian ini tetap menggunakan fotobioreaktor kolom gelembung tembus cahaya skala menengah bervolume 18 L dengan ukuran reaktor (0.4 x 0.1 x 0.6) cm³. Namun pada penelitian kali ini dilengkapi dengan alat filter. Filter yang digunakan berupa busa (busa berpori). Suhu yang digunakan merupakan suhu ruang, kecepatan superfisial udara sebesar 15,2 m/jam, dan konsentrasi CO₂ yang diberikan sebesar 5% dari udara. Sementara itu skema reaktor yang dirancang untuk penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3.3.3.3. Skema fotobioreaktor kultivasi filtrasi kontinu.

3.3.3.3. Prosedur Penelitian Optimasi Sistem Aerasi Dalam Kultur Media Untuk Meningkatkan Produksi Biomassa Dan Fiksasi CO₂ dari *Chlorella vulgaris*

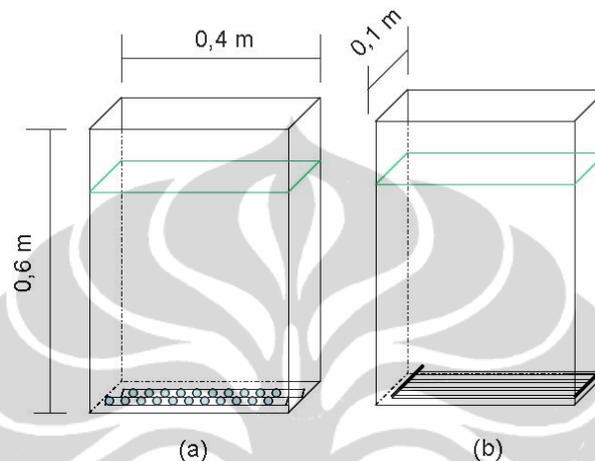
Pada penelitian ini dilakukan optimasi proses dengan mengatur sistem aerasinya. Media aerator yang digunakan aerator plastik akuarium dan aerator membran. Kinerja yang dihasilkan dari kedua aerator ini dibandingkan dan dipilih mana yang menghasilkan produksi biomassa *C. vulgaris* yang optimal. Prosedur Penelitian untuk topik ini adalah:



Gambar 3.3.3.4. Prosedur penelitian optimasi sistem aerasi dalam kultur media untuk meningkatkan produksi biomassa dan fiksasi CO₂ dari *C. vulgaris*

Pada penelitian ini akan dilakukan dua tahap penelitian yaitu melakukan uji hidrodinamika terhadap reaktor yang menggunakan *sparger* membran. Tahap pertama ini dilakukan untuk mendapatkan informasi berapa nilai laju alir gas optimum yang diperlukan untuk mencapai nilai K_{La} tertentu. Nilai K_{La} terbaik pada penelitian terdahulu adalah sebesar 0,303 menit⁻¹. Tahap kedua adalah

melakukan kultivasi *C. vulgaris* dengan sistem kultivasi menggunakan *sparger* membran. Sistem kultivasi dengan membran ini juga akan digunakan untuk proses kultivasi dengan perlakuan filtrasi. Kedua hasil ini akan dibandingkan dengan sistem yang menggunakan *sparger* biasa. Berikut ini skema reaktor yang digunakan dalam penelitian yang dilakukan:



Gambar 3.3.3.5. Skema reaktor *sparger* biasa (a) dan *sparger* membran (b)

3.3.3.4. *Prosedur Penelitian Optimasi Penggunaan Media Filter dalam Sistem Filtrasi Produksi Biomassa Dan Fiksasi CO₂ oleh Chlorella vulgaris*

Prosedur Penelitian untuk topik ini sama dengan penelitian optimasi sistem aerasi dalam kultur media untuk meningkatkan produksi biomassa dan fiksasi CO₂ dari *C. vulgaris*. Namun pada penelitian ini dilakukan perbandingan antara sistem yang menggunakan filter *busa* dan mikrofilter dalam sistem filtrasinya.

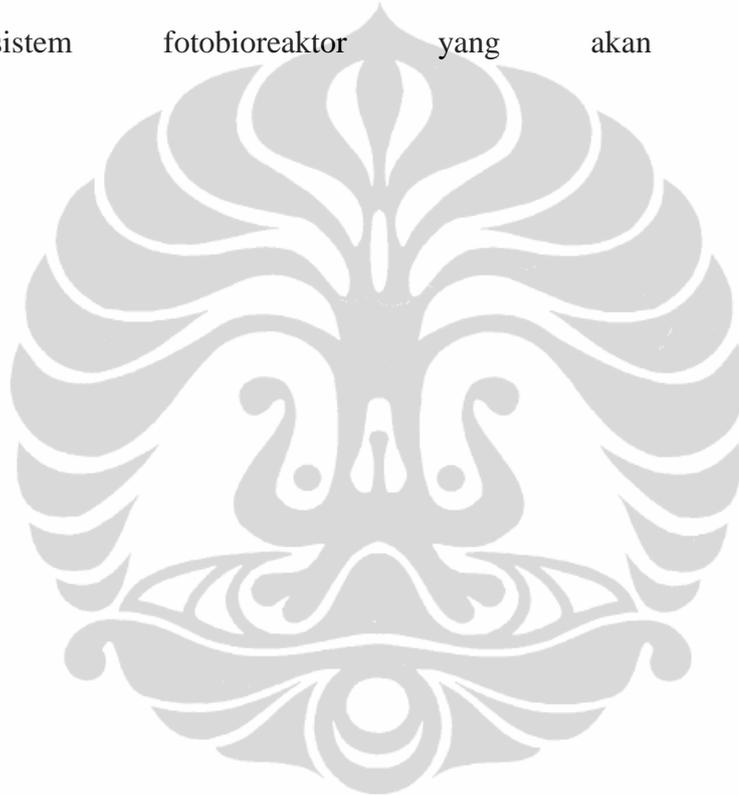
3.3.3.5. *Prosedur Penelitian Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris melalui Perlakuan Teknik Filtrasi Semi Kontinu dalam Aliran Sirkulasi Media Kultur.*

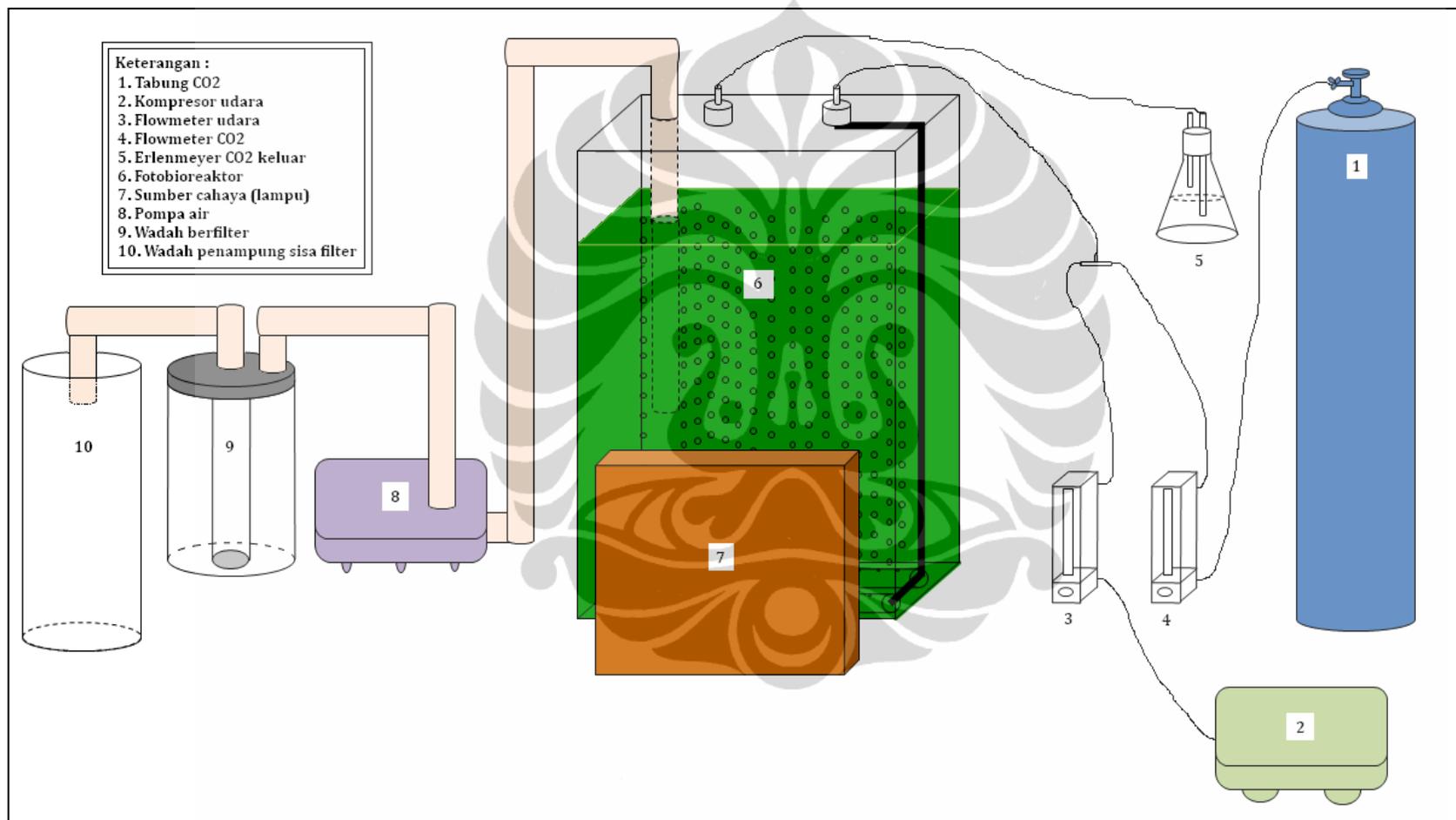
Prosedur Penelitian untuk topik ini hampir mirip dengan penelitian menggunakan sistem filtrasi secara kontinu. Perbedaannya adalah pada sistem semikontinu ini, media filter tidak diletakkan di dalam reaktor melainkan di luar reaktor.

Pada sistem semi kontinu ini kultivasi dilakukan sama seperti pada kultivasi pada perlakuan sebelumnya. Medium dan mikroalga dimasukkan ke

dalam reaktor sebanyak 18 L, kemudian diberi iluminasi cahaya dan gas CO₂. Data diambil setiap 6 jam sekali selama 204 jam. Perbedaannya adalah pada saat OD telah 0,6, kultur mikroalga dipanen (*harvest*). Pemanenan dilakukan dengan cara mengalirkan kultur dari reaktor ke dalam *water housing* atau wadah berfilter sebanyak 9 L. Kemudian, volume medium yang hilang ditambahkan dengan medium yang baru sejumlah volume tersebut.

Fotobioreaktor yang digunakan pada penelitian ini adalah fotobioreaktor dengan volume medium kultur sebesar 18 dm⁻³. Gambar di bawah ini adalah sketsa sistem fotobioreaktor yang akan digunakan.





Gambar 3.3.6. Skema sistem reaktor kultivasi *Chlorella vulgaris* dengan perlakuan filtrasi semikontinu.

Pada gambar tersebut terdapat pompa dan wadah berfilter (*Water Housing*) yang digunakan untuk menyerap mikroalga ke dalam filter. Filter yang terdapat dalam *water housing* adalah filter ultra (Gambar 3.3.3.7). Filter ini memiliki pori yang berukuran sebesar 0,1 sampai 0,01 μm (http://www.kochmembran.com/sep_uf.htmL). Filter ini telah banyak digunakan untuk menyaring pengotor yang terdapat dalam air pada proses pengolahan air (*water treatment*). Pemilihan filter ini dikarenakan efektifitasnya dalam menyaring hingga ukuran 0,1 μm sehingga lebih kecil dari ukuran *C. vulgaris* yang hanya sebesar 2-8 μm . Filter ultra ini berbahan dasar keramik yang halus, sehingga ketika digunakan untuk menyaring, pengotor yang tersaring tidak menempel pada filter namun terlarut dalam air yang tidak melewati filter. Dengan demikian, filter dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama karena tidak terlapisi oleh pengotor. Gambar berikut adalah filter ultra yang digunakan dalam penelitian ini.



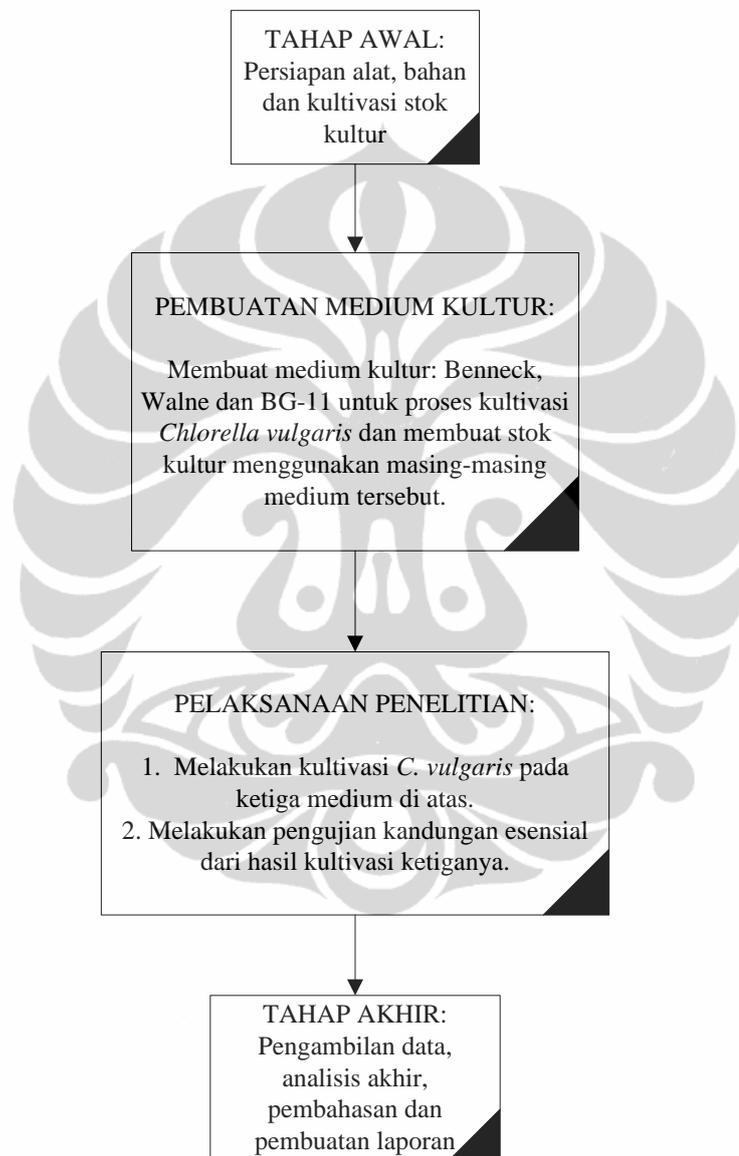
Gambar 3.3.3.7. Filter ultra setelah dialiri kultur *Chlorella vulgaris*

3.3.3.6. *Prosedur Penelitian Pembudidayaan C. vulgaris dalam berbagai jenis media kultur untuk tujuan aplikasi industri*

Pada penelitian ini *C. vulgaris* dibudidayakan dalam berbagai media kultur untuk tujuan aplikasi industri. Kegiatan ini dimaksudkan untuk mengkaji lebih lanjut terhadap potensi pemanfaatan *C. vulgaris* yang dihasilkan dari sistem kultivasi sederhana menggunakan rancangan fotobioreaktor di atas. Berikut ini adalah sub-sub topik yang dilakukan terkait dengan pembudidayaan *C. vulgaris* dalam beberapa jenis media kultur:

3.3.3.6.1. Pengaruh Jenis Media kultur terhadap Perolehan Kandungan Lipid dalam mikroalga *C. vulgaris*.

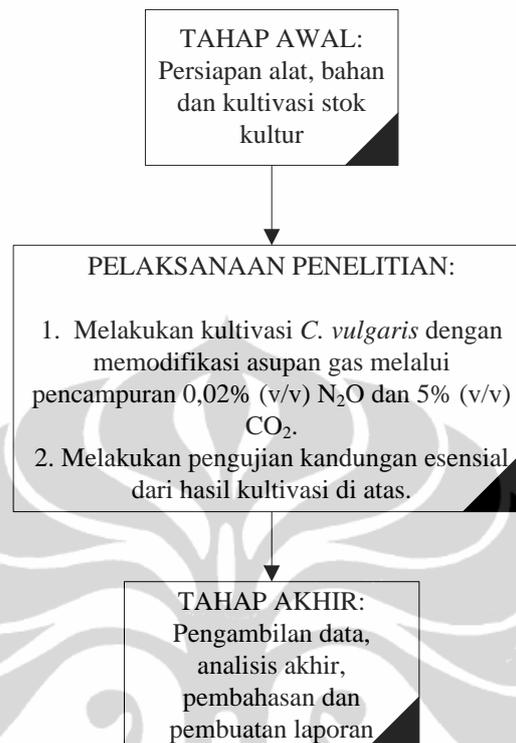
Penelitian ini dilakukan untuk melihat bagaimana pengaruh jenis medium kultur terhadap kemampuan produksi biomassa *C. vulgaris* dan pengaruhnya terhadap kandungan lipidnya. Prosedur pada penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 3.3.3.8. Prosedur penelitian kultivasi *C. vulgaris* pada variasi jenis medium.

3.3.3.6.2. Pemanfaatan Gas Buang yang diperkaya dengan kandungan gas NO_x dalam budidaya Mikroalga *C. vulgaris*.

Prosedur pada penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 3.3.3.9. Prosedur penelitian kultivasi *C. vulgaris* menggunakan asupan gas yang diperkaya dengan NO_x

3.3.4. Metode Pengukuran

1. *Optical density* 600 nm (OD600) dengan spektrofotometer (LaboMed. Inc.) untuk kerapatan biomassa dalam medium kultur
2. *TCD Gas chromatography* untuk konsentrasi gas CO₂ input dan output
3. *Luxmeter* (Luxtron LX-103) untuk kerapatan flux cahaya awal dan transmisi
4. pH meter electrode (Hanna Model HI 8014) untuk monitor pH medium kultur
5. *FID Gas chromatography* (Shimadzu GC 8A) untuk komposisi kualitatif asam lemak yang terkandung biomassa pada riset pengayaan kandungan triglesrida/ lemak dalam produk biomassa.

6. HPLC/GCMS untuk untuk komposisi kuantitatif asam lemak yang terkandung biomassa pada riset pengayaan kandungan triglesrida/ lemak dalam produk biomassa.

3.3.5. Metode Analisis Lipid

Untuk analisis lipid ini digunakan metode Bligh-Dyer dengan prosedur berikut:

- a. Sampel mikroalga yang telah dipecah dinding selnya disentrifuge selama 10 menit sekitar 8500 rpm sehingga terjadi pemisahan antara mikroalga dan medium.
- b. *Cake* dipisahkan dari supernatannya kemudian diukur volumenya.
- c. Setiap 1 mL *cake* dicampurkan dengan 2 mL metanol dan 1 mL kloroform menggunakan vortex.
- d. Setelah tercampur sempurna, *cake* tersebut ditambahkan 1 mL kloroform dan 1 mL air demin, dan vortex kembali.
- e. Sampel lalu disentrifuge selama 10 menit.
- f. Setelah terjadi pemisahan, ambil bagian bawah yang merupakan campuran lipid (berwarna kuning) dengan pipet tetes.
- g. Lipid kemudian dikeringkan dari kloroformnya.
- h. Berat lipid didapatkan dari selisih antara berat cawan kosong dan berat cawan dengan lipid kering.

3.3.6. Metode Analisis Klorofil dan Karotenoid

Untuk analisis Klorofil dan Karotenoid dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

- a. Sampel dicampurkan aseton dengan perbandingan 1:1 dalam tabung 10 mL.
- b. Kemudian ditambahkan *glass bead*.
- c. Sonikasi dalam sonikator selama ± 45 menit.
- d. Di-sentrifuge ± 30 menit
- e. Untuk klorofil, ukur absorbansi sampel pada panjang gelombang 645 nm & 663 nm (dengan larutan standarnya adalah aseton).
- f. Untuk beta karoten, absorbansi yang digunakan adalah pada panjang gelombang 450 nm.

3.3.7. Metode Analisis Protein

- Larutan protein standar (BSA 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$) dan H_2O dicampurkan dalam jumlah tertentu (Tabel 3.2) dalam tabung reaksi sehingga diperoleh berbagai konsentrasi antara 20-200 mg dalam larutan standar 1 mL.
- Pada tabung lain dicampurkan juga sampel protein dan H_2O sehingga volume total larutan sampel 2,0 mL.
- Kemudian larutan Biuret 5 mL ditambahkan ke dalam masing-masing tabung yang berisi larutan protein (standar dan sampel) dan segera divortex. Campuran reaksi diinkubasi pada suhu kamar tepat 10 menit. Untuk menghitung waktu reaksi digunakan *stopwatch*, dan waktu dihitung saat menambahkan larutan Biuret. Agar waktu reaksinya seragam untuk tiap sampel, ketika menambahkan larutan Biuret pada tabung berikutnya diberikan selang waktu tertentu.
- Kemudian pada menit ke-10 sebanyak 0,5 mL reagen Folin ditambahkan ke dalam campuran reaksi dan segera dikocok menggunakan vortex. Larutan diinkubasi pada suhu kamar selama 30 menit setelah penambahan reagen Folin.
- Serapan masing-masing larutan diukur tepat pada menit ke-30 yang ditetapkan pada panjang gelombang 750 nm.

Tabel 3.2. Penentuan kadar protein dengan metode Lowry

	Blanko	Larutan standar				Sampel protein		
No. tabung	1	2	3	4	5	6	7	8
Standar BSA (mL)	-	0,8	1,2	1,5	1,8	-	-	-
Sampel protein (μL)	-	-	-	-	-	5	50	200
Aquades (mL)	2	1,2	0,8	0,5	0,2	1,995	1,95	1,8
Larutan Biuret (mL)	5							
Reagen Folin (mL)	0,5							

3.3.8. Metode Perhitungan

- Pertumbuhan sel (Ohtaguchi and Wijanarko, 2002, Monod, 1949)

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

2. Konsumsi energi cahaya (Hirata, 1996)

$$E_x = \frac{\int_0^t I_t dt}{\Delta X \cdot S} \dots\dots\dots (3.2)$$

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

$$[HCO_3^-] = \left(\frac{K_{CO_2,0}}{H_{CO_2,0}} \right) \left(\frac{y_{CO_2} P_T}{10^{-pH}} \right) \left(\frac{EXP[A_k(1-T_o/T) + B_k \ln(T/T_o) + C_k(T/T_o - 1)]}{EXP[A_H(1-T_o/T) + B_H \ln(T/T_o) + C_H(T/T_o - 1)]} \right) \dots\dots\dots (3.3)$$

4. Perhitungan CTR dan q_{CO_2} (Wijanarko and Ohtaguchi, 2003)

$$CTR = \Delta y_{CO_2} \cdot \alpha_{CO_2}, \quad q_{CO_2} = \frac{\Delta y_{CO_2} \cdot \alpha_{CO_2}}{X} \dots\dots\dots (3.4)$$

dan

$$\alpha_{CO_2} = \frac{U_G \cdot A \cdot M_{CO_2} \cdot P}{V_{med} \cdot R \cdot T} \dots\dots\dots (3.5)$$

Dengan

U_G = kecepatan superfisial gas yang diumpankan (dm^3/h)

A = luas permukaan reaktor yang menghadap ke sumber cahaya (m^2)

M_{CO_2} = massa molekul relatif CO_2 (g/mol)

P = tekanan operasi (atm)

V_{medium} = volume medium (dm^3)

R = konstanta *Rydberg* ($0,08205 \text{ dm}^3 \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K}$)

T = suhu operasi (K)

5. Perhitungan kandungan lipid:

$$\% \text{lipid} = \frac{\text{berat botol akhir} - \text{berat botol kosong}}{\text{berat sampel}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.6)$$

6. Perhitungan kandungan klorofil:

$$\text{klorofil } a \text{ (mg / L)} = 12,25 \times A_{663} - 2,55 \times A_{645} \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

$$\text{klorofil } b \text{ (mg / L)} = 22,9 \times A_{645} - 4,64 \times A_{663} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

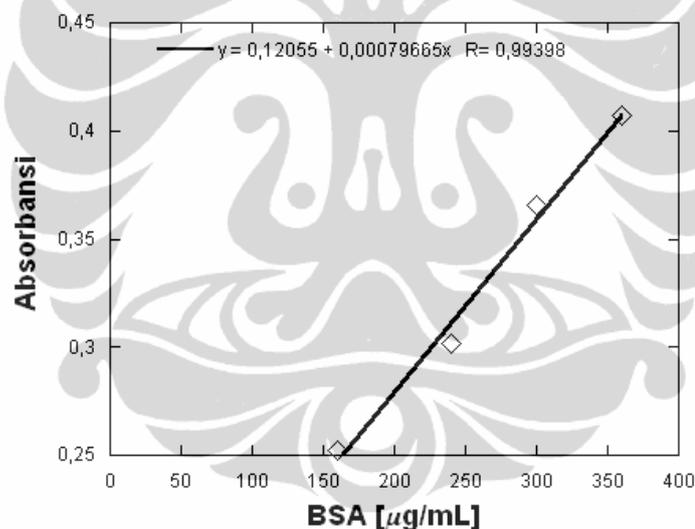
$$\text{klorofil [a + b] (mg / L)} = 7,34 \times A_{663} + 17,76 \times A_{645} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

7. Perhitungan kandungan karotenoid:

$$\text{karoten (mg / L)} = (1000 \times A_{450} - 3,27 \times (\text{klorofil } a) - 104(\text{klorofil } b)) / 227 \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

8. Perhitungan kandungan protein:

Kurva kalibrasi dibuat untuk menghitung kadar protein yang terdapat pada sampel. Kurva yang dibuat berdasarkan data berat sampel BSA terhadap absorbansi (750 nm). Berdasarkan data yang diperoleh (dapat dilihat pada lampiran), grafik yang terbentuk adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3.3.10. Kurva kalibrasi uji protein

Dari kurva kalibrasi standar protein yang didapat, kadar protein dihitung sebagai berikut:

$$A_{750} = 0,0008 \times C + 0,1206 \quad (3.11)$$

dengan C adalah kadar protein.

Hasil seluruh pengolahan data untuk tiap metode pemanenan selanjutnya akan dibandingkan melalui grafik pertumbuhan sel terhadap waktu, metabolisme terhadap waktu, dan fiksasi karbon dioksida terhadap waktu, serta kandungan nutrisi terhadap metode pemanenan agar dapat diamati pengaruh dari metode pemanenan terhadap jumlah biomassa dan kandungan nutrisinya.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

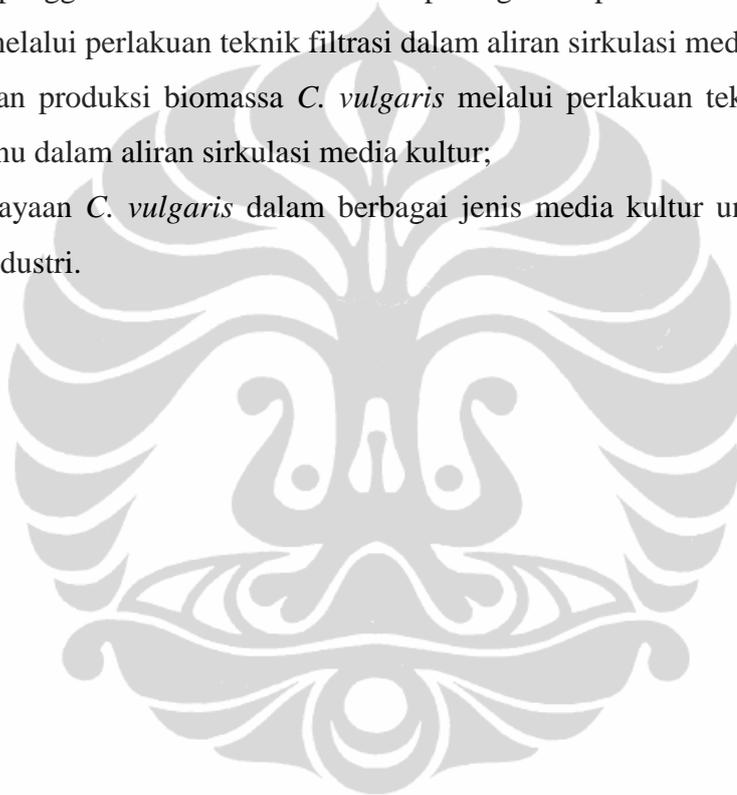
Pada bab ini akan dipaparkan mengenai hasil analisa dan kajian terhadap kegiatan penelitian yang telah dilakukan. Secara umum kegiatan penelitian diarahkan pada upaya pengembangan sistem filtrasi untuk dapat mempertahankan laju pertumbuhan optimum *Chlorella vulgaris* sehingga berdampak pada peningkatan produksi biomassa dan kemampuan fiksasi CO₂ nya. Berikut ini adalah tabel berisi pencapaian pelaksanaan kegiatan penelitian yang telah dilakukan.

Tabel 4.1. Pencapaian Pelaksanaan Kegiatan Penelitian

Kegiatan	Tahun 1		Tahun 2		Tahun 3		Publikasi
	1	2	3	4	5	6	
Perancangan reaktor dan uji hidrodinamika							Korean-Asean Symposium 2009
Proses kultivasi <i>Chlorella</i> (kontrol)							
Proses kultivasi dengan alterasi							
Proses kultivasi dengan filtrasi : optimasi kondisi operasi							JTKI 2009; JCCE 2012
Proses kultivasi dengan filtrasi: optimasi sistem aerasi							
Proses kultivasi dengan filtrasi: optimasi media filter							submitted
Proses kultivasi dengan filtrasi: optimasi sistem filtrasi							Submitted
Proses kultivasi dengan berbagai jenis media kultur							AJChe 2009; SNTK TOPI 2011

Dengan mengacu dari beberapa tahapan penelitian dalam tabel di atas, maka pembahasan pada bab ini akan terbagi dalam beberapa bagian topik penelitian yang disesuaikan berdasarkan urutan jenis kegiatan yang dilakukan. Beberapa topik tersebut adalah:

1. Studi awal peningkatan skala reaktor berbasis parameter hidrodinamik dalam produksi biomassa *C. vulgaris*;
2. Pengaturan laju hisap filter untuk mengendalikan densitas sel dalam kultur media untuk meningkatkan produksi berkelanjutan biomassa dan fiksasi CO₂ oleh *C. vulgaris*.
3. Optimasi sistem aerasi dalam kultur media untuk meningkatkan produksi biomassa dan fiksasi CO₂ dari *C. vulgaris*;
4. Optimasi penggunaan media filter dalam peningkatan produksi biomassa *C. vulgaris* melalui perlakuan teknik filtrasi dalam aliran sirkulasi media kultur;
5. Peningkatan produksi biomassa *C. vulgaris* melalui perlakuan teknik filtrasi semikontinu dalam aliran sirkulasi media kultur;
6. Pembudidayaan *C. vulgaris* dalam berbagai jenis media kultur untuk tujuan aplikasi industri.



4.1. Perancangan Sistem Reaktor dan Studi Awal Peningkatan Skala Reaktor Berbasis Parameter Hidrodinamik dalam Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris*.

Dalam mengembangkan fotobioreaktor untuk kultivasi alga, berbagai upaya perlu dilakukan untuk tetap dapat meningkatkan teknologinya dan mengetahui bagaimana karakteristik kultur alganya. Pengembangan fotobioreaktor ini perlu dilakukan agar diperoleh proses kultivasi alga yang efisien (Javanmardian dan Palsson, 1991; Kadam, 1997). Meskipun banyak jenis fotobioreaktor yang telah dibuat, pada kenyataannya hanya sedikit saja yang bisa diaplikasikan. Salah satu permasalahan utamanya adalah ketidakefisienan fotobioreaktor, terutama dalam hal perpindahan massanya (Ugwu, 2007).

Proses kultivasi alga dapat dilakukan dalam sistem kultivasi terbuka atau tertutup (fotobioreaktor). Beberapa pengalaman menunjukkan bahwa proses kultivasi alga dengan sistem tertutup lebih menguntungkan dibandingkan dengan sistem terbuka. Pertimbangan ini didasari atas kemudahan dalam mengontrol kondisi kultivasi, lebih terjaga dari adanya kontaminan yang masuk ke dalamnya, dan produksi biomassa yang diperoleh lebih besar. Fotobioreaktor sistem tertutup mempunyai berbagai bentuk, ukuran dan panjang yang disesuaikan dengan material yang digunakan (Pulz, 2001). Ada beberapa jenis fotobioreaktor sistem tertutup (dibedakan berdasarkan bentuk, *flow regime*, efisiensi cahaya dan luas permukaan kontakannya) yang biasanya digunakan dalam kultivasi mikroorganisme, antara lain yaitu :

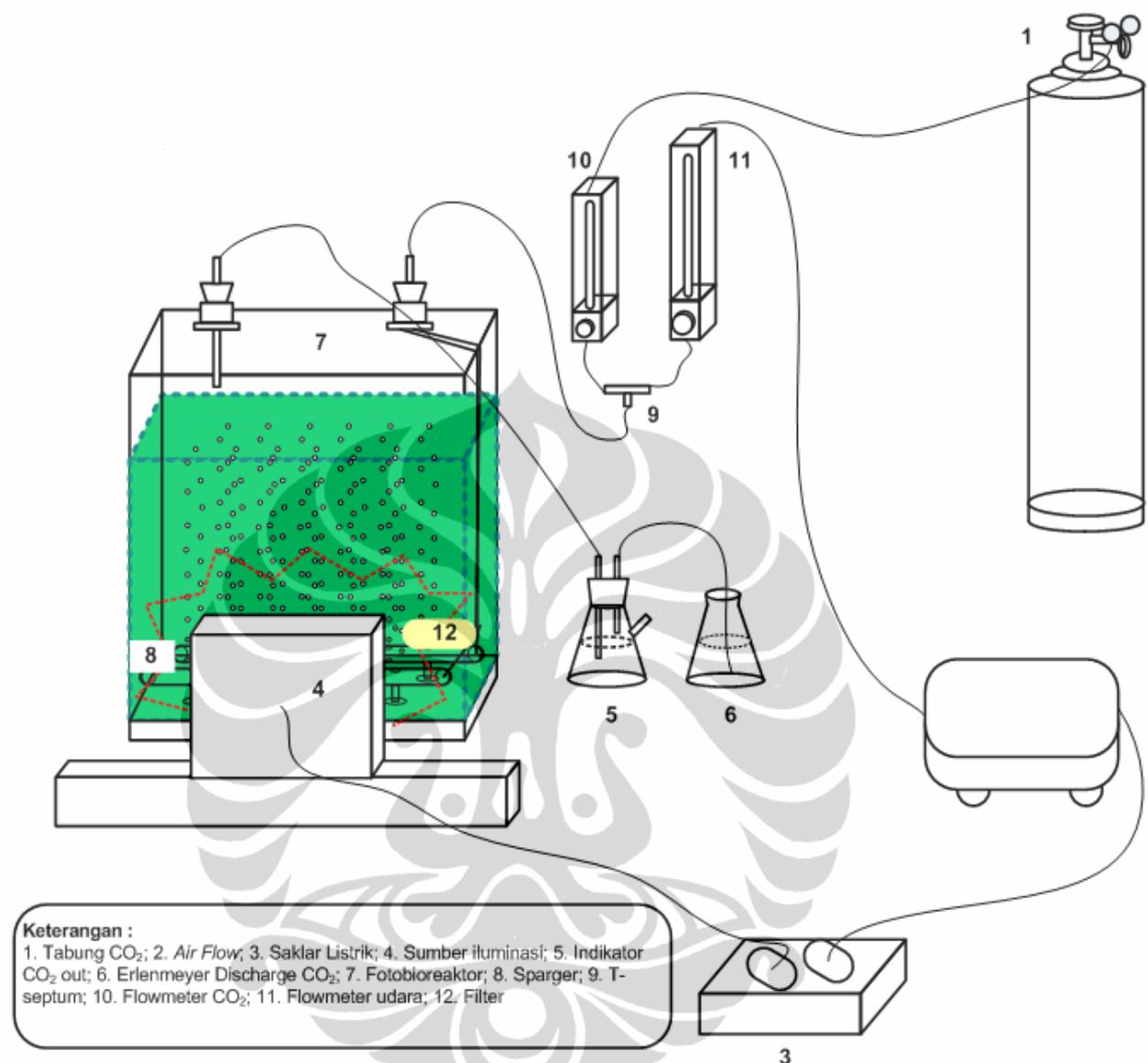
- *Tubular fotobioreaktor*
- *Plat-type fotobioreaktor*
- *Buble column fotobioreaktor*

Dalam tinjauan pustaka mengenai fotobioreaktor, telah dijelaskan mengenai keuntungan dan kendala masing-masing jenis fotobioreaktor. Rangkuman pemaparan mengenai sistem kultivasi tertutup tersebut dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 4.1.1. Hasil Evaluasi terhadap Beberapa Jenis Reaktor yang Dipilih untuk Kultivasi Alga.

No	Parameter:	<i>Flat Plat Reaktor</i>	<i>Tubular Reaktor</i>	<i>Vertical bubble column Reaktor</i>
1	Luas permukaan pencahayaan	besar	besar	Kecil
2	Laju transfer massa dalam kultur	cukup	kurang	Baik
3	Yield biomassa	cukup	Cukup	Baik
4	Potensi <i>scale-up</i>	agak sulit	Sulit	Mudah
5	Kemudahan untuk mensterilkan reaktor	Sulit	Sulit	Mudah

Beberapa parameter atau kriteria evaluasi di atas merupakan kriteria dasar yang minimal harus ada untuk dapat menjamin keberlangsungan hidup sel alga menjadi lebih baik. Dalam penelitian ini, jenis reaktor yang dipilih adalah kombinasi antara *flat plat reaktor* dan *vertical bubble column reaktor*. Adanya kombinasi ini sebenarnya dimaksudkan untuk lebih meningkatkan kinerja reaktornya dalam memproduksi biomassa. Reaktor yang diusulkan ini berupa reaktor plat datar yang tidak terlalu tipis dan diaerasi dengan udara melalui sebuah *sparger* atau distributor gas. Modifikasi reaktor ini bertujuan untuk menghasilkan reaktor yang memiliki kinerja: luas permukaan pencahayaan yang besar, laju transfer massa yang baik dalam kultur media, *yield* biomassa yang dihasilkan tinggi, mudah dalam mengoperasikan dan mensterilkan reaktor serta mudah untuk dilakukan *scale-up*. Bentuk atau konfigurasi reaktor yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.1.1. berikut ini.



Gambar 4.1.1. Skema Perancangan Fotobioreaktor untuk Kultivasi *Chlorella vulgaris*

Dalam mengembangkan fotobioreaktor untuk kultivasi alga, berbagai upaya perlu dilakukan untuk tetap dapat meningkatkan teknologinya dan mengetahui bagaimana karakteristik kultur alganya. Pengembangan fotobioreaktor ini perlu dilakukan agar diperoleh proses kultivasi alga yang efisien.

Kinerja bioproduksi alga juga sangat tergantung pada metabolisme yang dilakukan oleh mikroalga. Proses kultivasi/produksi biomassa mikroalga memerlukan suplay CO₂ secara kontinu untuk menjaga keberlangsungan aktivitas fotosintetik dari mikroalga. Sementara itu lamanya waktu kultivasi atau besarnya volume reaktor yang diperlukan untuk mencapai produktivitas yang diinginkan

sangat bergantung pada laju pertumbuhan mikroalga tersebut. Besarnya laju pertumbuhan ini sangat dipengaruhi oleh salah satu fenomena fisik yaitu perpindahan massa. Perpindahan massa akan menjadi sangat berarti manakala proses melibatkan beberapa fase.

Nilai k_{La} (CO_2) merupakan parameter hidrodinamika umum yang sering digunakan untuk menilai kinerja bioreaktor dalam proses kultivasi alga. Koefisien ini secara umum menggambarkan kondisi transfer massa yang terjadi di dalam reaktor. Koefisien ini dipengaruhi oleh: laju pengadukan, tipe distributor gas/sparger dan temperatur. Untuk proses kultivasi alga ini diperlukan nilai k_{La} (CO_2) yang optimal. Nilai K_{La} yang tinggi menunjukkan proses transfer massa CO_2 yang lebih baik dalam kultur mikroalga. Namun tidak selamanya nilai k_{La} (CO_2) yang besar baik untuk pertumbuhan kultur alga. Nilai k_{La} (CO_2) yang terlalu besar sangat mungkin menyebabkan terjadinya *shear stress* pada alga (Ugwu, 2007). Fenomena ini dapat menghambat pertumbuhan alga, sehingga harus dihindari.

Tinjauan aspek hidrodinamika ini sangat berhubungan erat dengan rancangan atau desain reaktor yang digunakan. Jenis reaktor, ukuran dan desain sistem yang berbeda akan mempengaruhi pola aliran fluida yang terlibat di dalamnya. Pola aliran yang terbentuk akan mempengaruhi kondisi atau proses transfer massa yang terjadi selama proses kultivasi. Hal ini diindikasikan dengan perolehan nilai k_{La} nya. Berikut ini dapat dilihat beberapa hasil yang diperoleh dari beberapa peneliti terkait dengan jenis dan ukuran reaktor yang digunakan dalam memproduksi berbagai jenis alga serta nilai k_{La} yang diperoleh.

Tabel 4.1.2. Beberapa Nilai K_{La} pada Berbagai Jenis dan Ukuran Reaktor

Fotobioreaktor	Volume (L)	Kecepatan superfisial (m/s)	K_{La} (s^{-1})	Jenis alga	Rujukan
Concentric tube airlift	12	0.055	0.020	<i>Phaeodactylum tricorutum</i>	Contreras et al. (1998)
Internally-illuminated	3	0.009	0.020	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Ogbonna et al. (1998)
Airlift Tubular Horizontal	200	0.160	0.014	<i>Porphyridium cruentum</i>	Camacho Rubio et al. (1999)
Bubble-column	13	$5.4-82 \times 10^{-4}$	$1.7-4.7 \times 10^{-3}$	<i>Porphyridium</i> sp.	Merchuk et al. (2000)
Inclined tubular	6	0.020	0.003	<i>Chlorella sorokiniana</i>	Ugwu et al. (2002)
Plate-plate	3	0.009	0.002	<i>Synechocystis aquatilis</i>	Zhang et al. (2002)

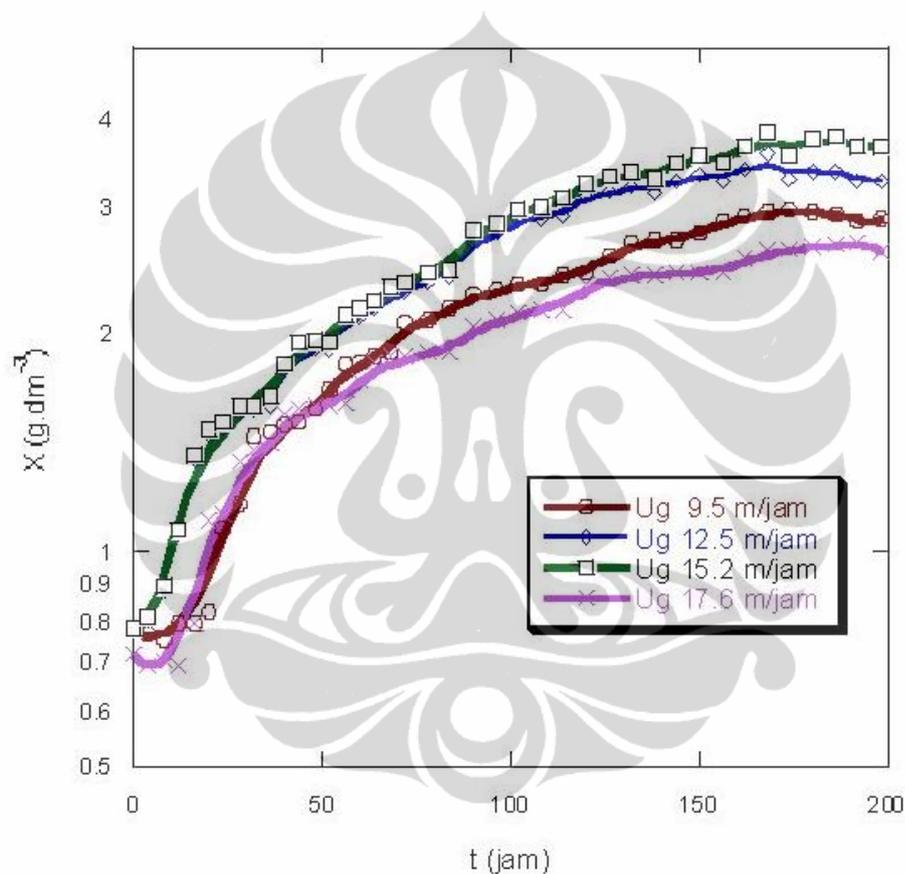
Penelitian ini akan membahas tentang pentingnya tinjauan aspek hidrodinamika (nilai K_{La}) dalam suatu rancangan fotobioreaktor yang dipilih untuk memproduksi biomassa mikroalga *Chlorella vulgaris*, terutama dalam kaitannya dengan upaya peningkatan skala reaktor (*scale-up*). Jenis reaktor yang digunakan adalah kombinasi antara *flat plat reaktor* dan *vertical bubble column reaktor*. Reaktor ini berupa reaktor plat datar yang tidak terlalu tipis dan diaerasi dengan udara melalui sebuah *sparger* atau distributor gas. Modifikasi reaktor ini bertujuan untuk menghasilkan reaktor yang memiliki kinerja: luas permukaan pencahayaan yang besar, laju transfer massa yang baik dalam kultur media, yield biomassa yang dihasilkan tinggi, mudah dalam mengoperasikan dan mensterilkan reaktor serta mudah untuk di *scale-up*.

Penelitian ini menggunakan fotobioreaktor teraerasi tembus cahaya skala menengah bervolume 18 L dan 40 L. Suhu yang digunakan merupakan suhu ruang, kecepatan superfisial udara sebesar 15.2 m/jam, dan konsentrasi CO_2 yang diberikan sebesar 5% dari udara.

Variabel-variabel yang menjadi bahasan adalah variabel yang merupakan parameter pertumbuhan *Chlorella vulgaris*, yaitu OD_{600} yang akan diolah menjadi berat kering *Chlorella*, pH yang dapat menunjukkan konsentrasi substrat, serta besarnya konsentrasi kandungan esensial seperti lipid, klorofil dan betakaroten.

4.1.1. Penentuan Nilai K_{1a} sebagai Parameter Hidrodinamik dan Pengaruhnya Pada Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris*

Tahap pertama yang dilakukan pada penelitian ini adalah melakukan proses kultivasi *C. vulgaris* dalam reaktor 18 L pada beberapa variasi kecepatan superfisial (U_g) gas CO_2 . Langkah ini dimaksudkan untuk mencari nilai U_g optimal dalam reaktor tersebut agar diperoleh produktivitas yang tinggi. Dari penelitian yang dilakukan diperoleh hasil sebagai berikut:

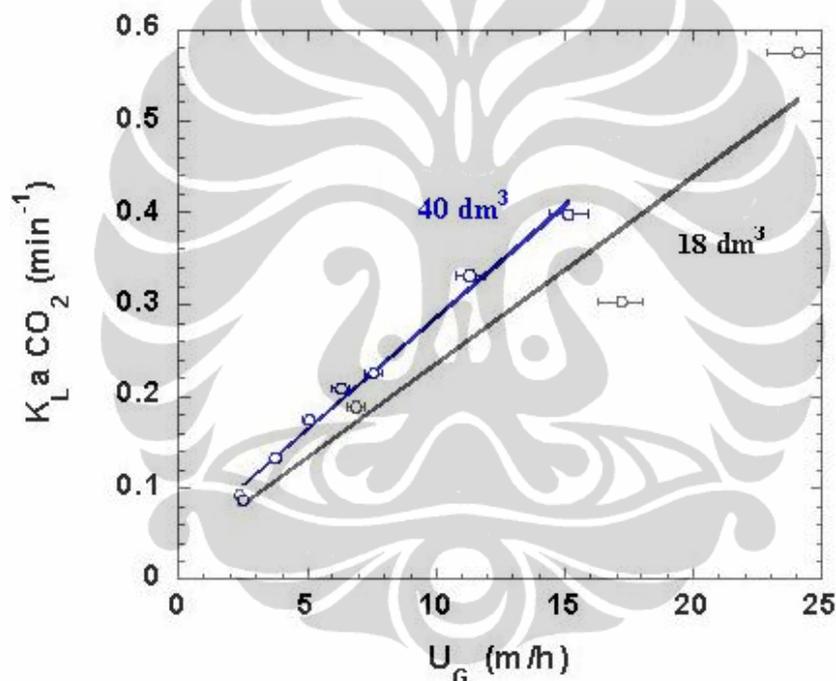


Gambar 4.1.2. Profil Pertumbuhan *C. vulgaris* pada Beberapa Nilai U_g

Dari Gambar di atas dapat dilihat bahwa nilai U_g 15,2 m/jam memberikan hasil produksi biomassa yang lebih optimal dibandingkan nilai U_g lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa nilai U_g yang digunakan tersebut menghasilkan proses transfer massa terbaik dari beberapa variasi U_g yang diujikan, dalam menghasilkan produk biomassa. Pada nilai U_g yang lebih rendah dari 15,2 m/jam, proses transfer massa yang terjadi kurang optimal. Ketidakefektifan ini disebabkan oleh suplay gas CO_2 yang diberikan masih kurang memadai sehingga

mempengaruhi pertumbuhan biomassanya. Namun demikian, untuk nilai U_g yang lebih besar dari 15,2 m/jam memberikan efek lain yaitu *shear stress* pada alga. Sebagaimana diungkapkan oleh Ugwu (tahun 2007) bahwa nilai laju yang terlalu besar (diindikasikan dengan nilai K_{La} (CO_2)) sangat mungkin menyebabkan terjadinya *shear stress* pada alga. Fenomena ini dapat menghambat pertumbuhan alga, sehingga harus dihindari.

Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai K_{La} pada berbagai nilai U_g untuk kedua ukuran reaktor (18 L dan 40 L) serta korelasi diantara keduanya. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

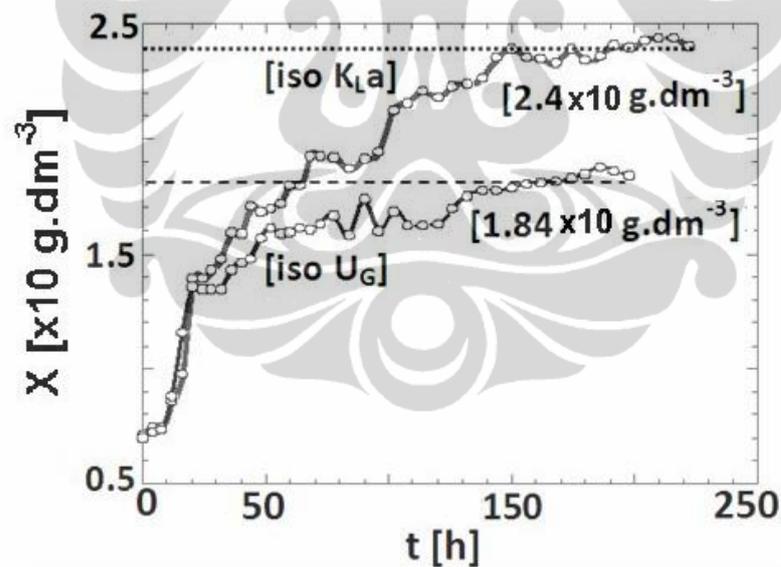


Gambar 4.1.3. Grafik Korelasi antara K_{La} dan U_g

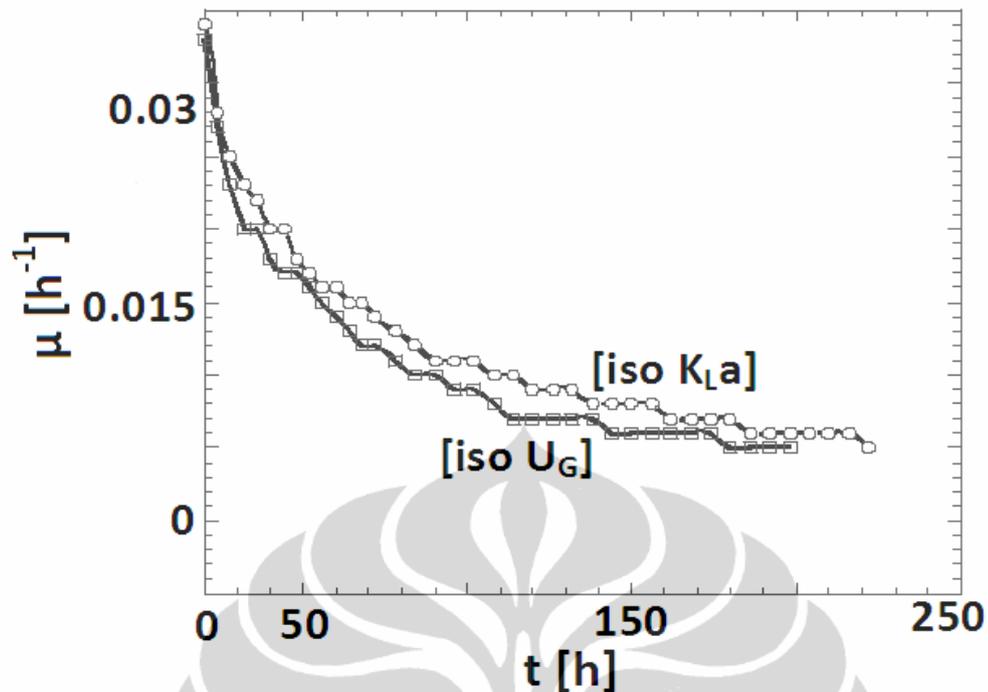
Berdasarkan eksperimen yang dilakukan pada reaktor berukuran volume 18 L, didapatkan nilai U_g optimum adalah 15,2 m/jam atau 0,005 m/detik. Dengan menggunakan grafik korelasi di atas maka diperoleh nilai $k_{La} = 0,303$ $menit^{-1}$ atau 0,005 $detik^{-1}$. Jika dibandingkan dengan kondisi operasi yang digunakan oleh Zhang (2002) pada reaktor plat datar dengan volume reaktor yang lebih kecil, yaitu 3 L maka untuk reaktor dengan volume 18 L ini, perolehan laju alir gas optimum dan nilai K_{La} tersebut dapat dinilai sebagai pencapaian yang lebih baik. Hal ini mengingat bahwa reaktor yang digunakan pada penelitian ini berukuran

jauh lebih besar (6 kalinya) namun menggunakan laju alir gas lebih kecil (hampir setengahnya) dan menghasilkan nilai K_La yang lebih besar (sekitar 2,5 kalinya).

Produksi yang optimum pada reaktor berukuran 18 L ini diharapkan dapat juga berlangsung pada reaktor berukuran volume 40 L. Dengan menggunakan nilai k_La yang sama, maka berdasarkan Gambar 4.1.3 untuk reaktor 40 dm³ didapatkan nilai U_g optimum = 12,2 m/jam. Nilai U_g ini akan digunakan untuk mengkultivasi *C. vulgaris* pada reaktor 40 L. Dikarenakan memiliki nilai k_La yang sama, maka model ini kita sebut sebagai iso- k_La . Sementara itu sebagai pembandingan, dilakukan juga proses kultivasi di reaktor 40 L dengan menggunakan nilai U_g yang sama dengan yang digunakan di reaktor 18 L. Oleh karenanya model ini kita sebut sebagai iso- U_g . Cara pandang seperti inilah yang kemudian disebut sebagai studi peningkatan skala reaktor berbasis parameter hidrodinamik. Hasil produksi biomassa kedua model tersebut dapat dilihat pada garfik di bawah ini.



Gambar 4.1.4. Profil Produksi Biomassa *C. vulgaris* pada model iso- k_La dan iso- U_g dalam reaktor 40 L



Gambar 4.1.5. Laju Pertumbuhan Spesifik *Chlorella vulgaris* pada model iso- k_{La} dan iso- U_g dalam reaktor 40 L

Gambar 4.1.4. dan Gambar 4.1.5. masing-masing menggambarkan profil produksi biomassa dan laju pertumbuhan yang terjadi selama masa kultivasi dengan menggunakan pendekatan kedua model seperti tersebut di atas. Dari Gambar 4.1.4. dapat dilihat bahwa model iso- k_{La} lebih memberikan hasil produksi biomassa yang lebih besar dibandingkan model iso- U_g . Hal ini menunjukkan bahwa produksi biomassa *C. vulgaris* ini sangat dikontrol atau dipengaruhi oleh proses transfer massa yang terjadi selama proses kultivasi. Kecenderungan yang sama juga ditunjukkan oleh profil laju pertumbuhan spesifik yang diperoleh. Dari Gambar 4.1.5. di atas, meskipun nilai laju pertumbuhan maksimum yang diperoleh dari kedua model adalah sama, namun model iso- k_{La} lebih memberikan penurunan laju pertumbuhan spesifik yang lebih landai dibandingkan dengan penurunan laju pertumbuhan spesifik pada model iso- U_g . Berdasarkan hasil yang diperoleh, maka dapat dikatakan bahwa model iso- k_{La} dapat lebih menjamin terjadinya proses transfer massa yang lebih baik dibandingkan iso- U_g . Pada model iso- k_{La} , besaran nilai U_g yang digunakan dalam reaktor 40 L tersebut ditentukan berdasarkan persamaan korelasi antara k_{La} dan U_g yang diperoleh dari Gambar 4.1.4. Nilai U_g yang diperoleh merupakan nilai U_g optimal yang dapat

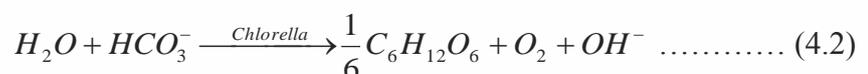
menghasilkan besaran nilai K_{La} atau proses transfer massa sebaik yang dihasilkan pada reaktor ukuran 18 L. Sementara model iso- U_g tidak menghasilkan produksi biomassa yang lebih baik, karena model ini tidak memberikan keoptimalan dari nilai U_g yang dibutuhkan oleh reaktor 40 L sehingga proses transfer massa yang terjadi pun berlangsung kurang baik.

4.1.2. Pengaruh Model Iso- K_{La} dan Iso- U_g terhadap Konsumsi $[HCO_3^-]$ oleh *Chlorella vulgaris* dalam Media Kultur.

Perhitungan terhadap $[HCO_3^-]$ dimaksudkan untuk mengetahui jumlah $[HCO_3^-]$ yang tersedia, yang dapat dikonsumsi oleh sel *C. vulgaris* dalam pertumbuhannya. Senyawa bikarbonat $[HCO_3^-]$ sendiri terbentuk karena adanya reaksi antara CO_2 terlarut dalam larutan medium dengan air. Konsentrasi $[HCO_3^-]$ dihitung dari perubahan pH kultur yang terjadi sebagai akibat adanya aktivitas pertumbuhan sel *C. vulgaris*. Dari hasil penelitian yang sudah pernah dilakukan, menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sel dalam kultur cenderung meningkatkan jumlah pH kultur. Namun demikian rentang pH yang diperoleh selama proses kultivasi berada pada rentang pertumbuhan optimumnya yaitu mulai dari pH 6,5 sampai 7,5 (Lampiran A, Tabel A.3). Pada saat gas CO_2 masuk dalam kultur, proses yang terjadi adalah pembentukan senyawa bikarbonat (pada ekstraselular) seperti pada reaksi berikut:

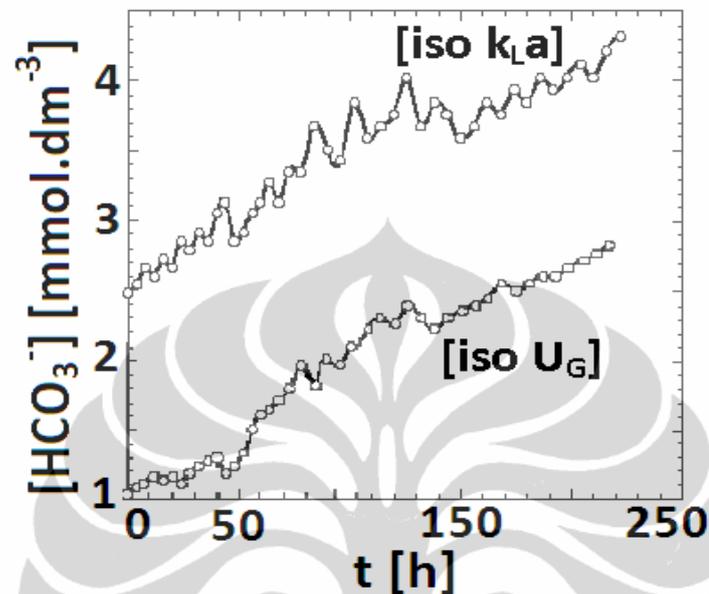


Senyawa bikarbonat inilah yang kemudian diserap oleh sel *Chlorella vulgaris*. Proses metabolisme yang terjadi dalam sel selanjutnya adalah reaksi antara bikarbonat tersebut dan air yang terdapat dalam sel membentuk senyawa organik seperti glukosa dan ion OH^- dimana dapat terlihat pada persamaan berikut:



Dengan menggunakan persamaan (3.3) yaitu persamaan hukum Henry, dapat dicari besarnya konsentrasi $[HCO_3^-]$ yang terbentuk dalam kultur. Karena

besarnya konsentrasi spesi ion $[HCO_3^-]$ sebanding dengan besarnya nilai pH, maka nilai spesi ion tersebut akan semakin besar dengan naiknya nilai pH dalam medium kultur.



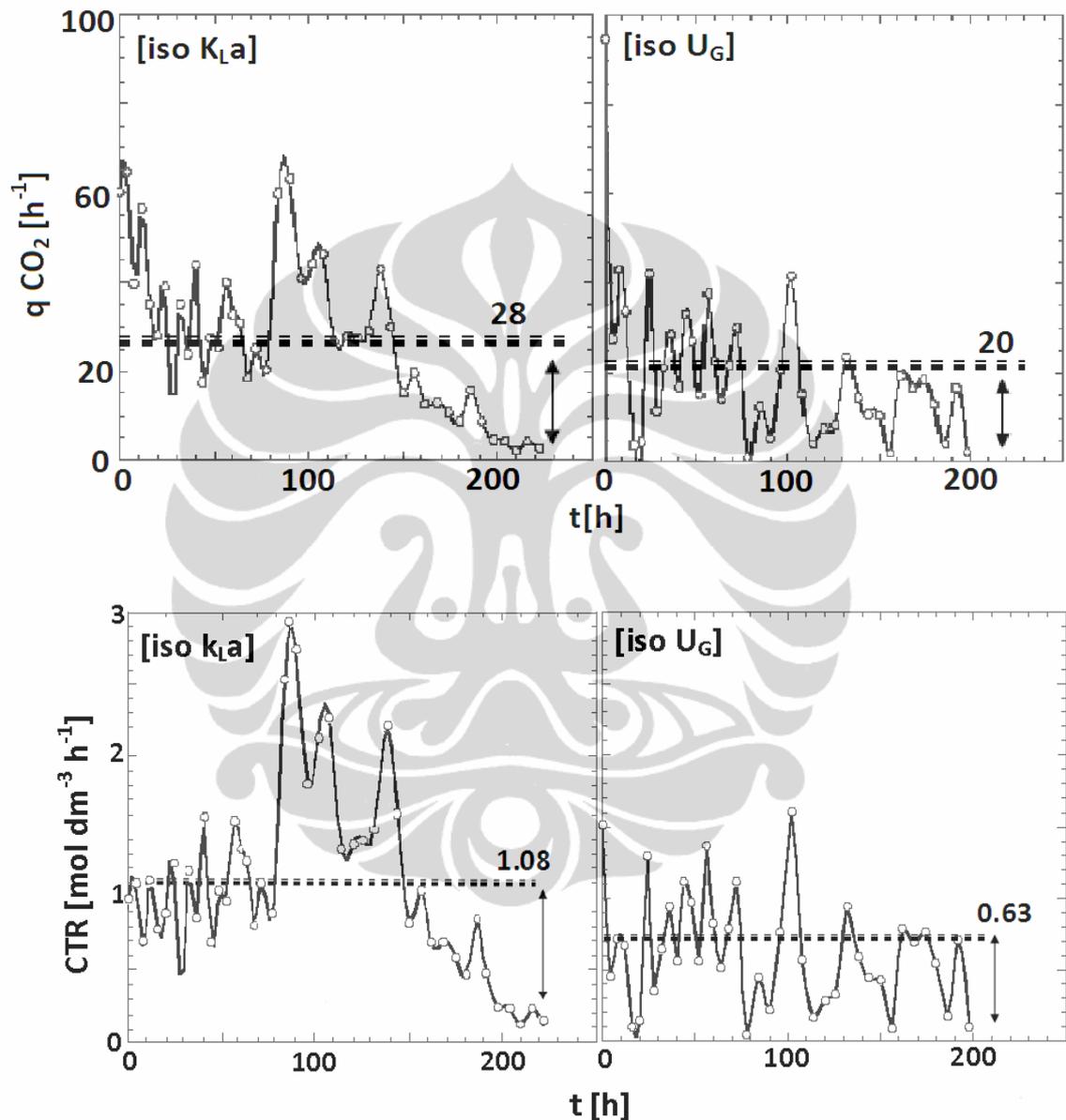
Gambar 4.1.6. Profil $[HCO_3^-]$ dalam medium kultur pada model iso- k_{La} dan iso- U_g

Dari gambar di atas didapatkan nilai maksimum $[HCO_3^-]$ pada kultur kondisi iso- U_g adalah 2,54 mM dan pada kultur kondisi iso- k_{La} adalah 4,16 mM. Dari hasil perhitungan tersebut dapat disimpulkan bahwa pada model iso- k_{La} , konsentrasi spesi ion $[HCO_3^-]$ dalam kultur meningkat 1,64 kali lipat dibandingkan kondisi iso- U_g . Ini sejalan dengan fakta bahwa pada model iso- k_{La} aktivitas sel yang terjadi sangat tinggi.

4.1.3. Pengaruh Model Iso- K_{La} dan Iso- U_g terhadap Laju Fikisasi CO_2 (q_{CO_2}), Laju Transfer Karbon (CTR) dan Laju Konsumsi Carbon (CUR) oleh *Chlorella vulgaris* dalam Media Kultur.

Laju transfer CO_2 spesifik (q_{CO_2}) adalah laju gas CO_2 yang ditransfer dalam suatu volume medium karena adanya aktivitas kehidupan biologi dalam satu satuan waktu tertentu, sedangkan CTR (*Carbon Transfer Rate*) merupakan

banyaknya gas CO_2 yang ditransfer dalam suatu volume medium dan dibutuhkan oleh metabolisme sel selama satu satuan waktu tertentu (Wijanarko, 2003). Kurva kecenderungan q_{CO_2} dan CTR terhadap waktu diperlihatkan pada gambar dibawah ini.

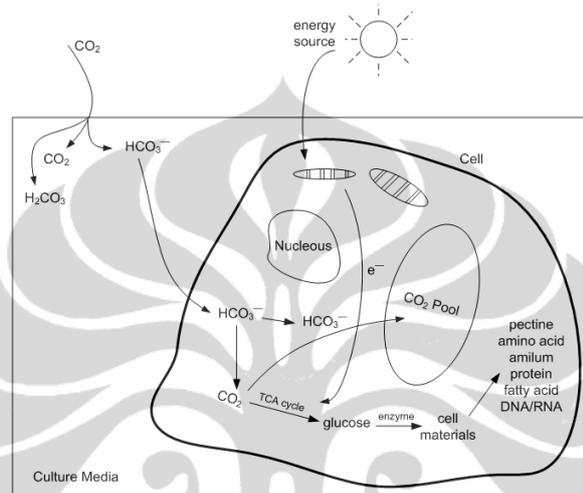


Gambar 4.1.7. Profil q_{CO_2} dan CTR pada model iso- K_{La} dan iso- U_g

Dari Gambar 4.1.7 terlihat bahwa kondisi perlakuan iso K_{La} juga mempengaruhi kemampuan fiksasi *Chlorella vulgaris*. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa nilai rata-rata q_{CO_2} dan CTR yang digunakan untuk

aktivitas biologi *Chlorella vulgaris* pada kondisi iso K_{La} lebih besar hampir 2 kali lipat dibandingkan dengan kondisi iso U_G .

Tingginya nilai CTR maupun q_{CO_2} pada kondisi iso U_G dan K_{La} ini terjadi akibat mekanisme akumulasi CO_2 (CCM, *Carbondioxide Concentrating Mechanism*) intra sel mikro alga eukariotik seperti *Chlorella vulgaris* terjadi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.1.8 dibawah.



Gambar 4.1.8. Mekanisme Akumulasi CO_2 intra sel (Kaplan, 1980)

Sel eukariotik memiliki vakuola yang dapat berfungsi juga sebagai organel pengakumulasi CO_2 intra sel (*CO₂ pool*) sehingga selama proses pertumbuhannya, CO_2 yang diabsorpsi sel relatif lebih besar dibandingkan pada mikro alga prokariotik. Hal ini terjadi karena CO_2 , selain dipergunakan untuk produksi biomassa dalam siklus TCA berikut reaksi enzimatik lainnya, juga diakumulasikan dalam vakuola sebagai cadangan intra sel yang dipergunakan kembali dalam produksi biomassa pada saat transfer CO_2 dari fase gas dalam gelembung udara pengaerasi ke kultur media terhenti (pH kultur media tetap) akibat terjadinya penjumlahan HCO_3^- dalam kultur media. (Wijanarko, 2006)

Parameter lain yang perlu diperhatikan adalah laju konsumsi karbon atau CUR (*Carbon Uptake Rate*). CUR merupakan laju penggabungan CO_2 menjadi biomaterial, yang ditentukan berdasarkan laju pertumbuhan (Ohtaguchi, 1997) atau laju karbon dioksida yang digunakan untuk pertumbuhan dari mikroalga. Biomaterial kering untuk Formula sel dari *C. vulgaris* ditentukan dengan *elemental analysis* yang telah dilakukan di laboratorium departemen Metalurgi UI

dan LEMIGAS yang untuk mengetahui komponen penyusun dari *Chlorella vulgaris*.

Tabel 4.1.3. Hasil uji elemental analisis *Chlorella vulgaris*

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

Dari analisis tersebut akan didapat rumus formula $\text{CH}_{3,3}\text{N}_{0,203}\text{O}_{0,322}\text{P}_{0,041}$ dari *Chlorella vulgaris* yang dimasukkan ke persamaan CUR yaitu :

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

dimana β merupakan berat formula sel.

Dari data yang diperoleh di atas, maka dapat ditentukan besarnya 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 $\text{CH}_x\text{N}_y\text{O}_z\text{P}_A$

Basis : 1 mol karbon

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dengan demikian dari perhitungan di atas didapatkan hasil :

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

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

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

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

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

Rumus Formula sel untuk *Chlorella vulgaris* yaitu :



Setelah mendapatkan rumus formula sel maka nilai β dapat diketahui:

$$\beta = \text{RMF} = 1 (12) + 3,3 (1) + 0,203 (14) + 0,322 (16) + 0,041 (31) = 24,57$$

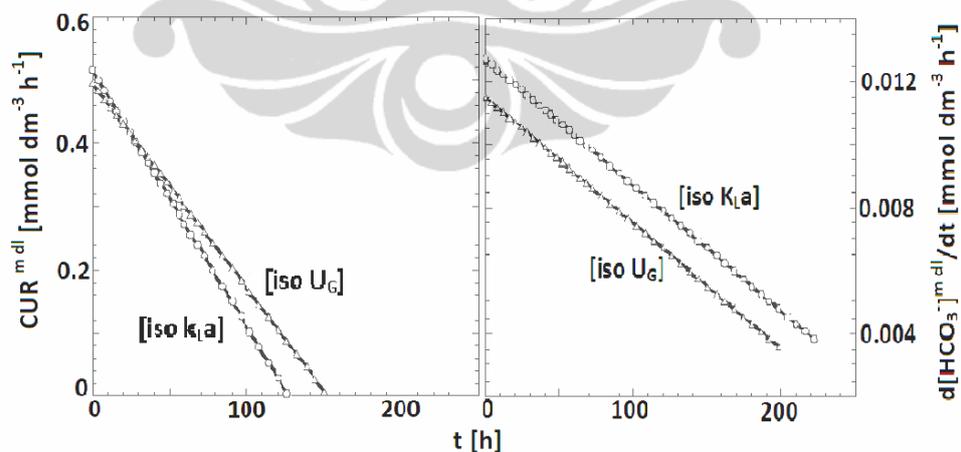
$$\beta = 24,57$$

Dengan memasukan nilai β ke dalam persamaan awal, maka nilai CUR dapat diketahui melalui persamaan di bawah ini:

$$\text{CUR} = \frac{44}{24,57} \cdot \frac{dX}{dt}$$

Sedangkan faktor dX/dt didapat dari turunan persamaan dari grafik hubungan perubahan X terhadap waktu. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada grafik di bawah

ini:



Gambar 4.1.9. Profil CUR dan $d[\text{HCO}_3^-]/dt$ pada model iso- K_{La} dan iso- U_g

Dari gambar 4.1.9 terlihat bahwa nilai CUR untuk kondisi iso K_{La} lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi iso U_G . Hal ini menunjukkan bahwa laju akumulasi CO_2 yang digunakan untuk pertumbuhan pada kondisi iso- K_{La} lebih tinggi. Hal ini juga sejalan dengan fakta bahwa aktivitas sel serta laju pertumbuhan pada kondisi iso- K_{La} lebih tinggi dibandingkan dengan iso U_G . Sedangkan grafik $dHCO_3/dt$ menunjukkan laju akumulasi CO_2 dari kultur yang digunakan untuk pertumbuhan. Seiring berkurangnya laju pertumbuhan maka laju akumulasi dari $dHCO_3/dt$ juga akan menurun. Hal ini diindikasikan dari profil $dHCO_3/dt$ di atas. Perbedaan yang tinggi dari nilai CTR terhadap nilai CUR dan $dHCO_3/dt$ ini kemungkinan disebabkan karena adanya akumulasi CO_2 di dalam membran seluler dan adanya produk ekstraseluler yang dihasilkan ke media kultur.

4.1.4. Analisis Kandungan Esensial dari Sel *Chlorella vulgaris* Hasil Kultivasi

Pada penelitian ini juga dilakukan uji kandungan esensial dari sel *Chlorella vulgaris* hasil kultivasi di atas. Pengujian ini dimaksudkan sebagai salah satu parameter penilaian tentang kinerja fotobioreaktor (volume 40 L) yang digunakan untuk produksi biomassa *C. vulgaris*. Kandungan esensial yang dipilih untuk pengujian ini adalah kandungan lipid, klorofil dan betakaroten. Pemilihan atas ketiga kandungan esensial tersebut dengan pertimbangan bahwa ketiga komponen itulah yang kebanyakan menjadi kandungan esensial yang potensial bagi *C. vulgaris*. Sebagai pembanding, dilakukan juga uji kandungan terhadap *Chlorella* yang di pre-kultur atau yang diaerasi dengan kandungan karbon yang relatif lebih sedikit dibandingkan dengan sel hasil kultivasi.

Tabel 4.1.4. Hasil Uji Kandungan Esensial dari *Chlorella vulgaris*.

Kandungan	Pre-kultur	Setelah Kultivasi	Teoritis*
Beta karoten (ppm)	11,4	9,2	3,3-11,2
Klorofil (ppm)	36,9	16,8	7,0-27,0
Lipid (%)	18,6	16,3	14,0-22,0

*Becker, 2004

Dari tabel di atas dapat dikatakan bahwa secara umum metode kultivasi dengan desain reaktor yang dipilih cenderung menghasilkan produksi biomassa *C. vulgaris* dengan penurunan besarnya kandungan lipid dan betakaroten yang relatif kecil (kurang dari 30 %). Besarnya penurunan ini masih dapat diabaikan, sehingga dapat dikatakan bahwa desain sistem kultivasi yang digunakan dalam penelitian ini masih dapat menghasilkan produksi biomassa dengan tetap mempertahankan banyaknya kandungan lipid dan betakarotennya. Sementara untuk kandungan klorofil terjadi penurunan kandungan cukup besar, sekitar 50 %. Hal ini sangat dimungkinkan mengingat pada saat kultivasi kualitas atau besarnya intensitas cahaya yang digunakan relatif lebih besar daripada saat pre-kultur.

Dari apa yang dipaparkan di atas dapat disimpulkan bahwa produktivitas mikroalga *C. vulgaris* selama kultivasi sangat dipengaruhi oleh fenomena transfer massa yang terjadi di dalam reaktor. Produktivitas *C. vulgaris* akan meningkat bila dapat ditentukan nilai K_{La} tertentu yang optimal untuk pertumbuhan selnya. Dalam penelitian ini didapatkan nilai K_{La} optimum untuk produksi biomassa *C. vulgaris* sebesar 0.303 menit^{-1} .

Dalam rangka upaya meningkatkan produktivitas biomassa *C. vulgaris* pada ukuran reaktor yang lebih besar, maka basis hidrodinamika ini dapat digunakan untuk menghasilkan produk biomassa yang sepadan dengan kondisi terbaik yang diperoleh dari produksi biomassa pada ukuran reaktor yang lebih kecil (skala laboratorium).

4.2. Pengaturan Laju Hisap Filter untuk Mengendalikan Densitas Sel dalam Kultur Media melalui Teknik Filtrasi secara Kontinu untuk Meningkatkan Produksi Biomassa dan Fiksasi CO₂ oleh *Chlorella vulgaris*

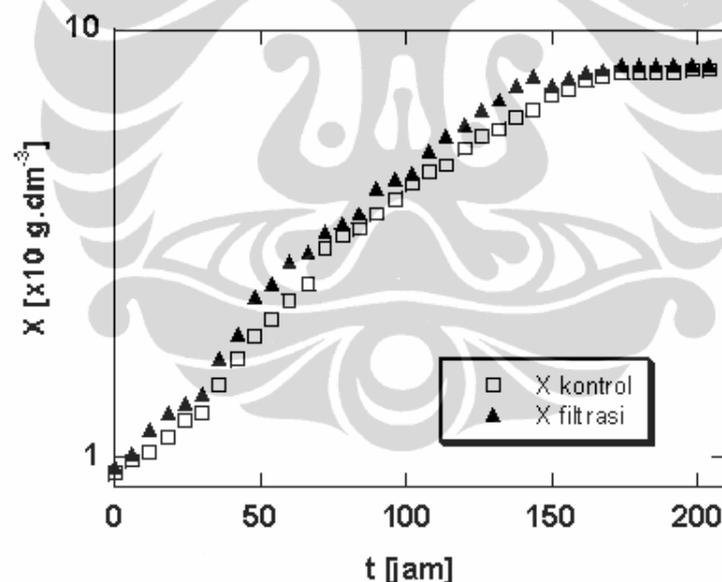
Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* dengan mengatur kondisi reaktor sedemikian rupa pada intensitas pencahayaan yang dijaga tetap. Dengan meninjau bahwa *C. vulgaris* adalah mikroorganisme fotosintesis yang mengubah energi cahaya menjadi senyawa karbon untuk pertumbuhannya, maka faktor cahaya menjadi sangat penting bagi pertumbuhannya. Semakin tinggi intensitas cahaya yang diberikan pada organisme fotosintesis maka laju pertumbuhan spesifik dan produksi biomasanya juga akan semakin tinggi sampai pada titik maksimumnya (Hirata, 1996). Penggunaan intensitas cahaya yang dijaga tetap memiliki keterbatasan karena intensitas yang diberikan selalu konstan padahal jumlah *C. vulgaris* dalam kultur semakin meningkat. Hal ini menjadi penyebab utama terjadinya efek *self shading* pada proses kultivasi *C. vulgaris*. Untuk meminimalkan terjadinya efek *self shading* ini, diperlukan upaya pengaturan pencahayaan sedemikian rupa agar sel-sel tetap menerima pencahayaan secara optimal selama berlangsungnya masa kultivasi.

Peningkatan produksi biomassa *C. vulgaris* dengan pengaturan intensitas cahaya sulit diaplikasikan pada skala yang lebih besar. Salah satu cara yang mungkin dilakukan adalah dengan mengatur densitas sel dalam reaktor pada nilai intensitas cahaya yang dijaga tetap. Pengaturan densitas sel ini dilakukan dengan menggunakan sistem filtrasi secara kontinu dalam sistem fotobioreaktor selama proses kultivasi *C. vulgaris* pada intensitas cahaya yang dijaga tetap.

Pada penelitian ini proses kultivasi dengan perlakuan filtrasi akan dibandingkan tidak hanya dengan sistem kultivasi tanpa filtrasi, tetapi juga akan dibandingkan terhadap proses kultivasi dengan perlakuan alterasi. Untuk dilihat seberapa efektifnya proses kultivasi *C. vulgaris* dengan teknik filtrasi ini sebagai metode pengganti alternatif dari teknik alterasi.

4.2.1. Pengaruh Perlakuan Filtrasi secara Kontinu dengan Pengaturan Laju Hisap Filter terhadap Perolehan Berat Kering *Chlorella vulgaris* (X)

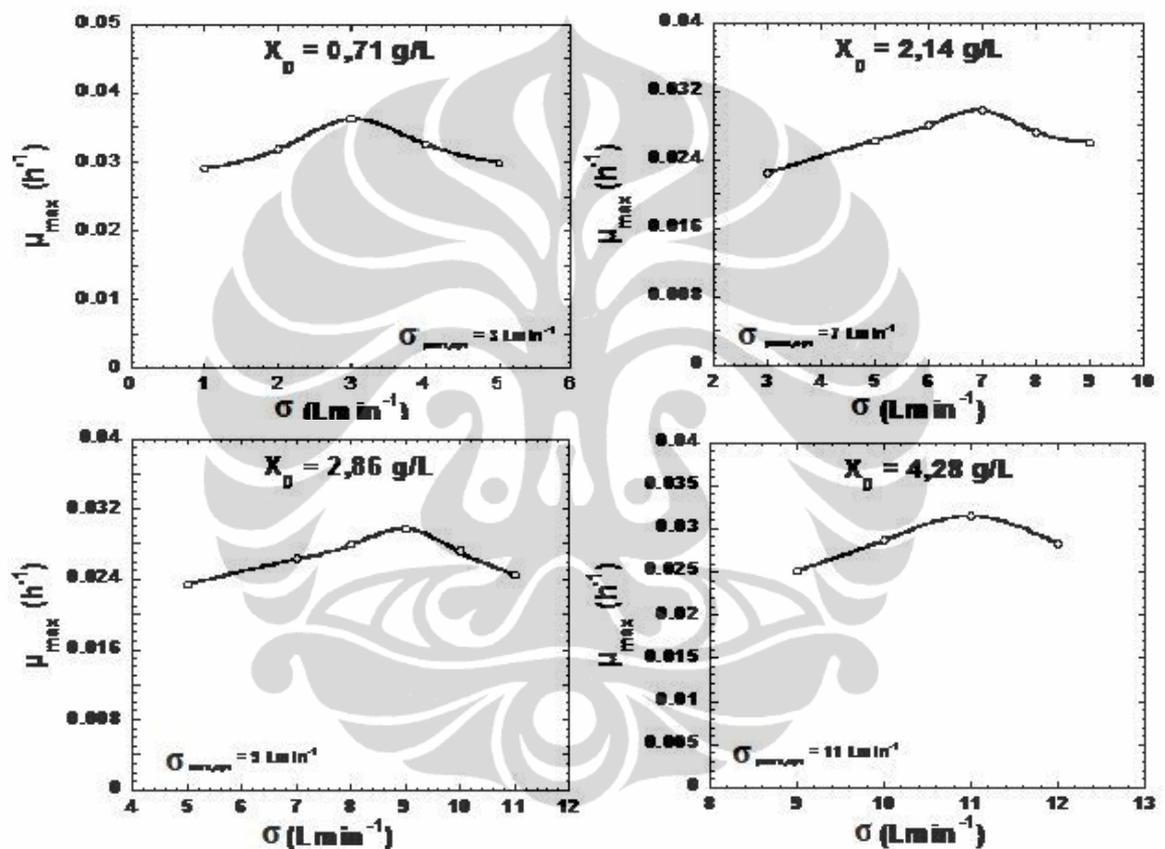
Pada penelitian ini, digunakan inokulum awal dengan berat kering (X) $0,094 \text{ g/dm}^3$ dengan intensitas cahaya yang diatur konstan yaitu sebesar 5000 lux serta dikultivasi dalam waktu 200 jam. Sebagai data pembanding maka dikultur pula *C. vulgaris* dengan diberikan intensitas cahaya yang sama, volume yang sama, serta berat kering yang hampir sama ($0,093 \text{ g/dm}^3$). Selain itu dilakukan juga proses kultivasi dengan perlakuan alterasi. Dalam penelitian sebelumnya telah dilakukan studi awal tentang perlakuan filtrasi secara kontinu pada sistem kultivasi *C. vulgaris*. Dari penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa pengaturan densitas sel dalam reaktor secara kontinu ini telah terbukti memberikan peningkatan terhadap produksi biomassa *C. vulgaris* sebesar 1,03 kali (Dianursanti 2009). Perolehan hasil ini dapat dilihat pada Gambar 4.2.2. berikut ini.



Gambar 4.2.2. Studi Awal Produksi Biomassa *C. vulgaris* pada perlakuan filtrasi dalam aliran sirkulasi media kultur (Dianursanti 2009)

Hasil penelitian awal ini belum optimal. Mengingat besarnya peningkatan produksi biomasanya masih sangat kecil. Upaya optimasi berikutnya yang dilakukan adalah mengatur laju hisap filter untuk menambah kekuatan daya hisap dari filter tersebut. Untuk upaya ini maka pada tahap pertama penelitian ini dilakukan kultivasi terhadap 4 variasi kerapatan sel (X_0) *C. vulgaris*, yaitu $\pm 0,71$

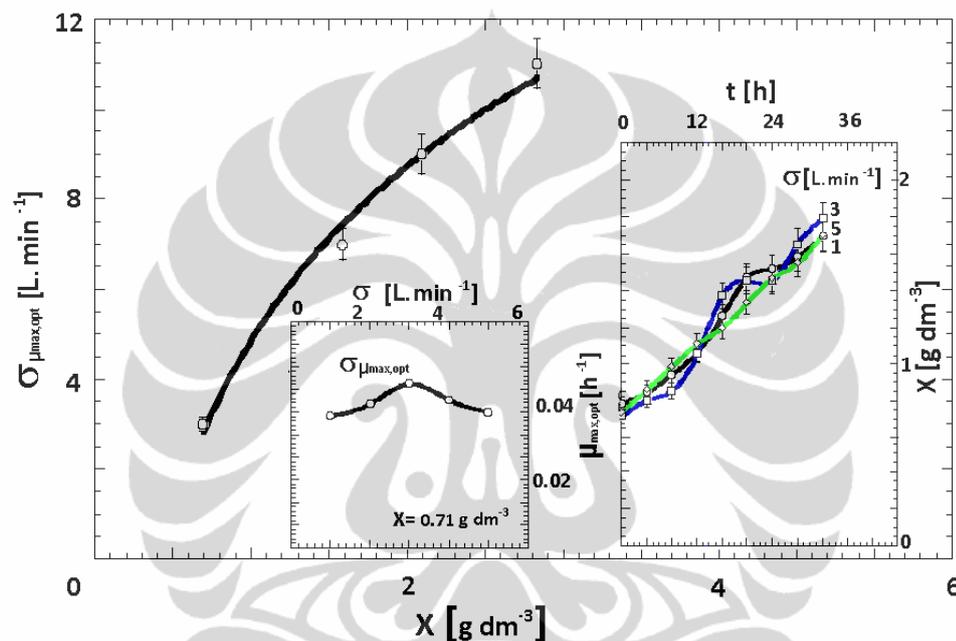
g/L; $\pm 2,14$ g/L; 2,86 g/L; 4,28 g/L pada skala intensitas cahaya 5000 lx sampai 16000 lx dengan pengaturan kecepatan aliran hisap untuk memperoleh laju pertumbuhan spesifik paling maksimum pada inokulum tersebut. $\sigma_{\mu_{\max, \text{opt}}}$ akan didapatkan ketika laju pertumbuhan maksimum (μ_{\max}) *Chlorella vulgaris* pada jumlah inokulum (X_0) tertentu dalam fotobioreaktor kolom gelembung mencapai nilai optimum. Berikut ini adalah profil laju pertumbuhan sel *C. vulgaris* pada berbagai variasi kecepatan aliran hisap untuk beberapa inokulum tertentu.



Gambar 4.2.3. Profil laju pertumbuhan spesifik *Chlorella vulgaris* pada berbagai variasi kecepatan aliran hisap

Kurva-kurva pada gambar di atas diperoleh dari plot nilai μ_{\max} tiap variasi kecepatan aliran hisap (σ) pada inokulum tertentu. Dari gambar tersebut terlihat bahwa semakin banyak jumlah inokulum, maka semakin besar pula kecepatan aliran hisap yang diperlukan untuk mendapatkan laju pertumbuhan paling maksimumnya. Ini membuktikan bahwa fotobioreaktor adalah suatu sistem yang homogen pada setiap titik dimana jumlah sel mikroalga tersebar secara merata,

sehingga semakin tinggi inokulum diperlukan kecepatan aliran hisap yang lebih besar agar seluruh permukaan sel mendapatkan intensitas cahaya yang cukup. Karena setiap kerapatan memiliki kecepatan aliran hisap untuk laju pertumbuhan paling maksimum ($\sigma_{\mu_{max,opt}}$) tertentu, maka dapat dibuat plot antara berat kering sel/biomassa (X) dan $\sigma_{\mu_{max,opt}}$, dapat dilihat sebagai berikut.

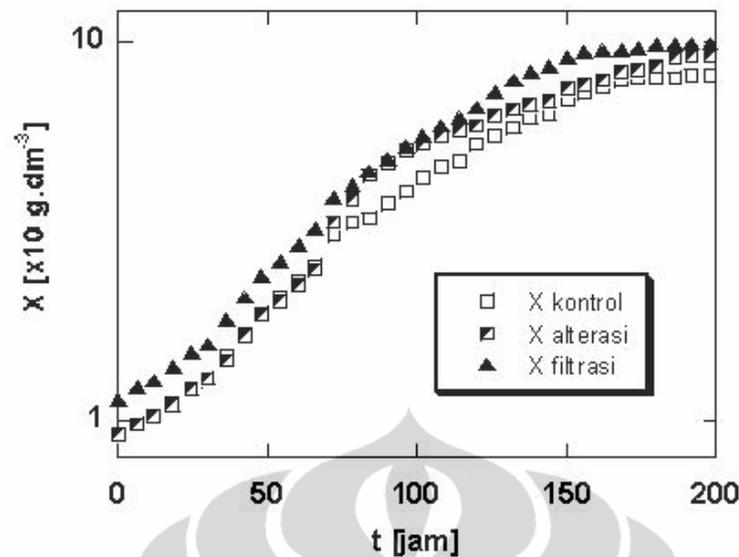


Gambar 4.2.4. Nilai $\sigma_{\mu_{max,opt}}$ pada Berbagai Berat Kering Sel (X) (Dianursanti, 2012)

Kurva ini akan menjadi acuan pada proses kultivasi dengan perlakuan filtrasi. Persamaan korelasi yang diperoleh dari kurva tersebut adalah

$$\sigma_{\mu_{max,opt}} = 0,773 + 3,229X - 0,136X^2$$

Pada proses ini dilakukan pengaturan kecepatan hisap dimana kecepatan hisap akan menggunakan $\sigma_{\mu_{max,opt}}$ dan akan selalu ditingkatkan sesuai dengan perkembangan produksi biomassa (X) selama masa kultivasi. Berikut ini adalah hasil kultivasi dengan 3 jenis perlakuan, yaitu kondisi normal (kontrol), perlakuan alterasi dan perlakuan filtrasi atau filtrasi secara kontinu.



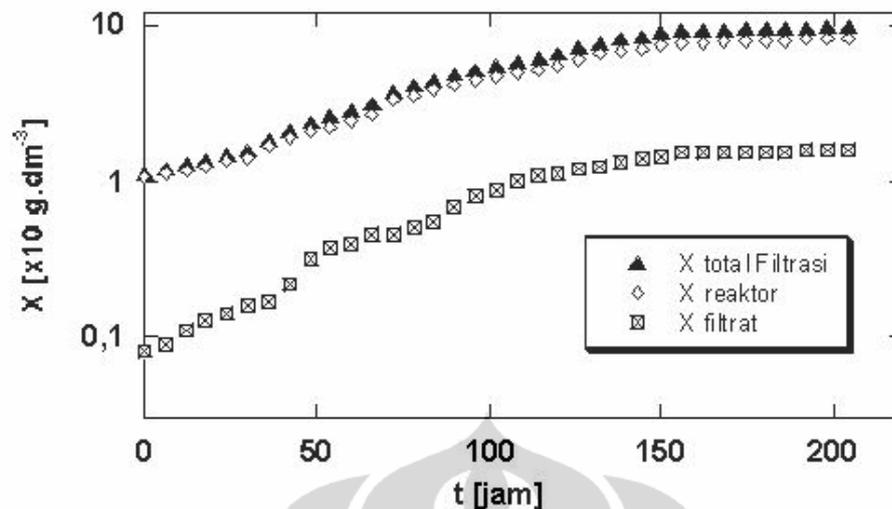
Gambar 4.2.5. Profil Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* pada perlakuan alterasi dan filtrasi dibandingkan dengan kondisi kultivasi tanpa perlakuan.

Pada grafik tersebut, dapat dilihat bahwa pada jam-jam pertama, pertumbuhan berat kering *Chlorella* pada ketiga perlakuan di atas meningkat dengan pesat. Hal ini sesuai dengan kurva masa pertumbuhan *C. vulgaris* dimana setelah fase *lag* (fase adaptasi) pada awal kultivasi, *Chlorella* akan mengalami fase pertumbuhan logaritmik dengan laju pertumbuhan yang maksimum.

Proses kultivasi dengan perlakuan alterasi dan filtrasi dalam penelitian ini cenderung menghasilkan perolehan biomassa yang lebih tinggi dibandingkan dengan proses kultivasi yang tidak mengalami perlakuan apa-apa (kontrol). Hal ini karena pada perlakuan alterasi dan perlakuan filtrasi, terjadinya efek *self shading* pada sel dapat lebih diminimalkan. Perlakuan alterasi merupakan metode pemberian cahaya dengan intensitas tertentu yang disesuaikan dengan besarnya banyaknya biomassa *C. vulgaris* yang dihasilkan selama masa kultivasi. Adanya perlakuan ini memungkinkan *C. vulgaris* tetap mendapatkan pencahayaan yang lebih baik seiring dengan bertambahnya jumlah biomassa selama proses kultivasi. Fenomena yang dihasilkan ini sesuai dengan hasil penelitian yang dicapai oleh peneliti lain yang menyatakan bahwa semakin tinggi intensitas cahaya yang diberikan pada organisme fotosintesis maka laju pertumbuhan spesifik dan produksi biomasanya juga akan semakin tinggi sampai pada titik maksimumnya (Hirata, 1996). Peningkatan intensitas yang diberikan mengacu pada penelitian

sebelumnya yang dilakukan oleh Wijanarko pada tahun 2006. Grafik yang diacu terdapat pada Gambar 2.8 (pada bab II). Pada penelitian terdahulu tersebut, metode alterasi yang dilakukan pada proses kultivasi *Chlorella vulgaris* dengan volume reaktor 1 dm³, dapat memberikan peningkatan produksi biomassa sebesar 60% (Wijanarko, 2006). Namun demikian, apa yang dihasilkan saat ini dengan metode yang sama pada volume reaktor 24 dm³ (dengan volume medium kultur sebesar 18 dm³), perlakuan alterasi ini belum mampu menyamai perolehan hasil peningkatan biomassa dengan penelitian terdahulu. Dengan ukuran volume yang lebih besar ini, perlakuan alterasi pada proses kultivasi *C. vulgaris* hanya mampu meningkatkan produksi biomasanya sebesar 1,13 kali dari proses kultivasi kontrol. Hal ini disebabkan sistem desain pencahayaan yang digunakan kurang mampu memberikan pencahayaan yang optimal seiring dengan bertambahnya biomassa dalam kultur media. Ketidakefektifan ini bisa jadi dikarenakan oleh semakin besarnya sistem reaktor yang digunakan dan semakin besarnya jumlah perolehan biomassa selama proses kultivasi, sehingga sistem pencahayaan dengan perlakuan alterasi akan memerlukan kekuatan intensitas pencahayaan yang lebih besar lagi dibandingkan dengan penelitian terdahulu. Sementara itu dengan perlakuan filtrasi secara kontinu dalam bioreaktor menghasilkan peningkatan produksi yang lebih besar yaitu sebesar 1,25 kali dari proses kultivasi kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan filtrasi telah berhasil mengatur kondisi densitas sel sedemikian rupa sehingga intensitas cahaya yang diberikan dapat tetap mencukupi kebutuhan sel selama proses kultivasi. Dalam hal ini, dapat pula dikatakan bahwa perlakuan filtrasi ini terbukti dapat meminimalkan efek *self shading*.

Perlakuan filtrasi pada proses kultivasi *C. vulgaris* merupakan salah metode yang alternatif yang potensial untuk dikembangkan dalam produksi biomassa alga yang lebih besar lagi. Metode ini tidak saja hanya berpotensi dalam upaya peningkatan produksi alga melalui pengaturan densitasnya, tetapi juga berpotensi sebagai metode alternatif untuk pemanenan biomasanya. Berikut ini adalah gambaran mengenai perolehan biomassa dalam sistem kultivasi *C. vulgaris* menggunakan teknik filtrasi.



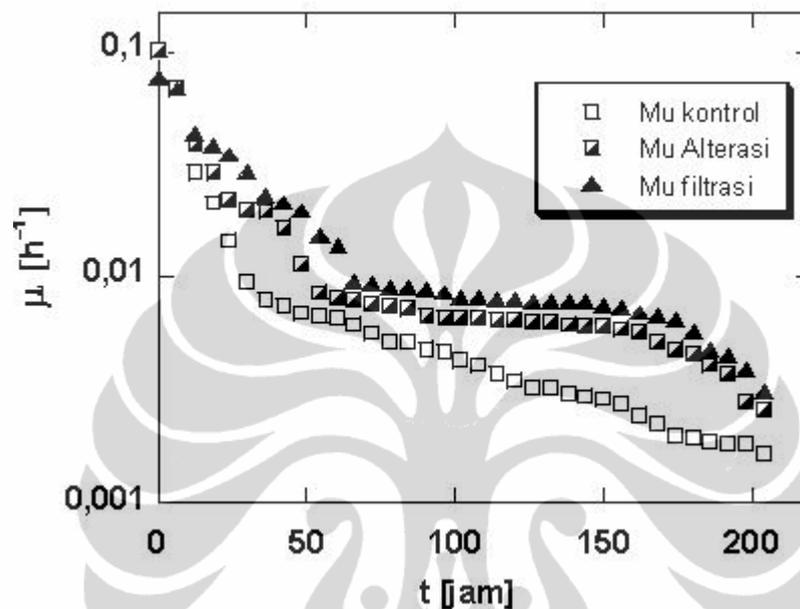
Gambar 4.2.6. Profil perolehan berat kering sel *Chlorella vulgaris* dalam sistem kultivasi menggunakan teknik filtrasi secara kontinu.

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa perlakuan filtrasi ini belum dapat menjaga densitas sel di dalam reaktor pada nilai yang tetap. Penjagaan ini dimaksudkan agar pencahayaan yang diberikan pada sel di dalam reaktor dapat tetap diterima secara optimal seiring dengan adanya pertambahan biomasanya selama proses kultivasi. Namun demikian perlakuan ini telah terbukti telah mampu meminimalkan terjadinya efek self shading selama proses kultivasi, dibuktikan dengan adanya peningkatan produksi biomassa yang lebih baik dibandingkan dengan perlakuan alterasi.

4.2.2. Pengaruh Perlakuan Filtrasi dengan Pengaturan Laju Hisap Filter terhadap Laju Pertumbuhan (μ)

Laju pertumbuhan *Chlorella* pada media kultur selama masa kultivasi berada dalam fase logaritmik dimana laju pertumbuhan berada pada titik maksimal lalu seiring bertambahnya waktu akan terus menurun hingga memasuki fase stasioner. Dari Gambar 4.2.7, dapat dilihat bahwa pada proses kultivasi biasa (kontrol), laju pertumbuhan sel cenderung menurun seiring dengan bertambahnya waktu. Sementara itu pada perlakuan alterasi dan filtrasi secara kontinu, penurunan laju pertumbuhan selnya lebih landai, bahkan pada rentang sekitar jam ke-60 hingga jam ke-170 besarnya laju pertumbuhan pada kedua perlakuan kultivasi tersebut masih dapat dijaga konstan. Baru setelahnya mulai terjadi penurunan kembali. Perlakuan sistem filtrasi secara kontinu dan alterasi memberikan hasil

rata-rata pertumbuhan sel yang lebih tinggi dibandingkan dengan proses kultivasi tanpa perlakuan (kontrol). Hal ini sesuai dengan perolehan hasil berat kering sel di atas bahwa kedua perlakuan ini telah berhasil membuat kondisi densitas sel dalam reaktor sedemikian rupa sehingga pencahayaan yang diberikan masih dapat diterima secara optimal oleh sel selama masa kultivasi.



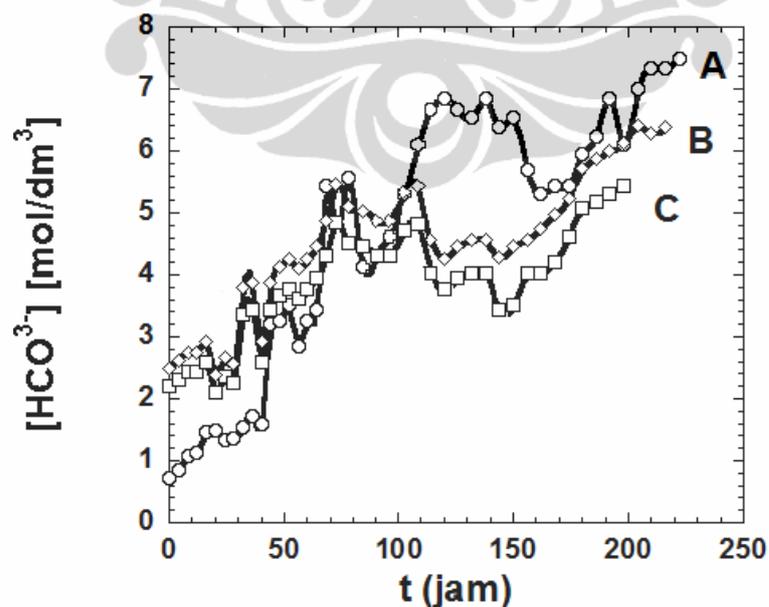
Gambar 4.2.7. Profil laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada perlakuan alterasi dan filtrasi dibandingkan dengan kondisi kultivasi tanpa perlakuan.

Sementara itu proses kultivasi dengan sistem filtrasi secara kontinu berhasil meningkatkan laju pertumbuhan biomassa yang lebih tinggi dibandingkan alterasi. Hal ini sebagaimana telah disebutkan di atas, bahwa pada sistem alterasi yang dilakukan, masih belum bisa memberikan kekuatan cahaya yang optimal yang diperlukan sel selama proses kultivasi. Semakin besar ukuran reaktor yang digunakan dan lamanya waktu kultivasi maka akan membuat kebutuhan intensitas cahaya yang juga semakin besar. Namun tidak demikian halnya dengan sistem kultivasi dengan perlakuan filtrasi secara kontinu, dimana penambahan intensitas cahaya tidak lagi diperlukan selama masa kultivasi karena adanya filtrasi dalam reaktor sebagai upaya pengaturan densitas sel menggunakan media filter. Dengan adanya pemerangkapan sebagian biomassa selama berjalan kultivasi akan membuat kondisi densitas sel dalam reaktor menjadi terjaga dan intensitas cahaya yang diberikan dapat terus diterima oleh sel secara optimal.

4.2.3. Pengaruh Perlakuan Filtrasi dengan Pengaturan Laju Hisap Filter terhadap Konsumsi $[\text{HCO}_3^-]$ oleh Sel *Chlorella vulgaris* dalam Media Kultur.

Perhitungan terhadap $[\text{HCO}_3^-]$ dimaksudkan untuk mengetahui jumlah $[\text{HCO}_3^-]$ yang tersedia, yang dapat dikonsumsi oleh sel *C. vulgaris* dalam pertumbuhannya. Senyawa bikarbonat $[\text{HCO}_3^-]$ sendiri terbentuk karena adanya reaksi antara CO_2 terlarut dalam larutan medium dengan air. Konsentrasi $[\text{HCO}_3^-]$ dihitung dari perubahan pH kultur yang terjadi sebagai akibat adanya aktivitas pertumbuhan sel *C. vulgaris*. Peningkatan nilai pH ini masih berkisar mulai dari pH 6,5 hingga 7,5 (Lampiran A). Rentang tersebut masih berada dalam rentang optimum pertumbuhannya yaitu sekitar pH 6 hingga 8 (Becker, 2004).

Dengan menggunakan persamaan (3.3) yaitu persamaan hukum Henry, dapat dicari besarnya konsentrasi $[\text{HCO}_3^-]$ yang terbentuk dalam kultur. Karena besarnya konsentrasi spesi ion $[\text{HCO}_3^-]$ sebanding dengan besarnya nilai pH, maka nilai spesi ion tersebut akan semakin besar dengan naiknya nilai pH dalam medium kultur.

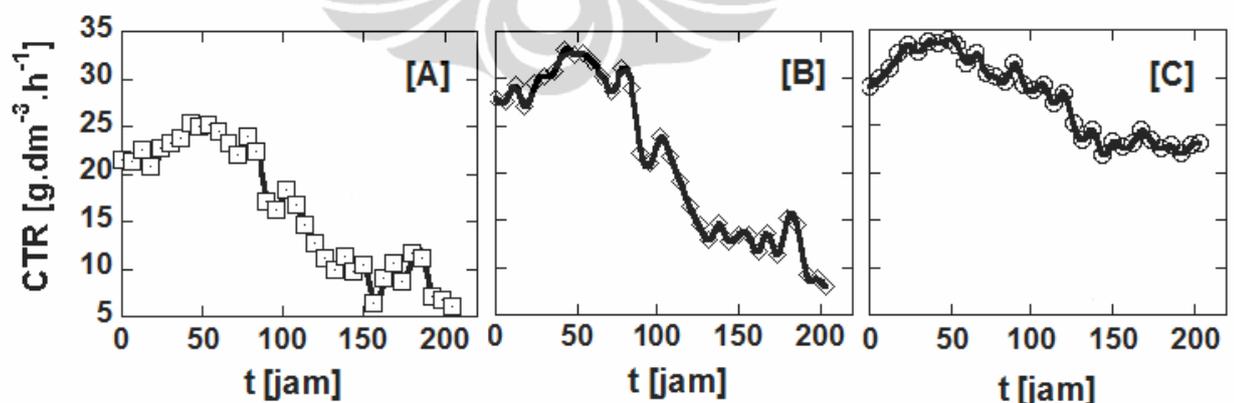


Gambar 4.2.8. Pengaruh sistem filtrasi terhadap profil $[\text{HCO}_3^-]$ dalam medium kultur dengan A: kontrol; B:kultivasi alterasi; C:kultivasi filtrasi

Dari gambar di atas terlihat bahwa $[\text{HCO}_3^-]$ pada proses kultivasi alterasi dan filtrasi secara kontinu menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan $[\text{HCO}_3^-]$ pada proses kultivasi kontrol. Hal ini sejalan dengan fakta bahwa pada pengaturan pencahayaan (alterasi) dan pengaturan kecepatan hisap dengan perlakuan filtrasi menghasilkan aktivitas sel yang terjadi lebih baik dibandingkan dengan proses kultivasi kontrol.

4.2.4. Pengaruh Teknik Filtrasi dengan Pengaturan Aliran Hisap (σ) terhadap Laju Fiksasi CO_2 (q_{CO_2}), Laju Transfer Karbon (CTR) dan Laju Konsumsi Carbon (CUR) oleh Sel *Chlorella vulgaris* dalam Media Kultur.

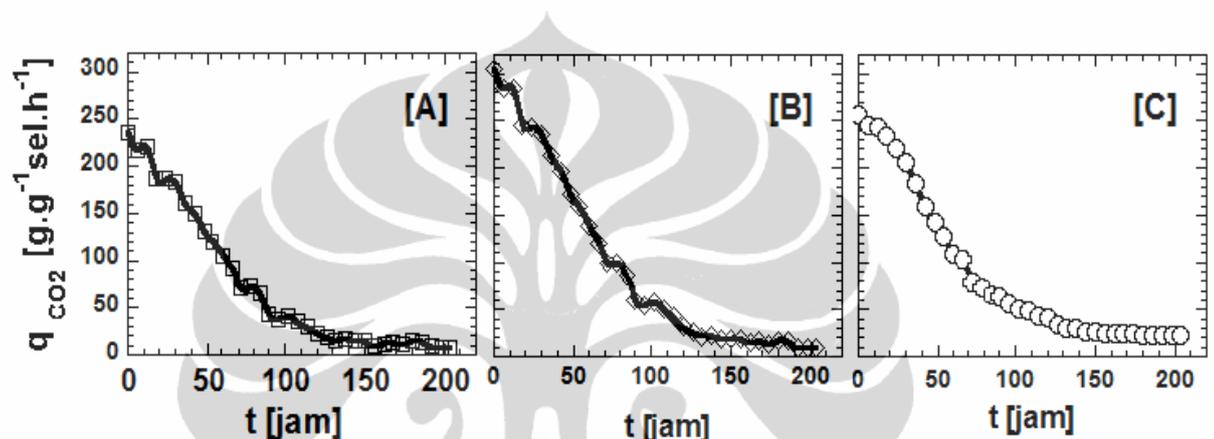
Laju transfer CO_2 spesifik (q_{CO_2}) adalah laju gas CO_2 yang ditransfer dalam suatu volume medium karena adanya aktivitas kehidupan biologi dalam satu satuan waktu tertentu, sedangkan CTR (*Carbon Transfer Rate*) merupakan banyaknya gas CO_2 yang ditransfer dalam suatu volume medium dan dibutuhkan oleh metabolisme sel selama satu satuan waktu tertentu (Wijanarko, 2003). Kurva kecenderungan q_{CO_2} dan CTR terhadap waktu diperlihatkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.2.9. Pengaruh pengaturan kecepatan hisap dalam teknik filtrasi terhadap profil CTR dalam medium kultur. A: Kultivasi biasa (kontrol); B: Kultivasi dengan alterasi; C: Kultivasi dengan teknik filtrasi

Tabel 4.2.1. Nilai rata-rata CTR kultivasi *C. vulgaris* pada beberapa perlakuan

Jenis Perlakuan	Nilai Rata-rata CTR [$\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}\cdot\text{jam}^{-1}$]
Kultivasi biasa (kontrol)	16,43
Kultivasi dengan alterasi	21,44
Kultivasi dengan filtrasi	27,92



Gambar 4.2.10. Pengaruh pengaturan kecepatan hisap dalam sistem filtrasi terhadap profil q_{CO_2} dalam medium kultur: A: Kultivasi biasa (kontrol); B: Kultivasi dengan alterasi; C: Teknik Filtrasi

Tabel 4.2.2. Nilai rata-rata q_{CO_2} kultivasi *Chlorella vulgaris* pada beberapa perlakuan

Jenis Perlakuan	Nilai Rata-rata q_{CO_2} [$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{sel}\cdot\text{jam}^{-1}$]
Kultivasi biasa (kontrol)	73,97
Kultivasi dengan alterasi	97,72
Kultivasi dengan filtrasi	88,67

Dari Gambar 4.2.9. dan Gambar 4.2.10 terlihat bahwa kondisi perlakuan alterasi dan filtrasi juga mempengaruhi kemampuan fiksasi *C. vulgaris*. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa nilai CTR rata-rata dan q_{CO_2} yang digunakan untuk aktivitas biologi *C. vulgaris* pada kondisi alterasi lebih besar sekitar 1,3 kali

lipat dibandingkan dengan kondisi kultivasi kontrol. Sementara itu pada perlakuan teknik filtrasi secara kontinu (filtrasi) nilai CTR rata-rata yang digunakan untuk aktivitas biologi tampak lebih besar 1,7 kali dibandingkan kondisi kultivasi kontrol. Namun peningkatan nilai q_{CO_2} yang dihasilkan dengan perlakuan teknik filtrasi secara kontinu tidak sebesar peningkatan CTR nya, yaitu sebesar 1,2 kali. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah karbon yang diserap oleh *Chlorella vulgaris* melalui teknik filtrasi ini tidak sebesar jumlah karbon yang diserap pada perlakuan alterasi. Namun demikian perbedaan nilai ini tidak signifikan, sehingga dapat dikatakan bahwa kedua perlakuan di atas memiliki potensi yang sama dalam mereduksi gas CO_2 dengan baik.

Dari apa yang dipaparkan di atas dapat disimpulkan bahwa produktivitas mikroalga *C. vulgaris* selama kultivasi sangat dipengaruhi oleh kondisi pencahayaan dalam reaktor. Pengaturan densitas sel dalam reaktor secara kontinu dengan perlakuan pengaturan laju alir hisap ini telah terbukti memberikan peningkatan terhadap produksi biomassa *C. vulgaris* sebesar 25%. Hal ini berarti perlakuan teknik filtrasi secara kontinu telah berhasil dalam memperpanjang waktu fase logaritmik dari kultivasi *C. vulgaris*. Perlakuan filtrasi secara kontinu dalam sistem kultivasi *C. vulgaris* juga berhasil meningkatkan perolehan nilai CTR dan q_{CO_2} nya sebesar masing-masing 1,7 dan 1,2 kali dari kultivasi biasa. Dengan demikian metode ini sangat potensial untuk dikembangkan sebagai alternatif untuk mereduksi keberadaan gas rumah kaca, CO_2 . Metode pengaturan sel dengan teknik pemerangkapan secara kontinu ini diyakini juga cukup potensial untuk dikembangkan sebagai metode untuk produksi biomassa, mengingat bahwa dari hasil uji kandungan esensial seperti lipid dan betakaroten dalam sel nya tidak mengalami pengurangan yang berarti.

4.3. Optimasi Sistem Aerasi dalam Kultur Media untuk Meningkatkan Produksi Biomassa dan Fiksasi CO₂ dari *Chlorella vulgaris*

Kinerja bioproduksi alga sangat tergantung pada metabolisme yang dilakukan oleh mikroalga. Proses kultivasi/produksi biomassa mikroalga memerlukan suplay CO₂ secara kontinu untuk menjaga keberlangsungan aktivitas fotosintetik dari mikroalga. Sementara itu lamanya waktu kultivasi atau besarnya volume reaktor yang diperlukan untuk mencapai produktivitas yang diinginkan sangat bergantung pada laju pertumbuhan mikroalga tersebut. Besarnya laju pertumbuhan ini sangat dipengaruhi oleh salah satu fenomena fisik yaitu perpindahan massa. Perpindahan massa akan menjadi sangat berarti manakala proses melibatkan beberapa fase.

Nilai K_{La} (CO₂) merupakan parameter hidrodinamika umum yang sering digunakan untuk menilai kinerja bioreaktor dalam proses kultivasi alga. Koefisien ini secara umum menggambarkan kondisi transfer massa yang terjadi di dalam reaktor. Koefisien ini dipengaruhi oleh: laju pengadukan, tipe distributor gas/sparger dan temperatur. Untuk proses kultivasi alga ini diperlukan nilai K_{La} (CO₂) yang optimal. Nilai K_{La} yang tinggi menunjukkan proses transfer massa CO₂ yang lebih baik dalam kultur mikroalga. Namun tidak selamanya nilai K_{La} (CO₂) yang besar baik untuk pertumbuhan kultur alga. Nilai K_{La} (CO₂) yang terlalu besar sangat mungkin menyebabkan terjadinya *shear stress* pada alga (Ugwu, 2007). Fenomena ini dapat menghambat pertumbuhan alga, sehingga harus dihindari.

Proses kultivasi *C. vulgaris* dalam penelitian ini akan berlangsung dalam fotobioreaktor dengan ukuran volume 18 L. Selama ini aerator yang digunakan adalah sejenis aerator akuarium yang terbuat dari plastik dengan ukuran diameter pipa 1,5 cm, diameter lubang aerator 2 mm dan jarak antar lubang aeratornya sebesar 1 cm. Dengan spesifikasi aerator seperti itu, maka untuk kultivasi alga dalam volume 18 liter diperlukan laju alir gas sebesar 8 L/menit, dengan nilai K_{La} CO₂ sebesar 0,005 detik⁻¹ dan kemampuan fiksasi CO₂ dari *Chlorella vulgaris* dalam media kultur berkisar antara 10-40% saja. Untuk dapat lebih mengoptimalkan pertumbuhan alga *C. vulgaris* dan kemampuan biofiksasinya dalam kultur diperlukan adanya upaya peningkatan nilai K_{La} CO₂ nya. Namun

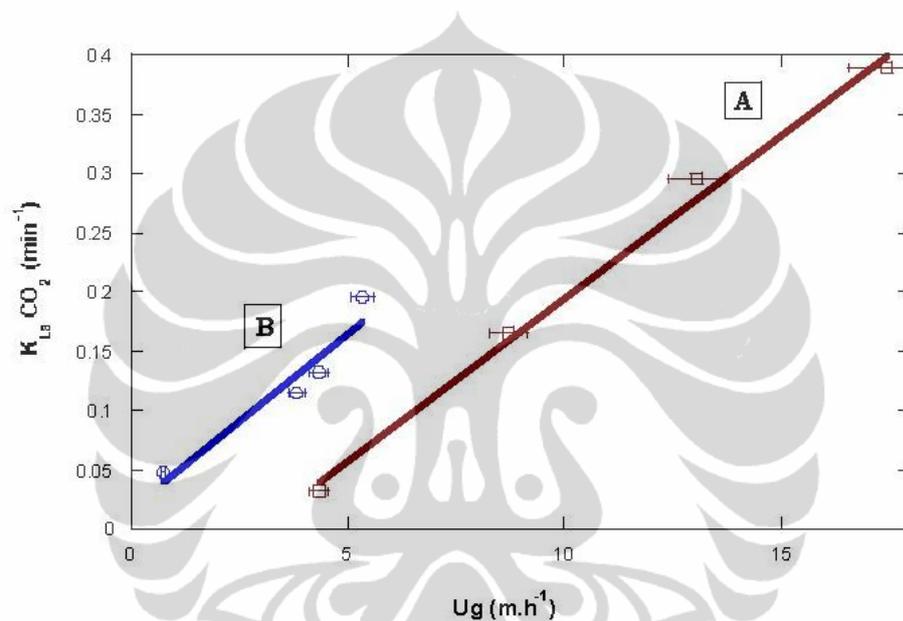
peningkatan nilai ini biasanya dilakukan dengan memperbesar nilai laju alir gas yang diberikan. Adanya upaya memperbesar laju alir gas ini akan mempunyai dampak yang kurang baik bagi pertumbuhan alga, yaitu adanya efek *shear stress* yang dapat mengganggu metabolisemenya. Selain itu peningkatan laju alir pun belum tentu serta merta menaikkan nilai K_{La} CO_2 nya, tak jarang malah menyebabkan penurunan nilainya yang disebabkan oleh semakin singkatnya waktu tinggal gasnya dalam media kultur akibat adanya kecepatan laju alir gas yang lebih besar.

Penelitian pemanfaatan membran serat berongga sebagai aerator dalam kultivasi *Chlorella vulgaris* ini dirasakan dapat mengatasi permasalahan hidrodinamik di atas. Selama ini membran serat berongga mulai banyak digunakan sebagai kontaktor gas-cair yang diantaranya adalah dalam proses penyerapan CO_2 dari aliran gas. Namun pada penelitian ini, membran serat berongga akan dimanfaatkan sebagai aerator dalam kultivasi mikroalga *C. vulgaris*. Serat membran berongga mempunyai dua fungsi utama yaitu sebagai tahanan tekanan gas yang diberikan ke dalam kultur sehingga dapat menurunkan efek *shear stress* yang mungkin terjadi pada alga dan untuk memperluas permukaan kontak gas-cair, sehingga efisiensi perpindahan massa gas CO_2 dalam media kultur menjadi jauh lebih tinggi. Selain itu ukuran pori membran yang relatif kecil diharapkan dapat menghasilkan ukuran gelembung gas yang berukuran kecil juga sehingga memungkinkan terjadinya proses transfer massa gas CO_2 ke dalam kultur yang lebih efisien dibandingkan dengan proses yang selama ini ada. Hal ini berarti bahwa nilai K_{La} (CO_2) yang akan diperoleh pun juga lebih besar dibandingkan sebelumnya. Proses transfer massa gas CO_2 yang efisien tentunya akan berdampak langsung pada peningkatan produksi biomassa *C. vulgaris* serta kemampuan biofiksasi CO_2 nya.

Penggunaan membran ini juga akan dipadukan dengan sistem filtrasi dalam kultur. Sebagaimana yang telah dibuktikan pada penelitian terdahulu, bahwa filtrasi dalam kultur media memberi peluang yang baik, tidak saja bagi produksi mikroalga secara berkelanjutan, tetapi juga berdampak positif terhadap peningkatan kemampuan fiksasi CO_2 dan sekaligus menjadi metode baru dalam sistem pemanenan biomassa secara simultan.

4.3.1. Pengaruh Penggunaan Membran Serat Berongga sebagai *Sparger* terhadap Produksi Biomassa *C. vulgaris*.

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah menentukan nilai K_{La} pada berbagai nilai U_g untuk kedua ukuran desain reaktor, serta korelasi diantara keduanya. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

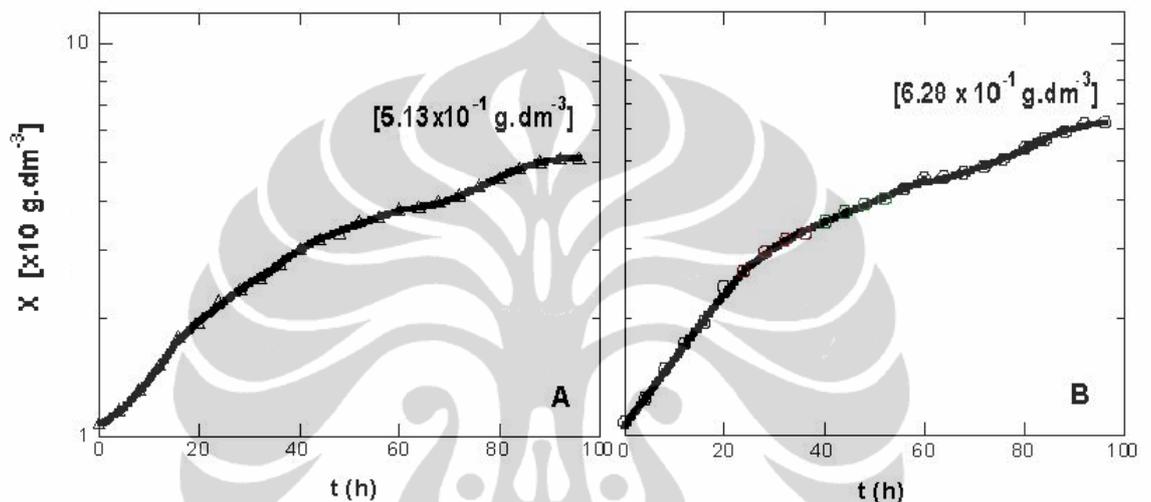


Gam

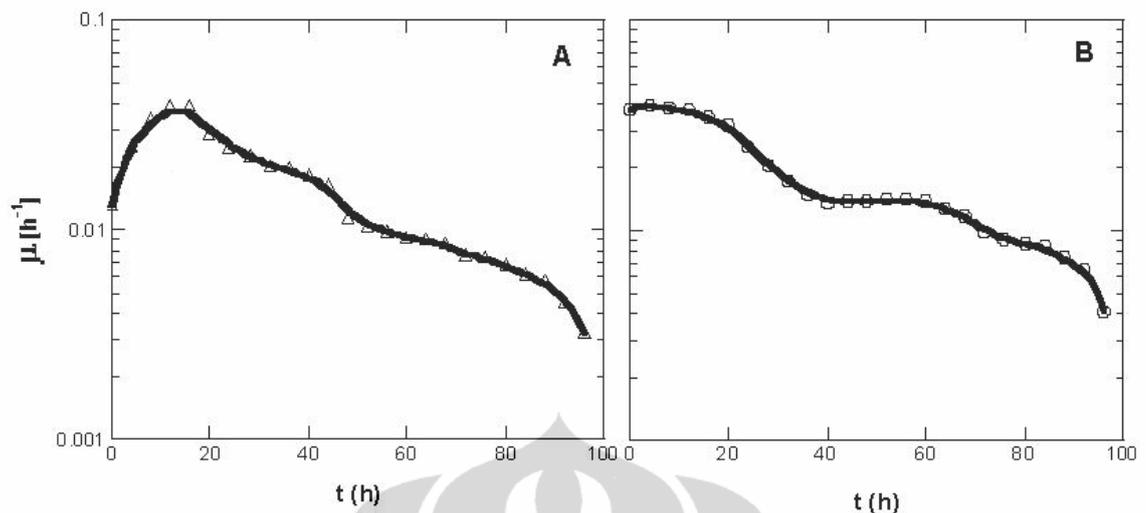
bar 4.3.2. Grafik Korelasi antara K_{La} dan U_g pada *sparger* biasa (A) dan *sparger* membran (B)

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa untuk sistem aerasi dengan *sparger* membran pada laju alir gas yang sama memiliki nilai K_{La} (CO_2) yang jauh lebih besar dibandingkan dengan sistem aerasi dengan *sparger* biasa. Dengan kata lain, untuk mencapai nilai K_{La} tertentu yang sama laju alir gas pada *sparger* membran jauh lebih kecil daripada sistem aerasi pada *sparger* biasa. Hal ini tentunya membawa keuntungan tersendiri bagi peningkatan produktivitas biomassa alga, karena untuk meningkatkan K_{La} (CO_2), dengan adanya penggunaan *sparger* membran tidak lagi memerlukan laju alir gas yang tinggi. Dengan demikian efek *shear stress* pada alga dapat dihindari.

Kegiatan selanjutnya adalah dilakukan proses kultivasi (tanpa perlakuan filtrasi) dengan menggunakan laju alir hasil penentuan dari studi hidrodinamika di atas. Pada sparger biasa, uji hidrodinamika telah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Untuk sistem dengan *sparger* biasa, kondisi U_g optimumnya adalah 15,2 m/jam atau laju alir gas = $8.57 \text{ dm}^3 \cdot \text{menit}^{-1}$. Sementara itu untuk sistem dengan *sparger* membran digunakan U_g sebesar 3,55 m/jam atau laju alir gas = $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{menit}^{-1}$. Hasil produksi biomassa yang diperoleh adalah:



Gambar 4.3.3. Profil Pertumbuhan Biomassa *Chlorella vulgaris* pada *sparger* biasa (A) dan *sparger* membran (B).



Gambar 4.3.4. Profil Laju Pertumbuhan Spesifik *Chlorella vulgaris* pada *sparger* biasa (A) dan *sparger* membran (B).

Dari kedua gambar di atas dapat dilihat bahwa *sparger* membran telah mampu menghasilkan peningkatan produksi biomassa sebesar 22,5 %. Nilai ini hampir mendekati nilai yang dicapai oleh sistem dengan *sparger* biasa menggunakan sistem filtrasi (25%). Keistimewaan dari pencapaian ini adalah bahwa pada penggunaan *sparger* membran serat berongga, laju alir gas yang dibutuhkan untuk volume yang sama jauh lebih kecil dibandingkan dengan sistem *sparger* biasa. Untuk memperlihatkan keistimewaan ini, pencapaian hasil kultivasi dinyatakan sebagai besaran $\frac{X}{V}$, yaitu berat kering sel per laju volumetrik gas yang dialirkan. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.3.1. Tabel Perolehan Hasil Kultivasi *C. vulgaris* dalam Besaran Lain.

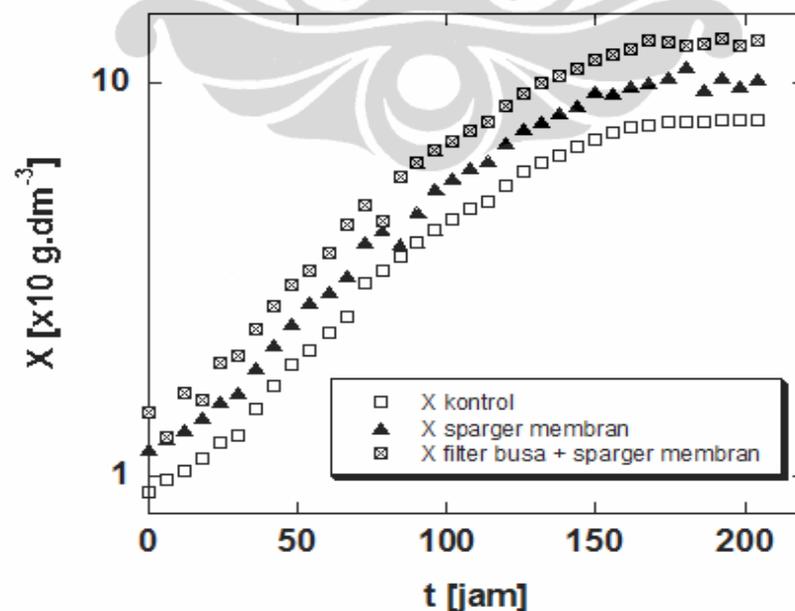
Jenis Perlakuan	Nilai $\frac{X}{V}$ (g.dm ⁻³ sel. per dm ³ menit ⁻¹ gas inlet)
<i>Sparger</i> biasa (berbahan plastik)	0,059
<i>Sparger</i> membran serat berongga	0,314

Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa penggunaan *sparger* membran ini sangat membawa perubahan hasil yang signifikan. Adanya penggunaan *sparger*

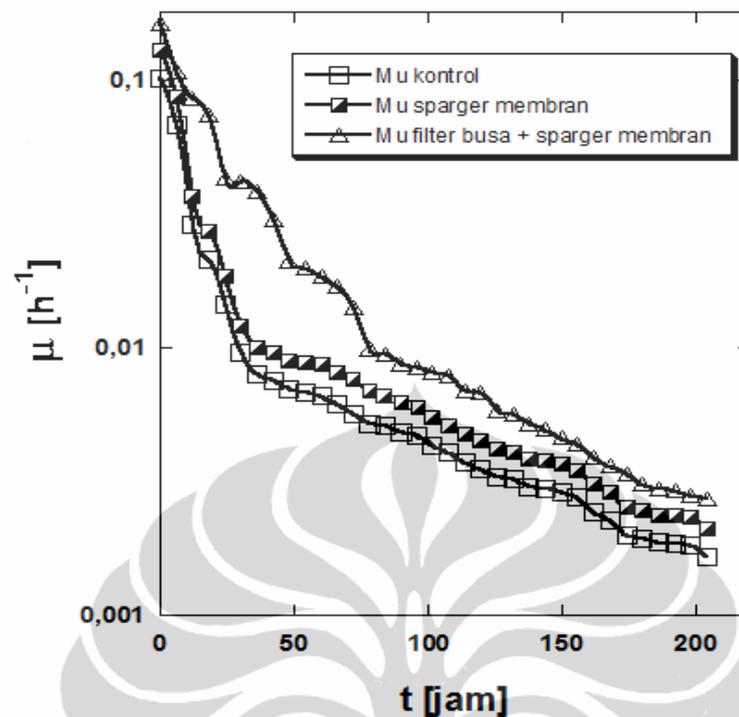
ini membawa peningkatan sekitar 5,25 kali dari penggunaan sparger biasa yang berbahan plastik. Dalam hal ini serat membran berongga mempunyai dua fungsi utama yaitu sebagai tahanan tekanan gas yang diberikan ke dalam kultur sehingga dapat menurunkan efek *shear stress* yang mungkin terjadi pada alga dan untuk memperluas permukaan kontak gas-cair. Dengan demikian efisiensi perpindahan massa gas CO₂ dalam media kultur menjadi jauh lebih tinggi. Selain itu ukuran pori membran yang relatif kecil diharapkan dapat menghasilkan ukuran gelembung gas yang berukuran kecil juga sehingga memungkinkan terjadinya proses transfer massa gas CO₂ ke dalam kultur yang lebih efisien dibandingkan dengan proses yang selama ini ada.

4.3.2. Pengaruh Penggunaan Perpaduan antara Membran sebagai *Sparger* dan Sistem Filtrasi terhadap Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris*.

Tahap kegiatan selanjutnya adalah menggunakan *sparger* membran ini dalam sistem filtrasi secara kontinu dan sebagai pembanding digunakan pula proses kultivasi tanpa perlakuan (kontrol) dengan *sparger* membran. Hasil produksi biomasnya adalah sebagai berikut:



Gambar 4.3.5. Profil Pertumbuhan *C. vulgaris* pada beberapa perlakuan kultivasi



Gambar 4.3.6. Profil Laju Pertumbuhan Spesifik *Chlorella vulgaris* pada beberapa perlakuan kultivasi

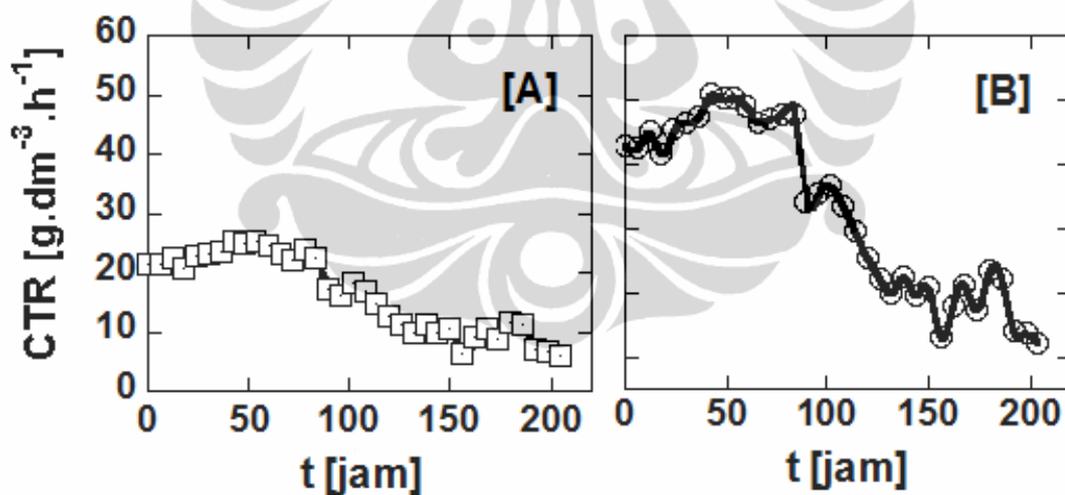
Dari kedua gambar di atas maka dapat dikatakan bahwa penggabungan antara penggunaan *sparger* membran dengan teknik filtrasi dalam kultivasi ini mampu memberi peningkatan produksi biomassa yang lebih besar yaitu sebesar 1,25 kali terhadap sistem kultivasi bersparger membran dan 1,59 kali terhadap sistem kultivasi bersparger biasa. Peningkatan ini mungkin terlihat kurang besar jika dilihat hanya berdasarkan perolehan hasil kultivasi. Oleh sebab itu perlu dilihat dari sisi besaran lain, yaitu nilai $\frac{X}{V}$, sebagaimana dapat dilihat pada tabel di bawah ini. Dari tabel ini dapat dilihat bahwa sesungguhnya secara efisiensi peningkatan produksi biomassa yang dihasilkan berdasarkan besaran tersebut jauh lebih besar yaitu sekitar 6,83 kali terhadap proses kultivasi menggunakan *sparger* biasa (tanpa perlakuan).

Tabel 4.3.2. Tabel Perolehan Hasil Kultivasi dalam Besaran Lain

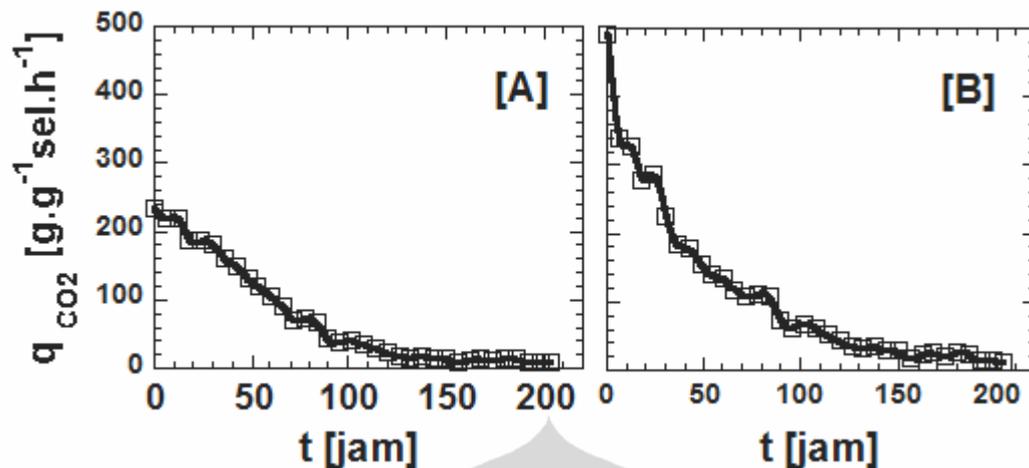
Jenis Perlakuan	Nilai $\frac{X}{V}$ (g.menit.l ⁻²)
<i>Sparger</i> biasa (berbahan plastik)	0,50
<i>Sparger</i> membran serat berongga	2,64
<i>Sparger</i> membran+filter busa	3,45

4.3.3. Pengaruh Penggunaan *Sparger* Membran Serat Berongga dalam Sistem Kultivasi *Chlorella vulgaris* dengan Perlakuan Filtrasi terhadap Proses Fiksasi CO₂.

Penggunaan membran serat berongga sebagai *sparger* dalam sistem kultivasi *C. vulgaris* telah memberikan bukti terhadap peningkatan produksi biomasnya. Hal ini pun berdampak pada kemampuan fiksasi CO₂ nya, sebagaimana terlihat pada gambar berikut.



Gambar 4.3.7. Profil Biofiksasi CO₂ *Chlorella vulgaris* pada kultivasi biasa (kontrol) (A) dan *Sparger* membran berfilter (B)



Gambar 4.3.8. Profil Laju Transfer Carbon per berat kering sel dalam Medium Kultur pada kultivasi biasa (kontrol) (A) dan *Sparger* membran berfilter (B)

Tabel 4.3.3. Perolehan Nilai rata-rata dari CTR dan q_{CO_2}

Jenis Perlakuan	CTR [$g \cdot dm^{-3} \cdot h^{-1}$]	q_{CO_2} [$g \cdot g^{-1} \cdot sel \cdot h^{-1}$]
Kultivasi biasa (kontrol)	16,43	73,97
Kultivasi dengan filtrasi dan <i>sparger</i> membran	32,85	110,96

Dari kedua gambar di atas dapat dilihat bahwa penggunaan *sparger* membran membawa peningkatan yang sangat besar terhadap kemampuan fiksasi CO_2 . Hasil yang didapat menunjukkan bahwa perlakuan filtrasi dalam sistem kultivasi yang dimodifikasi dengan penggunaan *sparger* membran serat berongga ini telah mampu meningkatkan perolehan nilai rata-rata CTR dan q_{CO_2} nya sekitar 2 dan 1,5 kali dari kultivasi biasa. Demikian juga bila dibandingkan dengan perolehan dari proses kultivasi menggunakan pemerangkap sel kontinu pada *sparger* biasa, yang menghasilkan peningkatan sebesar 1,7 kali pada nilai CTR dan 1,2 kali pada nilai q_{CO_2} . Ukuran pori membran yang relatif kecil menghasilkan ukuran gelembung gas yang berukuran kecil juga, sehingga dapat memperluas permukaan kontak antara gas-cair. Hal inilah yang membuat proses transfer massa gas CO_2 ke dalam kultur menjadi lebih efisien. Dengan demikian

proses fiksasi CO₂ pun menjadi semakin meningkat selama berlangsungnya kultivasi alga.

Dari kegiatan penelitian tentang optimasi sistem aerasi dalam kultur media untuk meningkatkan produksi biomassa dan fiksasi CO₂ dari *Chlorella vulgaris* dapat disimpulkan bahwa:

1. Produktivitas mikroalga *C. vulgaris* selama kultivasi juga dipengaruhi oleh kondisi aerasi dan proses transfer massa gas CO₂ di dalam medium. Peningkatan proses produksi biomassa *C. vulgaris* membutuhkan nilai K_{LA} CO₂ yang optimal dan diupayakan tidak menimbulkan efek *shear stress* pada alga akibat peningkatan laju alir gas yang diberikan. Dalam hal ini penggunaan membran serat berongga sebagai sparger atau aerator telah terbukti memberikan nilai K_{LA} CO₂ yang lebih tinggi dibandingkan dengan kultivasi pada sparger biasa.
2. Penggunaan membran serat berongga sebagai aerator telah mampu meningkatkan produksi biomassa hingga 22,5 %. Dalam penelitian ini kami memperkenalkan besaran baru untuk melihat besarnya keefektifan proses kultivasi yang dihasilkan yaitu besarnya densitas sel akhir yang diperoleh per besarnya laju alir volumetrik gas yang dialirkan, $\frac{X}{V}$. Bila ditinjau dari besar kecilnya laju alir gas yang diperlukan, maka penggunaan membran ini telah berhasil meningkatkan produktivitas sel hingga 5,25 kali dari penggunaan *sparger* biasa yang berbahan plastik. Penggunaan *sparger* membran ini bila dipadukan dengan sistem filtrasi secara kontinu mampu memberikan peningkatan produksi biomassa yang lebih besar lagi yaitu 1,59 kalinya. Bila ditinjau dari besaran $\frac{X}{V}$ nya maka peningkatan produksi biomassanya menjadi sebesar 6,83 kali.
3. Bila ditinjau dari aktivitas fiksasi CO₂ nya, maka penggunaan membran sebagai aerator dalam sistem kultivasi dengan filtrasi (secara kontinu) telah berhasil meningkatkan laju transfer karbonnya, yaitu CTR dan q_{CO_2} hingga 1,7 dan 1,2 kali dari penggunaan *sparger* biasa. Penggunaan *sparger* membran telah berhasil membuat proses transfer massa gas CO₂

ke dalam kultur menjadi lebih efisien. Dengan demikian proses fiksasi CO₂ pun menjadi semakin meningkat selama berlangsungnya kultivasi alga.

4. Penggunaan membran serat berongga sebagai aerator telah menjadi potensi yang menjanjikan dalam pengembangan ke depannya untuk meningkatkan kemampuan fiksasi CO₂ sistem kultivasi mikroalga, terutama *Chlorella vulgaris*.

4.4. Optimasi Media Filter dalam Peningkatan Produksi Biomassa *C. vulgaris* melalui Perlakuan Teknik Filtrasi dalam Aliran Media Kultur

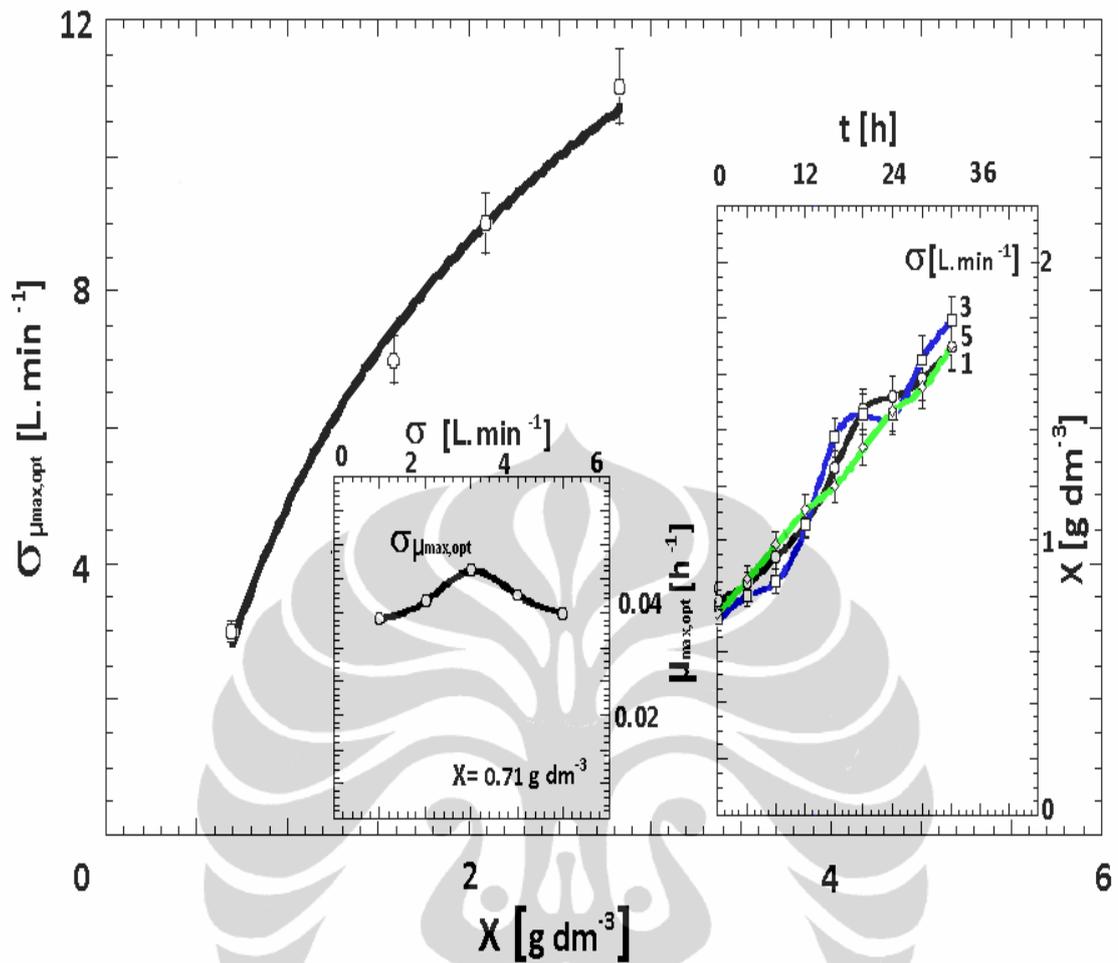
Penelitian ini merupakan optimasi penggunaan media filter dalam sistem filtrasi pada aliran sirkulasi media kultur untuk mengoptimalkan produksi biomassa *C. vulgaris* sehingga kandungan esensial dari mikroalga tersebut juga dapat diproduksi lebih banyak. Pembahasan mengenai hasil penelitian akan ditekankan pada pengaruh penggunaan mikrofilter dalam medium kultur terhadap peningkatan produksi biomassa *C. vulgaris*. Metode ini akan dibandingkan dengan metode kultivasi lainnya yaitu penggunaan filter busa pada media kultivasi, perlakuan nonfilter pada pencahayaan alterasi, dan perlakuan nonfiltrasi pada pencahayaan simultan.

Perlakuan filtrasi yang dilakukan pada media kultur telah terbukti dapat meningkatkan produksi biomassa *C. vulgaris* (Dianursanti, 2009). Namun hal ini masih perlu dikembangkan, mengingat hasil filtrasi dengan menggunakan filter busa biasa belum maksimal dalam hal filtrasinya. Hal ini disebabkan kekuatan hisap dari filter busa masih kurang memadai dan juga kapasitas filternya yang kurang dapat memerangkap sel dalam jumlah yang lebih besar lagi. Oleh sebab itu, pada penelitian ini digunakan mikrofilter yang mempunyai ukuran pori sebesar 0.5 mikron. Dengan penggunaan mikrofilter ini diharapkan dapat meningkatkan kekuatan hisap dari filter dan mampu memerangkap sel lebih banyak lagi sehingga meningkatkan produksi biomassa *C. vulgaris*.

Penggunaan mikrofilter pada medium kultur bertujuan untuk menyerap sel biomassa yang dihasilkan dari pembelahan sel. Rangkaian mikrofilter ini disirkulasikan kembali ke dalam fotobioreaktor. Sirkulasi medium kultur yang melewati mikrofilter ini berfungsi untuk menjaga volume medium dalam fotobioreaktor tetap. Dasar penggunaan mikrofilter ini adalah pengurangan sejumlah sel dari fotobioreaktor untuk mengurangi kepekatan sel di dalamnya. Pengurangan kepekatan sel ini akan membuka peluang sel-sel yang ada dalam fotobioreaktor untuk tetap mendapatkan energi cahaya yang cukup selama masa kultivasi. Dengan berkurangnya kerapatan sel maka intensitas cahaya yang tembus hingga ke bagian belakang reaktor akan lebih besar.

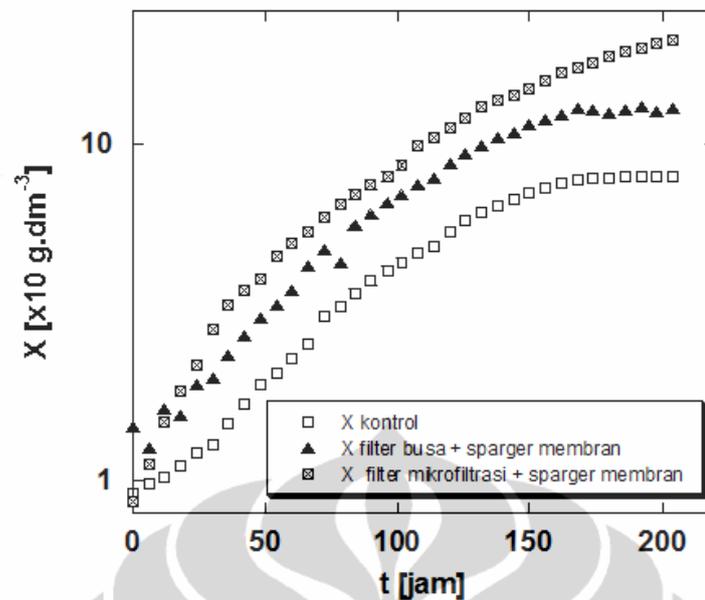
4.4.1. Pengaruh Penggunaan Mikrofiltrasi dalam Sistem Filtrasi pada Aliran Medium Kultur Terhadap Produksi Biomassa *C. vulgaris*.

Pada penelitian ini inokulum awal yang digunakan mempunyai nilai Optical Density 0,218 yang bila dikonversikan ke dalam berat kering biomassa mempunyai nilai 0.91 g/dm³. Intensitas cahaya yang digunakan adalah 5000 lux dan pencahayaan ini dilakukan secara simultan. Pada penelitian ini dilakukan juga pengaturan laju alir hisap filter sebagaimana pada penelitian terdahulu. Berikut merupakan kurva yang digunakan untuk mengetahui besar laju alir hisap optimum ($\sigma_{\mu_{max},opt}$) yang digunakan ketika terjadi peningkatan berat kering biomassa pada fotobioreaktor selama masa kultivasi.



Gambar 4.4.1. Nilai $\sigma_{\mu_{max,opt}}$ pada Berbagai Berat Kering Sel (X)

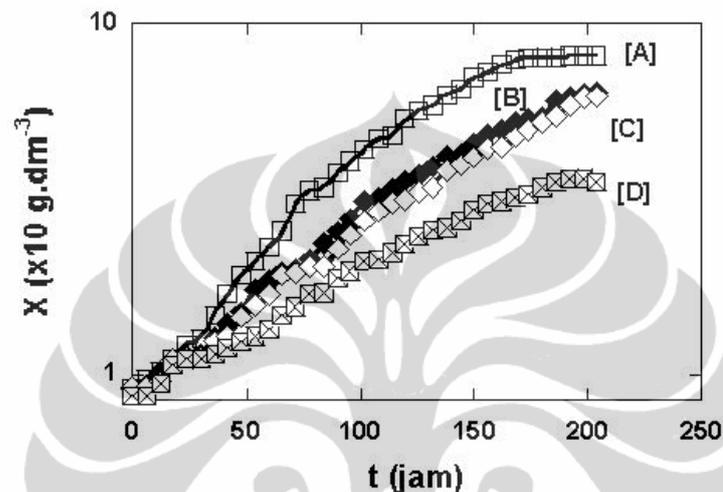
Berdasarkan grafik korelasi laju hisap filter optimum pada berbagai berat di atas, maka kultivasi dengan perlakuan mikrofiltrasi dilakukan. Peningkatan laju hisap filter disesuaikan dengan kondisi kerapatan sel yang diperoleh selama proses kultivasi berlangsung. Berikut ini merupakan kurva hasil pertumbuhan hasil kultivasi dengan menggunakan perlakuan mikrofiltrasi yang dibandingkan dengan perlakuan filter busa biasa dan proses kultivasi biasa tanpa perlakuan (kontrol).



Gambar 4.4.2 Pengaruh Perlakuan Mikrofiltrasi terhadap Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris*

Berdasarkan kurva 4.4.2. di atas, dapat disimpulkan bahwa perlakuan mikrofiltrasi pada sirkulasi aliran medium kultur, mempunyai tingkat produksi biomassa yang jauh lebih baik jika dibandingkan dengan dua perlakuan lainnya. Perlakuan mikrofiltrasi mempunyai tingkat produksi 2,12 kali lebih tinggi dibandingkan dengan filter busa biasa dan 2,54 kali lebih tinggi dibandingkan dengan proses kultivasi kontrol (tanpa perlakuan). Hal ini disebabkan penggunaan mikrofilter yang dapat memerangkap mikroalga *C. vulgaris* lebih optimal dibandingkan filter busa. Filtrasi yang optimal dapat menjaga keadaan densitas sel dalam reaktor pada nilai yang relatif konstan atau tidak mengalami peningkatan jumlah sel yang terlalu besar sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.4.3. Kondisi ini akan membuat sel-sel alga dalam reaktor dapat tetap mendapatkan pencahayaan yang optimal selama proses kultivasinya. Dengan demikian keadaan ini juga akan berdampak positif terhadap peningkatan produksi biomasanya. Kecenderungan hasil yang sama juga telah ditunjukkan pada penelitian sebelumnya yaitu dengan melakukan pengaturan intensitas cahaya selama berlangsungnya proses kultivasi *C. vulgaris*, telah dapat meningkatkan produksi biomasanya hingga 1,61 kali lipat dengan masa pertumbuhan yang lebih singkat hingga 2 kali masa pertumbuhan pada intensitas cahaya yang dijaga tetap

(kontrol) (Wijanarko,2004). Pada jenis alga yang lain juga dilaporkan kecenderungan yang serupa, yaitu perlakuan pengaturan intensitas cahaya terhadap sianobakter *Anabaena cylindrica* pada suhu rendah, menghasilkan peningkatan produksi biomassa hingga 6 kali lebih besar (Wijanarko, Ohtaguchi, 2003).

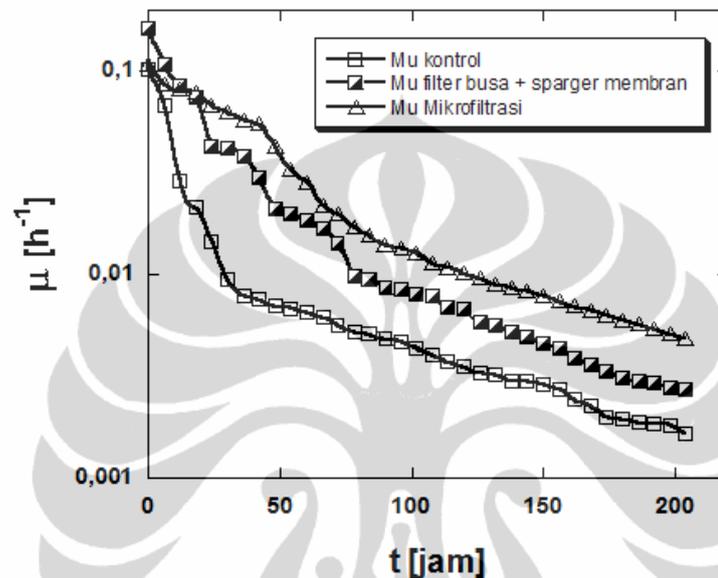


Gambar 4.4.3. Pengaruh Perlakuan Berbagai Jenis Media Filter terhadap Densitas Sel *Chlorella vulgaris* dalam Reaktor Selama Kultivasi: [A] Kontrol, [B] Kultivasi dengan filter busa dan sparger biasa, [C] kultivasi dengan filter busa dan sparger membrane, dan [D] Kultivasi dengan mikrofiltrasi.

Pada Gambar 4.4.3. juga dapat dilihat pengaruh penggunaan media filter terhadap keadaan densitas sel selama masa kultivasi. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa penggunaan mikrofilter pada proses kultivasi *C. vulgaris* membuat densitas sel selama proses kultivasi mengalami peningkatan yang lebih kecil dibandingkan pada penggunaan filter busa. Hal ini memberikan keuntungan bagi kelangsungan pertumbuhan biomassa *C. vulgaris* karena membuat sel-sel alga dalam reaktor dapat tetap mendapatkan pencahayaan yang optimal selama proses kultivasinya. Penggunaan mikrofilter pada kultivasi ini dapat dikatakan telah berhasil meminimalkan terjadinya efek *self shading* selama proses kultivasi.

4.4.2. Pengaruh Mikrofiltrasi Pada Sirkulasi Aliran Medium Kultur Terhadap Laju Pertumbuhan (μ) *Chlorella vulgaris*.

Laju pertumbuhan spesifik (μ_x) merupakan laju pertumbuhan sel/produksi biomassa pada fase logaritmik. Laju pertumbuhan juga dapat dikatakan sebagai waktu yang diperlukan untuk sekali pembelahan sel. Berikut adalah kurva laju pertumbuhan spesifik (μ_x) terhadap waktu (t).



Gambar 4.4.4. Pengaruh Perlakuan Mikrofiltrasi terhadap Laju Pertumbuhan (μ) *C. vulgaris* Dibandingkan dengan Perlakuan Kultivasi Lainnya

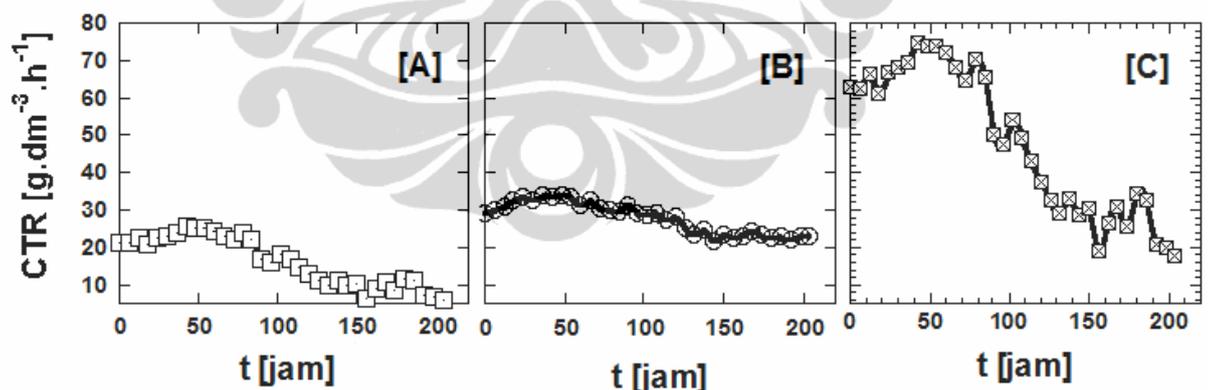
Berdasarkan kurva di atas dapat disimpulkan bahwa penggunaan mikrofilter pada sirkulasi aliran medium kultur, mampu menjaga laju pertumbuhan dengan nilai penurunan laju pertumbuhan yang lebih kecil daripada ketiga metode lainnya. Laju pertumbuhan sangat penting untuk dipertahankan (bernilai konstan) karena laju pertumbuhan yang konstan akan mempunyai dampak pada banyaknya produksi biomassa yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan pembahasan sebelumnya dimana produksi biomassa dengan perlakuan mikrofilter mempunyai nilai yang paling besar.

Laju pertumbuhan yang semakin menurun dapat disebabkan karena kerapatan sel dalam fotobioreaktor yang semakin meningkat. Kondisi ini dapat menimbulkan efek self shading, sehingga laju pertumbuhan pun menurun karena pencahayaan yang tidak diterima secara merata oleh sel untuk melakukan fotosintesis. Ketika pencahayaan tidak diterima secara merata oleh sel mikroalga,

maka jumlah sel yang membelah pun akan semakin berkurang. Hal ini menyebabkan jumlah produksi biomassa yang semakin sedikit dari waktu ke waktu. Pada proses filtrasi dengan mikrofilter dilakukan, besar kenaikan kerapatan sel pada fotobioreaktor relatif kecil sebagai akibat adanya proses filtrasi. Hal inilah yang menyebabkan energi cahaya masih mampu untuk dimanfaatkan dengan baik oleh sel mikroalga dan laju pertumbuhan pun tidak mengalami penurunan yang drastis.

4.4.3. Pengaruh Penggunaan Mikrofiltrasi dalam Sistem Filtrasi pada Aliran Medium Kultur Terhadap CTR *Chlorella vulgaris*.

CTR (*Carbon Transfer Rate*) merupakan banyaknya gas CO_2 yang ditransferkan dalam suatu volume medium kultur yang dibutuhkan oleh metabolisme sel selama satu satuan waktu tertentu (Wijanarko, 1997). Nilai CTR didapatkan dari presentase gas CO_2 yang mampu difiksasi ($\% \Delta y_{\text{CO}_2}$) dikalikan dengan koefisien transfer spesifik dari CO_2 (α_{CO_2}). Nilai CTR dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.4). Kurva kecenderungan CTR sebagai fungsi waktu dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.4.5. Kurva CTR Pada Medium Kultur *C. vulgaris*, [A]:Proses Kultivasi kontrol, [B]: Proses kultivasi dengan filter busa dan [C]: Proses Kultivasi menggunakan mikrofiltrasi.

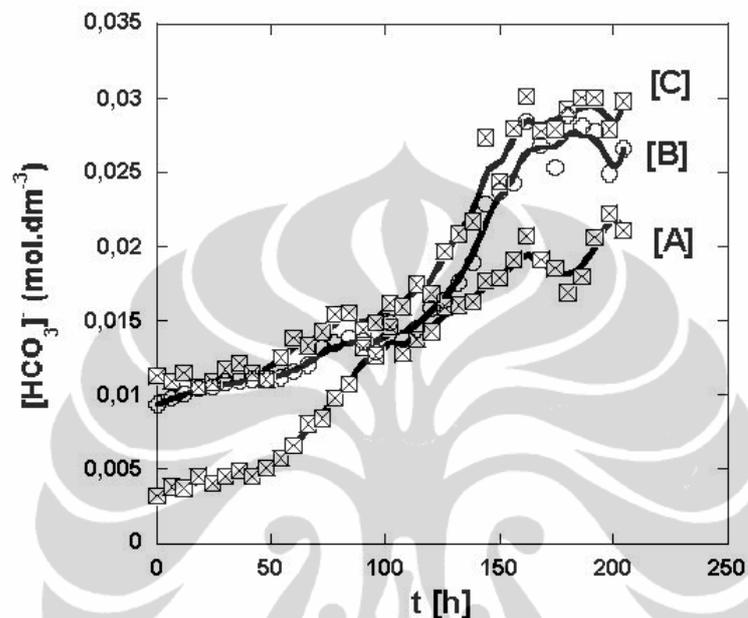
Berdasarkan kurva 4.4.5. di atas dapat dilihat bahwa nilai CTR pada medium kultur dengan perlakuan mikrofiltrasi mempunyai nilai rata-rata CTR yang paling tinggi, yaitu $48,16 \text{ g.dm}^{-3}.\text{h}^{-1}$. Sementara nilai CTR pada proses kultivasi kontrol dan penggunaan filter busa adalah $16,43$ dan $32,85 \text{ g.dm}^{-3}.\text{h}^{-1}$. Lebih kecilnya nilai CTR yang diperoleh pada kultivasi kontrol juga dipengaruhi

oleh semakin minimnya intensitas cahaya yang diterima oleh sel sebagai akibat dari adanya pertumbuhan biomassa selama masa kultivasi. Dalam proses fotosintesis, *Chlorella vulgaris* membutuhkan CO₂ sebagai sumber karbon. Namun, seiring dengan peningkatan kerapatan selnya pada fotobioreaktor, cahaya yang diberikan tidak lagi mencukupi untuk kebutuhan metabolisme. Dengan keadaan seperti itu, sumber karbon yang terdapat dalam medium kultur tidak mampu dimanfaatkan dengan baik oleh sel *C. vulgaris* karena semakin sedikit sel yang cukup mendapatkan energi cahaya untuk melakukan pembelahan. Kerapatan sel yang semakin pekat menyebabkan medium kultur semakin pekat dengan sumber karbon dan hal ini menyebabkan CO₂ yang ditransfer ke dalam fotobioreaktor semakin banyak yang dilepaskan. Sementara itu pada perlakuan filtrasi menggunakan busa dan mikrofiltrasi sirkulasi aliran medium kultur, kerapatan sel dijaga agar tidak meningkat terlalu tajam sehingga sejumlah intensitas cahaya yang masuk, masih bisa dimanfaatkan dengan baik oleh sel mikroalga *C. vulgaris* untuk melakukan fotosintesis. Jika fotosintesis berlangsung dengan baik maka sumber karbon yang dibutuhkan juga akan semakin besar. Oleh sebab itulah, nilai CTR pada perlakuan filtrasi cenderung berada pada nilai yang tinggi. Berdasarkan hasil ini juga dapat disimpulkan *C. vulgaris* dengan perlakuan mikrofiltrasi mempunyai potensi yang baik untuk mengurangi kadar gas rumah kaca karena kemampuannya yang baik dalam memfiksasi gas CO₂.

4.4.4. Pengaruh Penggunaan Mikrofiltrasi dalam Sistem Filtrasi pada Aliran Medium Kultur Terhadap [HCO₃⁻] dalam Medium.

C. vulgaris merupakan mikroorganisme akuatik yang membutuhkan cahaya dan sumber karbon agar bisa terus tumbuh dan berkembang. Berbeda dengan tumbuhan yang berada di darat, pada mikroalga *C. vulgaris* sumber karbon yang digunakan untuk berfotosintesis tidak secara langsung memanfaatkan gas CO₂, namun gas tersebut harus bereaksi terlebih dahulu dengan air (H₂O) untuk membantuk ion [HCO₃⁻] untuk kemudian dapat dimanfaatkan oleh mikroalga sebagai sumber karbon dalam proses fotosintesis. Proses fotosintesis yang terjadi pada mikroalga *C. vulgaris* merupakan proses yang dilakukan untuk menghasilkan energi yang dibutuhkan dalam pertumbuhannya.

Sebagaimana halnya dengan perhitungan-perhitungan yang dilakukan sebelumnya, maka besar nilai ion $[\text{HCO}_3^-]$ ini juga dihitung dengan mengukur besarnya nilai pH pada medium kultur. Dan berikut merupakan kurva $[\text{HCO}_3^-]$ terhadap waktu pada perlakuan mikrofiltrasi dan perlakuan lainnya.



Gambar 4.4.6. Profil $[\text{HCO}_3^-]$ dalam Medium Kultur *C. vulgaris* pada: [A] Proses kultivasi kontrol, [B] Proses kultivasi dengan filter busa dan [C]:Proses kultivasi dengan mikrofiltrasi.

Berdasarkan grafik di atas dapat dilihat bahwa ketersediaan ion $[\text{HCO}_3^-]$ terus meningkat dari waktu ke waktu. Hal ini sesuai dengan nilai CTR yang telah ditulis pada pembahasan sebelumnya. Pertumbuhan sel pada medium kultur terus meningkatkan kerapatan sel. Hal ini sangat rentan menimbulkan efek *self shading* pada mikroalga *C. vulgaris*. Salah satu akibat dari efek ini adalah pemanfaatan gas ion $[\text{HCO}_3^-]$ yang kurang optimal (keberadaannya semakin jenuh pada medium kultur). Meskipun ion ini sangat bermanfaat untuk pertumbuhan, ketersediaannya yang semakin jenuh pada medium kultur akan mengurangi kemampuan fiksasi CO_2 yang ditransfer ke dalam medium kultur.

Dari grafik di atas dapat dilihat, kultivasi dengan perlakuan filtrasi menggunakan filter busa dan mikrofiltrasi mempunyai nilai ion $[\text{HCO}_3^-]$ yang lebih tinggi dari waktu ke waktu. Hal ini sesuai dengan profil pertumbuhan sel yang diperoleh pada perlakuan dari kedua jenis pemerangkapan tersebut. Pada

kedua perlakuan tersebut diperoleh *yield* biomassa yang lebih tinggi dibandingkan kondisi kontrol. Peningkatan nilai pH yang diperoleh menunjukkan aktivitas sel yang lebih baik dan ini ditandai dengan penyerapan substrat atau ion $[\text{HCO}_3^-]$ yang lebih besar. Hal ini pun berdampak juga pada peningkatan kemampuan penyerapan CO_2 , yang ditandai dengan tingginya perolehan nilai CTR dan $q \text{ CO}_2$ nya sebagaimana dilihat pada Gambar 4.4.5.

Dari kegiatan penelitian tentang optimasi media filter dalam peningkatan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* melalui perlakuan teknik filtrasi dalam aliran sirkulasi media kultur dapat disimpulkan;

1. Perlakuan mikrofiltrasi pada sirkulasi aliran medium kultur, menghasilkan peningkatan produksi biomassa yang tertinggi dibandingkan dengan metode kultivasi lainnya dalam penelitian ini. Perlakuan mikrofiltrasi pada sirkulasi aliran medium kultur *C. vulgaris* berhasil meningkatkan produksi biomassa 2,12 kali dari penggunaan filter busa biasa, dan 2,54 kali lebih tinggi dari sistem kultivasi biasa (kontrol).
2. Penggunaan media filter mikrofiltrasi pada sirkulasi aliran medium kultur telah terbukti lebih mampu menjaga densitas sel *C. vulgaris* dalam reaktor sedemikian rupa hingga sel-selnya tetap mendapatkan pencahayaan yang memadai selama proses kultivasi. Hal ini ditunjukkan dengan perolehan profil laju pertumbuhan dengan penurunan terkecil dibandingkan perlakuan dengan penggunaan media filter busa biasa dan proses kultivasi kontrol.
3. Perlakuan mikrofiltrasi pada sirkulasi aliran medium kultur *C. vulgaris* menghasilkan fiksasi CO_2 yang lebih baik dibandingkan perlakuan dengan menggunakan filter busa biasa dan proses kultivasi kontrol. Hal ini berdasarkan nilai rata-rata CTR perlakuan mikrofiltrasi yang mempunyai nilai tertinggi yaitu sebesar $48,163 \text{ g/dm}^3 \cdot \text{jam}$.

4.5. Peningkatan Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* melalui Perlakuan Teknik Filtrasi Semikontinu dalam Fotobioreaktor

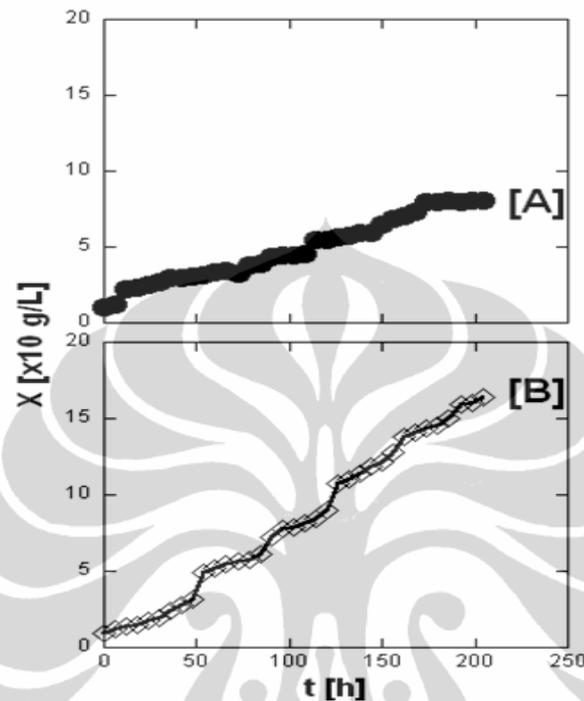
Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian sebelumnya, terkait dengan penggunaan teknik filtrasi dalam proses kultivasi *C. vulgaris*. Pada penelitian sebelumnya, sistem filtrasi berlangsung secara kontinu selama masa kultivasi. Pada sistem tersebut, tidak dilakukan penambahan medium baru selama berlangsungnya masa kultivasi. Berbeda halnya dengan perlakuan dalam penelitian ini. Teknik filtrasi semikontinu dilakukan dengan mengalirkan aliran sejumlah aliran kultur dalam medium keluar reaktor, untuk kemudian dipanen dan ditambahkan ke dalamnya sejumlah cairan medium baru sebanyak volume medium yang dikeluarkan tadi.

Pada prinsipnya teknik ini juga sama dengan metode-metode sebelumnya, yaitu untuk meminimalkan efek *self shading* yang terjadi dalam reaktor. Metode ini juga menawarkan alternatif proses untuk meningkatkan produksi berkelanjutan dari mikroalga *C. vulgaris*. Adanya mekanisme pengaliran sejumlah kultur dalam medium pada saat tertentu, menjadikan metode ini pun menjadi metode alternatif dalam upaya pemanenan mikroalga.

Pada sistem semi kontinu ini kultivasi dilakukan sama seperti pada kultivasi pada perlakuan sebelumnya. Medium dan mikroalga dimasukkan ke dalam reaktor sebanyak 18 L, kemudian diberi iluminasi cahaya dan gas CO₂. Data diambil setiap 6 jam sekali selama 204 jam. Perbedaannya adalah pada saat OD telah 0,6, kultur mikroalga dipanen (*harvest*). Pemanenan dilakukan dengan cara mengalirkan kultur dari reaktor ke dalam *water housing* atau wadah berfilter sebanyak 9 L. Kemudian, volume medium yang hilang ditambahkan dengan medium yang baru sejumlah volume tersebut. Pemanenan dilakukan setelah OD mencapai 0,6 dikarenakan pada OD tersebut kepadatan mikroalga sudah cukup tinggi dan ketika diberikan medium baru OD yang dihasilkan tidak terlalu rendah, sekitar OD 0,3. Selain itu, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai OD 0,6 tidak terlalu lama, sehingga pemanenan dapat dilakukan dalam jangka waktu yang singkat. Pemanenan ini dilakukan secara terus menerus hingga dicapai waktu kultivasi 204 jam.

4.5.1. Pengaruh Sistem Filtrasi Semikontinu terhadap Peningkatan Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris*.

Profil pertumbuhan mikroalga *C. vulgaris* menggunakan sistem filtrasi semikontinu dapat dilihat pada Gambar 4.5.1 di bawah ini.



Gambar 4.5.1. Profil pertumbuhan sel *C. vulgaris* selama masa kultivasi dengan [A]: sistem kultivasi alga tanpa perlakuan, dan [B]: sistem kultivasi filtrasi semikontinu.

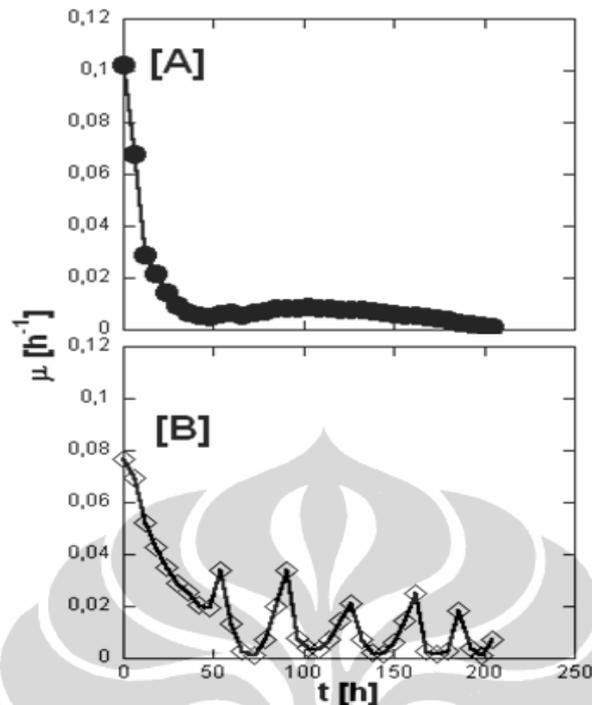
Dari Gambar 4.5.1. di atas dapat dilihat bahwa pada awal kultivasi (50 jam pertama), kedua sistem kultivasi tersebut memberikan pola yang sama pada pertumbuhan biomassa *C. vulgaris*. Namun setelahnya, pertumbuhan biomassa pada proses kultivasi dengan filtrasi semikontinu lebih meningkat tajam dibandingkan dengan proses kultivasi kontrol (tanpa perlakuan). Hal ini karena pada sistem kultivasi kontrol, mulai terjadi efek *self shading*. Efek ini terjadi sebagai akibat dari pertumbuhan sel *C. vulgaris* yang begitu cepat dalam kultur sehingga pemenuhan kebutuhan cahaya dalam reaktor menjadi kurang memadai.

Hasil yang dicapai pada penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan filtrasi semikontinu telah berhasil meningkatkan densitas biomassa sel menjadi $1,64 \text{ g.L}^{-1}$. Sementara itu pada proses kultivasi kontrol (tanpa perlakuan) mampu menghasilkan peningkatan densitas sel hingga $0,80 \text{ g.L}^{-1}$. Hal ini berarti sistem

filtrasi tersebut telah berhasil meningkatkan pertumbuhannya menjadi 2,5 kali. Dari Gambar 4.5.3. dapat dilihat bahwa setelah 170 jam berlangsungnya kultivasi, pertumbuhan sel pada kultivasi kontrol mulai memasuki fase stasioner, sedangkan pada proses kultivasi filtrasi semikontinu, pertumbuhan sel *Chlorella vulgaris* masih terus meningkat. Hal ini karena proses pemerangkapan yang dilakukan membuat kondisi densitas sel terjaga sedemikian rupa, sehingga tetap mendapatkan pencahayaan yang optimal selama masa kultivasi. Disamping itu, adanya mekanisme penambahan medium baru juga membuat kebutuhan sel akan nutrisi dari medium menjadi memadai. Hasil penelitian ini memiliki kemiripan pola dengan hasil yang dicapai pada penelitian-penelitian sebelumnya, yaitu proses yang menggunakan sistem filtrasi akan dapat meningkatkan pertumbuhan sel yang lebih baik. (Wijanarko,2008; Dianursanti,2009). Jika dibandingkan dengan proses kultivasi filtrasi secara kontinu menggunakan membran mikrofiltrasi, pencapaian hasil akhir densitas selnya masih sedikit masih sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan proses filtrasi semikontinu yaitu $2,05 \text{ g.L}^{-1}$.

4.5.2. Pengaruh Sistem Filtrasi Semikontinu terhadap Laju Pertumbuhan Sel *C. vulgaris*.

Profil laju pertumbuhan sel *C. vulgaris* selama proses kultivasi dengan menggunakan sistem pemerangkapan semikontinu ini dapat dilihat pada Gambar 4.5.2.

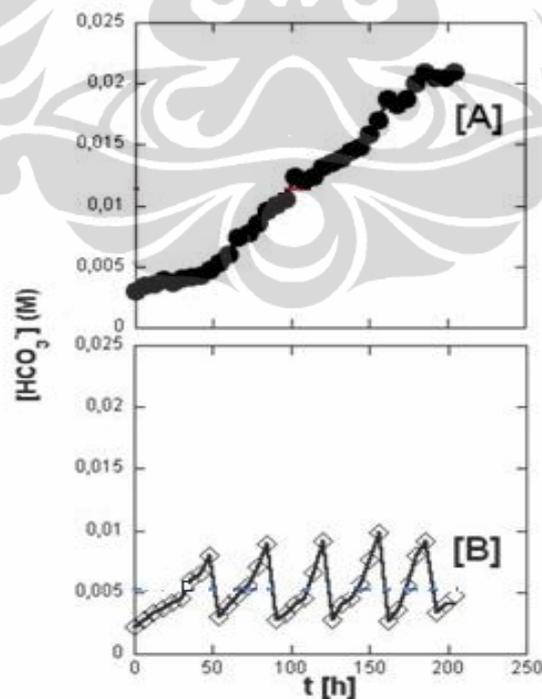


Gambar 4.5.2. Profil laju pertumbuhan spesifik *Chlorella vulgaris* selama masa kultivasi dengan [A]: sistem kultivasi alga tanpa perlakuan, dan [B]: sistem kultivasi filtrasi semikontinu.

Dari Gambar 4.5.2 di atas dapat dilihat bahwa kedua proses kultivasi memiliki pola laju pertumbuhan sel yang sama yaitu cenderung menurun seiring bertambahnya waktu. Namun ada sedikit berbeda yang terjadi pada proses kultivasi dengan filtrasi semikontinu ini yaitu pola laju pertumbuhan yang naik turun. Hal ini karena adanya proses pengaliran dan penambahan medium ke dan dari reaktor. Manakala medium baru ditambahkan, akan membuat pertumbuhan sel yang tadinya menurun menjadi meningkat kembali hingga waktu tertentu, demikian seterusnya hal tersebut berlangsung. Hal inilah yang menjadikan proses filtrasi semikontinu ini juga potensial untuk dikembangkan dalam proses produksi berkelanjutan mikroalga, khususnya *C. vulgaris*. Dengan demikian dapat pula dikatakan bahwa proses filtrasi secara kontinu ini telah terbukti mampu membuat masa kultivasi sel menjadi lebih lama.

4.5.3 Pengaruh Perlakuan Filtrasi Semikontinu terhadap $[\text{HCO}_3^-]$ dalam Medium

Profil konsentrasi bikarbonat dalam media kultur dapat dilihat pada Gambar 4.5.5 di bawah ini. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa jumlah bikarbonat yang terlarut dalam medium pada kondisi kontrol lebih besar daripada jumlah bikarbonat yang terlarut pada kultivasi filtrasi semikontinu. Hal ini karena pada proses kultivasi kontrol menghasilkan pH medium yang semakin tinggi, sebagai akibat dari pembentukan ion OH^- selama berlangsungnya proses fotosintesis (kultivasi). pH yang tinggi tersebut dikarenakan jumlah akumulasi sel dalam reaktor pada proses kultivasi kontrol ini lebih banyak dibandingkan proses kultivasi filtrasi semikontinu. Walaupun di akhir proses jumlah sel alga yang diperoleh pada proses kultivasi filtrasi lebih banyak, namun dalam perjalanan prosesnya keberadaan sel tersebut selalu dijaga pada kondisi tertentu. Itulah mengapa jumlah sel dalam reaktor pada proses kultivasi kontrol dirasakan lebih banyak dan menghasilkan nilai pH kultur yang lebih tinggi dibandingkan proses kultivasi dengan filtrasi semikontinu.

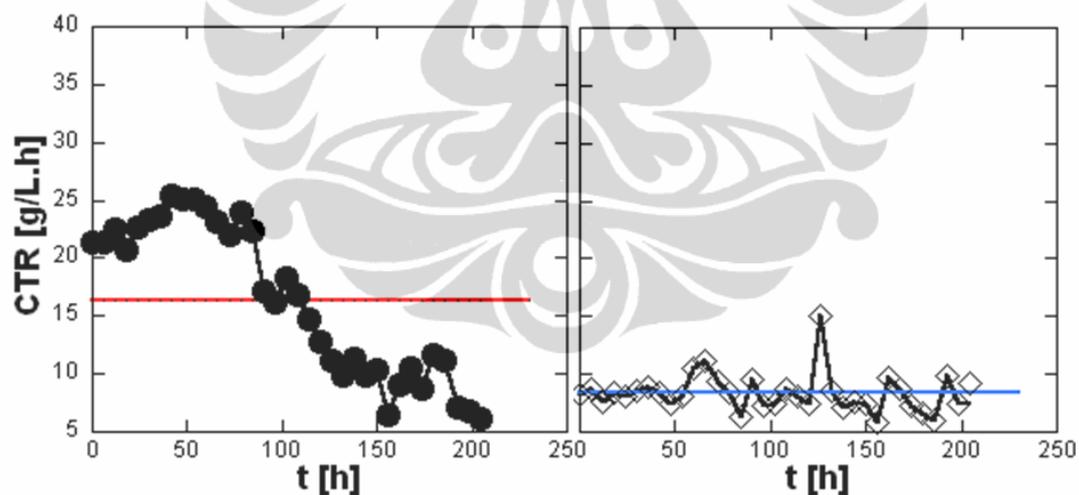


Gambar 4.5.3. Profil $[\text{HCO}_3^-]$ selama masa kultivasi dengan [A]: sistem kultivasi alga tanpa perlakuan, dan [B]: sistem kultivasi filtrasi semikontinu.

Perhitungan $[\text{HCO}_3^-]$ menggunakan persamaan (3.3), dimana konsentrasi bikarbonat ini berbanding lurus dengan nilai pH. Dengan demikian semakin tinggi nilai pH maka jumlah ion bikarbonat yang terlarut dalam medium juga menjadi lebih besar. Sementara itu nilai $[\text{HCO}_3^-]$ yang naik turun sepanjang proses kultivasi dikarenakan adanya mekanisme pengeluaran dan pemasukan medium kultur.

4.5.4 Pengaruh Sistem Filtrasi Semikontinu terhadap Laju Transfer Karbon (CTR) pada Medium

CTR menunjukkan jumlah gas CO_2 yang dipindahkan ke dalam medium dalam suatu waktu yang digunakan untuk proses metabolisme sel mikroalga (Wijanarko, 2008). Nilai CTR berbanding lurus dengan CO_2 yang terdifusi ke dalam medium. Semakin tinggi CO_2 yang terdifusi dalam medium, maka nilai CTR juga akan semakin besar. Gambar di bawah ini menunjukkan perbandingan CTR pada kedua metode pemanenan.



Gambar 4.5.4. Kurva CTR vs t, (kiri: kontrol, kanan: filtrasi semi kontinu)

CTR secara umum mengalami penurunan seiring dengan berlangsungnya kultivasi. Penurunan ini diakibatkan karena medium telah jenuh oleh CO_2 . Sel juga dapat memproduksi sumber karbonnya sendiri, sehingga CO_2 di dalam medium tidak diserap, dan CO_2 yang dialirkan lewat begitu saja menuju keluar reaktor.

Pada proses kultivasi dengan filtrasi semikontinu, CTR yang dihasilkan lebih kecil dibanding kontrol. Hal ini dimungkinkan karena besarnya jumlah sel yang terakumulasi dalam reaktor lebih kecil dibandingkan dengan jumlah sel pada proses kultivasi kontrol. Hal ini karena pada filtrasi semikontinu terjadi pemerangkapan sebagian sel dengan cara mengalirkannya keluar reaktor. Dengan demikian jumlah sel yang terdapat di dalamnya menjadi berkurang. Seperti kita ketahui bahwa jumlah sel yang besar sangat memungkinkan sel untuk memfiksasi CO₂ lebih besar dibandingkan dengan jumlah sel yang lebih kecil. Dalam hal ini proses filtrasi semikontinu memiliki jumlah akumulasi sel dalam reaktor yang cenderung lebih kecil dibandingkan proses kultivasi kontrol.

4.5.5. Analisis Kandungan Esensial dari Sel *Chlorella vulgaris* Hasil Kultivasi

Pada penelitian ini juga dilakukan uji kandungan esensial dari sel *C. vulgaris* hasil kultivasi di atas. Pengujian ini dimaksudkan sebagai salah satu parameter penilaian tentang kinerja fotobioreaktor yang dilengkapi dengan sistem filtrasi yang digunakan untuk produksi biomassa *C. vulgaris*. Kandungan esensial yang dipilih untuk pengujian ini adalah kandungan lipid, klorofil dan betakaroten. Pemilihan atas ketiga kandungan esensial tersebut dengan pertimbangan bahwa ketiga komponen itulah yang kebanyakan menjadi kandungan esensial yang potensial bagi *C. vulgaris*. Sebagai pembanding, dilakukan juga uji kandungan terhadap *Chlorella* yang di pre-kultur atau yang diaerasi dengan kandungan karbon yang relatif lebih sedikit dibandingkan dengan sel hasil kultivasi.

Tabel 4.5.1. Perbandingan kandungan nutrisi dalam % berat kering

Jenis Perlakuan	Beta Karoten	Klorofil a+b	Lipid	Protein
Filtrasi semikontinu	0,2486	0,6253	35,84	38,50
Kontrol	0,2517	0,8422	36,72	37,79
<i>Preculture</i>	0,1246	0,4636	37,69	36,63

Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya bahwa uji kandungan esensial dari hasil kultivasi ini menggunakan metode-metode dasar yang bersifat umum dan belum dilakukan optimasi terhadap tingkat kemurnian produk yang diperoleh. Dengan demikian hasil kuantitatif yang diperoleh terhadap produk esensial di atas, terutama untuk lipid, masih sangat dimungkinkan mengandung senyawa-senyawa

lain. Walaupun demikian, pengujian di atas dapat menunjukkan kecenderungan kualitas sel yang dihasilkan dari proses kultivasi dengan filtrasi semi kontinu.

Dari hasil kultivasi di atas dapat disimpulkan beberapa hal yaitu:

1. Sistem filtrasi semi kontinu dalam penelitian ini, menghasilkan peningkatan produksi biomassa tertinggi kedua setelah sistem kultivasi menggunakan mikrofiltrasi dalam sistem filtrasi kontinu, yaitu sebesar 2 kalinya dari proses kultivasi biasa (kontrol). Pencapaian densitas akhir sel dari perlakuan ini adalah $1,64 \text{ g.L}^{-1}$.
2. Sistem pemerangkapan semi kontinu ini telah berhasil membuat kondisi densitas sel terjaga sedemikian rupa, sehingga tetap mendapatkan pencahayaan yang optimal selama masa kultivasi. Disamping itu, adanya mekanisme penambahan medium baru juga membuat kebutuhan sel akan nutrisi dari medium menjadi memadai. Hal inilah yang memicu peningkatan produktivitas sel dalam proses kultivasinya.
3. Namun dari sisi efektivitas medium yang dipergunakan maka sistem filtrasi semi kontinu menjadi kurang efektif bila dibandingkan dengan sistem filtrasi secara kontinu. Karena selama proses kultivasinya selalu dilakukan penambahan medium baru pada rentang waktu tertentu, sementara pada proses kultivasi dengan filtrasi secara kontinu, tetap menggunakan media yang sama hingga akhir waktu kultivasi (204 jam).
4. Ditinjau dari kemampuan fiksasi CO_2 nya, sistem kultivasi dengan sistem filtrasi secara kontinu belum berhasil mendapatkan hasil yang optimal. CTR yang dihasilkan lebih kecil dibanding kontrol. Hal ini dimungkinkan karena besarnya jumlah sel yang terakumulasi dalam reaktor lebih kecil dibandingkan dengan jumlah sel pada proses kultivasi kontrol, sebagai akibat dari adanya pemerangkapan sebagian sel pada rentang waktu tertentu dengan cara mengalirkannya keluar reaktor. Dengan demikian jumlah sel yang terdapat di dalamnya menjadi berkurang. Seperti kita ketahui bahwa jumlah sel yang besar sangat memungkinkan sel untuk memfiksasi CO_2 lebih besar dibandingkan dengan jumlah sel yang lebih kecil.

5. Dari hasil analisis terhadap kandungan biomasanya dalam sistem kultivasi ini, lipid dan protein memiliki presentasi terbesar dalam *Chlorella vulgaris*, yaitu sebesar 35,84 dan 38,5 % dari berat kering selnya.

4.6. Pembudidayaan *Chlorella vulgaris* dalam Berbagai Jenis Media Kultur untuk Tujuan Aplikasi Industri.

Mikroalga *Chlorella* sp. merupakan salah satu mikroalga hijau yang semakin banyak dikembangkan sebagai penghasil biomassa. Belakangan ini, *Chlorella* sp. sangat diminati oleh para ahli untuk diteliti karena kemampuannya sebagai penghasil biomassa yang memiliki manfaat ganda. Saat ini *Chlorella* sp tidak saja bermanfaat sebagai suplemen makanan dan kesehatan, tetapi juga bermanfaat sebagai bahan baku biodiesel. Sebagai bahan baku suplemen makanan dan kesehatan, berbagai riset telah dilakukan di beberapa negara dan terbukti bahwa *Chlorella* aman dijadikan sebagai bahan pangan alternatif yang mempunyai khasiat penyembuh. Sedangkan sebagai bahan baku biodiesel, *Chlorella* ini masih berada dalam taraf pengkajian. Namun dengan adanya kandungan asam lemak yang tinggi dalam *Chlorella* tersebut, membuat mikroalga ini memiliki potensi yang menjanjikan untuk dijadikan sebagai biodiesel. Selain manfaat biomassa itu sendiri, *Chlorella* sp. dalam proses pembudidayaannya dapat dimanfaatkan sebagai pereduksi pemanasan global, yaitu dengan memfiksasi CO₂ yang terjadi dalam proses fotosintesis. Dengan demikian adanya riset berbasis mikroalga *chlorella* ini diharapkan dapat menghasilkan produksi biomassa yang dapat menjadi alternatif penyediaan sumber energi dan menjadi salah satu metode alternatif proses fiksasi CO₂ yang aman dan ramah lingkungan dalam mengatasi masalah gas rumah kaca.

Pada topik kali ini, pembahasan budi daya mikroalga *C. vulgaris* akan diarahkan untuk tujuan aplikasi industri. Berdasarkan uraian di atas bahwa *Chlorella* sp memiliki banyak keutamaan, demikian halnya dengan *C. vulgaris*. Pembahasan pada topik ini akan terbagi menjadi 2 topik kecil yaitu:

1. Pengaruh Jenis Media kultur terhadap Perolehan Kandungan Lipid dalam mikroalga *Chlorella vulgaris*.
2. Pemanfaatan Gas Buang yang diperkaya dengan kandungan gas NOx dalam budidaya Mikroalga *C. vulgaris*.

4.6.1. Pengaruh Jenis Media kultur terhadap Perolehan Kandungan Lipid dalam mikroalga *Chlorella vulgaris*.

Dewasa ini telah dikembangkan berbagai sumber pangan alternatif yang kaya akan kandungan esensial, salah satunya yaitu mikroalga *C. vulgaris*. Mikroalga ini dikenal sebagai makhluk hidup yang kaya akan karbohidrat, protein, dan lemak dimana zat – zat ini begitu penting dalam memperkuat ketahanan pangan. Besarnya kadar kandungan esensial tersebut dapat dipengaruhi oleh jenis medium pertumbuhannya sebagai sumber nutrisi. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan data kadar kandungan esensial pada mikroalga *C. vulgaris* dengan variasi nutrisi pada medium yang diberikan sehingga memudahkan para peneliti untuk mengidentifikasi jenis nutrisi terbaik untuk mendapatkan kandungan esensial yang optimal.

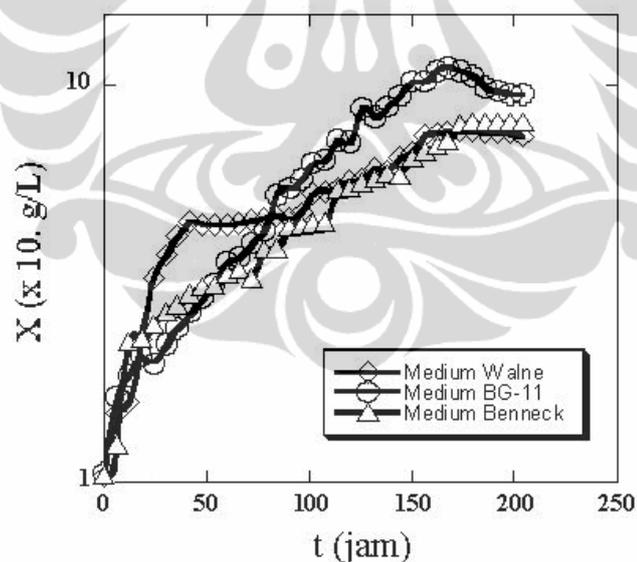
Media pertumbuhan mikroorganisme adalah suatu bahan yang terdiri dari nutrisi yang diperlukan mikroorganisme untuk pertumbuhannya. Mikroorganisme memanfaatkan nutrisi media berupa molekul-molekul kecil yang dirakit untuk menyusun komponen sel. Dengan media pertumbuhan dapat dilakukan isolat mikroorganisme menjadi kultur murni dan juga memanipulasi komposisi media pertumbuhannya (Indra, 2008). Jenis – jenis nutrisi pada medium perkembangbiakkan *Chlorella* akan mempengaruhi sintesa protoplasma dan hal ini merupakan faktor lingkungan kimia utama penentu kualitas alga.

Pada penelitian ini kualitas yang diamati adalah kadar lipid dalam berat kering mikroalga *C. vulgaris*. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa tingkat pertumbuhan dan kadar kandungan esensial sangat dipengaruhi oleh medium pertumbuhannya dan setiap jenis medium memberikan pengaruh berbeda terhadap kualitas *C. vulgaris*. Pada dasarnya, perbedaan kualitas alga *Chlorella* pada berbagai media disebabkan oleh kekhususan komponen kimia yang terkandung di

dalam masing – masing media. Nilai kandungan gizi *Chlorella* berupa protein, karbohidrat, dan lipid merupakan tolak ukur dari kualitas *Chlorella*, terutama yang akan dimanfaatkan sebagai bahan makanan dan bahan bakar. Ketersediaan berbagai jenis media anorganik dengan kandungan unsur kimia yang berlainan satu sama lain, mendasari dilakukannya penelitian ini. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada media kultur yang berbeda dan mengetahui kadar kandungan lipid. Informasi mengenai kelebihan dan kekurangan masing – masing media tumbuh ditinjau dari respon alga ber-sel *Chlorella* sp. diharapkan dapat menjadi acuan bermanfaat bagi pemilihan media dalam membudidayakan *Chlorella* tersebut.

4.6.1.1. Pengaruh Variasi Media Kultur terhadap Pembentukan Berat Kering *C. vulgaris*.

Hasil perolehan biomassa dari proses kultivasi dengan beberapa jenis medium dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar. 4.6.1. Profil Pertumbuhan biomassa *C. vulgaris* pada beberapa jenis media

Dari Gambar 4.6.1. dapat dilihat bahwa kelimpahan tertinggi pada saat fase stasioner selama pengamatan adalah *C. vulgaris* yang dikultivasi dalam medium BG-11 yaitu mencapai 1,5 g/L. lalu diikuti oleh pertumbuhan *C. vulgaris* yang dikultivasi dalam Medium Benneck mencapai 1,103 g/L, dan selanjutnya oleh media Walne mencapai 0,761 g/L. Data kultivasi di atas dilakukan pengambilan

data pertumbuhan setelah dilakukan *Chlorella vulgaris* yang dipre-kultur selama 24 jam untuk menghindari *lag phase* agar pada saat kultivasi dilakukan, pertumbuhan sudah menunjukkan fase eksponensial.

Setelah masa adaptasi berakhir terjadi pertumbuhan yang dipercepat pada fase eksponensial. Pada fase eksponensial dapat dilihat bahwa *Chlorella vulgaris* yang dikultivasi dalam ketiga medium tersebut pada 100 jam pertama memiliki profil yang naik. *C. vulgaris* yang dikultivasi di dalam media Walne memiliki profil tertinggi bila dibandingkan dengan medium lainnya. Namun demikian *C. vulgaris* yang dibiakkan dalam BG-11 setelah seratus jam masih mengalami pertumbuhan yang lebih besar dibandingkan dengan media kultur lainnya dan bahkan mengalami puncak kepadatan sel tertinggi setelah di atas 180 jam. Hal ini dikarenakan pada media Walne umumnya memiliki kandungan unsur hara yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan media kultur lainnya. Sebagai contoh unsur nitrogen yang digunakan sebagai salah satu bahan utama bagi *Chlorella* untuk membantu proses pertumbuhannya sebanyak 100 mg/L. Meskipun unsur – unsur lainnya pada media Walne beragam, namun pada umumnya memiliki konsentrasi yang jauh lebih kecil. Hal ini berdampak pada mudahnya *Chlorella* menyesuaikan kondisi intraselnya untuk dapat beradaptasi dengan media kultur yang baru, sehingga proses penyerapan unsur hara secara difusi lebih mudah untuk dilakukan dalam media Walne. Berbeda dengan media BG-11 yang memiliki tingkat kenaikan jumlah selnya yang lebih rendah dibandingkan yang lain pada sekitar 70 jam pertama. Hal ini disebabkan *C. vulgaris* membutuhkan waktu adaptasi yang lebih lama dengan media kultur barunya yang relatif memiliki konsentrasi unsur hara yang lebih tinggi. Sebagai contoh yaitu unsur nitrogen dalam media BG-11 mencapai 1500 mg/L dalam bentuk NaNO_3 dimana jumlahnya mencapai lima belas kali lipat lebih banyak dibandingkan dengan sumber nitrogen yang ada pada media Walne. Namun setelah melewati waktu kultivasi 100 jam, *C. vulgaris* yang dibiakkan dalam media Walne cenderung sudah mengalami penurunan tingkat pertumbuhan. Hal ini dikarenakan jumlah unsur hara dalam media Walne sudah habis dan tidak lagi dapat dengan optimum melakukan pertumbuhannya. Berbeda dengan *C. vulgaris* yang dibiakkan dalam media BG-11 setelah 100 jam masih menunjukkan

kenaikkan pertumbuhan yang signifikan sampai 180 jam dan mulai mendekati fase stasioner pada 196 jam. Hal ini terjadi karena media kultur BG-11. Pada media ini unsur-unsur Fe, Mn, Cl, dan Zn lebih banyak tersedia dari pada media yang lainnya. Unsur-unsur tersebut digunakan *Chlorella* sp untuk proses fotosintesis, dimana hasilnya digunakan untuk pertumbuhan (Fogg, 1965). Pada fase eksponensial terjadi peningkatan rerata kerapatan sel. Proses perbanyakan sel pada saat memasuki fase eksponensial berlangsung cepat sehingga populasi sel bertambah. Pertambahan populasi sel *Chlorella vulgaris* yang pesat tersebut kemungkinan terjadi karena kandungan nutrisi di dalam BG-11 masih terdapat dalam konsentrasi yang tinggi sehingga proses pertumbuhan dan pembelahan sel berlangsung cepat. Kurva pertumbuhan memperlihatkan kultur mencapai saat *peak* yang berbeda pada masing-masing media perlakuan.

Setelah mencapai *peak*, rerata kerapatan sel mulai menurun, yang menandakan kultur mulai memasuki fase stasioner. Fase stasioner pada kultur mikroalga berkaitan dengan berkurangnya sejumlah besar nutrisi. Selain itu, penurunan terjadi akibat berkurangnya intensitas cahaya yang diterima oleh *C. vulgaris* akibat adanya fenomena pembentukan bayangan (fenomena *self-shading*) oleh sel-sel mikroalga tersebut dalam kultur.

Kultivasi pada media Bencek menghasilkan pertumbuhan spesifik *Chlorella* sp lebih rendah dari pada perlakuan dengan media BG-11. Namun hasil ini masih lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil dari perlakuan dalam media Walne. Hal ini terjadi karena dalam media Bencek terdapat unsur utama dalam proses pertumbuhan yang cukup besar konsentrasinya yaitu senyawa nitrogen, yang terbentuk dalam senyawa NaNO_3 sebesar 500 mg/L. Jumlah senyawa ini lima kali lebih banyak dibandingkan dengan media Walne yang hanya mencapai 100 mg/L.

Dalam medium BG-11 peningkatan pertumbuhan selnya sangat tinggi. Hal ini sangat menguntungkan bagi kultur pakan alami yang membutuhkan jumlah pakan yang cukup dan waktu yang cepat. Fase kematian terjadi setelah masing-masing perlakuan media mencapai puncak populasi. Pengurangan populasi ini disebabkan karena kultur yang dilakukan pada volume yang terbatas yang

menyebabkan jumlah *nutrien* yang terkandung dalam media juga terbatas sehingga *Chlorella* sp tidak mampu lagi mempertahankan kepadatan selnya.

Perolehan pertumbuhan sel terendah diperoleh kultivasi *Chlorella* dalam medium Walne. Hal ini disebabkan karena media Walne memiliki kandungan NaNO_3 yang rendah yaitu sekitar 100 mg/L dan media Walne juga tidak memiliki ion fosfat dalam media kulturnya. Hal ini menyatakan bahwa diperlukan fosfat dan nitrogen dalam bentuk nitrit (NO_2^-), nitrogen merupakan salah satu unsur yang diperlukan mikroalga dalam jumlah besar dan bisa menjadi faktor pembatas dalam pertumbuhan mikroalga (Nybakken 1992). Kebutuhan unsur hara yang tercukupi dan faktor lingkungan yang mendukung akan menghasilkan laju pertumbuhan yang baik.

Menurut Bold dan Wayne 1985, nitrogen adalah komponen yang penting sebagai sumber nutrisi mikroalga untuk fase pertumbuhannya. Mikroalga akan memasuki fase pertumbuhan secara eksponensial sebagai fungsi waktu, sepanjang unsur hara dan cahaya mencukupi (Richmond 2003). Grahame (1987) juga menyatakan bahwa penambahan nitrogen dapat meningkatkan pertumbuhan mikroalga sesuai dengan anggapan bahwa nitrogen merupakan faktor pembatas.

Unsur Fosfor (P) yang ada pada media BG-11 dan Beneck, mutlak diperlukan karena unsur ini penting untuk proses transformasi energi dalam proses fotosintesis. Fosforilasi adenosine menghasilkan adenosine monofosfat, difosfat, dan trifosfat (AMP, ADP, dan ATP) yang kemudian digunakan oleh mikroalga sebagai sumber energi untuk kelangsungan proses kimia lainnya. Fungsi K_2HPO_4 adalah sebagai sumber fosfor untuk sintesis senyawa penghasil energi bagi aktivitas sel (Kuhl, 1974). Pada konsentrasi fosfat yang tinggi, energi yang diperlukan oleh *C. vulgaris* tersedia dalam jumlah yang lebih banyak sehingga *C. vulgaris* yang lebih cenderung akan memanfaatkan nitrat untuk pertumbuhannya dibandingkan ammonium (Hladka, 1971). Konsentrasi nitrat yang relatif lebih rendah dibandingkan konsentrasi ammonium, diduga tidak dapat mencukupi kebutuhan *Chlorella* untuk mendukung pertumbuhannya. Hal inilah yang menyebabkan meskipun media Walne memiliki kandungan ion NH_4^+ yang berasal dari $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ sebesar 0.009 mg/L. Namun media ini tidak memiliki

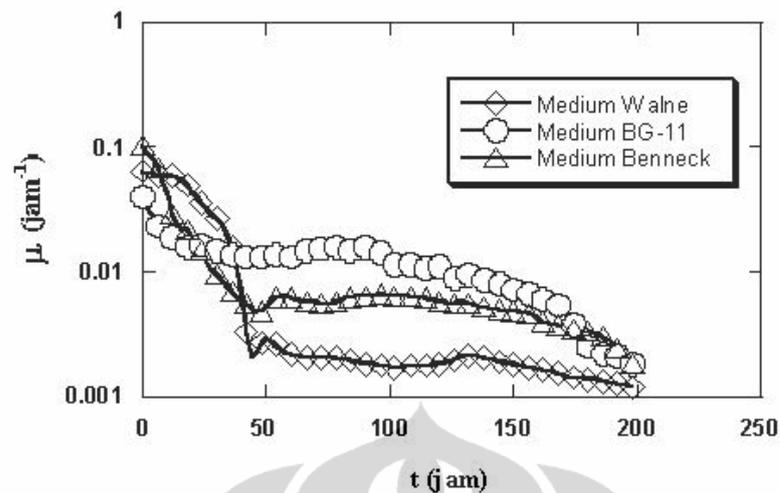
kandungan unsur hara yang cukup untuk memenuhi kebutuhan nutrisi *Chlorella vulgaris*.

Pada media kultur BG-11 unsur-unsur Fe, Mn, Cl, dan Zn lebih banyak tersedia dari pada media yang lainnya. Unsur-unsur tersebut digunakan *Chlorella* sp untuk proses fotosintesis, dimana hasilnya digunakan untuk pertumbuhan (Fogg, 1965). Pada fase eksponensial terjadi peningkatan rerata kerapatan sel. Proses perbanyakkan sel pada saat memasuki fase eksponensial berlangsung cepat sehingga populasi sel bertambah. Pertambahan populasi sel *Chlorella vulgaris* yang pesat tersebut kemungkinan terjadi karena kandungan nutrien di dalam BG-11 masih terdapat dalam konsentrasi yang tinggi sehingga proses pertumbuhan dan pembelahan sel berlangsung cepat. Kurva pertumbuhan memperlihatkan kultur mencapai saat *peak* yang berbeda pada masing-masing media perlakuan.

Setelah mencapai *peak*, rerata kerapatan sel mulai menurun, yang menandakan kultur mulai memasuki fase stasioner. Fase stasioner pada kultur mikroalga berkaitan dengan berkurangnya sejumlah besar nutrien. Selain itu, penurunan terjadi akibat berkurangnya intensitas cahaya yang diterima oleh *Chlorella vulgaris* akibat adanya fenomena pembentukan bayangan (fenomena *self-shading*) oleh sel-sel mikroalga tersebut dalam kultur.

4.6.1.2. Pengaruh Variasi Media Kultur terhadap Laju Pertumbuhan

Profil laju pertumbuhan yang dihasilkan dari kultivasi pada beberapa media dapat dilihat pada Gambar di bawah ini. Dari gambar di atas terlihat bahwa terdapat perbedaan laju pertumbuhan maksimum pada awal kultivasi dimana laju pertumbuhan maksimum pada reaktor dengan medium Benneck lebih tinggi dibandingkan pada reaktor dengan medium BG-11 dan Walne pada 30 jam pertama.



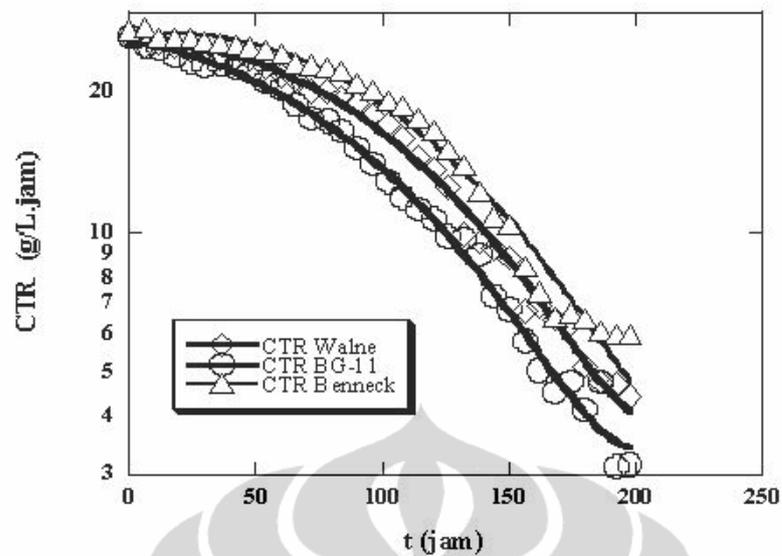
Gambar 4.6.1.2. Profil Laju Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada kultivasi dengan beberapa jenis medium.

Namun setelah 30 jam media kultur BG-11 mengalami laju pertumbuhan biomassa setiap jam paling optimum dibandingkan dengan yang lainnya. Hal ini telah dijelaskan dengan detail pada pengaruh media kultur terhadap nilai X pada setiap media kultur yang berbeda. Hal ini telah dijelaskan bahwa kebutuhan unsur hara yang tercukupi dan faktor lingkungan yang mendukung akan menghasilkan laju pertumbuhan yang baik. Nitrogen adalah komponen yang penting sebagai sumber nutrisi mikroalga untuk fase pertumbuhannya. Mikroalga akan memasuki fase pertumbuhan secara eksponensial sebagai fungsi waktu, sepanjang unsur hara dan cahaya mencukupi.

4.6.1.3. Pengaruh Variasi Media Kultur terhadap Carbon Transfer Rate (CTR) mikroalga *Chlorella vulgaris*.

CTR (*Carbon Transfer Rate*) merupakan banyaknya gas CO_2 yang ditransferkan dalam suatu volume medium kultur yang dibutuhkan oleh metabolisme sel selama satu satuan waktu tertentu (Wijanarko dkk, 2007). Nilai CTR didapatkan dari selisih konsentrasi CO_2 masukan dan keluaran (Δy_{CO_2}) dikalikan dengan koefisien transfer spesifik dari CO_2 (α_{CO_2}).

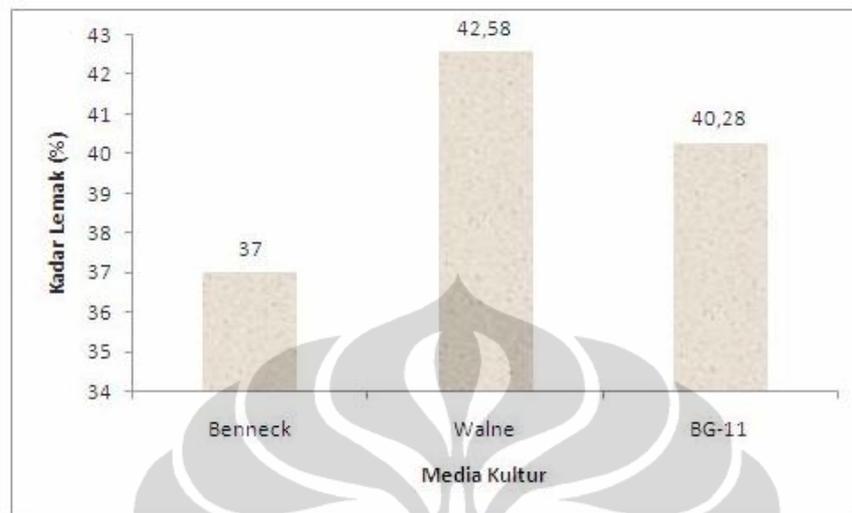
Kurva kecenderungan CTR sebagai fungsi waktu dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.6.1.3. Pengaruh Variasi Medium Pertumbuhan terhadap CTR

Dari gambar 4.6.1.3. dapat dilihat bahwa pada awal pertumbuhan nilai CTR cukup tinggi karena terjadi transfer atau konsumsi gas CO_2 ke dalam medium oleh mikroalga untuk keperluan metabolisme sel. Nilai CTR berbanding lurus dengan Δy_{CO_2} , sehingga seiring dengan pertambahan waktu nilai CTR cenderung turun akibat tidak seimbangnya peningkatan jumlah sel dengan besarnya fiksasi konsentrasi CO_2 . Medium lama-kelamaan akan jenuh dengan CO_2 terlarut karena sel dapat memproduksi sumber karbonnya sendiri. Gas CO_2 yang dialirkan tidak lagi terserap oleh mikroalga dan sebagian besar lewat begitu saja menuju outlet. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa nilai CTR pada medium B enneck rata-rata lebih baik dibandingkan dengan media Walne dan BG-11 walaupun pada umumnya perbedaannya tidak begitu signifikan. Hal ini terjadi karena pada media kultur BG-11 memiliki tingkat pertumbuhan yang umumnya lebih besar. Hal ini memungkinkan media kultur berada pada kondisi yang lebih jenuh sehingga mempersulit gas CO_2 untuk larut dalam media kultur. Nilai rata – rata CTR (Carbon transfer rate) tertinggi terdapat pada *Chlorella vulgaris* media kultur beneck sebesar $17.87 \text{ g/dm}^3.\text{h}$, pada media Walne sebesar $16,02 \text{ g/L.jam}$, dan nilai rata – rata CTR terendah terdapat pada *C. vulgaris* sebesar $14,22 \text{ g/L.jam}$.

4.6.1.4. Pengaruh Variasi Media Kultur terhadap Pembentukan Lipid *Chlorella vulgaris*.



Gambar 4.6.1.4. Presentase Lipid *Chlorella vulgaris* dalam berbagai media kultur.

Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa pada mikroalga yang dikultivasi pada medium Walne memiliki kadar lipid tertinggi (42,58 %). Sedangkan mikroalga dalam medium Benneck mencapai 37 % dan BG-11 40,58 % kandungan lipidnya. Hal ini terjadi karena dalam sistem metabolisme yang ada pada protoplasma, pada konsentrasi nitrogen rendah seluruh alga memiliki kandungan dan produktivitas yang tinggi, sebaliknya pada pada konsentrasi nitrogen yang tinggi kandungan produktivitas yang lipidnya rendah (Sheehan, 1998). Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Sriharti pada tahun 1998 yang mendapatkan nilai lipid lebih besar pada *Chlorella* sp dengan media Allen yang memiliki kandungan nitrogen lebih sedikit dibandingkan media vonshak.

Kimball (1991) berpendapat bahwa ada hubungan metabolisme antara karbohidrat . protein, dan lemak yaitu kompetisi asetil ko-A, yang merupakan precursor pada beragam jalur biosintesis seperti lemak, protein, dan karbohidrat. Pada kondisi stress lingkungan yaitu konsentrasi nitrogen rendah, mikroalga akan cenderung membentuk lipid sebagai cadangan makanan daripada membentuk karbohidrat dan senyawa lainnya. Hal ini disebabkan karena mikroalga lebih banyak menggunakan atom karbon untuk membentuk lipid daripada karbohidrat,

sebagai akibat meningkatnya aktifitas enzim asetil ko-A karboksilase (Sheehan, 1998).

Nitrogen dibutuhkan mikroalga dalam jumlah cukup untuk dapat menjalankan kehidupannya. Kebutuhan nitrogen dan intensitas cahaya masing – masing mikroalga berbeda mikroalga berbeda. Hal ini terlihat pada perbedaan laju pertumbuhan, biomassa, kandungan dan produktivitas lipid mikroalga.

Pada konsentrasi nitrogen dan intensitas cahaya tinggi seluruh mikroalga memiliki laju pertumbuhan yang tinggi dengan biomassa yang juga tinggi tetapi umumnya memiliki kandungan dan produktivitas lipid yang rendah. Sebaliknya pada konsentrasi nitrogen rendah menghasilkan laju pertumbuhan dan biomassa yang rendah. Hal ini dapat diartikan bahwa pada umumnya meningkatnya konsentrasi nitrogen dapat menyebabkan peningkatan biomassa, protein, klorofil, tetapi menurunkan kandungan lipid. Pada konsentrasi nitrogen rendah mikroalga memiliki laju pertumbuhan dan biomassa rendah tetapi memiliki kandungan lipid yang tinggi. Hal ini sesuai dengan pendapat borowitzka & borowitzka (1988) yang menyatakan bahwa pada konsentrasi nitrogen yang rendah mikroalga mengandung banyak lipid. Menurut Becker (1994), mikroalga yang tumbuh pada kondisi yang kekurangan nitrogen dalam kultur biakkan akan cenderung mengakumulasi sejumlah besar lipid, tetapi akan menurunkan produksi biomassa, protein, dan asam nukleat.

Lipid merupakan kelompok senyawa yang kaya akan karbon dan hidrogen. senyawa yang termasuk lipid adalah lemak dan minyak. Lipid juga berperan penting dalam komponen struktur membran sel. Lemak dan minyak dalam bentuk trigliserol yang berfungsi sebagai sumber energi, lapisan pelindung dan insulator organ – organ sel. Beberapa jenis lipid berfungsi sebagai sinyal kimia dan pigmen. Selain ketersediaan unsur hara dan intensitas cahaya, laju pertumbuhan dan produksi lipid juga berhubungan dengan proses biokimia yang terjadi di dalam mikroalga (Becker, 1994).

Dari penelitian tentang pengaruh jenis media kultur terhadap perolehan kandungan lipid dalam mikroalga *C. vulgaris* dapat disimpulkan bahwa:

1. Adanya variasi media kultur memberikan pengaruh terhadap tingkat pertumbuhan. Puncak kepadatan sel tertinggi berat kering (X) didapat

pada *C. vulgaris* yang dibiakkan dalam BG-11 yaitu mencapai 1,10 gr/dm³, selanjutnya pada media Beneck mencapai 0,80 gr/dm³, lalu kepadatan sel pada media walne mencapai 0,77 gr/dm³.

2. Jenis media kultur mempengaruhi nilai CTR (*Carbon Transfer Rate*) pada *Chlorella vulgaris* Nilai rata—rata CTR tertinggi yang diperoleh dari hasil kultivasi berturut-turut adalah kultivasi dalam medium Beneck dengan nilai rata – rata CTR sebesar 17,88 g/dm³.h , pada media walne sebesar 16,02 g/dm³.h , dan pada ,medium BG-11 sebesar 14,22 g/dm³.h.
3. Dalam penelitian ini jenis media kultur turut mempengaruhi pembentukan kandungan lipid pada *Chlorella vulgaris*. Kandungan Lipid terbesar terdapat pada *C. vulgaris* yang dikultivasi pada media walne sebesar 42,58 %, dan pada media BG-11 sebesar 41,26 %, sementara pada media Beneck sebesar 37 % .

4.6.2. Pemanfaatan Gas Buang yang diperkaya dengan kandungan gas NOx dalam Budidaya Mikroalga *C. vulgaris*.

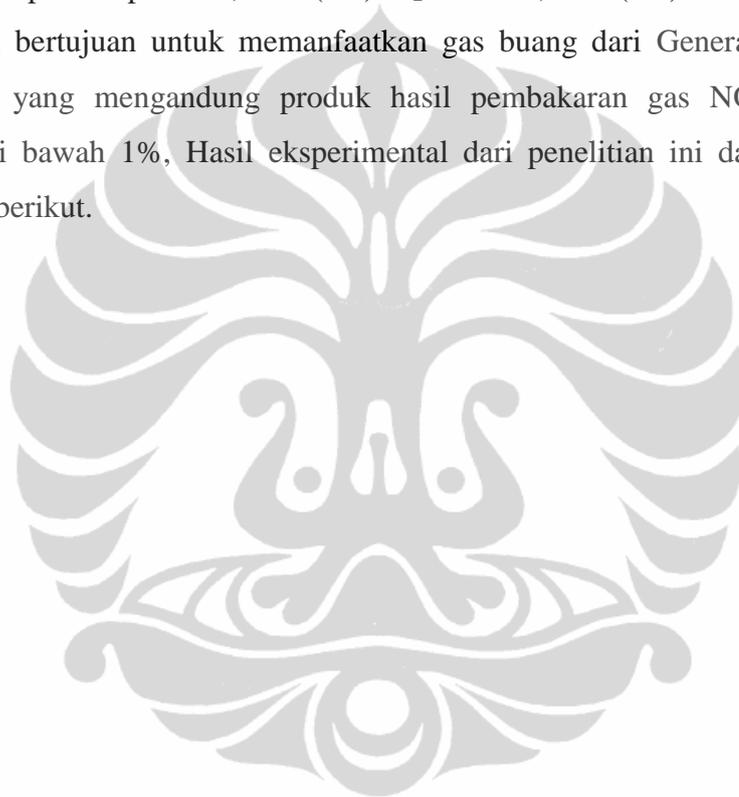
Mikroalga *C. vulgaris* merupakan salah satu jenis mikroalga hijau yang umumnya digunakan sebagai penghasil biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai suplemen makanan dan kesehatan. Namun ternyata ia juga bermanfaat untuk mereduksi pemanasan global yang disebabkan oleh banyaknya aktivitas manusia dalam penggunaan bahan bakar fosil yang semakin meningkat, yaitu dengan melakukan fiksasi CO₂ melalui proses fotosintesis. Namun, pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan gas NOx atau N₂O yang bersifat racun bagi pertumbuhan mikroalga. Pada penelitian ini *C. vulgaris* akan diuji ketahanannya terhadap N₂O, ditinjau dari jumlah berat kering sel, laju pertumbuhan spesifik, dan pH kultur.

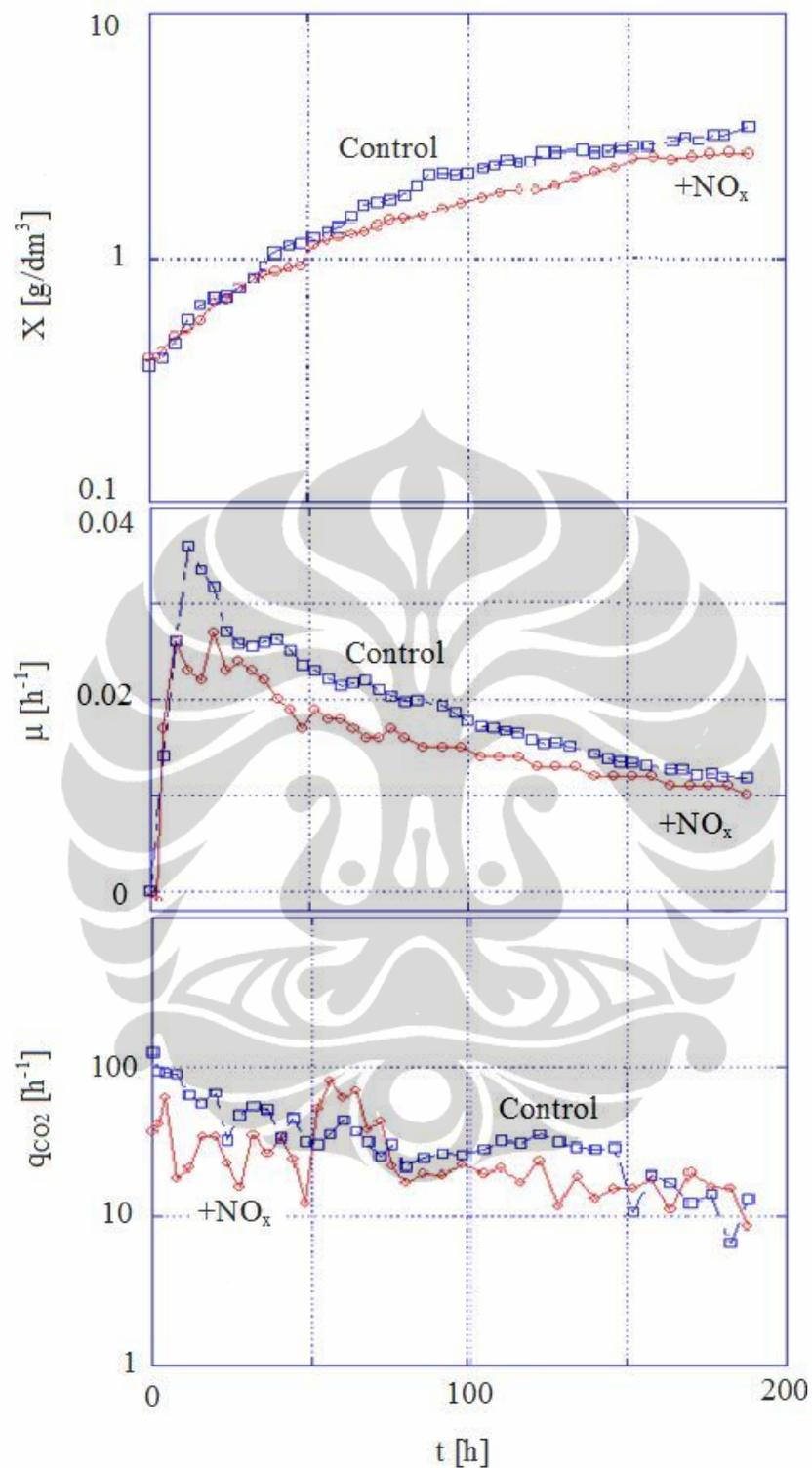
Pada penelitian ini, mikroalga *C. vulgaris* mengalami proses pengembangbiakan dalam sebuah fotobioreaktor kolom gelembung dengan pencahayaan kontinu untuk mengetahui ketahanan mikroalga terhadap polutan berupa gas N₂O yang dapat diketahui lewat pertumbuhan mikroalga *C. vulgaris*

setelah mengalami perlakuan penambahan gas N_2O kedalam medium hidupnya. Bahasan pada penelitian ini difokuskan pada pengaruh gas N_2O terhadap pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris*.

4.6.2.1. Pembahasan Hasil

Untuk keperluan aplikasi industri, sebagai langkah tambahan untuk menggunakan simulasi gas buang adalah dengan memodifikasi asupan gas dalam kolom melalui pencampuran 0,02% (v/v) N_2O dan 5,0 % (v/v) CO_2 . Simulasi percobaan ini bertujuan untuk memanfaatkan gas buang dari Generator Listrik Tenaga Gas, yang mengandung produk hasil pembakaran gas NO_x dengan konsentrasi di bawah 1%. Hasil eksperimental dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut.





Gambar 4.6.2.1. Hasil Produksi Biomassa *C.vulgaris* dengan asupan Gas yang mengandung gas NO₂ dan dibandingkan dengan proses kultivasi tanpa NO₂

Pada penelitian ini digunakan inokulum *Chlorella vulgaris* dengan nilai berat kering awal (X_{awal}) paling besar, yaitu 0,4 g/l. Inokulum tersebut diperkaya

oleh 100-300 ppm asupan gas N₂O selama waktu 188 jam dan hasilnya dibandingkan dengan inokulum yang memiliki berat kering sama namun tidak dialiri dengan N₂O (kontrol).

Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa *C. vulgaris* yang dialiri oleh N₂O sebanyak 100 - 300 ppm memiliki nilai berat kering yang lebih sedikit dibandingkan dengan berat kering yang tidak dialiri oleh N₂O seiring dengan penambahan waktu. Perbedaan nilai berat kering sel akhir (X_{akhir}) *C. vulgaris* terlihat jelas pada saat jam ke-75, dimana X_{akhir} yang dialiri gas N₂O adalah 2,67 g/l, atau 22.11 % lebih sedikit daripada X_{akhir} dari proses kultivasi kontrol sebanyak 3,42 g/l. Pola yang sama juga ditunjukkan oleh profil laju pertumbuhan spesifiknya. Penurunan jumlah biomassa yang terjadi tidaklah signifikan. Dari apa yang dihasilkan ini masih dapat dikatakan bahwa *C. vulgaris* masih mampu bertahan dalam rentang konsentrasi gas NO₂ di atas. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa *C. vulgaris* ini sangat potensial untuk dibudidayakan lebih lanjut dalam pengelolaan limbah gas buang dari industri.

Analisis berikutnya yang dilakukan adalah menguji kandungan alganya. Jenis kandungan yang dianalisis adalah Klorofil, karoten dan lipid. Hasil analisis kandungan ini dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 4.6.2.1. Hasil analisa kandungan *C. vulgaris*

Jenis kandungan	Kultivasi tanpa NO _x	Kultivasi dengan NO _x	Sebelum kultivasi	Kandungan teoritis
Klorofil (ppm)	17,9	16,8	43,3	7,0-27
Karoten (ppm)	9,42	5,6	11,6	3,3-11,2
Lipid (%)	18,3	11,8	18,8	14-22

Dari tabel tersebut dapat dikatakan bahwa proses pengaliran gas NO₂ ke dalam media kultur telah membuat pengurangan secara seluler terhadap kandungan-kandungan Klorofil, karoten dan juga lipidnya.

Dari penelitian tentang pemanfaatan gas buang yang diperkaya dengan kandungan gas NO_x dalam budidaya mikroalga *Chlorella vulgaris* dapat disimpulkan bahwa:

1. Mikroalga *C. vulgaris* memiliki ketahanan yang cukup baik dengan penambahan polutan N₂O pada konsentrasi sel awal (X_{awal}) 0,4 g/L. Hal ini ditandai dengan adanya penurunan perolehan densitas sel akhir yang tidak terlalu signifikan, yaitu hanya sekitar 22,11%. Perolehan laju pertumbuhan sel maksimum (μ_{max}) dalam penelitian ini adalah sebesar 0,026 jam⁻¹ dan berat akhir sel (X_{akhir}) sebesar 2,67 g/L dengan penambahan N₂O dengan kadar 100 – 300 ppm.
2. Adanya penambahan polutan N₂O dalam kultivasi *C. vulgaris* juga mempengaruhi kemampuan proses fiksasi CO₂ nya. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa rata-rata nilai CTR dan qCO₂ sebesar 41,515 g/L.jam dan 27,572 jam⁻¹. Hasil ini menunjukkan pengurangan yang tidak signifikan bila dibandingkan dengan perolehan hasil pada kultivasi kontrol (tanpa penambahan N₂O), yaitu sekitar 30%.
3. Penambahan gas N₂O memberikan pengaruh terhadap pengurangan kandungan lipidnya, dari 18,3 % menjadi 11,8 %.

5. Ringkasan Hasil Penelitian dan Pencapaian Publikasi Ilmiah Hasil Penelitian

Dari serangkaian kegiatan penelitian yang berjudul “Pengembangan Sistem Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* dalam Reaktor Plat Datar melalui Optimasi Pencahayaan Menggunakan Teknik Filtrasi pada Aliran Media Kultur”, beberapa hasil kuantitatif yang dihasilkan dirangkum sebagaimana dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 5.1. Ringkasan Hasil Penelitian

Aspek Penelitian	Jenis Perlakuan Kultivasi	Hasil Produksi Biomassa	Hasil Fiksasi CO ₂	Hasil Uji Kandungan	Publikasi
Intensitas Pencahayaan	Intensitas tetap, tanpa filter (kontrol) Dalam medium Benneck	0,804 g/L	CTR=16,43 g/L.jam $q_{CO_2}=73,97 \text{ g.g}^{-1}\text{sel. jam}^{-1}$	Lipid (35,84 %); Protein (291,85 ppm); klorofil (13,67 ppm); karoten (2,49 ppm)	Korean-Asean Symposium 2009
	Pengaturan Pencahayaan (alterasi)	0,908 g/L	CTR=21,44 g/L.jam. $q_{CO_2}=97,72 \text{ g.g}^{-1}\text{sel. jam}^{-1}$		
	Intensitas tetap + sistem filtrasi kontinu (media filter busa)	1,005 g/L	CTR=27,92 g/L.jam. $q_{CO_2}=88,67 \text{ g.g}^{-1}\text{sel. jam}^{-1}$		<ul style="list-style-type: none"> • Jurnal teknik Kimia Indonesia 2009; • Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia 2009; • Journal of Chemistry and Chemical Engineering 2012.
Sistem Aerasi	Sistem Pemerangkapan kontinu dengan membran serat berongga sebagai media aerator.	1,278 g/L	CTR=32,85 g.dm ⁻³ .h ⁻¹ . $q_{CO_2}=93,04 \text{ g.g}^{-1}\text{sel. h}^{-1}$		
Sistem Operasional Filtrasi.	Sistem Filtrasi semi kontinu	1,638 g/L	CTR=8,38 g.dm ⁻³ .h ⁻¹ . $q_{CO_2}=20,04 \text{ g.g}^{-1}\text{sel. h}^{-1}$	Lipid (38,24 %); Klorofil (17,88 ppm); karoten (10,42 ppm)	International Journal of Algae (submitted)
Jenis Media Filter	Sistem filtrasi dengan media mikrofiltrasi	2,046 g/L	CTR=8,38 g.dm ⁻³ .h ⁻¹ . $q_{CO_2}=20,04 \text{ g.g}^{-1}\text{sel. h}^{-1}$		
Kultivasi untuk tujuan Aplikasi Industri	Kultivasi dengan penambahan Gas NOx	0,623 g/L	CTR=41,51 g.dm ⁻³ .h ⁻¹ . $q_{CO_2}=27,57 \text{ g.g}^{-1}\text{sel. h}^{-1}$	Karoten (5,6 ppm); Klorofil: (16,8 ppm); Lipid: (11,8 %)	Asean Journal of Chemical Engineering, 2010
	Kultivasi dalam beberapa jenis media	BG-11 : 0,985 g/l Walne: 0,739 g/l	BG-11: CTR=13,78 g.dm ⁻³ .h ⁻¹ . $q_{CO_2}=45,16 \text{ g.g}^{-1}\text{sel. h}^{-1}$ Walne: CTR=14,23 g/l.h; $q_{CO_2}=43,05 \text{ g.g}^{-1}\text{sel. h}^{-1}$	BG-11: Lipid (40,58 %); Protein (462 ppm); Klorofil (17,57 ppm); Karoten (3,2 ppm)	SNTK TOPI 2011

Berikut ini adalah beberapa publikasi ilmiah yang dihasilkan dari sekian rangkaian kegiatan penelitian.

Jurnal Internasional:

1. **Dianursanti**, Nasikin, M.,Wijanarko, A., 2010., *NOx Enriched Flue Gas Fixation for Biomass Production of Chlorella vulgaris*, Asean Chemical Engineering Journal , vol 10, Number 1, 14-20.
2. **Dianursanti**, Nasikin,M.,Wijanarko, A., 2012., *The Effects of Cells Density Arrangement in Chlorella vulgaris Culture to CO₂ Fixation and Essential Substances Production*, Journal of Chemistry and Chemical Engineering, Vol 6, No.2.
3. **Dianursanti**, Nasikin,M.,Wijanarko, A., 2012, *Development of Discontinuous Filtration System for Enhancing Biomass Production and CO₂ Fixation from Chlorella vulgaris*, International Journal on Algae. (submitted)

Jurnal Nasional:

Dianursanti, Nuzulliany, R.,Wijanarko, A., dan M. Nasikin, 2009, *Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris melalui Teknik Filtrasi Dalam Aliran Sirkulasi Media Kultur*, Jurnal Teknik Kimia Indonesia, ISSN 1693-9433, Vol. 8, 87-93.

Seminar Internasional:

1. Darmawan, H., **Dianursanti**, Wijanarko, A. and Nasikin,M., 2010, *Suction Flowrate Adjustment in Filtration Process of Media Culture Circulation for Increasing Biomass Production of Chlorella vulgaris*. ASEAN-Korea Symposium on Biorefinery Technology, P64.
2. Grahita P, **Dianursanti**, Wijanarko, A., and Nasikin, M., 2010, *Determination of Hydrodynamic Parameter in Bubble Collumn Photobioreactor for Scale-up Biomass Production of Chlorella vulgaris*, ASEAN-Korea Symposium on Biorefinery Technology, P65.
3. **Dianursanti**, Septian M., Syarif A., Wijanarko, A., and Nasikin, M., 2010, *Determination of Enhancement of Chlorella sp. Biomass Production with Filtration in Circulating Media and Arrangement of Lighting Intensity*, ASEAN-Korea Symposium on Biorefinery Technology, P66.

4. **Dianursanti**, Nasikin, M., Wijanarko, A., 2011., *The Effects of Cells Density Arrangement in Chlorella vulgaris Culture to CO₂ Fixation and Essential Substances Production*, Conference on QIR, FTUI.

Seminar Nasional:

1. **Dianursanti**, Nuzulliany, R., Wijanarko, A., dan M. Nasikin, 2009, *Studi Awal Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris melalui Teknik Filtrasi Dalam Aliran Sirkulasi Media Kultur*, Seminar Nasional Teknik Kimia, ISBN 978-979-98300-1-2, TB12-1 – TB12-
2. **Dianursanti**, Wijoseno, T., Wijanarko, A. dan Nasikin, M., *Pengaruh Media Kultur Terhadap Akumulasi Kandungan Lipid Dalam Mikroalga Chlorella vulgaris*, Seminar Nasional Teknik Kimia Teknologi Oleo dan Petrokimia 2011, ISSN 1907-0500.



BAB V

KESIMPULAN

Penelitian yang berjudul “Pengembangan Sistem Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* dalam Reaktor Plat Datar melalui Optimasi Pencahayaan Menggunakan Teknik Filtrasi pada Aliran Media Kultur” telah dilakukan melalui serangkaian kegiatan penelitian. Kegiatan-kegiatan ini telah berhasil menghasilkan teknik filtrasi dalam sistem produksi biomassa *C. vulgaris* pada reaktor plat datar yang mampu mengendalikan peningkatan densitas sel dalam reaktor sedemikian rupa sehingga intensitas cahaya yang diberikan dapat tetap mencukupi kebutuhan sel selama kultivasi. Hal ini dibuktikan dengan dihasilkannya peningkatan-peningkatan dalam produksi biomassa dan fiksasi CO₂ pada setiap kegiatan penelitian yang dilakukan. Sistem Filtrasi yang dilakukan ada dua jenis, yaitu sistem filtrasi kontinu dan semikontinu. Secara umum dapat dikatakan bahwa penelitian ini telah menghasilkan sistem produksi Biomassa *C. vulgaris* dengan teknik filtrasi secara kontinu yang beroperasi secara efektif dengan kondisi operasi optimum sebagai berikut:

1. Laju alir gas optimum untuk reaktor plat datar berukuran 0,6 m x 0,4 m x 0,1 m dengan volume kultur 18 L dan *sparger* akuarium berbahan plastik adalah 15,2 m/jam atau 0,005 m/detik. Nilai laju alir gas ini menghasilkan nilai K_{La} sebesar 0,303 menit⁻¹ atau 0,005 detik⁻¹. Kondisi operasi ini dapat dikatakan lebih baik dari kondisi-kondisi operasi yang digunakan oleh peneliti-peneliti lain pada reaktor jenis kolom gelembung dan plat datar karena menggunakan ukuran reaktor yang lebih besar dengan laju alir gas yang sama atau bahkan lebih kecil dan menghasilkan nilai K_{La} yang lebih besar.
2. Laju hisap filter optimum untuk berbagai kondisi densitas sel telah didapatkan dan terangkum dalam Gambar 4.2.4. dengan korelasi sebagai berikut:

$$\sigma_{\mu max, opt} = 0,773 + 3,229X - 0,136X^2$$

Pengaturan laju hisap filter ini telah mampu mengendalikan densitas sel sedemikian rupa, sehingga intensitas cahaya yang diberikan dapat tetap mencukupi kebutuhan sel selama proses kultivasi. Pengaturan laju hisap filter ini telah berhasil meningkatkan produksi biomassa *C. vulgaris* sebesar 25%. Pengaturan ini juga berhasil meningkatkan perolehan nilai CTR dan q_{CO_2} nya sebesar masing-masing 1,7 dan 1,2 kali dari kultivasi biasa. Dengan demikian metode ini sangat potensial untuk dikembangkan sebagai alternatif untuk mereduksi keberadaan gas rumah kaca, CO₂.

3. Sistem aerasi yang optimum diperoleh dengan menggunakan membran serat berongga sebagai *sparger*. Penggunaan membran ini sebagai *sparger* telah mampu meningkatkan efektivitas produksi biomassa *C. vulgaris*. Hal ini dibuktikan dengan diperolehnya nilai K_La yang sama dengan proses yang menggunakan *sparger* akuarium plastik, namun menggunakan laju alir gas yang lebih kecil. Jika ditinjau dari keefektifan ini maka penggunaan membran serat berongga sebagai *sparger* dalam sistem filtrasi yang dilakukan, telah berhasil meningkatkan produktivitas sel hingga 6,83 kali dari penggunaan *sparger* akuarium plastik. Bila ditinjau dari aktivitas fiksasi CO₂ nya, maka penggunaan membran sebagai *sparger* dalam sistem kultivasi dengan filtrasi (secara kontinu) telah berhasil meningkatkan laju transfer karbonnya, yaitu CTR dan q_{CO_2} hingga 1,7 dan 1,2 kali dari penggunaan *sparger* biasa. Penggunaan *sparger* membran telah berhasil membuat proses transfer massa gas CO₂ ke dalam kultur menjadi lebih efisien.
4. Jenis media filter yang dapat menghasilkan peningkatan produktivitas biomassa *C. vulgaris* yang lebih baik adalah dengan menggunakan mikrofilter. Mikrofilter memiliki kekuatan hisap dan kapasitas filter yang lebih baik sehingga penggunaannya dalam sistem filtrasi ini, mampu mengendalikan densitas sel pada rentang kondisi yang sesuai dengan besarnya intensitas cahaya yang diberikan. Hasil yang dicapai dengan penggunaan mikrofilter ini lebih baik dibandingkan dengan penggunaan filter busa pada penelitian sebelumnya. Jika digabungkan dengan

optimasi-optimasi kondisi di atas, maka penggunaan mikrofiltrasi dengan pengaturan laju hisap filter dan penggunaan membran serat berongga sebagai aeratornya, telah berhasil meningkatkan produksi biomassa menjadi 2.12 kali dari penggunaan filter busa biasa. Bila ditinjau dari kemampuan fiksasi CO₂ nya, maka penggunaan mikrofiltrasi ini telah dapat meningkatkan nilai CTR nya hingga 1,5 kali dari penggunaan filter busa biasa.

Sistem filtrasi lain yang juga dikembangkan adalah sistem filtrasi semikontinu. Dalam penelitian ini, sistem filtrasi semikontinu menghasilkan peningkatan produksi biomassa tertinggi kedua setelah sistem kultivasi menggunakan mikrofiltrasi. Dalam sistem filtrasi semikontinu, peningkatan produksi biomassa yang diperoleh yaitu sebesar 2 kalinya dari proses kultivasi biasa (kontrol) sementara pada proses filtrasi kontinu dengan mikrofiltrasi diperoleh peningkatan produksi biomassa sebesar 2,5 kali dari proses kontrol. Namun dari sisi efektivitas medium yang dipergunakan maka sistem filtrasi semi kontinu menjadi kurang efektif bila dibandingkan dengan sistem filtrasi secara kontinu. Karena selama proses kultivasinya selalu dilakukan penambahan medium baru pada rentang waktu tertentu, sementara pada proses kultivasi dengan filtrasi secara kontinu, tetap menggunakan media yang sama hingga akhir waktu kultivasi (204 jam).

Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian terhadap kandungan esensial dari *Chlorella vulgaris*. Pengujian yang dilakukan terhadap kandungan Klorofil, Betakaroten dan Lipid dari alga *C. vulgaris*, rata-rata menunjukkan nilai kandungan yang berada dalam rentang kandungan teoritisnya, kecuali kandungan lipid. Untuk kandungan lipid diperoleh rata-rata sekitar 1,7 kali lebih besar dari kandungan maksimum teoritis untuk mikroalga *Chlorella* sp.

Hal ini menjadi peluang menarik untuk pengembangan dan pemanfaatannya ke depan sebagai sumber bahan baku bioenergi.

Biomassa *C. vulgaris* ini juga dikultivasi dalam berbagai macam media kultur, yaitu beberapa jenis medium dan penambahan gas polutan NO_x dalam aliran sirkulasi udara. Proses ini dimaksudkan untuk melihat peluang pengembangan dan pemanfaatan alga *C. vulgaris* dalam aplikasi industri. Dari

proses kultivasi menggunakan beberapa jenis medium menunjukkan bahwa medium yang memiliki nutrisi paling lengkap dan komposisinya mendekati atau hampir mirip dengan medium asal kulturnya, akan menghasilkan pertumbuhan biomassa yang lebih baik. Dalam hal ini medium BG-11, terbukti memiliki efek yang lebih baik pada pertumbuhan *C. vulgaris*. Namun berbagai jenis medium ini memiliki kandungan nitrogen yang berbeda-beda. Nutrisi dengan kandungan nitrogen terbanyak dalam suatu media akan cenderung menghasilkan pertumbuhan sel yang lebih baik namun tidak untuk kandungan lipidnya. Dari ketiga jenis medium tersebut, medium Walne memiliki kandungan nitrogen yang lebih sedikit. Dengan demikian, dari penelitian ini juga terbukti bahwa medium Walne menghasilkan pertumbuhan *C. vulgaris* dengan kandungan lipid yang lebih tinggi dibandingkan dalam medium lainnya. Sementara itu, hasil dari proses kultivasi dengan penambahan asupan gas NO_x menunjukkan bahwa mikroalga *C. vulgaris* memiliki ketahanan yang cukup baik. Hal ini ditandai dengan adanya penurunan perolehan densitas sel akhir yang tidak terlalu signifikan, yaitu hanya sekitar 22,11% dengan penambahan N_2O dengan kadar 100 – 300 ppm.

DAFTAR PUSTAKA

- Armbrust E. V., Bowen J. D., Olson, R. J. & Chisholm, S.W.(1989). Effect of light on the cell cycle of a marine synechococcus strain. *Applied and Environmental Microbiology Journal*, **55** (2) 425-432.
- Aruga Y. (1965). Ecological studies of photosynthesis and matter production of phytoplankton; seasonal change in photosynthesis of natural phytoplankton. *Botanical Magazine of Tokyo*, **78**, 280-288.
- Becker, W. (2004). *Microalgae in human and animal nutrition*. Handbook of Microalgae Culture. Oxford: Blackwell, 312-351.
- Badger, M. R. & Andrews, T.J. (1982). Photosynthesis and inorganic carbon usage by the marine cyanobacterium *Synechococcus* sp. *Australia Journal of Plant Physiology*, **70**, 517-523.
- Badger, M. R. & Gallagher, A. (1987). Adaptation of photosynthesis CO_2 and HCO_3^- accumulation by the cyanobacterium *Synechococcus* PCC 6301 to growth at different inorganic carbon concentrations. *Australia Journal of Plant Physiology*, **14**, 189-201.
- Badger, M. R. & Price, G.D.(1992). The CO_2 Concentrating mechanism in cyanobacteria and microalgae. *Physiologia Plantarum*, **84**:606-615.
- Bailey, J. & Ollis, D.F. (1986). *Biochemical Engineering Fundamental*. (2nd Ed.). Tokyo: Mcgraw-Hill.
- Borowitzka, M.A. & Borowitzka, L.J. eds. (1992). *Microalgae biotechnology*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Carvalho, A.P., Meireles, L.A. & Malcata, F.X. (2006). Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. *Biotechnol. Prog.* **22**, 1490–1506.
- Camacho Rubio, F., Acie'n Fern'andez, F.G., Sa'nchez Pe'rez, J.A., Garc'ı'a Camacho, F., & Molina Grima, E. (1999). Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture. *Biotechnology and Bioengineering*, **62**, 71–86.
- Carlozzi, P. (2003). Dilution of solar radiation through culture lamination in photobioreactor rows facing south–north: a way to improve the efficiency

- of light utilization by cyanobacteria (*Arthrospira platensis*). *Biotechnology and Bioengineering*, **81**, 305–315.
- Cheng-Wu, Z., Zmora, O., Kopel, R., & Richmond, A. (2001). An industrialize flat glass reactor for mass production of *Nannochloropsis sp.* (*Eustigmatophyceae*). *Aquaculture*, **195**, 35–49.
- Choi, S.L., Suh, I.S., & Lee, C.G. (2003). Lumostatic operation of bubble column photobioreactors for *Haematococcus pluvialis* cultures using a specific light uptake rate as a control parameter. *Enzyme Microbial Technology*, **33**, 403–409.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. Research review paper. *Biotechnology Advances*, Elsevier, **25**, 297–306.
- Contreras, A., Garcí'a, F., Molina Grima, E. & Merchuk, J.C. (1998). Interaction between CO₂-mass transfer, light availability and hydrodynamic stress in the growth of *Phaeodactylum tricornutum* in a concentric tube airlift photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering*, **60**, 318–325.
- Dianursanti, Nasikin, M., & Wijanarko, A. (2010). NO_x Enriched Flue Gas Fixation for Biomass Production of *Chlorella vulgaris*. *Asean Chemical Engineering Journal*, **10**, Number 1, 14–20.
- Dianursanti, Nasikin, M., & Wijanarko, A. (2012). The Effects of Cells Density Arrangement in *Chlorella vulgaris* Culture to CO₂ Fixation and Essential Substances Production. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, **6**, 2, 153–157.
- Dyer, D. L. & Gafford, R.D. (1961). Some characteristic of a thermophilic blue green alga. *Science*, **134**, 616–617.
- Falkowsky, P. G. & Owens, T.G. (1980). Light Shade Adaptation. *Plant Physiology*, **66**, 592–595.
- Falkowski, P. G. & Raven, J.A. (1997). *Aquatic photosynthesis*. (Ch. 5). London: Blackwell Science, 128–162.
- García-Malea Lo'pez, M.C., Del R'ío Sa'nchez, E., Casas Lo'pez, J.L., Acie'n Ferná'ndez, F.G., Ferná'ndez Sevilla, J.M., Rivas, J., Guerrero, M.G. & Molina Grima. (2006). Comparative analysis of the outdoor culture of

- Haematococcus pluvialis in tubular and bubble column photobioreactors. *Journal of Biotechnology*, **123**, 329–342.
- Gunther, W. S. (2001). *Master Thesis: A Photo-bioreaktor with On-line Biomass and Growth Rate Estimations for Optimization of Light Intensity in Cultures of Phototropic Microorganisms*. Department of Life Science, Aalborg University, 1-59.
- Hall, D.O., Fernandez, F.G.A., Guerrero, E.C., Rao, K.K., & Grima, E.M. (2003). Outdoor helical tubular photobioreactors for microalgal production: modeling of fluid-dynamics and mass transfer and assessment of biomass productivity. *Biotechnology and Bioengineering*, **82**, 62–73.
- Hirata S., Taya, M & Tone, S. (1998). Continuous cultures of *Spirulina platensis* under photoautotrophic conditions with change in light intensity. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **31**,4, 636-639.
- Hirata S., Hayashitani, M & Tone, S. (1996). Characterization of *Chlorella* cell cultures in batch and continuous operations under a photoautotrophic condition. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **29**,6, 953-959.
- Janvanmardian, M. & Palsson, B.O. (1991). High density photoautotrophic algal cultures: design, construction and operation of a novel photobioreaktor sistem. *Biotechnology and Bioengineering*, **38**, 1182–1189.
- Kaewpintong, K., Shotipruk, A., Powtongsook, S., & Pavasant, P. (2007). Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of *Haematococcus pluvialis* in airlift bioreaktor. *Bioresource Technology*, **98**, 288–295.
- Kaplan, A., Zenvirth, D. & Berry, J.A., (1982). Involvement of primary electrogenic pump in the mechanism for HCO_3^- uptake by the cyanobacterium *Anabaena variabilis*. *Plant Physiology*, **69**,978-982.
- Mangunwidjaja, D. & Suryani, A. (1994). *Teknologi Bioproses*, Jakarta: PT. Penebar Swadaya, 106-136.
- Merchuk, J.C., Gluz, M., & Mukmenev, I. (2000). Comparison of photobioreactors for cultivation of the microalga *Porphyridium sp.* *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **75**, 1119–1126.
- Molina Grima, E., Acie'n Ferna'ndez, F.G., Garc'ı'a Camacho, F. & Chisti, Y. (1999). Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scale up. *Journal of Biotechnology*, **70**, 231–247.

- Ogbonna J. C., Yada, H. & Tanaka, H. (1995). Kinetic study on light-limited Batch Cultivation of photosynthetic cells. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, **80**, 259-264.
- Ogbonna J. C. & Tanaka, H. (1996). Night biomass loss and changes in biochemical composition of cells during light/dark cyclic culture of *Chlorella pyrenoides*. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, **82**, 6, 558-564.
- Ogbonna, J.C. & Tanaka, H. (1997). Industrial Size-Photobioreactor, *Journal of Chemical Technology*, **27**, 7, 43-49.
- Ohtaguchi, K. (2000). Soft energy path synthesis from carbon dioxide to biofuel ethanol through cyanobacterial biotechnology. *Technology*, **7**, 175-188.
- Ohtaguchi K. & Wijanarko, A. (2002). Elevation of the efficiency of cyanobacterial carbon dioxide removal by monoethanolamine solutions, *Technology*, **8**, 267-286.
- Ohtaguchi K., Asami, K and Wijanarko, A. (2001). Risk reduction strategy with cyanobacterial biotechnology for mitigating the emission of CO₂ from fossil fuel combustion; Application of psychrophilic cyanobacterium *Anabaena cylindrica* to a low temperature CO₂ removal process. *Proceeding of 6th World Congress of Chemical Engineering*, Melbourne, 313.1-313.10.
- Pelroy R. A. & Bassham, J.A. (1972). Photosynthetic and dark carbon metabolism in unicellular blue green algae. *Archive Microbiology*, **86**, 25-38.
- Pelroy R.A., Levine, G. A. & Basham, J.A. (1976). Kinetics of light-dark CO₂ fixation and Glucose assimilation by *Aphanocapsa* 6714, *Journal of Bacteriology*, **182**, 2, 663-643.
- Pulz O. & Scheibenbogen, K. (1998). Photobioreactors: design and performance with respect to light energy input. *Advance Bio-chemical Engineering and Biotechnology*, **59**, 123-151.
- Pruvost, J., Pottier, L., & Legrand, J. (2006). Numerical investigation of hydrodynamic and mixing conditions in a torus photobioreactor. *Chemical Engineering Science*, **61**, 4476-4489.

- Rajagopal S., Jha, I.B., Murthy, S.D.S. & Mohanty, P. (1989). Ultraviolet B effects on *Spirulina platensis* cells: modification of chromophore-protein interaction and energy transfer characteristics of phycobilisomes, *Biochemical and Biophysical Research Communication*, **249**, 172-177.
- Sa'nchez Miron, A., Cero'n Garcí'a, M.C., Garcí 'a Camacho, F., Molina Grima, E., & Chisti, Y. (2002). Growth and characterization of microalgal biomass produced in bubble column and airlift photobioreactors: studies in fed-batch culture. *Enzyme Microbial Technology*, **31**, 1015–1023.
- Schugerl, K & Belgardt, K. H. eds. (2000). *Bioreaction Engineering*. (Ch. 2). Berlin: Springer-Verlag, 44 –102.
- Shekharam, K., Ventakaraman, L., & Salimath, P. (1987). Carbohydrate composition and characterization of two unusual sugars from the blue-green algae *Spirulina platensis*. *Phytochemical*, **26**, 2267-2269.
- Spolaore, Pauline, Claire Joannis-Cassan, Elie, D., Isambert, A. (2006). Commercial Applications of Microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **101**, No. 2, 87–96. 2006 DOI: 10.1263/jbb.101.87.
- Seaburg K. G., Parker, B.C., Wharton, R.A. & Simmon Jr. (1981). Temperature growth rebusaes of algal isolates from Antartic oases. *Journal of Phycology*, **17**, pp. 353-360.
- Suriawiria, U. (1987). *Simbiosis dan Karakteristik Chlorella*. Jakarta: Intermedia, 96-110.
- Tanaka, H. (1987). Large scale cultivation of plant cells at high density; A review, *Process Biochemistry*, 106-113.
- Ugwu, C.U., Ogbonna, J.C., & Tanaka, H. (2002). Improvement of mass transfer characteristics and productivities of inclined tubular photobioreaktors by installation of internal static mixers. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **58**, 600–607.
- Ugwu, C.U., Aoyagi, H., & Uchiyama, H.(2007). Photobioreaktor for Mass Cultivation of Algae. *Bioresource Technology*.
- Van Eykelenburg, C.(1979). The ultrastructure of *Spirulina platensis* in relation to temperature and light intensity, *Antonie van Leeuwenhoek*, **45**, 369 –390.
- Vega-Estrada, J., Montes-Horcasitas, M.C., Domini ´gues-Bocanegra, A.R., & Can˜ izares-Villanueva, R.O. (2005). Haematococcus pluvialis cultivation

- in split-cylinder internal-loop airlift photobioreactor under aeration conditions avoiding cell damage. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **68**, 31–35.
- Watanabe, A. (1960). List of algal strain in collection at Institute of Applied Microbiology. *Journal of General Microbiology*, **6**, 283-292.
- Wijanarko A., Dianursanti, Heidi, Soemantojo, R.W. & Ohtaguchi, K. (2006). Effect of light illumination alteration on *Chlorella vulgaris*'s CO₂ fixation in bubble column photobioreactor. *International Journal of Algae*, 8(1) 53-60.
- Wijanarko A. & Ohtaguchi, K. (2005). Double ended helix of blue green alga 16 S ribosomal RNA, a suitable environmental temperature subsequence. *ACGC Chemical Research Communication*, **19**, 16-20.
- Wijanarko A., Dianursanti, Andika, S.M.K., Asami, K., Witarto, A. B. , Ohtaguchi, K. & Soemantojo, R.W. (2005). Alteration of light illumination during microbial growth, an enhancement effort of Carbon dioxide fixation and biomass production by *Chlorella vulgaris*. *Abstract Book of 8th International Conference on Carbon Dioxide Utilization*, pp. 48-49 (Georg Sverdrups Hus, University i Oslo, Blindern Campus, Oslo, Norway on June 20-23, 2005).
- Wijanarko A. & Ohtaguchi, K. (2004). Carbon Dioxide Utilization for Global Sustainability: Reactor in series approximation, an enhancement effort of CO₂ fixation and biomass production by *Anabaena cylindrica*. *Surface Science and Catalysis*, 153, 461-468.
- Wijanarko A., Asami, K., & Ohtaguchi, K. (2004). The kinetics of Growth and the CO₂ concentrating Mechanism of the Filamentous Cyanobacterium *Anabaena cylindrica* in a Bubble Column. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **37**(8) 1019-1025.
- Wijanarko A. & Ohtaguchi, K. (2003). Alteration of light illumination during microbial growth, an enhancement effort of biomass production and carbon dioxide fixation of psychrophilic cyanobacterium *Anabaena cylindrica* IAM M1. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 134, S214.

- Wijanarko A., Kajiwara, S. & Ohtaguchi, K (1998). An approach to development of large scale culture of cyanobacteria for open sistem CO₂ removal. *Proceeding of 63rd Research Meeting of Japanese Chemical Engineers Society*, Osaka, pp. 92.
- Wijanarko A., Kajiwara,S. & Ohtaguchi, K. (1997). An approach with bubble column bioreaktor to the development of large scale culture of cyanobacteria for carbon dioxide removal. *Preprint 4th Japanese-German Symposium on Bubble Column*, Kyoto, pp. 110-117.
- Wirosaputro, S. (2002). *Chlorella untuk Kesehatan Global, Teknik Budidaya dan Pengolahan*. Yogyakarta: Gajahmada University Press.
- Yun Y.S., Lee, S.B., Park, J.M., Lee, C.I. & Yang, J.W. (1997). Carbon dioxide fixation, by alga cultivation using waste water nutrients. *Journal Chemical Technology and Biotechnology*, **69**, 451-455.
- Zhang, K., Kurano, N., & Miyachi, S. (2002.). Optimized aeration by carbon dioxide gas for microalgal production and mass transfer characterization in a vertical flat-plate photobioreactor. *Bioprocess Biosystem and Bioengineering*, **25**, 97–101.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama Lengkap : Dianursanti, ST., MT
NIM : 0806475063
Program Studi : Teknik Kimia, Fakultas
Teknik Universitas Indonesia



PENDIDIKAN

- | | |
|---|------------|
| 1. SDN Kebon Baru V | Lulus 1984 |
| 2. SMPN 4, Pekanbaru, Riau | Lulus 1987 |
| 3. SMAN 8 (d/h SMAN 6), Pekanbaru, Riau | Lulus 1990 |
| 4. Teknik Gas dan Petrokimia, FTUI | Lulus 1996 |
| 5. Program Magister Teknik Kimia, FTUI | Lulus 2003 |

PUBLIKASI YANG DITERBITKAN DAN DIAJUKAN UNTUK PERSYARATAN UJIAN PROMOSI PROGRAM DOKTOR

Jurnal Internasional:

1. **Dianursanti**, Nasikin, M.,Wijanarko, A., 2010., *NO_x Enriched Flue Gas Fixation for Biomass Production of Chlorella vulgaris Buitenzorg*, Asean Chemical Engineering Journal , vol 10, Number 1, 14-20.
2. **Dianursanti**, Nasikin,M.,Wijanarko, A., 2012., *The Effects of Cells Density Arrangement in Chlorella vulgaris Culture to CO₂ Fixation and Essential Substances Production*, Journal of Chemistry and Chemical Engineering, Vol 6, No.2.
3. **Dianursanti**, Nasikin,M.,Wijanarko, A., 2012, *Development of Discontinuous Filtration System for Enhancing Biomass Production and CO₂ Fixation from Chlorella Vulgaris Buitenzorg*, International Journalon Algae. (submitted)
4. **Dianursanti**, Sutrasno, Nasikin,M.,Wijanarko, A., 2012, *Enhancement of Chlorella vulgaris Biomass Production And CO₂ Fixation Using Microfiltration Treatment In Circulation Flow Of Medium Culture As Biodiesel Feedstock*. Journal of Pycology, Wiley-Blackwell USA. (impact factor journal-submitted)

Jurnal Nasional:

Dianursanti, Nuzulliany, R.,Wijanarko, A., dan M. Nasikin, 2009, *Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg melalui Teknik Filtrasi Dalam Aliran Sirkulasi Media Kultur*, Jurnal Teknik Kimia Indonesia, ISSN 1693-9433, Vol. 8, 87-93.

Seminar Internasional:

1. Darmawan, H., **Dianursanti**, Wijanarko, A. and Nasikin,M., 2010, *Suction Flowrate Adjustment in Filtration Process of Media Culture Circulation for Increasing Biomass Production of Chlorella vulgaris Buitenzorg*. ASEAN-Korea Symposium on Biorefinery Technology, P64.
2. Grahita P, **Dianursanti**, Wijanarko, A., and Nasikin, M., 2010, *Determination of Hydrodynamic Parameter in Bubble Collumn Photobioreactor for Scale-up Biomass Production of Chlorella vulgaris Buitenzorg*, ASEAN-Korea Symposium on Biorefinery Technology, P65.
3. **Dianursanti**, Septian M., Syarif A., Wijanarko, A., and Nasikin, M., 2010, *Determination of Enhancement of Chlorella sp. Biomass Production with Filtration in Circulating Media and Arrangement of Lighting Intensity*, ASEAN-Korea Symposium on Biorefinery Technology, P66.
4. **Dianursanti**, Nasikin,M.,Wijanarko, A., 2011., *The Effects of Cells Density Arrangement in Chlorella vulgaris Culture to CO₂ Fixation and Essential Substances Production*, Conference on QIR , FTUI.

Seminar Nasional:

1. **Dianursanti**, Nuzulliany, R., Wijanarko, A., dan M. Nasikin, 2009, *Studi Awal Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg melalui Teknik Filtrasi Dalam Aliran Sirkulasi Media Kultur*, Seminar Nasional Teknik Kimia, ISBN 978-979-98300-1-2, TB12-1 – TB12-
2. **Dianursanti**, Wijoseno, T., Wijanarko, A. dan Nasikin, M., *Pengaruh Media Kultur Terhadap Akumulasi Kandungan Lipid Dalam Mikroalga Chlorella Vulgaris Buitenzorg*, Seminar Nasional Teknik Kimia Teknologi Oleo dan Petrokimia 2011, ISSN 1907-0500.



LAMPIRAN A DATA PENGAMATAN

Tabel A.1. Data dan pengolahan Kultivasi *Chlorella vulgaris* tanpa perlakuan (kontrol)

Waktu	OD	Io (lux)	Ib (lux)	Yin (%)	Yout (%)	pH	X (g/L)	μ (h ⁻¹)	[HCO ₃ ⁻] (M)	CTR (g/L.h)	q _{CO₂} (h ⁻¹)
0	0,220	5196,667	1180,000	5,1867	5,3012	6,63	0,0911	0,1024	0,003153	21,44	235,41
6	0,233	5196,667	1112,000	5,4988	4,9292	6,69	0,0977	0,0680	0,003838	21,29	218,00
12	0,243	5196,667	1048,000	5,1398	5,2112	6,71	0,1022	0,0288	0,003757	22,53	220,32
18	0,260	5196,667	893,333	5,7832	5,0370	6,74	0,1109	0,0215	0,00453	20,79	187,49
24	0,281	5196,667	780,000	5,4437	5,3139	6,72	0,1215	0,0145	0,004072	22,71	186,86
30	0,292	5196,667	603,333	5,7330	4,8799	6,75	0,1271	0,0096	0,004595	23,24	182,84
36	0,334	5196,667	540,000	5,7911	4,6381	6,77	0,1479	0,0069	0,00486	23,71	160,31
42	0,376	5196,667	470,000	5,3935	4,8191	6,78	0,1692	0,0055	0,004632	25,44	150,36
48	0,421	5196,667	356,667	5,2746	4,9813	6,83	0,1920	0,0049	0,005082	25,10	130,70
54	0,456	5196,667	323,333	5,4293	5,4907	6,87	0,2093	0,0062	0,005736	25,15	120,19
60	0,500	5196,667	253,333	5,3978	3,8919	6,93	0,2316	0,0068	0,006548	24,46	105,62
66	0,546	5196,667	240,000	5,4308	3,2878	7,02	0,2544	0,0056	0,008105	23,20	91,20
72	0,652	5196,667	210,000	5,3813	4,0948	7,04	0,3076	0,0067	0,00841	22,03	71,60
78	0,698	5196,667	186,667	5,6980	4,6068	7,08	0,3310	0,0072	0,009764	23,90	72,20
84	0,759	5196,667	153,333	5,5813	5,6691	7,13	0,3614	0,0081	0,010731	23,90	66,12
90	0,822	5196,667	133,333	6,5341	4,7811	7,15	0,3928	0,0084	0,013154	17,08	43,47
96	0,880	5196,667	113,333	5,9932	5,3798	7,17	0,4223	0,0086	0,012634	16,19	38,33
102	0,930	5196,667	113,333	5,8765	6,3980	7,24	0,4471	0,0088	0,014555	18,36	41,05
108	0,991	5196,667	93,333	5,2599	4,1856	7,23	0,4775	0,0086	0,012731	16,81	35,21
114	1,035	5196,667	83,333	5,5566	4,6198	7,24	0,4999	0,0084	0,013762	14,75	29,51
120	1,135	5196,667	73,333	5,3560	5,0552	7,27	0,5502	0,0079	0,014214	12,73	23,13
126	1,220	5196,667	60,000	5,8932	2,4254	7,28	0,5927	0,0078	0,016004	11,12	18,76
132	1,287	5196,667	53,333	5,7633	4,7090	7,29	0,6261	0,0076	0,016016	9,94	15,88
138	1,347	5196,667	50,000	5,5872	5,3919	7,31	0,6566	0,0073	0,016259	11,28	17,18

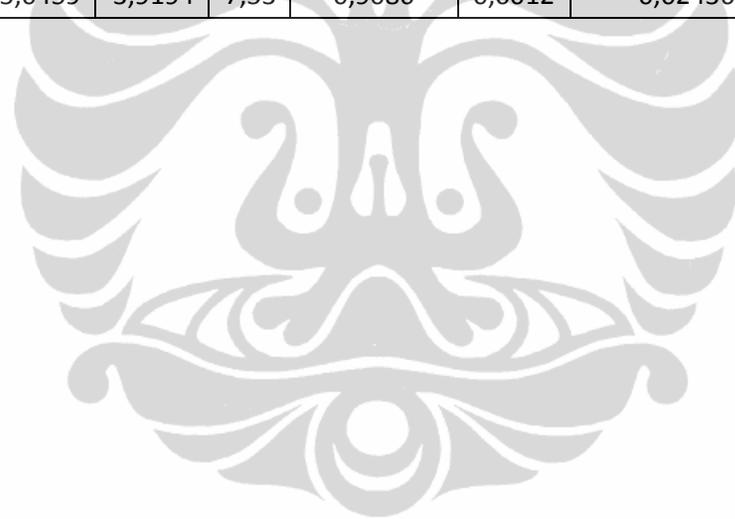
Waktu	OD	Io (lux)	Ib (lux)	Yin (%)	Yout (%)	pH	X (g/L)	μ (h ⁻¹)	[HCO ₃ ⁻] (M)	CTR (g/L.h)	q _{CO₂} (h ⁻¹)
144	1,405	5196,667	46,667	5,9240	2,9891	7,32	0,6855	0,0067	0,01764	9,82	14,32
150	1,473	5196,667	40,667	5,5900	3,1851	7,35	0,7195	0,0064	0,017836	10,41	14,47
156	1,526	5196,667	32,333	5,5928	2,8519	7,38	0,7463	0,0058	0,019121	6,48	8,68
162	1,574	5196,667	28,000	5,5447	3,4078	7,42	0,7702	0,0053	0,020786	9,05	11,75
168	1,599	5196,667	21,667	5,2170	3,0012	7,41	0,7828	0,0048	0,019112	10,56	13,49
174	1,627	5196,667	20,000	4,9390	3,1005	7,42	0,7970	0,0042	0,018515	8,69	10,91
180	1,629	5196,667	17,667	4,2036	3,0782	7,45	0,7981	0,0036	0,016885	11,70	14,67
186	1,632	5196,667	16,000	4,2672	2,6823	7,47	0,7996	0,0030	0,017949	11,15	13,95
192	1,634	5196,667	14,667	5,0305	2,6589	7,46	0,8004	0,0025	0,020678	7,04	8,80
198	1,641	5196,667	14,000	5,3986	2,7312	7,46	0,8038	0,0018	0,022191	6,80	8,46
204	1,641	5196,667	12,333	4,9976	2,7890	7,47	0,8038	0,0012	0,021021	6,10	7,59



Tabel A.2. Data dan pengolahan kultivasi *Chlorella vulgaris* dengan perlakuan alterasi

Waktu	OD	Io (lux)	Ib (lux)	Yin (%)	Yout (%)	pH	X (g/L)	μ (h ⁻¹)	[HCO ₃ ⁻] (M)	CTR (g/L.h)	q _{CO₂} (h ⁻¹)
0	0,2214	5110	1179	5,0713	2,7388	6,65	0,0916	0,1015	0,0032285	27,874	304,33
6	0,2325	5110	1115	5,0135	2,6440	6,67	0,0972	0,0700	0,0033422	27,681	284,88
12	0,2436	5110	1037	5,0814	2,5895	6,7	0,1027	0,0297	0,0036297	29,284	285,01
18	0,2577	5110	970	5,0263	2,4463	6,71	0,1098	0,0221	0,003674	27,022	245,99
24	0,2800	5110	961	5,0518	2,3752	6,73	0,1210	0,0149	0,0038666	29,518	243,94
30	0,2941	5110	951	5,0241	2,4276	6,76	0,1281	0,0098	0,0041205	30,209	235,81
36	0,3275	5110	824	5,0315	2,3420	6,78	0,1448	0,0071	0,004321	30,819	212,78
42	0,3730	5110	622	5,0571	2,3672	6,82	0,1677	0,0057	0,004762	33,07	197,24
48	0,4154	5110	571	5,0137	2,3217	6,83	0,1890	0,0050	0,0048311	32,625	172,65
54	0,4488	7030	527	5,0713	2,3904	6,85	0,2057	0,0064	0,0051169	32,693	158,93
60	0,4943	7030	512	5,0461	2,5368	6,86	0,2285	0,0070	0,0052101	31,796	139,14
66	0,5367	7030	422	5,0912	2,4783	6,91	0,2498	0,0057	0,005898	30,159	120,72
72	0,6186	7030	322	5,0355	2,6143	6,94	0,2909	0,0069	0,0062507	28,636	98,44
78	0,6631	13250	303	5,0785	2,6579	6,97	0,3132	0,0074	0,006755	31,065	99,18
84	0,7035	13250	249	5,0861	2,7095	7	0,3335	0,0083	0,0072489	29,042	87,08
90	0,7763	15400	193	5,0643	2,5434	7,03	0,3700	0,0087	0,007734	22,202	60,00
96	0,8046	15400	157	5,0817	2,7369	7,05	0,3842	0,0089	0,0081264	21,043	54,77
102	0,8490	19130	248	5,0541	2,7655	7,08	0,4065	0,0091	0,0086603	23,862	58,70
108	0,8945	19130	192	5,0911	2,7353	7,06	0,4294	0,0088	0,008331	21,858	50,91
114	0,9350	19130	154	5,0373	2,8659	7,05	0,4496	0,0087	0,0080554	19,179	42,65
120	1,0664	21520	112	5,0247	2,7666	7,09	0,5156	0,0082	0,0088104	16,544	32,09
126	1,1533	21520	91	5,0541	3,0385	7,11	0,5592	0,0080	0,0092796	14,453	25,85
132	1,2311	21520	79	5,0812	3,1972	7,17	0,5982	0,0079	0,0107116	12,923	21,60
138	1,3302	24170	64	5,0653	3,0984	7,22	0,6479	0,0076	0,011981	14,661	22,63
144	1,3938	24170	48	5,0964	3,3317	7,26	0,6799	0,0069	0,0132175	12,764	18,77
150	1,4221	24170	42	5,0758	3,4527	7,29	0,6941	0,0065	0,0141056	13,537	19,50

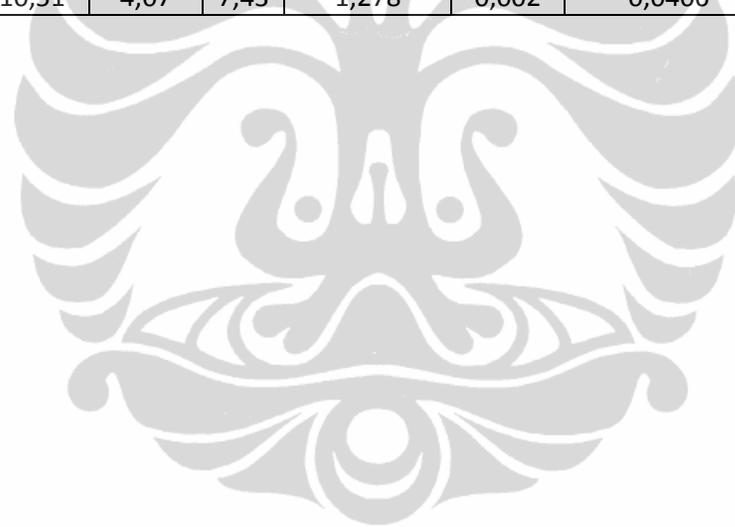
Waktu	OD	Io (lux)	Ib (lux)	Yin (%)	Yout (%)	pH	X (g/L)	μ (h ⁻¹)	[HCO ₃ ⁻] (M)	CTR (g/L.h)	q _{CO₂} (h ⁻¹)
156	1,4555	26300	34	5,0309	3,4637	7,32	0,7108	0,0060	0,0149807	13,426	18,89
162	1,5768	26300	28	5,0165	3,1895	7,35	0,7717	0,0055	0,0160062	11,763	15,24
168	1,6900	26300	23	5,0516	3,3394	7,37	0,8285	0,0049	0,0168778	13,733	16,58
174	1,7082	26300	23	5,0238	3,2450	7,38	0,8376	0,0043	0,0171759	11,302	13,49
180	1,7486	26300	15	5,0913	3,4400	7,41	0,8579	0,0038	0,0186516	15,215	17,73
186	1,8295	26300	12	5,0462	3,4635	7,43	0,8985	0,0031	0,0193576	14,5	16,14
192	1,8497	28140	12	5,0711	3,7086	7,47	0,9086	0,0025	0,0213299	9,1558	10,08
198	1,8598	28140	12	5,0195	3,7641	7,49	0,9137	0,0019	0,0221079	8,8422	9,68
204	1,8497	28140	12	5,0459	3,9194	7,53	0,9086	0,0012	0,0243683	7,9352	8,73



Tabel A.3 . Data dan pengolahan kultivasi *Chlorella vulgaris* menggunakan sistem pemerangkapan sel secara kontinyu bersparger membran serat berongga

Waktu	OD total	Io (lux)	Ib (lux)	Yin (%)	Yout (%)	pH	X (g/L)	μ (h ⁻¹)	[HCO ₃ ⁻] (M)	CTR (g/L.h)	q _{CO₂} (h ⁻¹)
0	0,327	5226,67	1112	6,3399	3,12	6,79	0,145	0,153	0,0094	42,884	296,12
6	0,348	5226,67	919	5,9521	3,17	6,81	0,155	0,108	0,0098	42,586	274,21
12	0,363	5226,67	830	6,1247	3,21	6,84	0,163	0,046	0,0104	45,052	277,14
18	0,390	5226,67	793	6,0409	3,25	6,85	0,176	0,034	0,0107	41,572	235,84
24	0,424	5226,67	748	6,3147	3,18	6,83	0,193	0,023	0,0103	45,412	235,05
30	0,442	5226,67	646	5,8715	3,27	6,87	0,202	0,015	0,0113	46,474	229,98
36	0,507	5226,67	530	5,6342	3,33	6,9	0,235	0,011	0,0122	47,414	201,64
42	0,575	5226,67	430	5,7875	3,31	6,88	0,269	0,009	0,0114	50,878	189,13
48	0,647	5226,67	364	5,8315	3,34	6,92	0,305	0,008	0,0125	50,192	164,41
54	0,702	5226,67	325	6,5452	3,37	6,95	0,333	0,010	0,0134	50,298	151,18
60	0,773	5226,67	269	4,9151	3,35	7,03	0,368	0,011	0,0162	48,916	132,86
66	0,845	5226,67	247	4,2176	3,38	6,98	0,404	0,009	0,0145	46,398	114,71
72	1,014	5226,67	222	5,0176	3,42	7,03	0,489	0,011	0,0162	44,056	90,07
78	1,088	5226,67	218	5,5183	3,45	7,01	0,526	0,011	0,0155	47,792	90,82
84	1,184	5226,67	209	6,4729	3,41	7,06	0,575	0,013	0,0174	47,792	83,17
90	1,284	5226,67	209	5,9002	3,47	7,09	0,625	0,013	0,0187	34,156	54,68
96	1,377	5226,67	202	6,2860	3,52	7,04	0,671	0,014	0,0167	32,374	48,22
102	1,456	5226,67	193	7,4950	3,49	7,11	0,711	0,014	0,0194	36,712	51,64
108	1,552	5226,67	191	5,0529	3,54	7,07	0,759	0,014	0,0178	33,628	44,29
114	1,623	5226,67	172	5,4982	3,57	7,15	0,795	0,013	0,0215	29,506	37,13
120	1,782	5226,67	169	5,9154	3,63	7,14	0,875	0,013	0,0208	25,452	29,09
126	1,917	5226,67	166	3,4552	3,59	7,15	0,942	0,012	0,0214	22,236	23,60
132	2,023	5226,67	164	5,6742	3,67	7,11	0,996	0,012	0,0195	19,8814	19,97
138	2,119	5226,67	162	6,2848	3,72	7,16	1,044	0,012	0,0220	22,554	21,60
144	2,211	5226,67	156	5,8813	3,74	7,22	1,090	0,011	0,0249	19,6376	18,02
150	2,319	5226,67	154	7,1530	3,78	7,31	1,144	0,010	0,0307	20,826	18,21

Waktu	OD total	Io (lux)	Ib (lux)	Yin (%)	Yout (%)	pH	X (g/L)	μ (h ⁻¹)	[HCO ₃ ⁻] (M)	CTR (g/L.h)	q _{CO₂} (h ⁻¹)
156	2,404	5226,67	109	10,71	3,81	7,27	1,187	0,009	0,0283	12,9628	10,92
162	2,479	5226,67	102	10,63	3,76	7,32	1,225	0,008	0,0314	18,0968	14,78
168	2,520	5226,67	98	10,57	3,85	7,34	1,245	0,008	0,0328	21,128	16,97
174	2,565	5226,67	89	10,59	3,87	7,37	1,267	0,007	0,0353	17,3878	13,72
180	2,568	5226,67	81	10,71	3,94	7,35	1,269	0,006	0,0339	23,408	18,45
186	2,573	5226,67	77	10,70	3,91	7,38	1,271	0,005	0,0361	22,308	17,55
192	2,575	5226,67	74	10,74	4,03	7,42	1,273	0,004	0,0398	14,0858	11,07
198	2,586	5226,67	73	10,59	3,96	7,39	1,278	0,003	0,0369	13,6034	10,64
204	2,586	5226,67	72	10,51	4,07	7,43	1,278	0,002	0,0406	12,208	9,55



Tabel A.4. Data dan pengolahan kultivasi *Chlorella vulgaris* menggunakan sistem pemerangkapan sel secara kontinyu menggunakan mikrofiltrasi

Waktu	OD total	Io (lux)	Ib (lux)	Yin (%)	Yout (%)	pH	X (g/L)	μ (h ⁻¹)	[HCO ₃ ⁻] (M)	CTR (g/L.h)	q _{CO₂} (h ⁻¹)
0	0,212	5226,67	1112	12,53	2,7759	6,8	0,0870	0.039015	0.039015	63,04	724,37
6	0,263	5226,67	919	11,3533	2,0857	6,83	0,1124	0.036413	0.036413	62,60	556,71
12	0,337	5226,67	830	10,8966	1,276	6,87	0,1497	0.031816	0.031816	66,23	442,38
18	0,405	5226,67	793	10,4321	0,9786	6,85	0,1836	0.029418	0.029418	61,11	332,88
24	0,477	5226,67	748	10,0202	0,9572	6,88	0,2198	0.027329	0.027329	66,76	303,68
30	0,601	5226,67	646	10,362	0,9397	6,9	0,2821	0.023338	0.023338	68,32	242,17
36	0,706	5226,67	530	10,225	0,9106	6,92	0,3349	0.021286	0.021286	69,70	208,11
42	0,770	5226,67	430	10,371	0,9017	6,89	0,3669	0.020830	0.020830	74,79	203,82
48	0,833	5226,67	364	9,757	0,5203	6,9	0,3984	0.020397	0.020397	73,78	185,18
54	0,964	5226,67	325	10,3741	0,3911	6,93	0,4643	0.018479	0.018479	73,94	159,25
60	1,055	5226,67	269	10,9072	0,3394	6,95	0,5100	0.017650	0.017650	71,91	140,99
66	1,134	5226,67	247	10,7135	0,3013	6,94	0,5497	0.017088	0.017088	68,21	124,09
72	1,256	5226,67	222	10,6836	0,2846	6,97	0,6109	0.015964	0.015964	64,76	106,00
78	1,362	5226,67	218	11,3119	0,311	6,98	0,6641	0.015182	0.015182	70,26	105,79
84	1,461	5226,67	209	10,6198	0,2288	7,01	0,7134	0.014552	0.014552	65,68	92,07
90	1,556	5226,67	209	10,3173	0,2281	6,99	0,7615	0.013985	0.013985	50,21	65,94
96	1,637	5226,67	202	9,7879	0,2397	7,03	0,8020	0.013575	0.013575	47,59	59,34
102	1,766	5226,67	193	9,8564	0,2187	7,06	0,8667	0.012799	0.012799	53,97	62,27
108	2,006	5226,67	191	10,1971	0,2601	7,04	0,9870	0.011417	0.011417	49,43	50,08
114	2,128	5226,67	172	9,9713	0,2531	7,09	1,0482	0.010888	0.010888	43,37	41,38
120	2,280	5226,67	169	9,8197	0,2726	7,08	1,1247	0.010249	0.010249	37,42	33,27
126	2,426	5226,67	166	10,487	0,2436	7,12	1,1977	0.0096933	0.0096933	32,69	27,29
132	2,623	5226,67	164	10,3481	0,4242	7,15	1,2967	0.0089934	0.0089934	29,23	22,54
138	2,731	5226,67	162	9,8391	0,2033	7,19	1,3508	0.0086493	0.0086493	33,16	24,55
144	2,843	5226,67	156	11,0295	0,2512	7,24	1,4072	0.0082958	0.0082958	28,87	20,51
150	2,962	5226,67	154	10,3058	0,2136	7,22	1,4667	0.0079320	0.0079320	30,61	20,87
156	3,140	5226,67	109	10,3082	0,2384	7,28	1,5563	0.0074299	0.0074299	19,06	12,24

Waktu	OD total	Io (lux)	Ib (lux)	Yin (%)	Yout (%)	pH	X (g/L)	μ (h ⁻¹)	[HCO ₃ ⁻] (M)	CTR (g/L.h)	q _{CO₂} (h ⁻¹)
162	3,293	5226,67	102	10,5791	0,2517	7,3	1,6330	0.0070185	0.0070185	26,60	16,29
168	3,423	5226,67	98	9,9949	0,26	7,29	1,6980	0.0066715	0.0066715	31,06	18,29
174	3,542	5226,67	89	10,2534	0,292	7,28	1,7580	0.0063509	0.0063509	25,56	14,54
180	3,677	5226,67	81	10,0659	0,2357	7,31	1,8256	0.0060093	0.0060093	34,41	18,85
186	3,800	5226,67	77	10,7869	0,203	7,29	1,8871	0.0056942	0.0056942	32,79	17,38
192	3,907	5226,67	74	10,5386	0,241	7,3	1,9410	0.0054043	0.0054043	20,71	10,67
198	4,012	5226,67	73	10,0297	0,2073	7,29	1,9934	0.0051185	0.0051185	20,00	10,03
204	4,116	5226,67	72	10,2487	0,2303	7,31	2,0457	0.0048322	0.0048322	17,95	8,77



Tabel A. 5. Data dan pengolahan Kultivasi *Chlorella vulgaris* semi kontinyu

Waktu	OD	Io (lux)	Ib (lux)	Yin (%)	Yout (%)	pH	X (g/L)	μ (h ⁻¹)	[HCO ₃ ⁻] (M)	CTR (g/L.h)	q _{CO₂} (h ⁻¹)
0	0,222	5746,667	1430,000	6,3399	5,3012	6,50	0,09328	0,0767	0,0022482679	8,29106	88,88304
6	0,250	5586,667	1175,000	5,9521	4,9292	6,60	0,10731	0,0697	0,0028304016	8,69692	81,04328
12	0,285	5376,667	877,667	6,1247	5,2112	6,68	0,12489	0,0522	0,0034028912	7,54790	60,43466
18	0,332	5690,000	693,000	6,0409	5,0370	6,72	0,14890	0,0431	0,0037311960	8,40991	56,48057
24	0,373	5856,667	600,333	6,3147	5,3139	6,77	0,16986	0,0349	0,0041864708	8,02042	47,21733
30	0,404	5836,667	520,667	5,8715	4,8799	6,80	0,18541	0,0287	0,0044858842	8,54653	46,09415
36	0,510	5800,000	398,667	5,6342	4,6381	6,93	0,23917	0,0253	0,0060512913	8,94691	37,40760
42	0,552	6116,667	334,000	5,7875	4,8191	6,96	0,26047	0,0204	0,0064840755	8,46771	32,50882
48	0,631	6233,333	272,333	5,8315	4,9813	7,05	0,31640	0,0196	0,0079771556	7,37808	24,56322
54	0,347	6166,667	658,000	6,5452	5,4907	6,62	0,48876	0,0340	0,0029637943	8,15316	52,15104
60	0,404	5603,333	565,000	4,9151	3,8919	6,74	0,51784	0,0132	0,0039070418	10,53490	56,81807
66	0,463	6103,333	471,333	4,2176	3,2878	6,82	0,54776	0,0027	0,0046972974	11,15646	51,80930
72	0,499	6216,667	347,333	5,0176	4,0948	6,89	0,56602	0,0010	0,0055188433	9,30709	39,84287
78	0,524	6543,333	279,667	5,5183	4,6068	7,00	0,57870	0,0071	0,0071096474	8,35899	33,94185
84	0,676	6206,667	217,333	6,4729	5,6691	7,10	0,61468	0,0360	0,0089505158	6,28422	19,43400
90	0,340	6390,000	613,000	5,9002	4,7811	6,60	0,72652	0,0172	0,0028304016	9,59853	62,75334
96	0,433	6566,667	515,333	6,2860	5,3798	6,66	0,77369	0,0078	0,0032497359	7,29545	36,45496
102	0,466	5230,000	351,333	7,4950	6,3980	6,76	0,79042	0,0037	0,0040911750	7,40691	34,15551
108	0,520	5340,000	319,333	5,0529	4,1856	6,80	0,81781	0,0036	0,0044858842	8,68622	35,56354
114	0,575	5420,000	264,333	5,4982	4,6198	6,97	0,84553	0,0074	0,0066351090	8,08489	29,72715
120	0,624	5336,667	219,333	5,9154	5,0552	7,11	0,89453	0,0400	0,0091590001	7,35898	24,77856
126	0,343	5490,000	563,333	3,4552	2,4254	6,60	1,07281	0,0178	0,0028304016	15,08280	97,74427
132	0,407	5196,667	423,000	5,6742	4,7090	6,75	1,10543	0,0070	0,0039980485	8,60825	46,04917
138	0,473	5316,667	423,000	6,2848	5,3919	6,80	1,13891	0,0020	0,0044858842	7,18975	32,62008
144	0,559	5636,667	254,333	5,8813	4,9968	6,90	1,18252	0,0018	0,0056473937	7,61074	28,82589
150	0,575	5510,000	196,667	7,1530	6,0979	7,03	1,19047	0,0061	0,0076181244	7,46462	27,44649

Waktu	OD	I _o (lux)	I _b (lux)	Y _{in} (%)	Y _{out} (%)	pH	X (g/L)	μ (h ⁻¹)	[HCO ₃ ⁻] (M)	CTR (g/L.h)	q _{CO₂} (h ⁻¹)
156	0,620	5300,000	158,333	6,4563	5,7086	7,14	1,19387	0,0171	0,0098140454	5,86065	19,86924
162	0,447	5730,000	473,333	5,3556	4,3225	6,57	1,38151	0,0079	0,0026414845	9,76195	47,10854
168	0,497	5663,333	357,000	5,6772	4,7046	6,71	1,40687	0,0030	0,0036462636	8,66967	37,27598
174	0,541	5546,667	302,000	5,9492	5,0894	6,89	1,42935	0,0015	0,0055188433	7,31377	28,67418
180	0,552	5483,333	238,333	6,6165	5,7589	7,05	1,43476	0,0030	0,0079771556	6,55932	25,18221
186	0,624	5433,333	204,333	6,2950	5,5455	7,11	1,44760	0,0182	0,0091590001	6,02529	20,28788
192	0,367	5876,667	666,333	5,5418	4,4578	6,68	1,59073	0,0041	0,0034028912	9,89876	59,33841
198	0,418	5616,667	492,333	6,5740	5,6075	6,75	1,61643	0,0009	0,0039980485	7,44003	38,64650
204	0,464	5190,000	404,333	5,3871	4,4019	6,82	1,62885	0,0074	0,0046972974	9,25490	42,87768



LAMPIRAN B CONTOH PENGOLAHAN DATA

B.1 Pengolahan Data OD

Pada penelitian sebelumnya telah didapatkan kurva kalibrasi X Vs OD untuk menentukan berat kering sel pada kepadatan tertentu. Persamaan linear kurva tersebut adalah:

$$y = 0,50716x - 0,019478$$

dimana y adalah X dan x adalah OD. Dengan memasukkan OD ke dalam persamaan tersebut akan diperoleh X. Misalnya pada data ke-0 reaktor flokulasi didapat OD 0,243, sehingga:

$$y = 0,50716 \times (0,243) - 0,019478$$

$$y = 0,1038$$

$$X = 0,1038 \text{ g/L}$$

B.2 Pengolahan Data pH dan y_{CO_2}

Data pH digunakan untuk mengetahui konsentrasi ion bikarbonat dengan menggunakan persamaan berikut:

$$[HCO_3^-] = \left(\frac{K_{CO_2}}{H_{CO_2}} \right) \left(\frac{y_{CO_2} P_T}{10^{-pH}} \right) \frac{\left[\exp \left[A_K \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_K \ln \left(\frac{T_0}{T} \right) + C_K \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) \right] \right]}{\left[\exp \left[A_H \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_H \ln \left(\frac{T_0}{T} \right) + C_H \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) \right] \right]}$$

Dimana :

P_T = Tekanan Operasi (atm)

y_{CO_2} = fraksi gas CO_2

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

H_{CO_2} = 2900 KPa/mol

T = Temperatur operasi

T_0 = Temperatur standar

$A_K = 40.557$ $B_K = -36.782$ $C_K = 0$

$A_H = 22.771$ $B_H = -11.452$ $C_H = -3.117$

Pada data ke-0 reaktor flokulasi, diperoleh data pH sebesar 6,63. Setelah dimasukkan ke dalam persamaan diperoleh $[HCO_3^-]$ sebesar 0,00303283 M.

Untuk data y_{CO_2} digunakan untuk melakukan perhitungan CTR dan q_{CO_2} menggunakan persamaan berikut:

$$CTR = \Delta y_{CO_2} \times \alpha_{CO_2}$$

dimana

$$\alpha_{CO_2} = \frac{U_G \times A \times M_{CO_2} \times P}{V_{medium} \times R \times T}$$

dengan

U_G = kecepatan superfisial gas yang diumpankan = 151,5 L/h

A = luas permukaan reaktor yang menghadap ke sumber cahaya = 3,384 m²

M_{CO_2} = massa molekul relatif CO₂ = 44 g/mol

P = tekanan operasi = 1 atm

V_{medium} = volume medium = 18 L

R = konstanta *Rydberg* (0,08205 dm³.atm/mol.K)

T = suhu operasi = 302 K

Data Δy_{CO_2} yang didapat pada jam ke-0 reaktor flokulasi sebesar 42,3699%, sehingga diperoleh CTR sebesar 21,44173 g/L.h

Kemudian untuk persamaan q_{CO_2} adalah:

$$q_{CO_2} = \frac{CTR}{X} = \frac{\Delta y_{CO_2} \times \alpha_{CO_2}}{X}$$

dimana

X = berat kering sel per satuan volume (g/L)

Δy_{CO_2} = selisih konsentrasi CO₂ masuk dan keluar reaktor

CTR = (g/dm³.h)

Dengan menggunakan CTR dan X yang diperoleh dari perhitungan sebelumnya, q_{CO_2} yang diperoleh dari persamaan di atas adalah 206 h⁻¹.

B.3 Pengolahan Data I_0 dan I_b

Data I_0 dan I_b digunakan untuk mendapatkan efisiensi energi pembentukan biomassa. Persamaan yang digunakan adalah:

$$E_X = \frac{A \int_0^b I_b dt}{\Delta X \times s} \quad E = \frac{A \int_0^b (I_0 - I_b) dt}{\Delta X \times s}$$

dengan ΔX = berat biomassa yang dihasilkan selama masa pertumbuhan (g/L)

s = jarak yang ditempuh cahaya didalam medium = 0,09 m

Kemudian digunakan persamaan berikut untuk mencari persentase efisiensi konversi energi untuk pembentukan biomassa:

$$\eta_E = \frac{E_X}{E} \times 100\%$$

Jam ke-6 pada reaktor flokulasi diketahui I_0 dan I_b sebesar 5196,7 dan 1400 lux, sehingga diperoleh E_X , E , dan η sebesar: 7860,53; 21317,01; dan 36,874%.

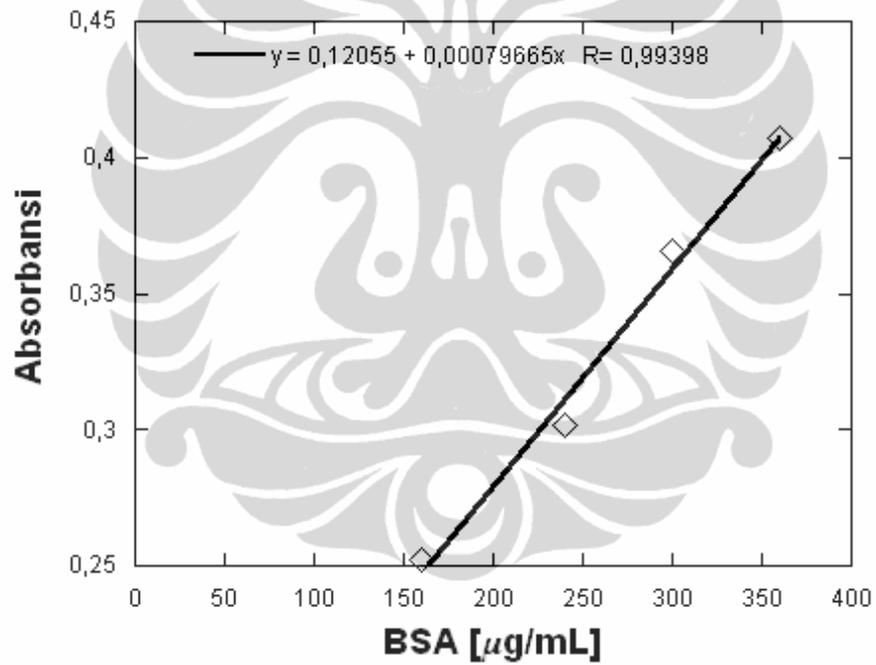
LAMPIRAN C KALIBRASI PROTEIN

Data hasil absorbansi yang diperoleh untuk kalibrasi protein adalah sebagai berikut.

Tabel C. 1 Data absorbansi dari sampel BSA

BSA (μg)	Absorbansi
160	0,252
240	0,301
300	0,366
360	0,407

Sehingga dapat dihasilkan kurva kalibrasi berikut:



Gambar C. 1 Kurva kalibrasi protein