



UNIVERSITAS INDONESIA

**PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* Buitenzorg
DENGAN METODE PENCAHAYAAN ALTERASI
DALAM FOTOBIOREAKTOR KOLOM GELEMBUNG
SUSUN SERI DENGAN VOLUME TOTAL 18 LITER**

SKRIPSI

**NISSA GEMA NUSANTARI
0405067053**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* Buitenzorg
DENGAN METODE PENCAHAYAAN ALTERASI
DALAM FOTOBIOREAKTOR KOLOM GELEMBUNG
SUSUN SERI DENGAN VOLUME TOTAL 18 LITER**

SKRIPSI

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

**NISSA GEMA NUSANTARI
0405067053**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Nissa Gema Nusantari

NPM : 0405067053

Tanda Tangan :

Tanggal : 7 Juli 2009

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Nissa Gema Nusantari
NPM : 0405067053
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan Metode Pencahayaan Alterasi Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri dengan Volume Total 18 Liter

Telah disetujui untuk dimajukan dalam sidang skripsi untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Dianursanti, MT. (.....)
Pembimbing : Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng (.....)
Penguji : Dr. Ir. Heri Hermansyah, M.Eng (.....)

Ditetapkan di : Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok

Tanggal : 7 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah SWT atas izin-Nya skripsi ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Dalam penyusunan buku ini, saya banyak mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA, selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
2. Ibu Anti yang telah meluangkan waktu untuk berdiskusi, memberikan bimbingan dan semangat. Semangat Bu buat S3nya!!
3. Pak Anondho selaku pembimbing ke-2, terima kasih untuk onsultasi di detik-detik terakhirnya Pak.
4. Mang Ijal yang sudah bersedia kami repotin terus; Mang Djajat, Mbak Fita, Mbak Yanti dan karyawan DTK lain atas bantuannya.
5. Keluarga di rumah: Ayah, Ibu, Akbar, Oase, Oma, Tante Dini, terima kasih atas dukungan, kasih sayang, dan doa yang tidak pernah putus.
6. Mama, yang walaupun jauh tapi selalu mendoakan Nissa.
7. Eris, Isna, Endah, Tya, Ita, thank you for all your support and a shoulder to cry on, so glad i have you girls..
8. Teman-teman satu topik mikroalga; cewe-cewe *tough* Isna (lagi) dan Tarryn; Kate dan Maudhi tetep semangat yaa..
9. Hadi, you know what I thank you for..
10. Senior-senior topik mikroalga, terutama untuk Ahmed yang panik sendiri waktu penelitian kami blum selsesai.
11. Semua dosen Teknik Kimia atas ilmu yang diberikan.
12. Teman-teman seangkatan 2005.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juni 2009

Penulis

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

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

Nama : Nissa Gema Nusantari
NPM : 0405067053
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan Metode Pencahayaan Alterasi Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri dengan Volume Total 18 Liter

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 30 Juni 2009
Yang menyatakan

(Nissa Gema Nusantari)

ABSTRAK

Nama : Nissa Gema Nusantari
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan Metode Pencahayaan Alterasi Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri dengan Volume Total 18 Liter

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan tiga buah reaktor, masing-masing dengan volume sebesar 6 liter, yang disusun seri terhadap produksi biomassa *Chlorella vulgaris* yang dikultivasi dengan pencahayaan alterasi. Kultur *Chlorella* diaerasi menggunakan udara yang mengandung 5% karbondioksida dengan laju volumetrik sebesar 4.5 L/menit. Intensitas cahaya yang digunakan terus ditingkatkan seiring dengan penambahan kandungan biomassa di dalam kultur. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa rata-rata biomassa yang dihasilkan adalah sebesar 3.157 g/dm³. Jumlah biomassa terbesar diperoleh dari Reaktor 1 dan yang terkecil adalah produksi biomassa di Reaktor 3. Secara keseluruhan penggunaan reaktor seri menghasilkan biomassa 1.39 kali lipat lebih banyak daripada reaktor tunggal.

Kata kunci:

Chlorella vulgaris, pencahayaan alterasi, fotobioreaktor seri

ABSTRACT

Name : Nissa Gema Nusantari
Study Program : Chemical Engineering
Title : *Chlorella vulgaris* Buitenzorg Biomass Production Under
Alteration Illumination in 18 Litres Serial Bubble Column
Photobioreactors

This research is conducted to find out the influence of utilizing three reactors, each having the volume of 6 litres, arranged in series to the production of *Chlorella vulgaris* biomass cultivated under the alteration illumination. The *Chlorella* culture is aerated by 5% carbondioxide in air having the volumetric rate of 4.5 L/minute. The light intensity is increased along with the rise of biomass content in the culture. The result of this research shows that the average biomass produced is 3.175 g/dm³. The highest ammount of biomass is produced in Reactor 1 while Reactor 3 gives the lowest ammount of biomass. Overall, utilizing three reactors in series produces 1.39 as much biomass as utilizing just a single reactor.

Key words:

Chlorella vulgaris, alteration illumination, photobioreactors in series



DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR SINGKATAN	xii
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Batasan Masalah.....	7
1.5 Sistematika Penulisan.....	7
BAB 2	9
TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Mikroalga <i>Chlorella vulgaris</i>	9
2.1.1 Taksonomi <i>Chlorella vulgaris</i>	10
2.1.2 Morfologi <i>Chlorella</i>	10
2.1.3 Fase Pertumbuhan <i>Chlorella sp.</i>	11
2.1.4 Manfaat <i>Chlorella sp.</i>	13
2.2 Fotosintesis	16
2.2.1 Fotosintesis pada Tumbuhan.....	17
2.2.2 Fotosintesis pada Alga dan Bakteri.....	17
2.2.3 Proses Fotosintesis.....	18
2.2.4 Fotosintesis pada <i>Chlorella sp.</i>	19
2.2.5 Faktor Penentu Laju Fotosintesis	20
2.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroalga Hijau <i>Chlorella sp.</i> pada Medium Terbatas.....	21
2.3.1 Jenis Medium	21
2.3.2 Pencahayaan.....	22
2.3.3 Kondisi Operasi	23
2.3.4 Kontaminan.....	24
2.4 Fotobioreaktor.....	24
2.4.1 Karakteristik Fotobioreaktor	25
2.4.2 Fotobioreaktor Kolom Gelembung.....	28
2.5 Pengaruh Metode Pencahayaan terhadap Pertumbuhan <i>Chlorella</i>	29
2.5.1 Fotoperiodisasi (Pencahayaan Terang – Gelap).....	29
2.5.2 Pencahayaan Kontinyu Intensitas Konstan.....	30
2.5.3 Pencahayaan Alterasi.....	30
2.5.4 Perbandingan Ketiga Metode Pencahayaan.....	31
BAB 3	33

METODE PENELITIAN.....	33
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	33
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	35
3.2.1 Alat Penelitian.....	35
3.2.2 Bahan Penelitian.....	36
3.3 Variabel Penelitian	36
3.3.1 Variabel Bebas	36
3.3.2 Variabel Terikat.....	36
3.3.3 Variabel Semibebas	37
3.4 Prosedur Penelitian.....	37
3.4.1 Persiapan Peralatan dan Medium	37
3.4.2 Pemiakan Kultur <i>Chlorella vulgaris</i> Dalam Medium Benneck.	40
3.4.4 Penentuan Kerapatan Biomassa Inokulum <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg.....	41
3.4.5 <i>Running</i> Fotobioreaktor.....	41
3.4.6 Pengambilan Data.....	42
3.4.7 Pengolahan Data Penelitian	43
BAB 4	47
HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1 Pembahasan Umum.....	47
4.2 Data Penelitian	49
4.3 Pengaruh Susunan Reaktor Seri terhadap Produksi Biomassa <i>Chlorella</i> <i>vulgaris</i> Buitenzorg	53
4.3.1 Perhitungan X.....	53
4.3.2 Perhitungan μ_{max}	54
4.3.3 Pengaruh Susunan Reaktor terhadap Nilai pH Medium.....	56
4.4 Energi untuk Produksi Biomassa	57
4.5 Pengaruh Penambahan Volume Reaktor terhadap Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg.....	58
BAB 5	61
KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Koloni <i>Chlorella sp.</i>	9
Gambar 2. 2 Struktur Sel <i>Chlorella</i>	10
Gambar 2. 3 Kurva Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i>	12
Gambar 2. 4 Reaksi pada Fotosintesis	18
Gambar 2. 5 Fotobioreaktor Terbuka untuk Pembiakan <i>Chlorella sp.</i>	25
Gambar 2. 6 Fotobioreaktor Kolom Gelembung.....	28
Gambar 2. 7 Perbandingan Pengaruh Metode Pencahayaan terhadap Pertumbuhan <i>Chlorella sp.</i>	31
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 4. 1 Susunan Rangkaian Peralatan	48
Gambar 4. 2 Data Pengamatan Pertumbuhan <i>Chlorella Vulgaris</i> pada Reaktor Seri Skala Pilot	50
Gambar 4. 3 Data Pengamatan Pertumbuhan <i>Chlorella Vulgaris</i> pada Reaktor Tunggal Skala Pilot	51
Gambar 4. 4 Data Pengamatan Pertumbuhan <i>Chlorella Vulgaris</i> pada Reaktor Seri Skala Lab.....	52
Gambar 4. 5 Perbandingan Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> dengan Pencahayaan Alterasi pada Reaktor Seri dan Reaktor Tunggal.....	53
Gambar 4. 6 Perbandingan Laju Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> dengan Pencahayaan Alterasi pada Reaktor Seri dan Reaktor Tunggal.....	55
Gambar 4. 7 Konsentrasi Ion $[HCO_3^-]$ dalam Reaktor Seri	56
Gambar 4. 8 Konsentrasi Ion $[HCO_3^-]$ dalam Reaktor Tunggal.....	57
Gambar 4. 9 Rasio antara Jumlah Biomassa Akhir terhadap Jumlah Biomassa Awal untuk Penelitian dengan Variasi Berbeda.....	Error! Bookmark not defined.

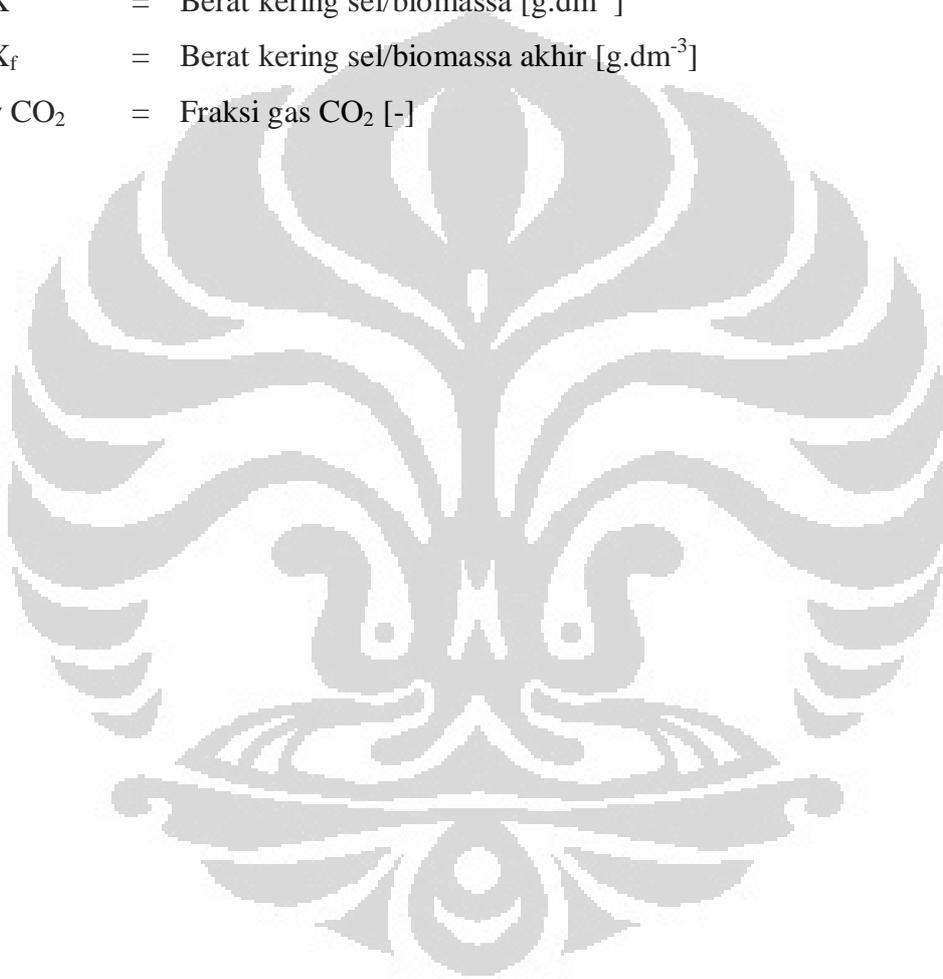
DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Ringkasan Penelitian Mikroalga yang Berkaitan dengan Jenis Reaktor dan Fiksasi CO ₂	1
Tabel 1. 2 Kandungan Nutrisi Makro pada <i>Chlorella sp</i>	2
Tabel 1. 3 Jejak Rekam Penelitian Mengenai Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg di Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia	3
Tabel 1. 4 Posisi Penelitian yang Dilakukan.....	6
Tabel 2. 1 Taksonomi <i>Chlorella vulgaris</i>	10
Tabel 2. 2 Komposisi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i>	14
Tabel 2. 3 Perbandingan Komposisi Nutrisi Medium Pembiakan <i>Chlorella sp.</i>	22
Tabel 2. 4 Perbandingan Peningkatan Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg Skala Lab (volume reaktor = 0.6 dm ³)	32
Tabel 3. 1 Bahan Medium Benneck.....	39
Tabel 4. 1 Berat Kering Maksimum	54
Tabel 4. 2 Energi Cahaya untuk Produksi Biomassa.....	58
Tabel 4. 3 Perbandingan Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> yang Dikultivasi dengan Pencahayaan Alterasi dalam Reaktor Susun Seri Skala Lab dan Skala Pilot	59

DAFTAR SINGKATAN

α_{CO_2}	=	Koefisien transfer CO_2 spesifik [$g \cdot dm^{-3} \cdot h^{-1}$]
α_{kaca}	=	Efisiensi penyerapan cahaya permukaan kaca fotobioreaktor [%]
λ	=	Panjang gelombang [nm]
A	=	Luas permukaan plat iluminasi [m^2]
A_H, B_H, C_H	=	Konstanta H_{CO_2} pada Persamaan Henry [-]
A_K, B_K, C_K	=	Konstanta K_{CO_2} pada Persamaan Henry [-]
CTR	=	<i>Carbon Transfer Rate</i> [$g \cdot dm^{-3} \cdot h^{-1}$]
E_x	=	Energi cahaya yang dimanfaatkan untuk produksi biomassa [$J \cdot g^{-1}$]
H_{CO_2}	=	Bilangan Henry [$kPa \cdot kg \cdot mol^{-1}$]
I	=	Intensitas cahaya [lx]
I_b	=	Intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh kultur medium keluar fotobioreaktor setelah dikalikan dengan α_{kaca} [lx]
I_i	=	Intensitas cahaya yang diterima oleh kultur medium dalam fotobioreaktor setelah dikalikan dengan α_{kaca} [lx]
I_0	=	Intensitas cahaya yang diterima oleh kultur medium dalam fotobioreaktor [lx]
I_t	=	Intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh kultur medium keluar fotobioreaktor [lx]
$I_{\mu max, opt}$	=	Intensitas cahaya untuk laju pertumbuhan maksimum [lx]
K_{CO_2}	=	Konstanta kesetimbangan CO_2 [-]
M_{CO_2}	=	Berat molekul CO_2 [$g \cdot mol^{-1}$]
N, N_{sel}	=	Nilai kerapatan sel [$sel \cdot cm^3$]
OD	=	<i>Optical density</i> (kerapatan optik)/absorbansi kultur terhadap cahaya. [-]
OD_{680}	=	<i>Optical density</i> (kerapatan optik)/absorbansi kultur terhadap cahaya pada panjang gelombang 680nm. [-]
P	=	Tekanan operasi [atm]
P_T	=	Tekanan <i>ambient</i> [atm]
q_{CO_2}	=	Laju transfer CO_2 spesifik dengan basis biomassa (X) [h^{-1}]
R	=	Konstanta tetapan gas [$0.082 \text{ atm} \cdot dm^{-3} \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$]

a	=	Jarak yang ditempuh cahaya dalam kultur medium [m]
T	=	Temperatur operasi [K]
t	=	Waktu [h]
U_G	=	Kecepatan superficial gas [$m \cdot h^{-1}$]
μ	=	Laju pertumbuhan spesifik [h^{-1}]
μ_{max}	=	Laju pertumbuhan spesifik maksimum [h^{-1}]
V_{med}	=	Volume medium [dm^3]
X	=	Berat kering sel/biomassa [$g \cdot dm^{-3}$]
X_f	=	Berat kering sel/biomassa akhir [$g \cdot dm^{-3}$]
y_{CO_2}	=	Fraksi gas CO_2 [-]



BAB 1

PENDAHULUAN

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

1.1 Latar Belakang Masalah

Bioteknologi merupakan suatu kajian dari kegiatan industri yang menghasilkan barang dan jasa dengan menggunakan organisme, sistem dan proses secara biologis (Sukoso, 2008). Salah satu topik penelitian bioteknologi yang telah banyak dikembangkan adalah tentang potensi dari biomassa mikroalga hijau (Ferna'ndez F.G.A., 1998), yang dapat digunakan sebagai suplemen makanan, bahan kosmetik, *pharmaceutical*, umpan akuakultur, produk kimia *intermediate*, dan bahan bakar ramah lingkungan. Selain itu, mikroalga hijau memiliki kemampuan untuk memfiksasi CO₂ sehingga dapat membantu mereduksi pemanasan global. Tabel 1.1 memperlihatkan ringkasan beberapa penelitian yang telah dilakukan berkaitan dengan usaha-usaha yang dilakukan untuk meningkatkan produksi mikroalga berdasarkan jenis reaktor dan fiksasi CO₂.

Tabel 1. 1 Ringkasan Penelitian Mikroalga yang Berkaitan dengan Jenis Reaktor dan Fiksasi CO₂

Reaktor	Characterization of factors influencing the growth of <i>Anabaena variabilis</i> in a bubble column reactor (Yoon, Shin, Park) Photobioreactors for mass cultivation of algae (Ugwu et. al.) Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae (Sierra et. al.) Capturing sunlight into a photobioreactor: Ray tracing simulations of the propagation of light from capture to distribution into the reactor (Zijffers et. al.)
Fiksasi CO ₂	A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration – the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach (Stewart, Hessami) Reduction of CO ₂ by a high-density culture of <i>Chlorella sp.</i> in a semicontinuous photobioreactor (Chiu et. al.) CO ₂ bio-mitigation using microalgae (Wang et. al.)

Mikroalga hijau yang telah banyak diteliti dan dikembangkan sebagai penghasil biomassa adalah *Chlorella sp.* Mikroalga ini memiliki banyak manfaat karena memiliki kandungan nutrisi yang lengkap seperti dapat dilihat pada Tabel 1.2.

Tabel 1. 2 Kandungan Nutrisi Makro pada *Chlorella sp*

Kandungan Nutrisi Makro	Persentase
Protein	58.4
Lemak	9.3
Karbohidrat	23.2
Serat	0.3
Ash	4.2
Kelembaban	4.6
Kalori	411 cal/100gr

Sumber: <http://www.naturalways.com/chlor02.ht>

Selain itu, *Chlorella sp.* juga memiliki kandungan nutrisi mikro berupa vitamin dan mineral. Dari Tabel 1.2, dapat dilihat bahwa kandungan nutrisi terbesar yang dimiliki oleh *Chlorella sp.* adalah protein. Kandungan protein yang lebih dari 50% persen menjadikan mikroalga hijau ini cocok digunakan sebagai suplemen makanan dengan kadar protein tinggi. Kandungan nutrisi terbanyak kedua adalah karbohidrat. Dengan kandungan karbohidrat yang cukup tinggi, *Chlorella sp.* dapat dikembangkan sebagai sumber pangan alternatif untuk membantu mengatasi masalah kekurangan pangan. Selain itu, *Chlorella sp.* juga memiliki kandungan lemak sebesar 9.3% sehingga dapat digunakan sebagai salah satu alternatif bahan baku pembuatan biodiesel.

Sebagai negara yang kaya akan sumberdaya hayati dan memiliki wilayah laut yang cukup luas, Indonesia memiliki peluang untuk mengembangkan produksi biomassa *Chlorella sp.* Namun, pemanfaatan *Chlorella sp.* di negara kita saat ini baru sebagai pakan alami larva ikan man mas (<http://digilib.biologi.lipi.go.id>) dan aditif pakan ternak (<http://www.poultryindonesia.com>). Sementara itu, Jepang telah meneliti mikroalga ini dan mendapat kesimpulan bahwa *Chlorella sp.* asal Indonesia memiliki kualitas yang sangat baik sebagai sumber *food supplement* dan sumber bahan baku industri farmasi lainnya. Jepang sendiri telah memanfaatkan lokasi di

Kabupaten Pasuruan sebagai lokasi kultur *Chlorella* sp. (<http://prasetya.brawija.ac.id/sukoso.htm>). Sayang sekali jika sumber daya alam yang sangat potensial itu justru dikelola oleh negara lain. Oleh karena itu, akan lebih baik jika Indonesia mampu mengembangkan produksi biomassa mikroalga yang sangat potensial ini.

Sebagai mikroalga hijau, *Chlorella* sp. memperoleh energi untuk pertumbuhannya dengan melakukan fotosintesis, yaitu dengan mengubah energi cahaya menjadi senyawa karbon. Pertumbuhan *Chlorella* sp. akan berlangsung baik jika proses fotosintesis berjalan dengan optimal. Oleh karena itu, cahaya merupakan faktor penting bagi pertumbuhan *Chlorella* sp. dan menjadi variabel sasaran optimalisasi dalam upaya meningkatkan produksi biomassa mikroalga tersebut.

Rangkaian penelitian yang dilakukan di Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia (DTK FTUI) membandingkan tiga metode pencahayaan, yaitu fotoperiodisasi (pencahayaan terang-gelap), pencahayaan kontinu dengan intensitas konstan, dan pencahayaan kontinu dengan alterasi intensitas. Selain metode pencahayaan, variabel lain yang dijadikan sasaran optimalisasi pada penelitian-penelitian yang dilakukan oleh DTK FTUI untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella* sp. adalah konfigurasi reaktor. Beberapa penelitian yang telah dilakukan di DTK FTUI dapat dilihat pada Tabel 1.3.

Tabel 1. 3 Jejak Rekam Penelitian Mengenai Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg di Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Tahun	Peneliti	Judul Penelitian	Volume Total Reaktor	Kesimpulan
2005	Sang Made Kresna Andika	“Peningkatan Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg dengan Alterasi Pencahayaan dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung”	1 dm ³	Perlakuan alterasi pencahayaan menghasilkan produksi biomassa 1.61 kali lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu.
2006	Valentino	“Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg melalui Pencahayaan Siklus Harian dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung”	0.6 dm ³	Perlakuan pencahayaan siklus harian pada kultivasi <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg menunjukkan hasil akhir produksi biomassa lebih rendah daripada pencahayaan kontinyu.
2006	Muryanto	“Produksi Biomassa <i>Chlorella sp.</i> dengan Pencahayaan Periodik dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri”	0.6 dm ³	Pada pencahayaan periodik, penggunaan reaktor susun seri dapat meningkatkan produksi biomassa sebesar 1.2 kali lipat dibandingkan dengan reaktor tunggal.
2006	Muhammad Aji Sujarwo	“Peningkatan Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg dengan Pencahayaan Kontinu dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri”	0.6 dm ³	Pada pencahayaan kontinyu, penggunaan reaktor susun seri dapat meningkatkan produksi biomassa sebesar 1.6 kali lipat dibandingkan dengan reaktor tunggal.
2006	Antonius Yudi Sendjaja	“Produksi Biomassa <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg dengan Optimasi Pencahayaan Alterasi dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri”	0.6 dm ³	Pada penggunaan reaktor susun seri, pencahayaan alterasi dapat meningkatkan produksi biomassa sebesar 2.62 kali lipat dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu.
2008	Indah Permata S.	“Evaluasi Kinerja Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah untuk Produksi Biomassa <i>Chlorella sp.</i> Melalui Pengaturan Kerapatan Cahaya”	21 dm ³	Pada penggunaan reaktor tunggal dengan volume 21 dm ³ , pencahayaan alterasi dapat meningkatkan produksi biomassa sebesar 1.63 kali lipat dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu.

Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan metode pencahayaan alterasi merupakan metode pencahayaan yang tepat untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Hal ini telah dibuktikan pada penelitian skala lab yang dilakukan oleh Sang Made Kresna Andika pada tahun 2005. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan alterasi pencahayaan dapat meningkatkan kemampuan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg sampai 1.61 kali lipat dengan masa kultivasi hingga 2 kali lebih singkat jika dibandingkan dengan metode pencahayaan kontinyu intensitas konstan. Peningkatan kemampuan produksi biomassa ini disebabkan oleh kemampuan metode pencahayaan alterasi dalam mengatasi masalah *self shading*, yaitu terhalangnya satu sel oleh sel lain sehingga cahaya yang diperoleh tidak merata.

Dengan intensitas yang terus meningkat, cahaya akan mampu mencapai bagian belakang reaktor sehingga sel yang terdapat di bagian belakang tetap memperoleh cahaya untuk berfotosintesis.

Sedangkan untuk susunan reaktor, keunggulan penggunaan reaktor yang disusun seri telah dibuktikan melalui penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Aji Sujarwo pada tahun 2006. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan tiga buah fotobioreaktor berukuran 200 cm^3 yang disusun seri akan meningkatkan produksi biomassa hingga 1.6 kali lipat dari reaktor tunggal berukuran 600 cm^3 . Susunan reaktor seri diharapkan mampu mengatasi masalah *self shading* dan mengurangi kompetisi sel-sel *Chlorella sp.* untuk mendapatkan nutrisi. Selain itu, penggunaan fotobioreaktor susun seri diharapkan dapat meningkatkan efisiensi fiksasi CO_2 karena gas CO_2 keluaran dari reaktor pertama akan diumpankan ke dalam reaktor kedua. Kemudian keluaran reaktor kedua akan diumpankan ke dalam reaktor ketiga.

Dari kedua penelitian tersebut, dapat dilihat bahwa metode pencahayaan alterasi dan konfigurasi reaktor susun seri dapat meningkatkan produksi biomassa *Chlorella sp.* Antonius Yudi, melalui penelitiannya pada tahun 2006, mencoba menggabungkan kedua variabel tersebut untuk mendapatkan produksi biomassa yang lebih tinggi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa dalam fotobioreaktor gelembung susun seri dengan volume total 0.6 dm^3 , metode pencahayaan alterasi dapat meningkatkan produksi biomassa hingga 2.62 kali lipat dibandingkan dengan metode pencahayaan kontinu.

Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian-penelitian sebelumnya yang dapat dilihat pada Tabel 1.4. Pada penelitian ini, reaktor yang digunakan adalah tiga buah fotobioreaktor, masing-masing berukuran 6 L, yang disusun seri dengan sistem pencahayaan alterasi. Penambahan volume total reaktor diharapkan akan meningkatkan produksi biomassa *Chlorella sp.* Hasil penelitian ini akan dibandingkan dengan beberapa hasil penelitian sebelumnya untuk menentukan metode kultivasi yang lebih efektif dalam meningkatkan produksi biomassa *Chlorella sp.*

Tabel 1. 4 Posisi Penelitian yang Dilakukan

		Tanpa Filtrasi		Tanpa Filtrasi	Dengan Filtrasi	Tanpa Filtrasi	Dengan Filtrasi
Pencahayaannya	Alterasi	S. M. K. Andika, 2005	A. Y. Sendjaja, 2006	I. P. Syahri, 2008	A. Syarif, 2008	N. G, Nusantari, 2009	
	Kontinyu	S. M. K. Andika, 2005	A. Y. Sendjaja, 2006	I. P. Syahri, 2008	R. Nuzulliany, 2008		
	Terang-Gelap	Valentino, 2006	Muryanto, 2006				
		Tunggal	Seri	Tunggal		Seri	
		Skala Lab		Skala Menengah			

Penelitian-penelitian yang dilakukan difokuskan untuk menemukan metode kultivasi yang ideal sehingga dapat meningkatkan produksi biomassa *Chlorella sp.* Pada akhirnya, hasil penelitian ini diharapkan dapat diaplikasikan untuk mengoptimalkan pemanfaatan mikroalga perairan di lingkungan kampus UI. Selain itu, pengembangan produksi biomassa mikroalga ini dapat dijadikan media untuk meningkatkan hubungan dengan fakultas lain. Misalnya dengan melakukan riset bersama Jurusan Biologi dan Jurusan Farmasi FMIPA untuk mengembangkan produksi biomassa ini menjadi skala yang lebih besar lagi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana pengaruh penyusunan fotobioreaktor kolom gelembung secara seri terhadap produksi biomassa *Chlorella vulgaris* untuk reaktor dengan volume total 18 liter dengan pencahayaan alterasi.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menentukan pengaruh konfigurasi reaktor terhadap peningkatan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* pada reaktor dengan volume total 18 liter.
2. Mengetahui pengaruh perbesaran volume terhadap produksi biomassa *Chlorella vulgaris* dalam fotobioreaktor kolom gelembung susun seri.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
2. Mikroalga yang digunakan adalah *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang diperoleh dari koleksi kultur Sub Balai Penelitian Perikanan Air Tawar Depok, Dinas Kelautan dan Perikanan. Mikroalga tersebut dikultivasi dalam medium *Benneck* dan diaerasi dengan CO₂ 5% dalam udara.
3. Sistem reaktor yang digunakan adalah tiga buah fotobioreaktor yang disusun seri dengan volume setiap reaktor sebesar 6 liter.
4. Kecepatan superfisial CO₂ yang digunakan adalah kecepatan superfisial optimum berdasarkan pengukuran *gas hold up*.
5. Metode pencahayaan yang digunakan adalah alterasi pencahayaan dengan intensitas cahaya terus ditingkatkan sesuai dengan peningkatan jumlah sel pada kultur. Intensitas cahaya yang digunakan adalah intensitas cahaya optimum untuk setiap jumlah sel.
6. Sebagai perbandingan adalah kultivasi dengan metode pencahayaan alterasi dalam fotobioreaktor tunggal dengan volume 18 liter serta kultivasi dengan metode pencahayaan alterasi dalam fotobioreaktor susun seri skala lab dengan volume masing-masing reaktor 0.2 dm².

1.5 Sistematika Penulisan

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

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan teori umum tentang mikroalga *Chlorella vulgaris*, proses fotosintesis, dan faktor-faktor yang

mempengaruhi pertumbuhan dan produksi biomassa mikroalga *Chlorella vulgaris*.

BAB III METODE PENELITIAN

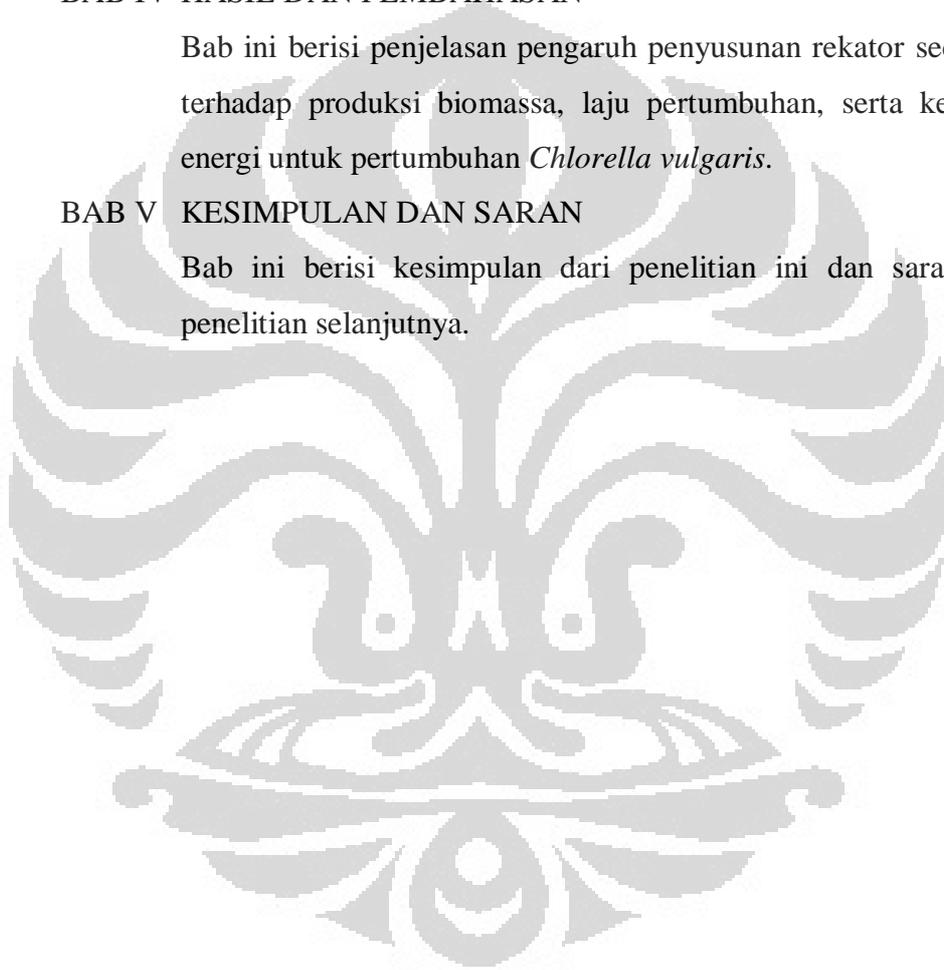
Bab ini berisi penjelasan tentang diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, variabel penelitian, prosedur penelitian, serta metode perhitungan data hasil observasi yang akan digunakan dalam penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi penjelasan pengaruh penyusunan reaktor secara seri terhadap produksi biomassa, laju pertumbuhan, serta kebutuhan energi untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

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



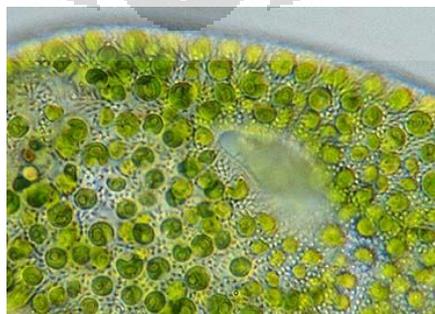
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

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

2.1 Mikroalga *Chlorella vulgaris*

Chlorella merupakan mikroalga hijau yang sangat spesial karena kandungan klorofilnya paling tinggi dibanding seluruh mikroalga hijau bahkan seluruh tanaman tingkat tinggi di dunia, yaitu sebanyak 28.9 g/kg (www.tuberoze.com). Jika ditinjau dari komponen fotosintesisnya, *Chlorella* secara fisiologi dan biokimia sangat identik dengan tumbuhan tinggi, walaupun secara fisik belum memiliki akar, batang, dan daun yang sebenarnya (uniseluler). *Chlorella* juga memiliki kelebihan untuk tumbuh dan berkembang biak dengan cepat. Hal inilah yang menjadikan *Chlorella* sangat digemari untuk diteliti dan dikembangkan, disamping potensi dan nilai ekonomisnya yang tinggi (www.chlorellafactor.com).

Chlorella 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* (Suriawiria, 2005). Sistem koloni *Chlorella* dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Koloni *Chlorella sp.*

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

2.1.1 Taksonomi *Chlorella vulgaris*

Mikroalga yang digunakan pada penelitian ini adalah *Chlorella vulgaris* yang memiliki klasifikasi sebagai berikut:

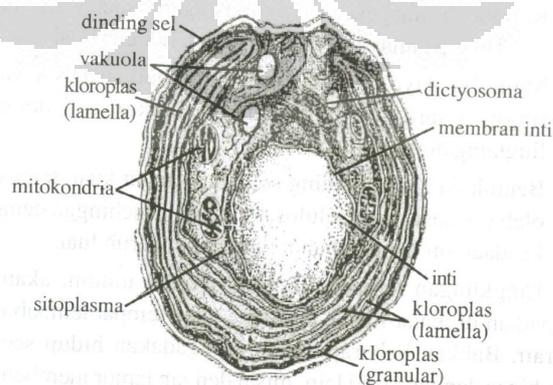
Tabel 2. 1 Taksonomi *Chlorella vulgaris*

Scientific classification	
Kingdom:	<u>Flora</u>
Division:	<u>Chlorophyta</u>
Class:	<u>Trebouxiophyceae</u>
Order:	<u>Chlorellales</u>
Family:	<u>Chlorellaceae</u>
Genus:	<i>Chlorella</i>
Species:	<i>Chlorella vulgaris</i>

Sumber: <http://en.wikipedia.org/wiki/Chlorella>

2.1.2 Morfologi *Chlorella*

Chlorella adalah organisme bersel tunggal atau *uniselular* dengan ukuran sel antara 3-15 μm dan hidup di air tawar atau laut secara bebas maupun *sendofitis*. Struktur sel dari *Chlorella* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Struktur Sel *Chlorella*

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

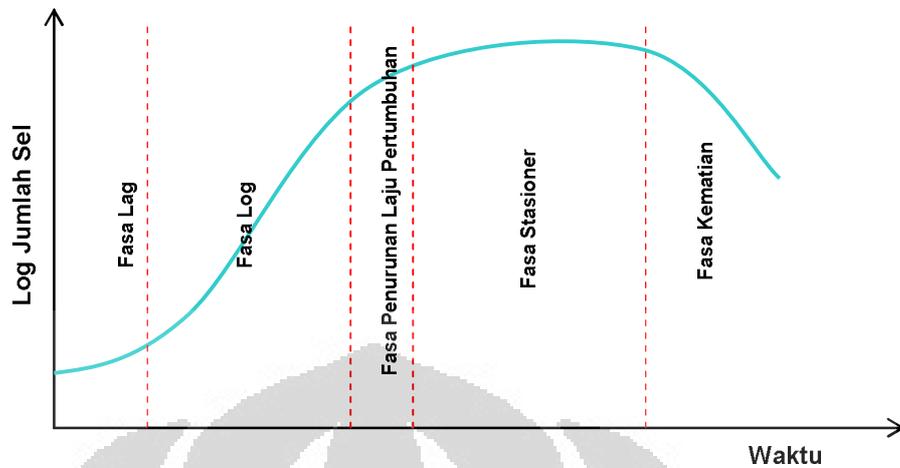
Bentuk sel *Chlorella* bulat dan lonjong, tidak bergerak, dan berdinding sel tebal terbuat dari selulosa. Struktur sel *Chlorella* terdiri dari sebuah *nukleus* (inti sel), badan golgi, *kloroplast*, *pirenoid*, *mitokondria*, dan *vakuola*.

2.1.3 Fase Pertumbuhan *Chlorella sp.*

Chlorella sp. berkembang biak secara aseksual dengan cara membelah diri dan membentuk *autospora*. Setiap sel yang sudah masak akan membelah dan menghasilkan 2, 4, 8, dan 16 *autospora*, akan tetapi kondisi 16 *autospora* jarang didapatkan. *Autospora* adalah *spora non flagella* yang mempunyai bentuk seperti sel induknya, tetapi mempunyai ukuran tubuh lebih kecil. Selanjutnya, *autospora* yang telah dihasilkan akan dibebaskan dari sel induk melalui penghancuran dinding sel dewasa dan kemudian berkembang hingga mencapai ukuran sel induknya.

Chlorella vulgaris mempunyai waktu generasi yang sangat cepat. Oleh karena itu dalam waktu yang relatif singkat, perbanyakan sel akan terjadi secara cepat, terutama jika tersedianya cahaya dan sumber energi yang cukup. Umumnya perbanyakan sel terjadi dalam waktu 4-14 jam, tergantung pada lingkungan pendukungnya (Wirosaputro, 2002).

Apabila sejumlah kecil *Chlorella sp.* diinokulasi dalam medium kultur terbatas dan jumlah sel *Chlorella sp.* dihitung sebagai fungsi waktu, maka pola pertumbuhan berdasarkan jumlah sel dapat dikelompokkan menjadi lima fase (Wirosaputro, 2002) seperti dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Kurva Pertumbuhan *Chlorella vulgaris*

1. Fase Tunda (*lag phase*)

Fase tunda adalah fase penyesuaian dengan lingkungan yang baru sebelum memulai pembiakan (pembelahan). Penundaan pertumbuhan terjadi karena sel-sel kekurangan metabolit dan enzim akibat dari keadaan tidak menguntungkan dalam pembiakan terdahulu. Enzim-enzim dan zat antara terbentuk dan terkumpul sampai konsentrasi yang cukup untuk kelanjutan pertumbuhan. Pada fase ini tidak terjadi penambahan jumlah sel.

2. Fase Pertumbuhan Logaritmik (*log phase*)

Pada fase ini, sel-sel berada dalam keadaan stabil dan membelah dengan cepat sehingga jumlah sel terus bertambah dengan kecepatan tetap. Bahan sel baru terbentuk dengan laju konstan tetapi bahan-bahan baru itu bersifat katalitik sehingga massa bertambah secara eksponensial. Pertumbuhan yang cepat ini terjadi hingga satu atau lebih zat makanan dalam pembenihan habis atau hasil metabolisme beracun yang tertimbun terlalu banyak sehingga menghambat pertumbuhan.

3. Fase Penurunan Laju Pertumbuhan

Pada fase ini, laju penambahan jumlah sel menurun karena zat makanan yang tersedia tidak sebanding dengan jumlah populasi akibat dari penambahan yang sangat cepat pada fase eksponensial.

Kompetisi yang sangat tinggi di dalam media hidup menyebabkan hanya sebagian dari populasi yang mendapatkan cukup nutrisi untuk tumbuh dan membelah.

4. Fase Stasioner

Pada fase ini, jumlah sel kurang lebih tetap karena pertumbuhan berhenti, namun pergantian sel tetap terjadi. Adanya kehilangan sel karena kematian diimbangi oleh pembentukan sel-sel yang baru melalui pertumbuhan dan pembelahan yang lambat. Hal ini disebabkan oleh habisnya zat makanan atau menumpuknya hasil metabolisme yang beracun.

5. Fase kematian

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

2.1.4 Manfaat *Chlorella sp.*

Chlorella sp. memiliki kandungan sel yang sangat bermanfaat bagi kesehatan. Secara umum kandungan sel *Chlorella sp.* adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Komposisi Biomassa *Chlorella vulgaris*

Komponen		
Protein	g/100g	33-45
Lemak	g/100g	6.9-16.1
Air	g/100g	4-5
Klorofil	g/100g	0.7-2.7
Sumber Mineral	g/100g	6.5-10.5
Lipid	g/100g	6.5-12.5
Rohfaser	g/100g	6.6-7.5
Ballaststoffe	g/100g	27.1-32.5
Karbohidrat	g/100g	0.9-2
Mineral		
Kalsium	mg/100g	321-604
Magnesium	mg/100g	273-325
Seng	mg/100g	4-6
Besi	mg/100g	40-70
Kalium	mg/100g	1000-2900
Iodium	mg/100g	< 0.0005
Selenium	µg/100g	2-10
Vitamin		
Betakaroten	mg/100g	3.3-11.2
Vitamin B1	mg/100g	0.5-1.0
Vitamin B2	mg/100g	3.2-3.8
Vitamin B6	mg/100g	0.3-3.7
Vitamin B12	mg/100g	0.2-1.0
Vitamin E	mg/100g	3.6-10.0
Vitamin C	mg/100g	13-20
Vitamin K1	mg/100g	0.2-0.8

Sumber: www.gtamart.com

Komponen utama sel *Chlorella* yang banyak dimanfaatkan adalah sebagai berikut:

1. Kandungan klorofil

Chlorella sp. mengandung klorofil dalam jumlah besar ($\pm 2.8\%$). Klorofil yang telah diekstrak memiliki manfaat di bidang kesehatan, di antaranya sebagai alat pembersih alami (*cleansing*) di dalam tubuh; pengontrol kandungan kalsium; membantu pencernaan protein dan lemak; penyerapan unsur-unsur Fe; serta menjadikan dan menjaga darah tetap bersih, sehat dan berfungsi dengan baik (Suriawiria, 2005).

2. Kandungan protein

Kandungan protein *Chlorella* cukup tinggi. Dalam protein tersebut terdapat beragam asam amino esensial yang sangat dibutuhkan tubuh manusia. Selain berguna bagi pertumbuhan, kandungan protein alami yang dimiliki *Chlorella* juga membantu menjaga kandungan gula dalam darah (www.chlorellafactor.com).

3. *Chlorella Growth Factor* (CGF)

Chlorella Growth Factor (CGF) terkandung di dalam *nucleus* pada sel *Chlorella*. Walaupun kandungan CGF hanya 5%, manfaatnya sangat luas bagi kesehatan karena dapat meningkatkan kekebalan tubuh, mencegah kanker, dan banyak kegunaan medis lain. Beberapa penyakit dan kelainan metabolisme tubuh dapat disembuhkan melalui pemberian preparat *Chlorella*. Hal ini karena CGF memiliki aktivitas tinggi dalam merangsang pertumbuhan jaringan baru. Selain itu, CGF yang salah satu kandungannya adalah *glukoprotein* memiliki daya sebagai “*anti tumor activity*” terhadap Sarkoma 180 (salah satu tipe kanker), bahkan dapat menghambat tumor payudara dan liver sampai 52.9% (Suriawiria, 2005).

4. Vitamin

Vitamin yang dihasilkan oleh *Chlorella* berbeda dengan vitamin sintesis. Kandungannya alami sehingga lebih sehat dan lebih mudah diserap oleh tubuh. *Betakaroten* bermanfaat bagi kesehatan mata serta untuk menjaga kekebalan tubuh. Sedangkan vitamin B bagus untuk orang yang sedang melakukan diet karena dapat mencegah rasa lapar (www.chlorellafactor.com).

5. Dinding sel

Dinding sel *Chlorella* tersusun oleh *selulosa*, *hemiselulosa* dan *lignin* sehingga dapat digunakan sebagai sumber serat yang sangat dibutuhkan oleh manusia. (Suriawiria, 2005) Kehadiran serat di dalam makanan dapat mengontrol kandungan kolesterol. Selain itu, dinding sel *Chlorella* juga mengandung *polisakarida* kompleks yang berguna untuk mencegah kanker (www.chlorellafactor.com).

2.2 Fotosintesis

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

Fotosintesis berasal dari kata *foton* yang berarti cahaya dan *sintesis* yang berarti penyusunan, sehingga fotosintesis dapat diartikan sebagai proses sintesis dari zat organik (dalam hal ini CO₂) dengan menggunakan energi cahaya. Sumber energi cahaya alami adalah matahari yang memiliki spektrum cahaya infra merah, merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, ungu dan ultra ungu. Pada proses fotosintesis, cahaya yang digunakan adalah spektrum cahaya tampak, dari ungu sampai merah (<http://free.vlsm.org>).

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

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

2.2.1 Fotosintesis pada Tumbuhan

Tumbuhan bersifat autotrof. Autotrof artinya dapat mensintesis makanan langsung dari senyawa anorganik. Tumbuhan menggunakan karbon dioksida dan air untuk menghasilkan gula dan oksigen yang diperlukan sebagai makanannya melalui reaksi berikut ini:



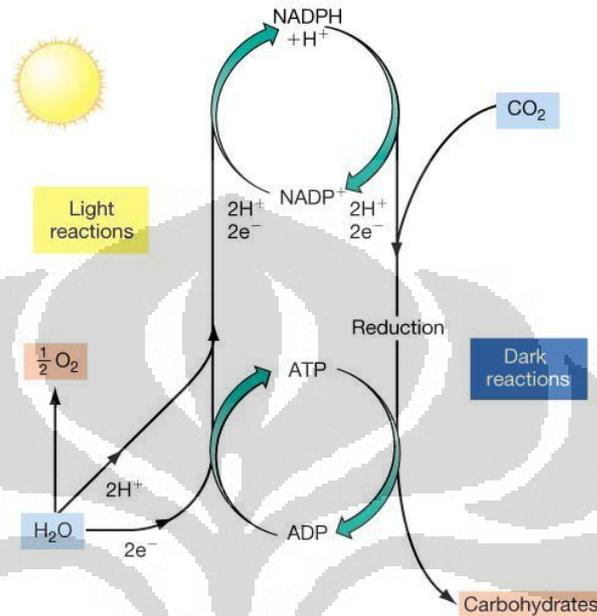
Tumbuhan menangkap cahaya menggunakan pigmen yang disebut klorofil. Pigmen inilah yang memberi warna hijau pada tumbuhan. Klorofil mengandung organel yang disebut kloroplas. Kloroplas inilah yang menyerap cahaya yang akan digunakan dalam fotosintesis. Meskipun seluruh bagian tubuh tumbuhan yang berwarna hijau mengandung kloroplas, namun sebagian besar energi dihasilkan di daun. Di dalam daun terdapat lapisan sel yang disebut mesofil yang mengandung setengah juta kloroplas setiap milimeter persegi. Cahaya akan melewati lapisan epidermis tanpa warna dan yang transparan, menuju mesofil, tempat terjadinya sebagian besar proses fotosintesis. Permukaan daun biasanya dilapisi oleh kutikula dari lilin yang bersifat anti air untuk mencegah terjadinya penyerapan sinar matahari ataupun penguapan air yang berlebihan (<http://id.wikipedia.org>).

2.2.2 Fotosintesis pada Alga dan Bakteri

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

2.2.3 Proses Fotosintesis

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

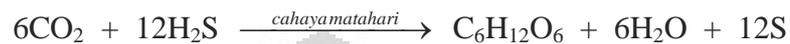


Gambar 2. 4 Reaksi pada Fotosintesis

Dalam reaksi terang, terjadi konversi energi cahaya menjadi energi kimia dan menghasilkan oksigen (O_2). Sedangkan dalam siklus Calvin terjadi seri reaksi siklik yang membentuk gula dari bahan dasar CO_2 dan energi (ATP dan NADPH). Energi yang digunakan dalam siklus Calvin diperoleh dari reaksi terang (<http://bima.ipb.ac.id>).

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

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



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

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

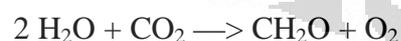
Secara singkat, reaksi-reaksi yang terjadi selama proses fotosintesis adalah sebagai berikut:



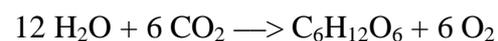
Reaksi gelap:



atau



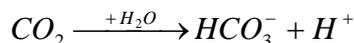
atau



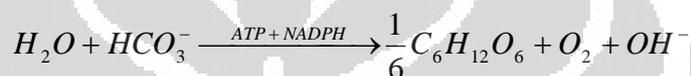
2.2.4 Fotosintesis pada *Chlorella sp.*

Pada mikroalga hijau *Chlorella sp.* yang termasuk organisme renik air, fotosintesis dilakukan di dalam air atau media hidupnya. CO_2 yang dibutuhkan sebagai sumber karbonnya didapatkan dalam bentuk senyawa

bikarbonat yang terbentuk dari reaksi air dengan CO₂ terlarut dalam media hidupnya (pada ekstra selular) sebagai berikut (Wijanarko dan Ohtaguchi, 2004):



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



Hasil fotosintesis mikroalga hijau *Chlorella sp.* adalah ion OH⁻, oksigen molekular, dan senyawa organik (karbon) yang akan digunakan sebagai cadangan makanan (*carbon source*) apabila tidak mendapatkan cahaya dan CO₂ untuk pertumbuhan dan pembelahan selnya.

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

2.2.5 Faktor Penentu Laju Fotosintesis

Berikut adalah beberapa faktor utama yang menentukan laju fotosintesis (<http://id.wikipedia.org>):

1. *Intensitas cahaya*

Laju fotosintesis maksimum ketika banyak cahaya.

2. *Konsentrasi karbon dioksida*

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

3. *Suhu*

Enzim-enzim yang bekerja dalam proses fotosintesis hanya dapat bekerja pada suhu optimalnya. Umumnya laju fotosintesis meningkat seiring dengan meningkatnya suhu hingga batas toleransi enzim.

4. *Kadar air*

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

5. *Kadar fotosintat (hasil fotosintesis)*

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

6. *Tahap pertumbuhan*

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

2.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroalga Hijau *Chlorella sp.* pada Medium Terbatas

Organisme autotrofik seperti *Chlorella sp.* membutuhkan cahaya, CO₂, H₂O, nutrisi, dan *trace element* untuk pertumbuhannya (www.nhm.ac.uk). Berikut akan diuraikan beberapa faktor lain yang berhubungan dengan hal-hal tersebut yang sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan mikroalga hijau *Chlorella sp.* pada medium terbatas (Wirosaputro, 2002).

2.3.1 Jenis Medium

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

Medium yang diperlukan untuk perkembangan *Chlorella sp.* relatif lebih sederhana dan memerlukan jenis nutrisi yang lebih sedikit dibandingkan dengan medium untuk jenis alga lainnya. Ada beberapa medium yang lazim digunakan untuk membiakkan *Chlorella sp.*, yaitu *Benneck*, *Detmer*, Pupuk Komersial, dan *Walne*. Komposisi nutrisi dari masing-masing medium tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Perbandingan Komposisi Nutrisi Medium Pembiakan *Chlorella sp.*

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

2.3.2 Pencahayaan

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

cahaya jika dibandingkan dengan cahaya yang bersumber dari cahaya matahari.

2.3.3 Kondisi Operasi

Kondisi operasi yang harus diperhatikan dalam kultivasi *Chlorella sp.* adalah konsentrasi CO₂, laju alir CO₂ dan udara, derajat keasaman, dan temperatur.

2.3.3.1 Konsentrasi CO₂

Dalam proses fotosintesis, CO₂ merupakan unsur paling penting. Tersedianya CO₂ yang cukup dalam medium akan memperlancar proses fotosintesis yang akan berimbas pada pertumbuhan *Chlorella vulgaris* itu sendiri. Konsentrasi CO₂ yang optimal untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris* adalah sekitar 3-5% (Wirosaputro, 2002).

2.3.3.2 Laju Alir CO₂ dan Udara

Laju alir udara perlu dipertimbangkan jika jenis reaktor yang digunakan adalah reaktor kolom gelembung. Sedangkan laju CO₂ diatur sesuai dengan model reaktor yang digunakan, luas permukaan kontak dan volume kultur. Hal ini ditujukan untuk pemerataan suplai CO₂ yang dibutuhkan oleh *Chlorella vulgaris* pada medium terbatas (www.nhm.ac.uk).

2.3.3.3 Derajat Keasaman (pH)

Derajat keasaman (pH) akan mempengaruhi kinerja suatu enzim. Menurut Round (1973), pH media yang berkisar antara 7.0-8.0 cukup baik digunakan dalam kultur alga di laboratorium. *Chlorella sp.* sendiri tahan terhadap lingkungan yang asam dengan pH mencapai 2.

2.3.3.4 Temperatur

Semakin tinggi suhu maka laju reaksi akan semakin besar. Berdasarkan prinsip tersebut sel akan tumbuh lebih cepat pada temperatur yang lebih tinggi. Namun temperatur yang terlalu tinggi akan menyebabkan denaturasi protein dan asam nukleat, kehilangan

enzim yang penting dan metabolisme sel. Temperatur optimum bagi perkembangan *Chlorella sp.* adalah 23°C – 30°C (Wirosaputro, 2002).

2.3.4 Kontaminan

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

2.4 Fotobioreaktor

Fotobioreaktor, sebagai tempat hidup, sangat diperlukan dalam memaksimalkan produktivitas produk yang berasal dari mikroorganisme fotoprotik (Pulz, O., 2001). Fotobioreaktor terbagi menjadi dua sistem, yaitu sistem terbuka (*open system*) dan sistem tertutup (*closed system*). Fotobioreaktor sistem terbuka dapat berupa air alami, seperti danau, dan dapat pula berupa kolam buatan. Sedangkan fotobioreaktor sistem tertutup umumnya terdiri dari fotobioreaktor tubular dengan *tube* dalam berbagai bentuk, ukuran, dan panjang yang disesuaikan dengan material yang digunakan (Pulz, 2001).

Pemilihan desain dari sebuah fotobioreaktor akan sangat mudah mempengaruhi produksi dan efisiensi keseluruhan untuk memproduksi mikroorganisme yang berbasis produk. Secara nyata diketahui bahwa fotobioreaktor yang digunakan dalam kultivasi mikroorganisme skala industri adalah fotobioreaktor sistem tertutup, seperti tubular fotobioreaktor (*biocoil*, *biofence*, *ultrathin sheet*) (Gunther, 2001). Hal ini dikarenakan produk yang dihasilkan oleh fotobioreaktor sistem tertutup bermutu tinggi, variabel-variabel yang mempengaruhi dalam perkembangan mikroorganisme dapat dikontrol seperti intensitas cahaya dan temperatur, serta lebih menghemat penggunaan ruang.

Ada beberapa jenis fotobioreaktor yang sering digunakan dalam kultivasi mikroorganisme berdasarkan bentuk, *flow regime*, efisiensi energi cahaya, dan luas permukaan kontak, yaitu:

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



Gambar 2. 5 Fotobioreaktor Terbuka untuk Pembiakan *Chlorella sp.*

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

2.4.1 Karakteristik Fotobioreaktor

Umumnya, kondisi kehidupan normal alamiah mikroalga yang menjadi salah satu subjek penelitian bioteknologi adalah sebagai berikut : jarak rata-rata antara sel (*cell displacement*) vertikal atau horizontal berkisar $5 \cdot 10^{-3}$ sampai $3 \cdot 10^{-5}$ m/s. Densitas maksimum sel $1,000 \text{ sel/cm}^3$, *photon flux density (PFD)* biasanya bagus dalam *light limited area*, suplai cahaya efektif pada saat pagi sampai sore, kondisi CO_2 dan nutrisi biasanya jauh dari optimal, stabilitas nilai pH, konsentrasi ion, dan temperatur pada rentang yang cukup panjang.

Pada kenyataannya, untuk sistem kultivasi dalam fotobioreaktor, harus diberikan pada kondisi yang sangat berbeda, dimana densitas sel dapat mencapai 10^8 sel/cm^3 , jarak rata-rata sel tereduksi sampai $60 \mu\text{m}$ atau 10 kali diameter sel, *cell displacement* dari 0.3 sampai 1 m/s, *turbulence-conditioned PFD* bervariasi antara frekuensi 0.1-1.000 s dapat menggantikan waktu pagi sampai sore maupun malam harinya, asupan nutrisi dan CO_2

yang biasanya optimum, nilai pH dan temperatur yang optimum untuk spesifik sel mikroalga tertentu (Pulz, 2001).

Berikut akan dijelaskan beberapa karakteristik dari fotobioreaktor:

2.4.1.1 Energi Cahaya

Cahaya sebagai sumber energi untuk kehidupan fotoautotropik merupakan faktor pembatas yang mendasar dalam *photobiotechnology*. Pada pencahayaan yang intens, laju fotosintesis akan berbanding lurus proporsional dengan intensitas cahaya, sampai intensitas iluminasi yang tinggi dapat merusak sistem reseptor fotosintetik dalam beberapa menit, yang dinamakan *photoinhibition*. Pada kebanyakan mikroalga, fotosintesis akan terjenuhkan pada radiasi sekitar 1,700-2,000 $\mu\text{E}/\text{m}^2$ dan mengalami *photoinhibition* pada 130 $\mu\text{E}/\text{m}^2$ (Pulz, 2001).

Pada jenis fotobioreaktor tubular atau *plate-type*, dengan *surface-to-volume ratio* 20-80 m^2/m^3 dan besarnya pencahayaan mencapai 1.15 $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$, dengan *layer thickness* sampai 5 mm, produktivitas dapat mencapai 2-5 g.DW/day. Meskipun minat pada bioteknologi semakin berkembang belakangan ini, tetapi masih sedikit referensi literatur mengenai *short-term process* dari *photoadaption*, yaitu mengenai *light inhibition* atau *saturation effect* dalam fotobioreaktor sistem tertutup. *Photoadaption* memerlukan waktu sekitar 10-40 menit dimana dapat dijelaskan ketidaksesuaian antara produktivitas kultur alga pada *open-air* dan pencahayaan optimum mereka.

2.4.1.2 Keseimbangan CO₂/O₂

Untuk laju fotosintesis yang tinggi, keseimbangan CO₂/O₂ harus disesuaikan, dimana enzim utama *carboxylating*, Rubisco, menggunakan CO₂ untuk siklus Calvin dan tidak menggunakan untuk O₂ fotorespirasi. Oksigen dapat menjadi permasalahan dalam

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

Konsentrasi CO₂ biasanya harus dijaga dalam rentang yang sempit. Kandungan CO₂ udara 0.03% menjadi suboptimal bagi pertumbuhan, dan pada umumnya tumbuh-tumbuhan dapat mentoleransi konsentrasi CO₂ hanya sampai 0.1%. Tetapi untuk kebanyakan strain dari mikroalga, telah diteliti bahwa mikroorganisme ini dapat mentoleransi kandungan CO₂ udara sampai 12% pada temperatur 35°C. Sampai saat ini, tekanan parsial O₂ (pO₂) dalam suspensi mikroalga baik dalam *open* atau *closed photobioreactor*, dapat direduksi hanya dengan menambah turbulensi dan *stripping* O₂ dengan udara. Kedua pendekatan ini masih menjadi '*unsolved dilemma*' dalam sistem fotobioreaktor (Pulz, 2001).

2.4.1.3 Temperatur

Temperatur dapat mempengaruhi respirasi dan fotorespirasi secara lebih kuat dibanding dengan fotosintesis. Ketika CO₂ atau cahaya menjadi terbatas untuk proses fotosintesis, pengaruh temperatur menjadi tidak signifikan. Dengan penambahan temperatur, respirasi akan meningkat secara signifikan. Jadi, net efisiensi fotosintesis akan menurun dengan kenaikan pada temperatur tinggi. Efek ini dapat memperburuk kultur suspensi pada kondisi penurunan CO₂ dan kelarutan O₂ pada kenaikan temperatur (Pulz, 2001).

2.4.1.4 Nutrien dan Nilai pH

Asupan nutrien yang cukup untuk mikroalga adalah pre-kondisi untuk fotosintesis yang optimal. Defisiensi nutrien akan menyebabkan gangguan pada metabolisme dan ketidaksesuaian produksi pada *intermediate* proses fotosintesis. Deviasi dari nilai pH optimum akan mempengaruhi psikologis reaksi dan produktivitas

sehingga kondisi yang terkontrol dengan mudah harus dijaga pada rasio optimum dalam fotobioreaktor (Pulz, 2001).

2.4.2 Fotobioreaktor Kolom Gelembung

Sistem fotobioreaktor terdiri dari beberapa bagian, yaitu reaktor vessel, sistem sirkulasi gas, sistem titrasi gas, lemari yang berisi sumber cahaya, dan sistem pengendalian reaktor. Untuk kultivasi mikroalga sendiri dapat dilakukan dengan sistem *batch* atau kontinu. Tetapi dalam beberapa penelitian, sistem kultivasi yang digunakan adalah *semi-batch* di mana gas CO₂ secara kontinu dialirkan ke dalam reaktor sedangkan mikroalga ditempatkan secara *batch* (<http://inhavision.inha.ac.kr/~leecg/Lumostat.pdf>).

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



Gambar 2. 6 Fotobioreaktor Kolom Gelembung

Intensitas penerangan dalam fotobioreaktor kolom gelembung sistem *batch* harus dipertahankan pada tingkat yang diinginkan. Hal ini dikarenakan semakin bertambahnya waktu, maka jumlah mikroorganisme dalam fotobioreaktor tersebut akan semakin banyak karena terjadi proses pembelahan sel. Semakin banyak jumlah mikroorganisme, maka

kemungkinan bagi mikroorganisme yang berada di bagian tengah dan belakang untuk memperoleh cahaya semakin minim karena tertutup oleh mikroorganisme yang berada di depannya. Distribusi yang tidak seimbang ini menyebabkan laju pertumbuhan mikroorganisme terganggu. Peristiwa ini dikenal dengan *self-shading of light* (Gunther, 2000).

Dalam reaksi fotosintesis dihasilkan gas O₂ yang dapat menyebabkan kenaikan tekanan dan merusak fotobioreaktor. Dengan menggunakan sistem titrasi katalitik menggunakan gas H₂ atau menggunakan sistem aerasi dengan aerator, konsentrasi O₂ dalam fotobioreaktor dapat dihilangkan.

2.5 Pengaruh Metode Pencahayaan terhadap Pertumbuhan Chlorella

Seperti telah dijelaskan sebelumnya pada Subbab 2.3.2, sebagai mikroalga hijau, *Chlorella* memperoleh energi untuk pertumbuhannya dengan melakukan fotosintesis, yaitu dengan mengubah energi cahaya menjadi senyawa karbon. Pertumbuhan *Chlorella* akan berlangsung baik jika proses fotosintesis berjalan dengan optimal. Oleh karena itu, cahaya merupakan faktor penting bagi pertumbuhan *Chlorella* dan menjadi variabel sasaran optimalisasi dalam upaya meningkatkan produksi biomassa *Chlorella*.

Rangkaian penelitian yang dilakukan di Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia (DTK FTUI) membandingkan tiga metode pencahayaan, yaitu fotoperiodisasi (pencahayaan terang-gelap), pencahayaan kontinyu dengan intensitas konstan, dan pencahayaan kontinyu dengan alterasi intensitas.

2.5.1 Fotoperiodisasi (Pencahayaan Terang – Gelap)

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

Chlorella yang dikultivasi dengan metode ini menunjukkan peningkatan jumlah sel yang paling lambat dibandingkan dengan dua metode lain. Hal ini karena pada metode pencahayaan fotoperiodisasi terdapat periode gelap dimana *Chlorella* tidak melakukan fotosintesis sehingga kebutuhan energi diperoleh dari cadangan karbohidrat sel. Jika cadangan karbohidrat habis, maka pertumbuhan dan perkembangbiakan akan berhenti sehingga jumlah sel tetap dan lama-lama berkurang.

2.5.2 Pencahayaan Kontinyu Intensitas Konstan

Pada pencahayaan kontinyu, pemberian cahaya dilakukan secara terus-menerus sehingga *Chlorella* dapat selalu melakukan fotosintesis dan jumlah sel akan terus meningkat hingga mencapai fase pertumbuhan stasioner. Fase stasioner ini dapat disebabkan oleh terjadinya *self shading*, yaitu penutupan satu sel oleh sel lain sehingga cahaya yang diperoleh oleh setiap sel tidak merata. Dalam usaha meningkatkan produksi biomassa *Chlorella*, dicari cara untuk mengatasi masalah *self shading* tersebut, yaitu dengan menggunakan metode pencahayaan alterasi.

Menurut penelitian yang telah dilakukan, perlakuan ini memberikan hasil laju pertumbuhan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pencahayaan gelap-terang (fotoperiodesitas).

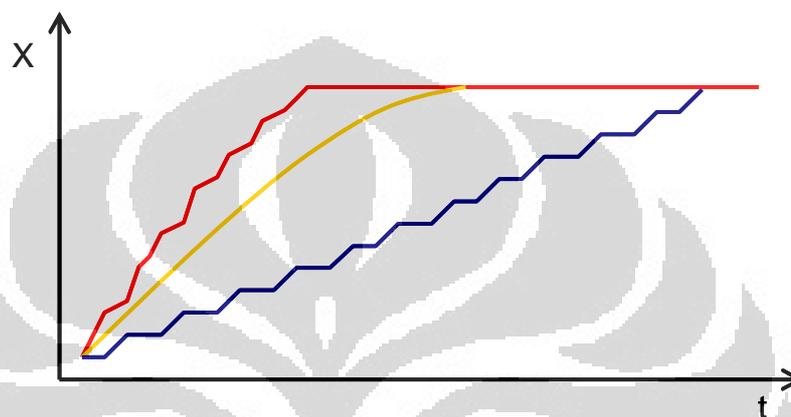
2.5.3 Pencahayaan Alterasi

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

biomassa dengan jumlah yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu (Wijanarko, 2003).

2.5.4 Perbandingan Ketiga Metode Pencahayaan

Perbandingan ketiga metode pencahayaan dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut ini.



Keterangan:

- terang gelap
- intensitas konstan
- alterasi

Gambar 2.7 Perbandingan Pengaruh Metode Pencahayaan terhadap Pertumbuhan *Chlorella sp.*

Dari grafik tersebut, dapat dilihat bahwa untuk mencapai jumlah sel yang sama, metode pencahayaan alterasi membutuhkan waktu yang lebih singkat dibandingkan dengan dua metode lain. Oleh karena itu, metode alterasi adalah metode pencahayaan yang sesuai untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella*. Hal ini telah dibuktikan pada penelitian-penelitian sebelumnya. Rangkuman hasil penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Perbandingan Peningkatan Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg Skala Lab (volume reaktor = 0.6 dm³)

Metode Pencahaya-an Konfigurasi Reaktor	Terang Gelap	Kontinyu	
		Intensitas Konstan	Alterasi
Tunggal	4.02 (Valentino, 2006)	13.85 (S. M. K. Andika, 2005)	22.22 (S. M. K. Andika, 2005)
Seri	5.02 (Muryanto, 2006)	9.96 (A. Y. Sendjaja, 2006)	25.1 (A. Y. Sendjaja, 2006)

Keterangan:

- peningkatan biomassa = biomassa akhir / biomassa awal
- Untuk pencahayaan intensitas konstan pada reaktor seri, waktu kultivasi sama dengan waktu kultivasi pada pencahayaan alterasi dalam reaktor seri. Hal ini menyebabkan jumlah biomassa akhir yang diperoleh belum maksimal karena *Chlorella* belum mencapai fase pertumbuhan stasioner.

Tabel di atas menunjukkan peningkatan biomassa yang dinyatakan dengan jumlah biomassa akhir / jumlah biomassa pada awal masa kultivasi. Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa metode pencahayaan alterasi menghasilkan peningkatan produksi biomassa yang paling besar. Hal ini sesuai dengan Gambar 2.7.

BAB 3 METODE PENELITIAN

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

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

Studi literatur bertujuan mempelajari teori-teori mengenai penelitian yang akan dilakukan. Semua literatur yang berkaitan dikumpulkan dan dipelajari. Kemudian dilakukan tahap persiapan yang terdiri dari persiapan alat dan persiapan medium. Pada tahap persiapan alat, semua alat yang akan digunakan disterilisasi terlebih dahulu. Kemudian dilakukan pembuatan rangkaian peralatan. Persiapan medium merupakan tahap pembuatan medium Benneck yang berfungsi sebagai tempat hidup dan sumber nutrisi bagi *Chlorella sp.* yang dikultivasi.

Selanjutnya adalah tahap pembiakan kultur murni *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam medium Benneck. Kultur murni yang didapat harus dibiakkan lagi sebelum dapat digunakan dalam penelitian. Tujuannya adalah selain untuk memperbanyak persediaan yang ada, juga untuk membuat *Chlorella vulgaris* Buitenzorg tersebut beradaptasi dalam medium baru sebelum digunakan (melewati fasa lag).

Sebelum melakukan tahap *running* fotobioreaktor, kerapatan biomassa inokulum perlu diketahui. Hal ini agar perubahan jumlah inokulum dari waktu ke waktu dapat dilihat sehingga besar intensitas cahaya yang dibutuhkan dapat ditentukan. Setelah jumlah inokulum awal ditentukan, dilakukan *running* fotobioreaktor. Selama proses *running* tersebut, data diambil setiap selang waktu tertentu, misalnya setiap 4 jam, sampai pertumbuhan *Chlorella sp.* mencapai fase stasioner atau awal fase kematian.

Pengolahan data dilakukan setelah semua data yang dibutuhkan diperoleh. Hasil yang didapat kemudian dibandingkan dengan hasil-hasil penelitian sebelumnya. Perbandingan dilakukan sebanyak dua kali, yaitu:

1. Hasil penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian yang menggunakan pencahayaan alterasi pada fotobioreaktor tunggal dengan volume total yang sama. Hal ini untuk mengetahui pengaruh konfigurasi reaktor terhadap peningkatan produksi biomassa *Chlorella sp.*
2. Hasil penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian yang menggunakan pencahayaan alterasi pada fotobioreaktor susun seri skala lab dengan volume masing-masing reaktor sebesar 0.2 dm^2 . Hal ini untuk mengetahui pengaruh pembesaran volume terhadap produksi biomassa *Chlorella sp.*

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

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

3.2.1 Alat Penelitian

Pada penelitian ini akan digunakan peralatan-peralatan sebagai berikut:

1. Tiga buah fotobioreaktor dengan volume total 18 L dengan bahan dasar kaca transparan yang dilengkapi dengan aliran input dan output gas dan udara yang mengandung CO₂.
2. Kompresor udara .
3. Tabung CO₂ yang dilengkapi dengan *regulator*.
4. Flowmeter udara dan flowmeter CO₂.
5. Lampu Philips Halogen 23W/50-60Hz (sebagai sumber pencahayaan).
6. *Y-junction* yang terbuat dari bahan gelas (sebagai titik indikator konsentrasi CO₂ input fotobioreaktor).
7. Peralatan *glassware* yang terdiri dari erlenmeyer 100 cm³ (sebagai *discharge* gas CO₂ dan udara output fotobioreaktor), pipet ukur 5 cm³, gelas ukur 10 cm³, dan *beaker glass* 50 cm³ dan 100 cm³.
8. Selang silikon dan selang plastik (sebagai rangkaian peralatan dan konektor rangkaian).
9. *Unit Gas Chromatography TCD Shimadzu GC-8A* (untuk mengukur konsentrasi gas CO₂ input dan output fotobioreaktor), Recorder C-R6A Chromatograph (untuk mendapatkan printout dari hasil GC), serta tabung gas (carrier gas) Argon.
10. *Syringe 1001 RT Hamilton* 1 cm³ (*inlet-outlet*) (untuk mengambil sampel dari input dan output CO₂).
11. *Set Lightmeter Lxtron LX-103* (sebagai penghitung kekuatan intensitas cahaya, dengan satuan *Lx* ataupun *Foot-Candle*).
12. *pH meter HANNA Model HI 8014* dengan larutan buffer 4 dan 7.

13. Lemari kerja *ultraviolet*.
14. Panci aluminium (untuk sterilisasi alat).
15. *Spectro UV-VIS RS Spectrometre, LaboMed. Inc* (untuk menghitung OD/absorbansi pada 680 nm).

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. *Starter* mikroalga hijau *Chlorella vulgaris* dengan usia ± 60 jam yang telah dihitung sel awalnya (inokulum) dengan menggunakan spektrofotometer pada 680 nm.
2. KH_2PO_4 , MgSO_4 , NaNO_3 , FeCl_3 untuk membuat medium Benneck.
3. Gas CO_2 sebagai bahan untuk fotosintesis mikroalga.
4. Air hasil *reverse osmosis* untuk membuat medium *Benneck* dan mencuci peralatan.
5. Alkohol 70% untuk sterilisasi peralatan dan mencegah kontaminasi.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel ini merupakan variabel yang diset pada suatu harga tertentu. Variabel bebas pada penelitian ini adalah waktu pengambilan data (t), jumlah sel awal (N_0), dan konsentrasi gas CO_2 masukan reaktor pertama ($y \text{ CO}_2$).

3.3.2 Variabel Terikat

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

3.3.3 Variabel Semibebas

Variabel ini merupakan variabel yang diset pada harga tertentu tetapi besarnya ditentukan oleh suatu variabel terikat tertentu. Variabel semibebas pada penelitian ini adalah besarnya intensitas cahaya (I_0) yang ditentukan sesuai dengan konsentrasi sel di dalam reaktor (N) yang merupakan variabel terikat.

3.4 Prosedur Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap seperti dapat dilihat pada Gambar

3.1. Setiap tahap akan dijabarkan lebih lanjut pada bagian ini.

3.4.1 Persiapan Peralatan dan Medium

Tahap ini terdiri dari 2 bagian yaitu perangkaian semua instrumen dalam lemari fotobioreaktor dan pembuatan medium *Benneck*.

3.4.1.1 Sterilisasi Peralatan

Seluruh peralatan yang akan bersentuhan langsung dengan *Chlorella* pada penelitian ini harus disterilisasi sebelum digunakan. Hal ini untuk menghindari kontaminasi oleh bakteri pengganggu yang dapat mengganggu pertumbuhan *Chlorella*. Langkah-langkah sterilisasi alat adalah sebagai berikut:

1. Pencucian Alat

Peralatan yang digunakan dicuci dengan sabun lalu dibilas dengan air sampai tidak terdapat sisa sabun pada peralatan.

2. Pengeringan

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

3. Sterilisasi

Peralatan dari kaca/logam disterilisasi menggunakan oven dengan suhu 120°C selama ± 1 jam sedangkan peralatan dari plastik atau berdimensi besar cukup direndam dalam alkohol 70% selama ± 5 menit dan direndam lagi sebelum dipakai.

4. Penyimpanan

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

Hal yang perlu diperhatikan adalah lingkungan pada lemari kerja dan *transfer box* harus bersih dan steril. Caranya adalah dengan dilap terlebih dahulu, lalu disemprot dengan alkohol 70% dan diratakan dengan lap/tisu kering dan bersih. Lemari penyimpanan alat dan *transfer box* harus menggunakan lampu UV untuk mencegah pertumbuhan kuman. Lampu UV tersebut dimatikan saat lemari penyimpanan dan *transfer box* digunakan untuk kerja. Selain itu, tangan praktikan juga harus selalu bersih, dicuci terlebih dahulu dan disemprot alkohol 70% sebelum mulai bekerja atau mengambil data.

3.4.1.2 Pembuatan Rangkaian Peralatan

Peralatan penelitian dirangkai dalam suatu lemari kaca untuk melindungi reaktor dari kontaminan. Reaktor yang digunakan sebanyak tiga buah dan masing-masing berukuran 6 L. Tiap reaktor yang digunakan dihitung nilai α_{kaca} -nya sebagai fungsi dari intensitas. Nilai α_{kaca} ini digunakan untuk mengetahui hambatan cahaya dari setiap reaktor sehingga jumlah cahaya yang digunakan mikroalga untuk pertumbuhannya dapat diketahui dengan tepat untuk kemudian digunakan dalam perhitungan

Ketiga reaktor tersebut diletakkan dalam posisi sejajar dan menghadap ke lampu halogen sebagai sumber iluminasi. Kemudian masing-masing reaktor dihubungkan dengan menggunakan selang

silikon dan selang plastik. Setiap sambungan selang dilapisi selotip untuk memastikan tidak ada sambungan yang bocor.

Selanjutnya, aliran dari tabung gas CO₂ dan aliran udara dari kompresor dilewatkan ke dalam *flowmeter* sebelum digabungkan menjadi satu aliran. Aliran ini kemudian diumpankan ke dalam reaktor pertama. Kemudian udara dan gas CO₂ dari reaktor pertama dialirkan ke reaktor berikutnya melalui selang penghubung. Aliran keluaran reaktor terakhir dimasukkan ke dalam sebuah erlenmeyer *discharge* CO₂ yang berisi air.

Kalibrasi flowmeter juga dilakukan agar dapat diketahui dengan tepat skala dari masing-masing flowmeter. Hal ini penting karena CO₂ sebagai sumber karbon (*carbon source*) yang akan dialirkan harus selalu dijaga konstan pada konsentrasi 5% dari laju aliran total. Selain itu, sebagai sumber iluminasi digunakan lampu halogen dengan intensitas cahaya sampai 110 Klx.

3.4.1.3 Pembuatan Medium Benneck

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

Tabel 3. 1 Bahan Medium Benneck

Bahan	(mg/dm ³ aquadest)
KH ₂ PO ₄	100
MgSO ₄ .7H ₂ O	200
NaNO ₃	500
FeCl ₃	3 – 5

Pertimbangan penggunaan Benneck sebagai medium antara lain karena kandungan nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg terdapat pada medium ini. Selain itu, medium ini mudah dibuat. Penggunaan medium ini juga mengacu

pada penelitian-penelitian sebelumnya bahwa medium ini cukup baik untuk digunakan sebagai media hidup *Chlorella vulgaris* Buitenzorg.

Cara membuat 1 dm³ medium:

1. Melarutkan KH₂PO₄ 100 mg, MgSO₄ 200 mg, NaNO₃ 500 mg, FeCl₃ 3 – 5 mg dalam 1 dm³ aquadest.
2. Larutan tersebut kemudian disterilisasi dengan dikukus di dalam panci bertekanan selama 1 jam dengan api sedang.
3. Jika terdapat endapan, maka endapan tersebut harus dipisahkan terlebih dahulu dari larutan.
4. Setelah dingin, larutan tersebut dapat langsung digunakan sebagai medium pertumbuhan *Chlorella vulgaris*. Jika tidak langsung digunakan, medium harus disimpan dalam botol yang tertutup rapat agar tetap steril.

3.4.2 Pemiakan Kultur *Chlorella vulgaris* Dalam Medium Benneck.

Cara pembiakan medium kultur murni:

1. Medium serta peralatan pembiakan (wadah, selang udara, tutup wadah) disiapkan dan disterilkan.
2. Stock murni *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dimasukkan ke dalam wadah steril dan dicampur dengan medium Benneck yang telah steril. Perbandingan antara jumlah stock *Chlorella* dengan medium dapat diatur sesuai kebutuhan penelitian. Selama proses pemindahan, lingkungan harus dijaga steril yaitu dilakukan dalam *transfer box* yang telah disterilkan dengan alkohol 70% dan menggunakan api bunsen.
3. Medium kultur tersebut di-*bubbling* dengan menggunakan kompresor udara dan CO₂ sebesar 1 v/vm. Pada tahap ini juga harus diberikan cahaya namun dengan intensitas yang kecil ± 1,000 lx.
4. Kultivasi dapat dilakukan selama 2 – 3 hari untuk melewati *lag time* dari pertumbuhan *Chlorella vulgaris* atau selama satu minggu dengan intensitas yang lebih besar untuk memperbanyak stok yang ada.

3.4.4 Penentuan Kerapatan Biomassa Inokulum *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Langkah-langkah perhitungan:

1. Melakukan homogenisasi yaitu dengan mengaduk medium kultur sampai semua endapan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang ada merata di dalamnya.
2. Mengambil sampel dan memasukkannya ke dalam kuvet kaca.
3. Mengukur absorbansinya dengan menggunakan spektrofotometer.
4. Menentukan jumlah selnya dengan melihat hubungan antara OD₆₈₀ vs jumlah sel pada kurva kalibrasi.

3.4.5 *Running* Fotobioreaktor

Inokulum yang telah disiapkan pada tahap-tahap sebelumnya akan dikembangbiakkan dalam fotobioreaktor susun seri. Persiapan akhir untuk melaksanakan *running* fotobioreaktor adalah sebagai berikut:

1. Menghitung jumlah inokulum yang akan digunakan sebagai *starter*.
2. Mengencerkan inokulum dengan menambahkan medium sesuai dengan tingkat pengenceran yang diinginkan.
3. Memindahkan inokulum sebanyak 6 L ke dalam masing-masing reaktor yang telah disterilkan.
4. Reaktor diaerasi dengan udara dari kompresor yang dicampur dengan CO₂ murni sehingga diperoleh udara dengan kadar CO₂ sebesar 5%.

Selanjutnya, *running* fotobioreaktor dilakukan dengan memberikan perlakuan alterasi intensitas cahaya. Intensitas cahaya awal yang digunakan adalah intensitas cahaya optimum, yaitu besar intensitas cahaya yang menghasilkan laju pertumbuhan maksimum untuk jumlah inokulum awal yang digunakan. Intensitas cahaya akan ditingkatkan sesuai dengan peningkatan jumlah sel pada kultur. Sebagai pembanding, dilakukan pembiakkan dengan pencahayaan alterasi dalam fotobioreaktor kolom gelembung tunggal dengan volume 18 liter.

Kondisi operasi yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- Temperatur fotobioreaktor adalah temperatur lingkungan yaitu sebesar 29°C.
- Tekanan gas dan udara dalam fotobioreaktor adalah tekanan atmosferik yaitu 1 atm.
- Kecepatan superfisial optimum bagi pertumbuhan *Chlorella vulgaris*.
- Konsentrasi CO₂ dalam udara masukan reaktor sebesar 5%.

3.4.6 Pengambilan Data

Data yang diambil dalam penelitian ini adalah:

- Temperatur bioreaktor (°C)
- pH kultur media dalam fotobioreaktor
- Intensitas cahaya di balik reaktor / I_b (I_x)
- Kerapatan biomassa dalam kultur media dalam fotobioreaktor (g/L)

Prosedur pengambilan data yang dilakukan adalah:

1. Pengambilan data N sel dilakukan dengan mengambil sampel sebanyak ± 5 mL dan memasukkannya ke dalam kuvet kaca. Selanjutnya sampel ini diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 600 nm.
2. Pengambilan data intensitas cahaya yang diterima dan ditransmisikan oleh reaktor dilakukan dengan menggunakan *luxmeter*. Untuk mengukur intensitas yang diterima, *luxmeter* diletakkan di depan reaktor mengarah ke sumber iluminasi, sedangkan dalam mengukur besar intensitas yang ditransmisikan, *luxmeter* diletakkan tepat di belakang reaktor dengan menghadap ke arah sumber iluminasi.
3. Pengambilan data pH dilakukan dengan menggunakan pHmeter, di mana ujung dari membran pengukur pH dicelupkan ke dalam sampel yang diambil. Kemudian menunggu hingga nilai pH yang ditunjukkan pada *display* telah stabil.

4. Pengambilan data CO₂ dilakukan dengan menggunakan instrumen GC – TCD. Pertama sampel gas diambil dengan menggunakan *Syringe* sebanyak $\pm 5 \mu\text{L}$. Selanjutnya sampel disuntikkan ke dalam GC – TCD dengan menggunakan gas Argon (Ar) sebagai *carrier gas*. Temperatur *injector* diset sebesar 130°C, sedangkan temperatur keluaran adalah 100°C.

Pengambilan data ini diulang dalam interval waktu tertentu. Untuk pencahayaan alterasi data diambil setiap 4 jam sampai berat sel di dalam reaktor konstan.

3.4.7 Pengolahan Data Penelitian

Variabel penelitian yang diambil yaitu OD₆₀₀, pH, dan I_b akan diolah menggunakan beberapa metode perhitungan, antara lain:

3.4.7.1 Pengolahan Data OD₆₀₀

Nilai OD yang didapatkan dari hasil penelitian akan dikonversi menjadi nilai N sel dan X di mana N sel adalah jumlah sel *Chlorella vulgaris* yang terdapat di dalam satu satuan volume, sedangkan berat kering biomassa (X) adalah berat dari *Chlorella vulgaris* di luar medium hidupnya. Jumlahnya dapat dihitung secara langsung dengan menggunakan data absorbansi pada 600 nm dan mengkorelasikannya dengan menggunakan kurva kalibrasi OD₆₀₀ vs N sel dan OD₆₀₀ vs X yang telah dibuat pada penelitian sebelumnya. Dari pengolahan ini dapat dibuat kurva pertumbuhan X vs t.

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

$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (6) \quad \text{atau} \quad \mu = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (7)$$

(Schugerl dan Bellgardt, 2000)

dimana:

μ = laju pertumbuhan spesifik (h^{-1})

N = jumlah sel (sel/cm^3)

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

t = waktu (h)

3.4.7.2 Pengolahan Data pH

Nilai pH digunakan untuk menghitung besar konsentrasi $[\text{HCO}_3^-]$ dalam reaktor dengan menggunakan persamaan *Henderson-Hasellbach*, yaitu:

$$K_{\text{CO}_2} = \frac{[\text{HCO}_3^-] \cdot [\text{H}^+]}{[\text{CO}_2]} \quad (\text{Wijanarko, 2000}) \quad (8)$$

$$[\text{HCO}_3^-] = K_{\text{CO}_2} [\text{CO}_2] [\text{H}^+] \quad (9)$$

$$[\text{HCO}_3^-] = K_{\text{CO}_2} [\text{CO}_2] 10^{-\text{pH}} \quad (10)$$

Sedangkan untuk mencari nilai K_a dan $[\text{CO}_2]$ digunakan pendekatan hukum Henry.

$$P_{\text{CO}_2} = H_{\text{CO}_2} \cdot [\text{CO}_2] \quad (11)$$

$$P_{\text{CO}_2} = \frac{y_{\text{CO}_2} \cdot P_T}{P_T} \quad (12)$$

$$\ln \left(\frac{H_{\text{CO}_2}}{H_{\text{CO}_2,0}} \right) = A_H \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_H \cdot \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + C_H \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \quad (13)$$

(Wijanarko, 2000)

$$\ln \left(\frac{H_{\text{CO}_2}}{H_{\text{CO}_2,0}} \right) = A_K \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_K \cdot \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + C_K \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \quad (14)$$

(Wijanarko, 2000)

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

$$[\text{HCO}_3^-] = \left(\frac{K_{\text{CO}_2,0}}{H_{\text{CO}_2,0}} \right) \left(\frac{y_{\text{CO}_2} \cdot P_T}{10^{-\text{pH}}} \right) \left(\frac{\text{EXP} \left[A_k \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_k \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + C_k \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]}{\text{EXP} \left[A_h \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_h \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + C_h \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]} \right) \quad (15)$$

dengan:

P_T = tekanan operasi. (atm)

y_{CO_2} = konsentrasi gas CO_2 yang diumpangkan.

$K_{\text{CO}_2,0}$ = 4.38×10^{-7}

$H_{\text{CO}_2,0}$ = 2900 kPa.kg/mol

T = temperatur operasi (K)

T_0 = temperatur standar (K)

Konstanta-konstanta aktivitas gas CO_2 :

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

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

3.4.7.3 Pengolahan Data I

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

Nilai energi yang digunakan untuk produksi biomassa dari *Chlorella vulgaris* Buitenzorg ditentukan melalui persamaan berikut:

$$E_x = \frac{\int_0^t I_t dt}{\Delta X \cdot s} \quad (21)$$

di mana:

ΔX = berat biomassa yang dihasilkan selama masa kultivasi
(g/dm^3)

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

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

t = waktu (jam)

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



BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang pelaksanaan penelitian, hasil yang diperoleh, dan analisis hasil penelitian.

4.1 Pembahasan Umum

Pembahasan hasil penelitian ini akan ditekankan pada pengaruh susunan reaktor secara seri terhadap peningkatan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* yang dikultivasi dengan menggunakan metode pencahayaan alterasi. Sebagai pembanding adalah produksi biomassa *Chlorella vulgaris* yang dikultivasi pada reaktor tunggal dengan volume yang ekuivalen dan dikultivasi pada kondisi operasi yang sama. Selain itu, hasil penelitian ini akan dibandingkan dengan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* dalam reaktor seri pada skala lab. Hal ini untuk melihat pengaruh pembesaran volume terhadap biomassa yang dihasilkan.

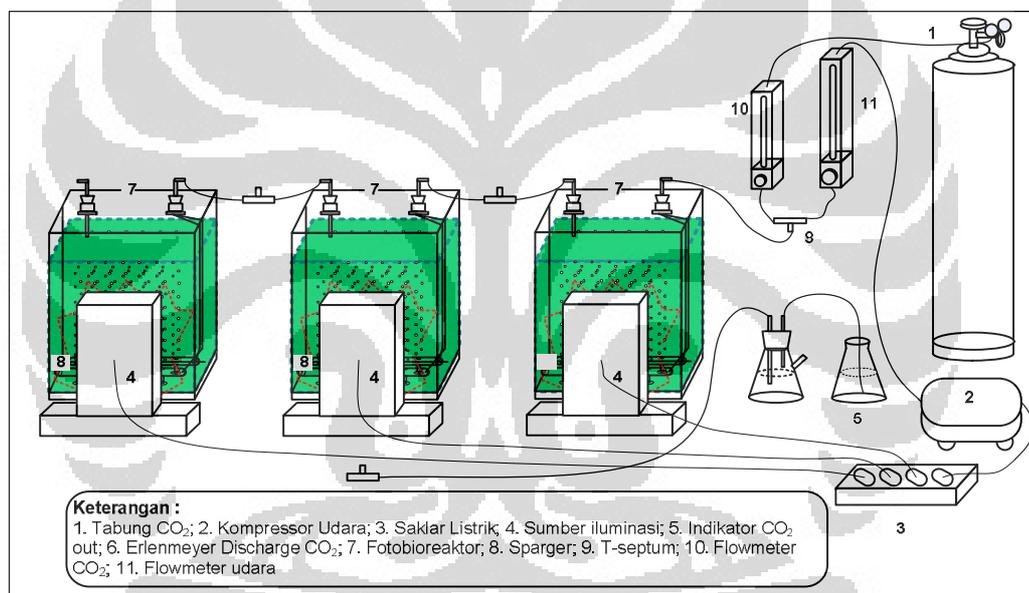
Penelitian ini menggunakan tiga buah fotobioreaktor kolom gelembung dengan volume masing-masing reaktor sebesar 6 liter. Dimensi reaktor yang digunakan adalah 38.5 cm x 10 cm x 25 cm. Reaktor didesain memiliki bentuk setipis mungkin untuk mengurangi terjadinya efek *selfshading*. Dengan bentuk yang tipis, cahaya akan lebih mudah mencapai bagian belakang reaktor saat kultur sudah semakin padat dengan sel *Chlorella sp.*

Sebagai langkah awal adalah penentuan laju alir volumetrik udara untuk reaktor dengan volume 6 liter. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kecepatan alir udara yang diperlukan agar diperoleh pertumbuhan *Chlorella vulgaris* yang optimum. Laju alir volumetrik yang digunakan adalah 5 L/menit.

Persiapan selanjutnya adalah pembiakan kultur *Chlorella vulgaris* dalam medium Benneck. pembiakan kultur *Chlorella vulgaris* dalam medium Benneck ini bertujuan memberikan waktu kepada sel-sel *Chlorella vulgaris* untuk beradaptasi dan mencapai fase pertumbuhan eksponensial. Tahap ini dilakukan dengan mengalirkan udara yang tidak dicampur dengan CO₂ ke dalam reaktor.

Penggunaan Benneck sebagai medium adalah karena medium ini mengandung senyawa makro yang diperlukan untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris*, yaitu NaNO_3 , KH_2PO_4 , dan MgSO_4 . Mg^{2+} diperlukan dalam mengontrol proses pembelahan sel, sedangkan PO_4^{3-} dan NO_3^- sangat penting dalam pembentukan nukleat dan protein selama pertumbuhan sel (Wirosaputro, 2002).

Setelah kultur *Chlorella vulgaris* yang dibiakkan siap untuk dikultivasi, pengambilan data dapat dimulai. Pertama, semua peralatan yang digunakan dirangkai seperti dapat dilihat pada Gambar 4.1. Sisi kanan, kiri, dan belakang reaktor ditutup oleh karton hitam sehingga *Chlorella vulgaris* yang dikultivasi hanya memperoleh cahaya dari sisi depan. Hal ini dilakukan untuk mempermudah perhitungan penggunaan energi cahaya bagi pertumbuhan sel.



Gambar 4. 1 Susunan Rangkaian Peralatan

Langkah selanjutnya adalah pembuatan inokulum awal dengan jumlah sel sebanyak $1,000,000 \text{ sel/dm}^3$. Berdasarkan kurva kalibrasi OD_{600} versus N_{sel} , inokulum awal ini harus memiliki absorbansi sekitar 0.2 jika diukur pada panjang gelombang 600 nm. Pembuatan inokulum awal ini dilakukan dengan mengencerkan kultur *Chlorella vulgaris* yang telah dibiakkan sebelumnya hingga memiliki absorbansi bernilai 0.2 dengan volume 6 L untuk setiap reaktor.

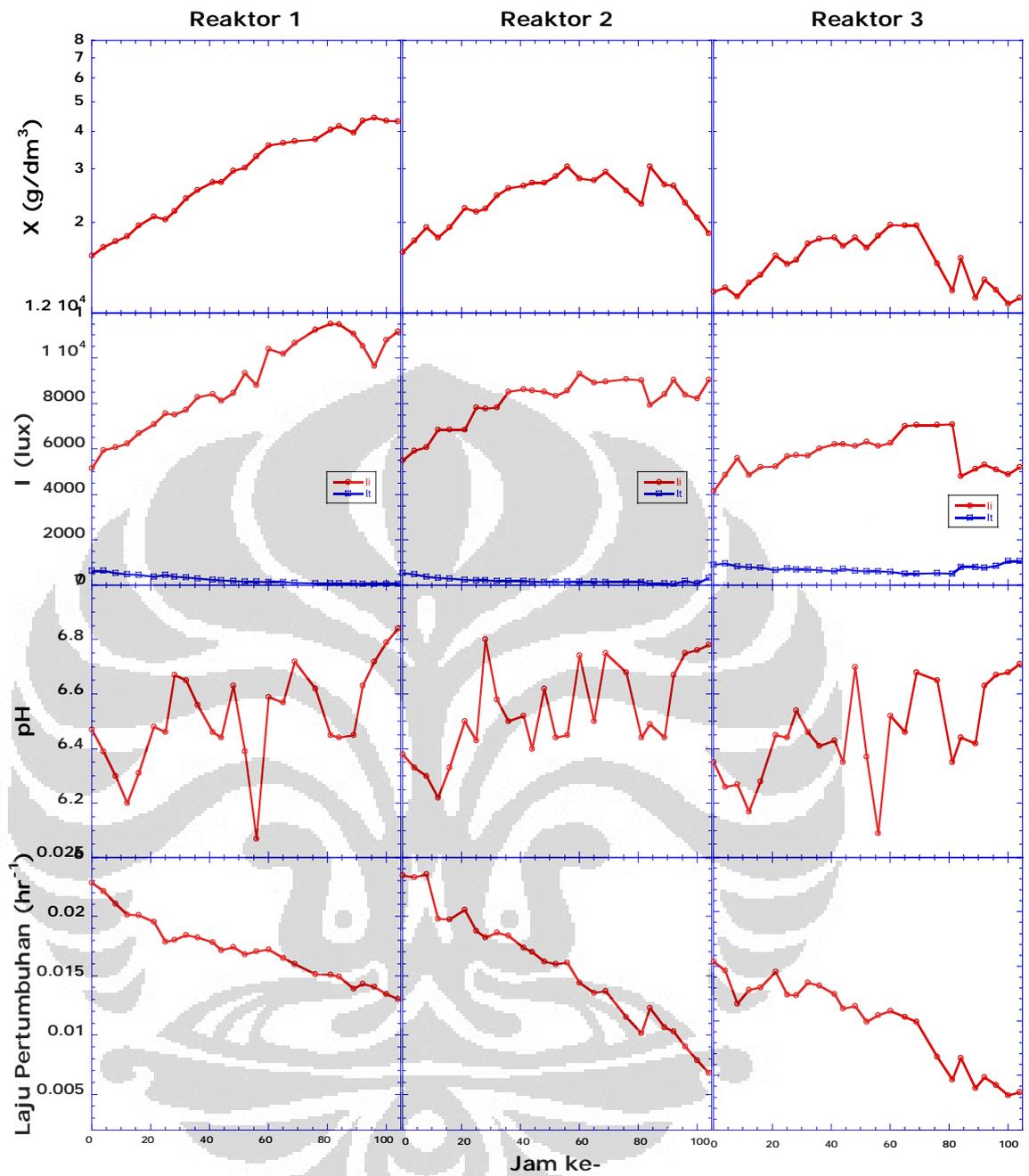
Hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan reaktor seri untuk kultivasi *Chlorella vulgaris* adalah aliran udara antar reaktor. Reaktor harus dipastikan tertutup rapat agar udara keluaran reaktor pertama dapat seluruhnya mengalir ke

reaktor kedua dan udara keluaran reaktor kedua dapat seluruhnya mengalir ke reaktor ketiga. Jika sedikit saja terjadi kebocoran, maka udara yang mengalir ke reaktor berikutnya tidak cukup kuat untuk melakukan pengadukan. Hal ini dapat menghambat pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada reaktor tersebut karena distribusi udara menjadi tidak merata. Masalah ini diatasi dengan menggunakan lem silikon untuk merekatkan tutup reaktor.

Metode pencahayaan yang digunakan pada penelitian ini adalah pencahayaan alterasi. Intensitas cahaya yang diberikan terus ditingkatkan berdasarkan jumlah biomassa yang terdapat di dalamnya. Pertumbuhan di setiap reaktor berbeda sehingga intensitas cahaya yang diberikan untuk setiap reaktor pun berbeda.

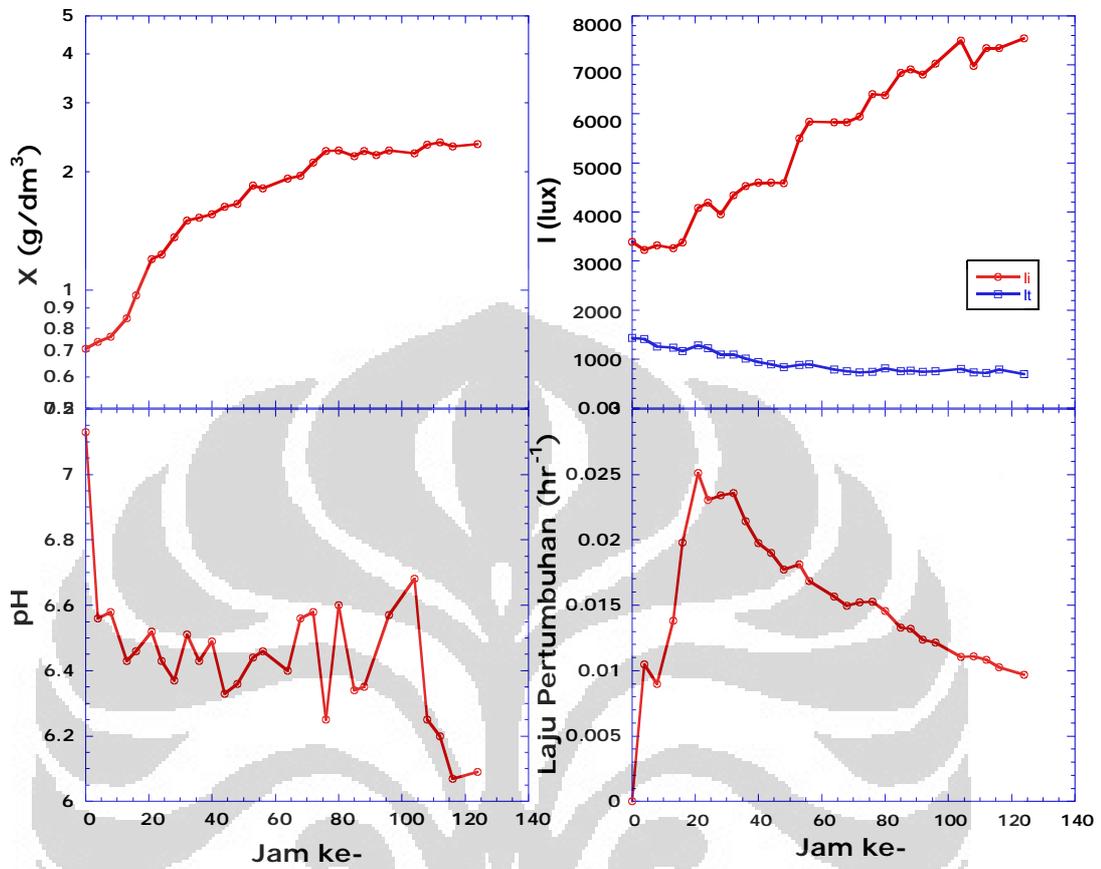
4.2 Data Penelitian

Data yang diperoleh dari penelitian ini disajikan dalam bentuk angka dan grafik. Data dalam bentuk angka disajikan dalam Lampiran pada bagian akhir skripsi ini. Grafik data yang diperoleh dari kultivasi *Chlorella vulgaris* dalam fotobioreaktor susun seri dengan pencahayaan alterasi dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut ini.



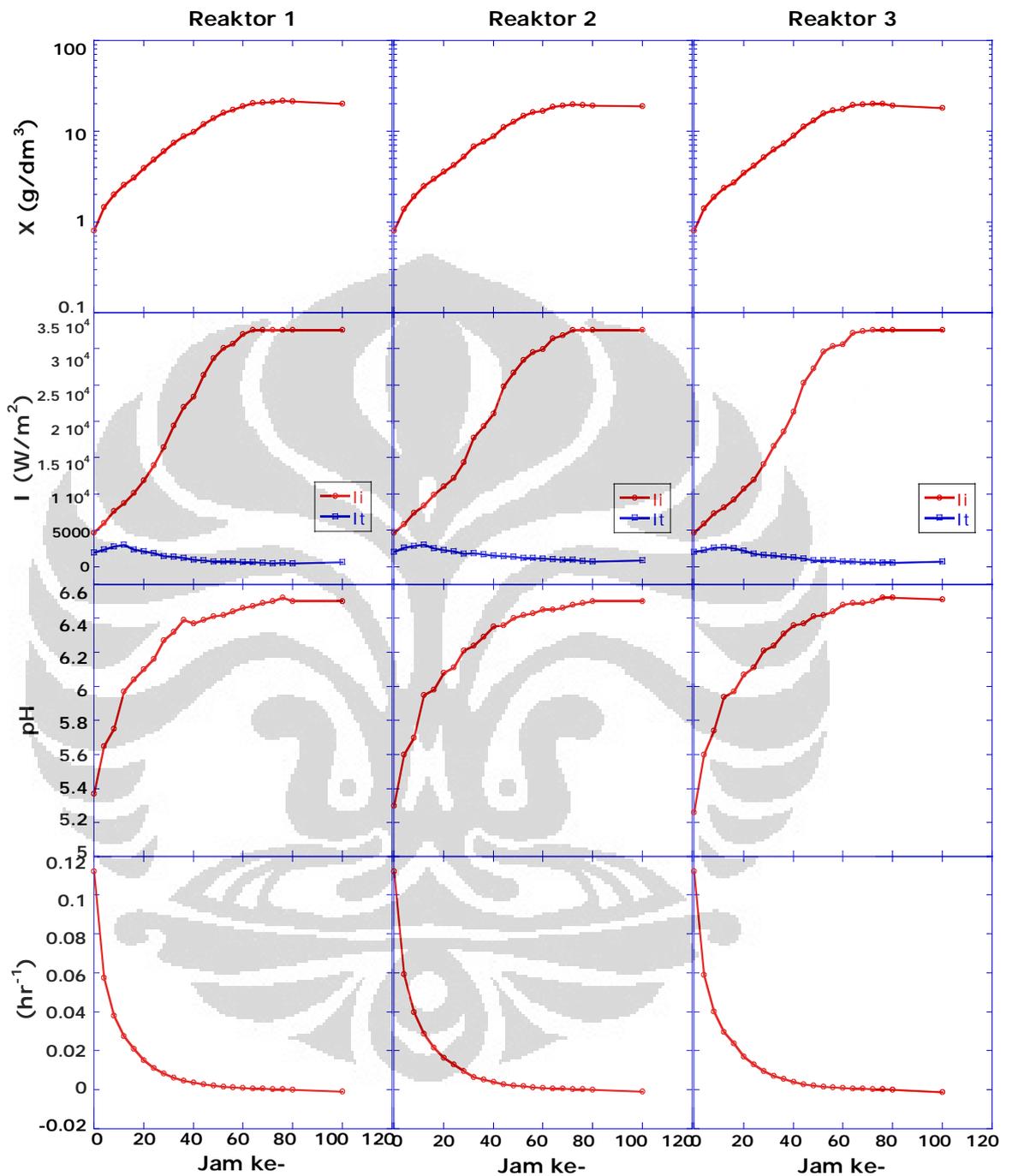
Gambar 4. 2 Data Pengamatan Pertumbuhan *Chlorella Vulgaris* pada Reaktor Seri Skala Pilot

Data yang diperoleh dari kultivasi dalam reaktor tunggal adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 3 Data Pengamatan Pertumbuhan *Chlorella Vulgaris* pada Reaktor Tunggal Skala Pilot

Sedangkan untuk kultivasi dalam reaktor seri skala lab, data yang diperoleh adalah sebagai berikut:



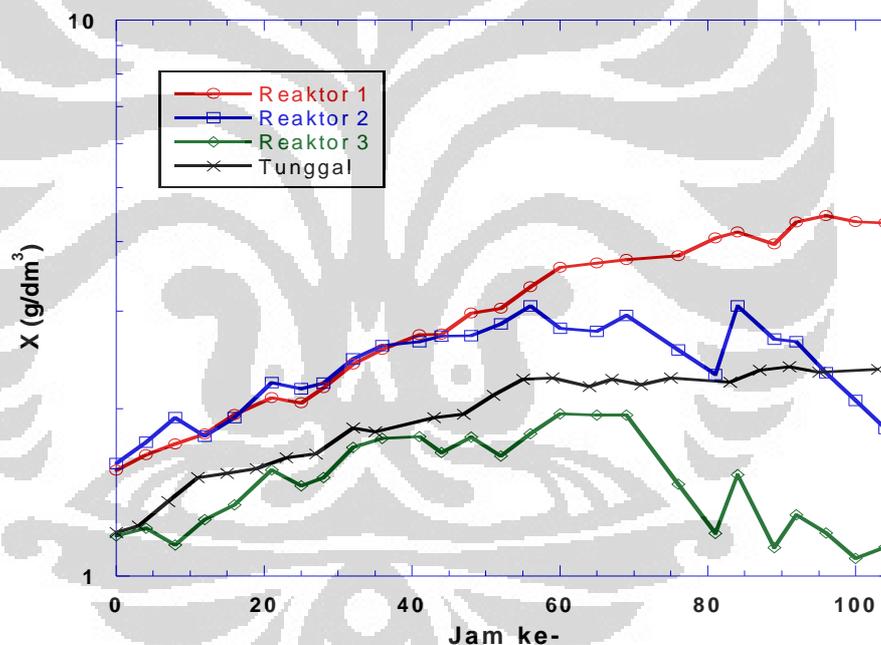
Gambar 4. 4 Data Pengamatan Pertumbuhan *Chlorella Vulgaris* pada Reaktor Seri Skala Lab

4.3 Pengaruh Susunan Reaktor Seri terhadap Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Pengaruh penggunaan reaktor yang disusun seri untuk kultivasi *Chlorella vulgaris* dapat dianalisa melalui beberapa variabel, seperti berat kering, laju pertumbuhan, dan konsentrasi $[\text{HCO}_3^-]$.

4.3.1 Perhitungan X

Pada penelitian ini, inokulum awal yang digunakan memiliki berat kering sekitar 1.2 sampai 1.6 g/dm^3 . Intensitas cahaya yang diberikan terus ditingkatkan seiring dengan bertambahnya jumlah biomassa di dalam medium. Perbandingan pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada reaktor seri dan reaktor tunggal dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Perbandingan Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* dengan Pencahayaan Alterasi pada Reaktor Seri dan Reaktor Tunggal

Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa untuk sekitar 30 jam pertama, peningkatan pertumbuhan *Chlorella vulgaris* adalah yang paling cepat, baik pada reaktor seri maupun reaktor tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa sel-sel *Chlorella vulgaris* yang digunakan sudah berada pada fase pertumbuhan eksponensial. Setelah itu, peningkatan biomassa akan melambat dan pertumbuhan memasuki fase stasioner. Hal ini disebabkan

oleh bertambahnya kepadatan sel di dalam kultur sehingga nutrisi yang tersedia tidak dapat mencukupi kebutuhan seluruh sel. Akibatnya, pertumbuhan sel-sel *Chlorella vulgaris* menjadi terhambat.

Grafik tersebut juga menunjukkan bahwa pertumbuhan *Chlorella vulgaris* di Reaktor 3 dari rangkaian seri adalah yang paling rendah. Hal ini terjadi karena kekuatan aliran udara dari Reaktor 2 terlalu lemah untuk menghasilkan gelembung-gelembung yang dapat mengaduk kultur di Reaktor 3. Pengadukan yang kurang baik menyebabkan distribusi udara dan CO₂ tidak merata sehingga tidak semua sel *Chlorella vulgaris* memperoleh sumber karbon untuk tumbuh dan berkembang biak. Pada akhirnya, pertumbuhan sel dalam Reaktor 3 menjadi terhambat.

Tabel 4. 1 Berat Kering Maksimum

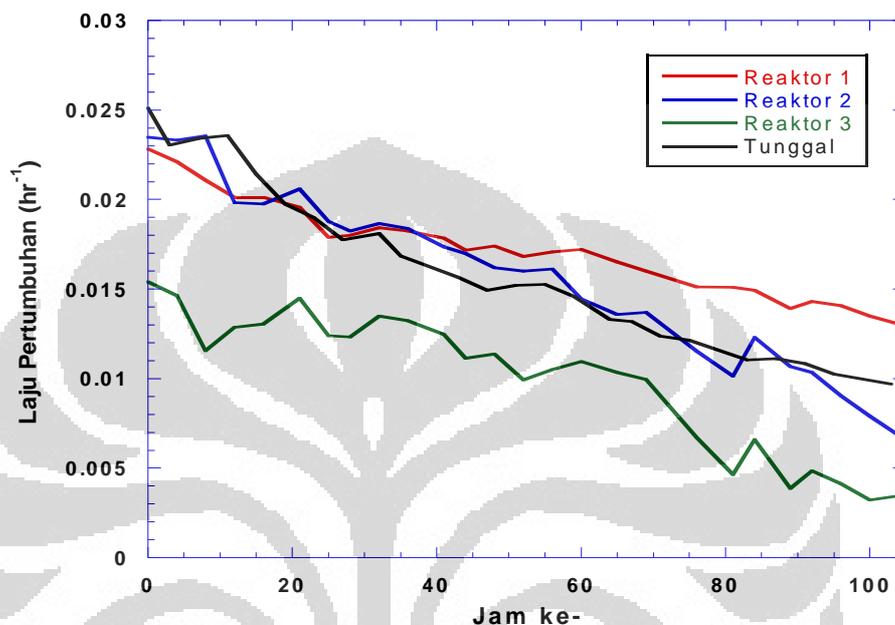
Susunan Reaktor		Berat Kering Maksimum (g/dm ³)
Seri	1	4.45
	2	3.06
	3	1.96
Tunggal		2.27

Secara keseluruhan, kultivasi *Chlorella vulgaris* dalam reaktor susun seri menghasilkan biomassa lebih banyak daripada kultivasi dalam reaktor tunggal. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.1. Rata-rata berat kering yang diperoleh dari kultivasi pada reaktor seri adalah sebesar 3.16 g/dm³. Jumlah ini menunjukkan bahwa penggunaan reaktor seri menghasilkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* lebih banyak 1.39 kali lipat dibandingkan dengan penggunaan reaktor tunggal.

4.3.2 Perhitungan μ_{\max}

Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada awal kultivasi berada pada fase eksponensial dimana laju pertumbuhannya berada pada titik maksimal. Laju pertumbuhan tersebut kemudian akan terus menurun hingga mencapai fase kematian. Hal ini dapat dinyatakan secara matematis berdasarkan Persamaan 6. Pada persamaan tersebut, nilai laju pertumbuhan berbanding terbalik dengan berat kering yang dihasilkan sehingga semakin banyak

biomassa yang dihasilkan, semakin kecil laju pertumbuhan. Laju pertumbuhan yang melambat saat jumlah biomassa bertambah disebabkan oleh jumlah nutrisi yang semakin sedikit sehingga tidak dapat memenuhi kebutuhan seluruh sel untuk tumbuh dan membelah diri.



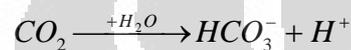
Gambar 4. 6 Perbandingan Laju Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* dengan Pencahayaan Alterasi pada Reaktor Seri dan Reaktor Tunggal

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.6, laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada Reaktor 3 adalah yang paling rendah. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, hal ini disebabkan oleh masalah aerasi di mana udara keluaran Reaktor 2 tidak cukup kuat untuk melakukan pengadukan dengan merata. Sedangkan untuk Reaktor 1 dan Reaktor 2, laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada kedua reaktor tersebut relatif lebih tinggi dibandingkan dengan laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada reaktor tunggal. Laju pertumbuhan yang lebih tinggi ini disebabkan oleh proses pengadukan yang lebih baik pada kedua reaktor tersebut. Dimensi reaktor yang lebih rendah menyebabkan distribusi udara dan sumber karbon sepanjang tinggi reaktor lebih merata dibandingkan pada reaktor tunggal dengan volume yang ekuivalen.

4.3.3 Pengaruh Susunan Reaktor terhadap Nilai pH Medium

Nilai pH yang terukur saat pengambilan data menggambarkan tingkat keasaman medium. Aktivitas sel seperti pertumbuhan, pembelahan, dan metabolisme sel dapat meningkatkan nilai pH medium. Nilai pH ini sebanding dengan konsentrasi ion $[HCO_3^-]$ yang terdapat dalam medium. Hubungan ini dapat dijelaskan dengan mempelajari proses metabolisme yang terjadi.

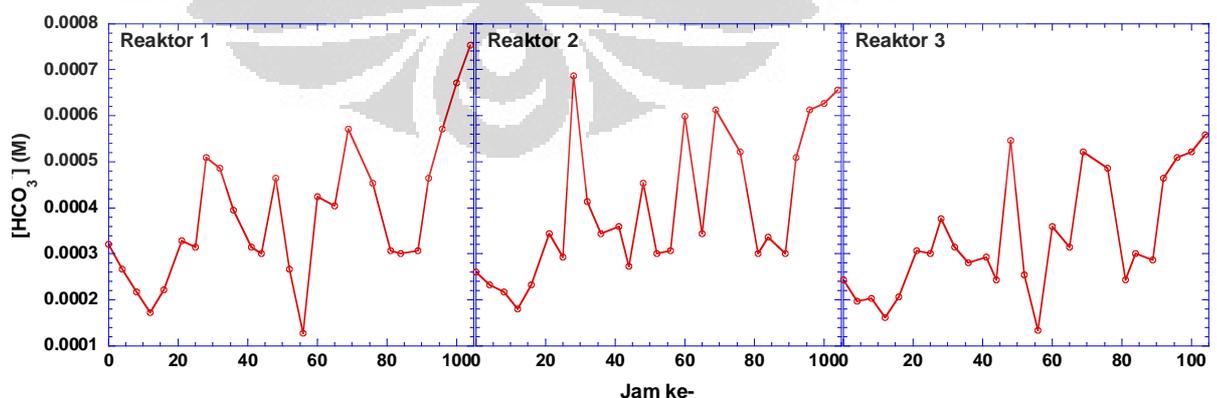
Proses aerasi kultur menggunakan udara yang dicampur dengan CO_2 menyebabkan CO_2 larut dalam medium. CO_2 terlarut ini kemudian bereaksi dengan air membentuk ion bikarbonat berdasarkan reaksi berikut ini:



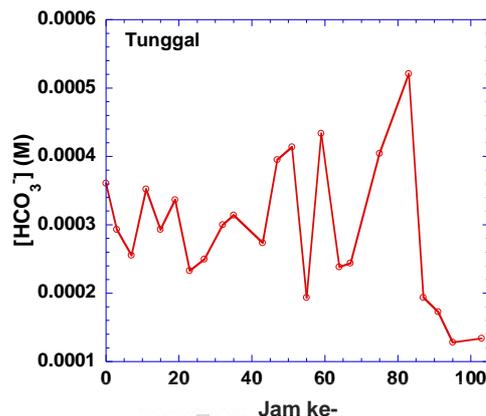
Senyawa bikarbonat yang terbentuk merupakan senyawa yang mudah diserap oleh sel *Chlorella vulgaris*. Proses metabolisme yang terjadi di dalam sel merupakan reaksi antara senyawa tersebut dengan air dalam sel. Reaksi yang terjadi menghasilkan senyawa organik seperti glukosa dan air (Wijanarko, 2006), seperti berikut ini:



Reaksi tersebut juga menghasilkan ion OH^- yang bersifat basa. Hal inilah yang menyebabkan pH medium meningkat. Konsentrasi ion $[HCO_3^-]$ dalam kultur *Chlorella vulgaris* pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



Gambar 4. 7 Konsentrasi Ion $[HCO_3^-]$ dalam Reaktor Seri



Gambar 4. 8 Konsentrasi Ion [HCO₃⁻] dalam Reaktor Tunggal

Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa konsentrasi ion [HCO₃⁻] dalam medium cenderung konstan dan hanya berfluktuasi pada rentang tertentu. Nilai pH tidak dapat naik lebih tinggi lagi karena adanya sistem *buffer* alami berupa gas CO₂ terlarut dalam media kultur. Gas CO₂ tersebut akan berubah menjadi asam karbonat yang akan terurai menjadi ion-ion karbonat dan ion bikarbonat. Reaksi kesetimbangan antara CO₂ terlarut, asam karbonat, ion bikarbonat serta ion karbonat akan menyebabkan nilai pH bergeser pada kisaran 6-9 dan tidak meningkat lagi.

Jika penggunaan reaktor seri dibandingkan dengan penggunaan reaktor tunggal, dapat dilihat bahwa rata-rata konsentrasi ion [HCO₃⁻] lebih tinggi dalam reaktor seri. Hal ini berarti bahwa pada reaktor seri tersedia lebih banyak substrat yang dapat digunakan *Chlorella vulgaris* untuk membentuk biomassa. Oleh karena itu, secara keseluruhan, pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada reaktor seri menjadi lebih baik dibandingkan pertumbuhan pada reaktor tunggal.

4.4 Energi untuk Produksi Biomassa

Sebagai mikroalga hijau, *Chlorella vulgaris* memerlukan cahaya sebagai sumber energi dalam melakukan metabolisme. Besar energi yang diperlukan tergantung pada tingkat intensitas cahaya dan kondisi fotobioreaktor. Jika tinggi intensitas cahaya yang digunakan terus ditingkatkan, maka produksi biomassa juga akan terus meningkat hingga mencapai batas maksimum. Semakin baik kondisi fotobioreaktor, maka semakin tinggi konversi energi cahaya untuk

pembentukan biomassa. Efisiensi konversi energi dapat dihitung dengan membandingkan energi yang dimanfaatkan untuk metabolisme terhadap energi yang tersedia selama kultivasi. Kedua jenis energi tersebut dapat diketahui dari besarnya intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh reaktor dan intensitas cahaya awal yang masuk ke dalam reaktor, secara berurutan. Besar energi cahaya yang digunakan untuk produksi biomassa dari kedua macam susunan reaktor dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Energi Cahaya untuk Produksi Biomassa

Susunan Reaktor		Ex (J/g)
Seri	1	0.0294
	2	0.1427
	3	0.8630
Tunggal		0.1344

Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa kebutuhan energi pada setiap reaktor dalam rangkaian seri bervariasi. Besar energi cahaya yang ditransmisikan pada Reaktor 1 adalah yang paling kecil. Hal ini disebabkan oleh besarnya jumlah biomassa yang terbentuk sehingga energi yang dibutuhkan lebih besar. Lain halnya dengan Reaktor 3 yang mentransmisikan energi cahaya paling besar. Biomassa yang terbentuk dalam Reaktor 3 memang yang paling rendah dibandingkan dengan ketiga reaktor lainnya.

4.5 Pengaruh Penambahan Volume Reaktor terhadap Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Selain dibandingkan dengan kultivasi dalam reaktor tunggal, hasil penelitian ini juga dibandingkan dengan kultivasi dalam reaktor seri pada skala lab yang memiliki volume total 0.6 dm³. Hal ini untuk melihat bagaimana pertumbuhan dan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* pada skala yang lebih besar. Perbandingan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* yang dikultivasi pada skala lab dengan produksi biomassa skala pilot dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Perbandingan Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* yang Dikultivasi dengan Pencahayaan Alterasi dalam Reaktor Susun Seri Skala Lab dan Skala Pilot

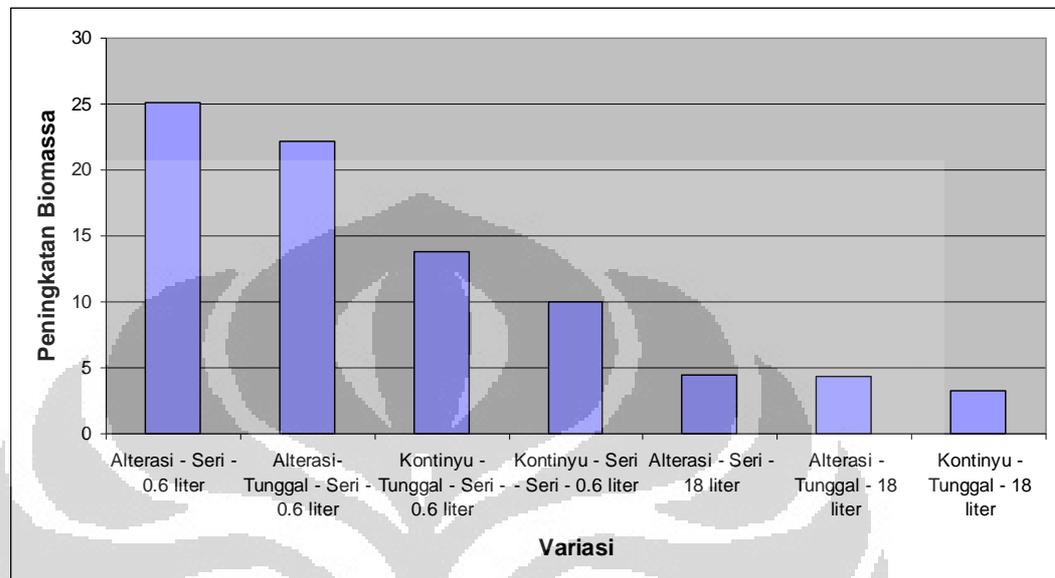
Skala Penelitian	Reaktor	ΔX (g/dm ³)
Skala Lab	1	20.69
	2	18.69
	3	19.19
Skala Pilot	1	2.9
	2	1.47
	3	0.78

Berdasarkan tabel tersebut, dapat dilihat bahwa kultivasi *Chlorella vulgaris* dengan pencahayaan alterasi dalam reaktor seri skala lab memberikan produksi biomassa yang jauh lebih besar daripada kultivasi dengan pencahayaan alterasi dalam reaktor seri skala pilot, yaitu sebesar 11.37 kali lipat. Perbedaan yang cukup jauh ini disebabkan oleh kontrol kondisi operasi pada skala pilot yang lebih sulit daripada kontrol kondisi operasi pada skala lab, terutama dalam hal proses aerasi.

Penyusunan reaktor secara seri mengharuskan setiap reaktor tertutup rapat agar udara dapat mengalir dengan baik dari reaktor satu ke reaktor selanjutnya. Jika salah satu reaktor ada yang tidak tertutup rapat, maka aliran udara akan terhambat dan proses aerasi pada reaktor selanjutnya akan terganggu. Proses aerasi selain berfungsi untuk memberikan pasokan udara dan sumber karbon, juga berfungsi dalam pengadukan dan pemerataan distribusi udara dan sumber karbon tersebut. Oleh karena itu, jika proses aerasi pada salah satu reaktor terganggu, maka pertumbuhan *Chlorella vulgaris* di dalamnya akan ikut terganggu.

Selain masalah kebocoran, hal lain yang dapat mengganggu proses aerasi adalah masalah kekuatan aliran udara yang digunakan. Semakin besar volume reaktor, maka semakin besar pula laju alir udara yang diperlukan agar reaktor yang berada paling ujung dapat tetap teraduk dengan baik. Namun, aliran udara yang terlalu besar akan menyebabkan pola aliran di reaktor pertama menjadi terlalu turbulen. Hal ini juga kurang baik bagi distribusi udara dan sumber karbon. Pada aliran turbulen, waktu tinggal udara di dalam medium menjadi lebih singkat sehingga sel-sel *Chlorella*

vulgaris tidak dapat menyerap sumber karbon dengan optimal. Pada reaktor skala lab, pengaturan laju alir ini lebih mudah dilakukan karena volume reaktor yang relatif kecil.



Gambar 4.9 Rasio antara Jumlah Biomassa Akhir terhadap Jumlah Biomassa Awal untuk Penelitian dengan Variasi Berbeda

Kesulitan mengontrol kondisi operasi pada reaktor dengan volume yang lebih besar berakibat pada peningkatan produksi biomassa yang lebih kecil. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.9. Grafik tersebut menunjukkan bahwa biomassa yang dihasilkan pada reaktor dengan volume 18 liter lebih sedikit daripada biomassa yang dihasilkan pada reaktor dengan volume 0.6 liter.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

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

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian mengenai produksi biomassa *Chlorella vulgaris* dengan pencahayaan alterasi dalam fotobioreaktor kolom gelembung susun seri skala pilot adalah:

1. Penggunaan reaktor yang disusun seri dapat meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* sebesar 1.39 kali lipat dibandingkan dengan penggunaan reaktor tunggal dengan volume total yang ekuivalen untuk kultivasi dengan pencahayaan alterasi.
2. Jumlah energi yang digunakan pada kultivasi *Chlorella vulgaris* dalam reaktor susun seri lebih besar 7.7 kali dibandingkan dengan jumlah energi yang digunakan pada kultivasi dalam reaktor tunggal dengan volume yang ekuivalen.
3. Kultivasi *Chlorella vulgaris* dalam reaktor seri skala pilot menghasilkan biomassa yang jauh lebih sedikit daripada kultivasi dalam reaktor seri skala lab. Pada skala lab, biomassa yang dihasilkan mencapai 11.37 kali lipat daripada skala pilot.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, ada saran yang dapat diberikan untuk penelitian-penelitian selanjutnya mengenai produksi biomassa *Chlorella vulgaris*. Pada penelitian ini, produksi biomassa paling rendah adalah pada Reaktor 3. Oleh karena itu, ada baiknya dicoba kultivasi dalam reaktor seri dengan hanya menggunakan dua buah reaktor. Penggunaan dua buah reaktor ini lebih aplikatif pada skala yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

<http://bima.ipb.ac.id>

<http://chlorella.co.nz>

<http://inhavision.inha.ac.kr/~leecg/Lumostat.pdf>

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

<http://www.gtamart.com>

Andika, Sang Made Kresna, 2005, “*Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dengan Alterasi Pencahayaan dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung*”, Departemen Gas dan Petrokimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Anonim. “Anabolisme”. <http://free.vlsm.org> (19 Maret 2008)

Anonim. “Chlorella”. <http://www.tuberoze.com> (19 Maret 2008)

Anonim. “Chlorella”. <http://en.wikipedia.org/wiki/Chlorella> (19 Maret 2008)

Anonim. “Chlorella’s Nutritional Analysis”.
<http://www.naturalways.com/chlor02.htm> (19 Maret 2008)

Anonim. “Chlorella Sebagai Feed Additive”. <http://www.poultryindonesia.com> (1 Juni 2008)

Anonim. “Fotosintesis”. <http://id.wikipedia.org> (19 Maret 2008)

Anonim. “Microalgal Culturing”. <http://www.nhm.ac.uk> (19 Maret 2008)

Anonim. “Potensi Chlorella”. <http://www.chlorellafactor.com> (19 Maret 2008)

Anonim. “Pure Yaeyama Chlorella”. <http://www.chlorella-world.com/yaeyama.html> (1 Juni 2008)

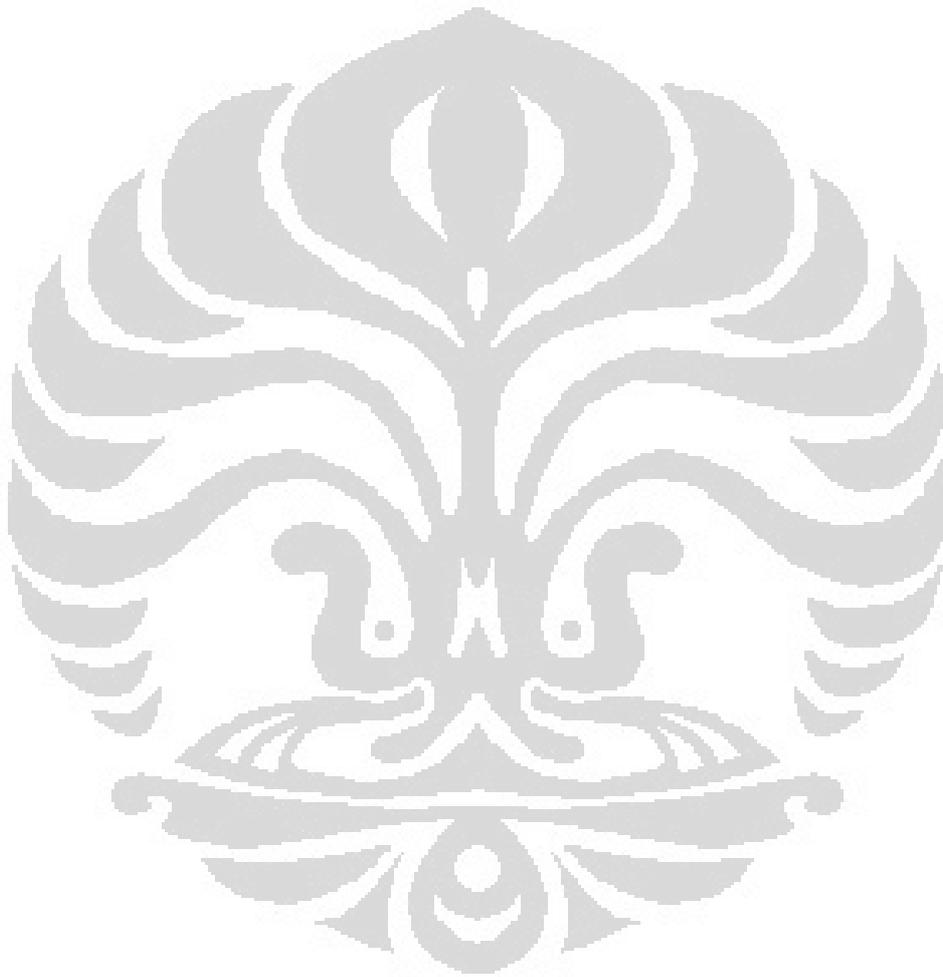
Ferna’ndez, F.G.A., F. G. Camacho, J. A. S. Pe’rez, J. M. F. Sevilla, and E. M. Grima. 1998. “Modelling of Biomass Productivity in Tubular Photobioreactors for Microalgal Cultures: Effects of Dilution Rate, Tube Diameter, and Solar Irradiance”, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol 58. no 6. pp:605-616

Gunther, William S., 2000, “*A Photobioreactor with On-Line Biomass and Growth Rate Estimations for Optimization of Light Intensity in Cultures of Phototrophic Microorganism*”, Department of Life Science Aalborg University.

- Muryanto, 2006, “*Produksi Biomassa Chlorella sp. dengan Pencahayaan Periodik dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri*”, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Pulz, O. “Photobioreactors: Production Systems for Phototropic Microorganisms”.
<http://link.springer.de>
- Sendjaja, Antonius Yudi, 2006, “*Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dengan Optimasi Pencahayaan Alterasi dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri*”, Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Sriharti. “Pemanfaatan Mikroalga *Chlorella sp.* dan *Scenedesmus sp.* sebagai Pakan Alami Larva Man Mas (*Cyprinus carpio*)”.
<http://digilib.biologi.lipi.go.id> (1 Juni 2008)
- Sujarwo, Muhammad Aji, 2006, “*Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dengan Pencahayaan Kontinu dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri*”, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Sukoso. “Peran Bioteknologi Molekuler dalam Pembangunan Bidang Perikanan dan Kelautan Indonesia”. <http://prasetya.brawija.ac.id/sukoso.htm> (1 Juni 2008)
- Suriawiria, Unus. 2005. *Chlorella untuk Kesehatan dan Kebugaran*. Jakarta: Papas Sinar Sinanti.
- Valentino, 2006, “*Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg Melalui Pencahayaan Siklus Harian dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung*”, Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Wijanarko, A dan K. Ohtaguchi. 2004. “Carbon Dioxide Utilization for Global Sustainability: Reactor in series approximation, an enhancement effort of CO₂ fixation and biomass production by *Anabaena cylindrica*”. *Study in Surface Science and Catalysis*, Vol 153, pp:461-468
- Wijanarko, A., 2006, “*Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dalam Kolom Gelembung Seri dengan Pengaturan*

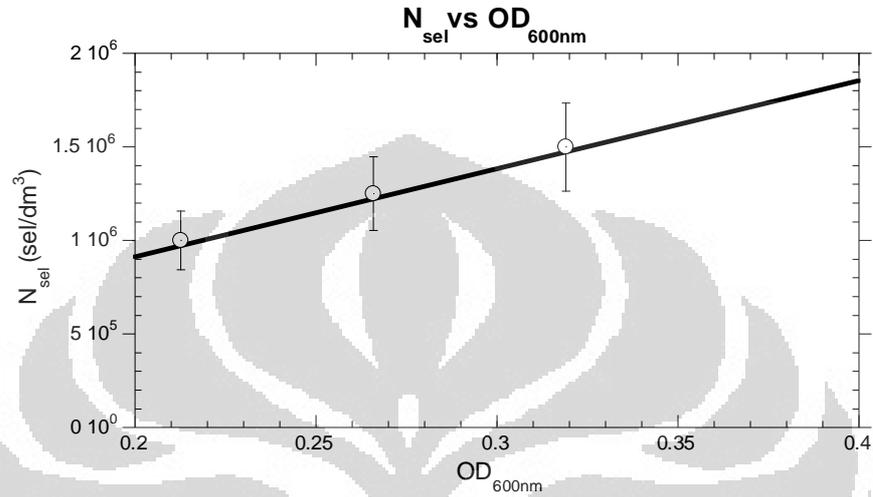
Pencahayaan”, Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Wirosaputro, S. 2002. *Chlorella untuk Kesehatan Global, Teknik Budidaya dan Pengolahan*. Yogyakarta: Gajahmada University Press.

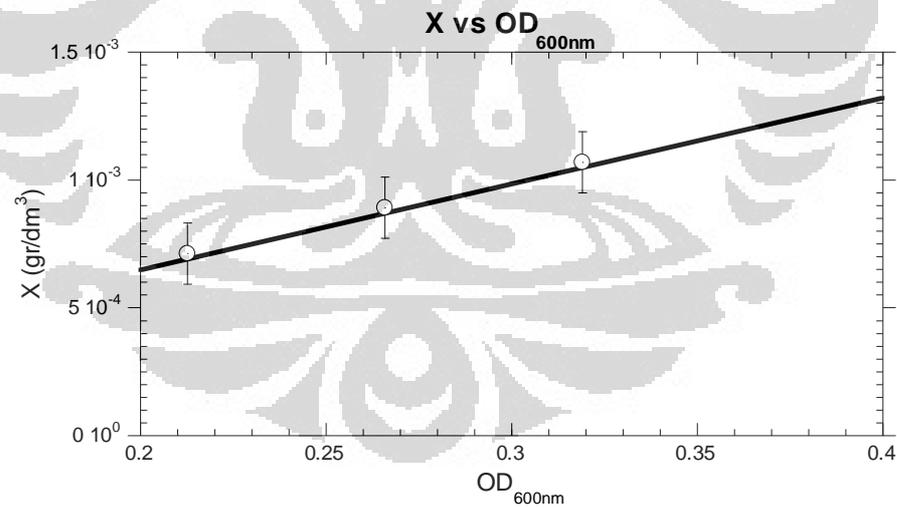


A.1 Kurva Kalibrasi OD₆₀₀ vs N_{sel} dan OD₆₀₀ vs X_f

$$y = -33480 + 4.719e+06x \quad R = 0.99921$$



$$y = -2.3882e-05 + 0.0033662x \quad R = 0.99921$$



A.2 Tabel Konversi OD₆₀₀, N_{sel}, X

Dari persamaan garis pada kurva kalibrasi maka dapat dibuat tabel konversi OD₆₀₀, N_{sel}, dan X sebagai berikut:

OD ₆₀₀	N _{sel}	X	OD ₆₀₀	N _{sel}	X
0.200	909,403.980	0.000649358	0.244	1,117,372.973	0.000797471
0.201	914,130.548	0.000652724	0.245	1,122,099.542	0.000800837
0.202	918,857.116	0.000656090	0.246	1,126,826.110	0.000804203
0.203	923,583.684	0.000659457	0.247	1,131,552.678	0.000807569
0.204	928,310.252	0.000662823	0.248	1,136,279.246	0.000810936
0.205	933,036.820	0.000666189	0.249	1,141,005.814	0.000814302
0.206	937,763.388	0.000669555	0.250	1,145,732.382	0.000817668
0.207	942,489.956	0.000672921	0.251	1,150,458.950	0.000821034
0.208	947,216.524	0.000676288	0.252	1,155,185.518	0.000824400
0.209	951,943.092	0.000679654	0.253	1,159,912.086	0.000827767
0.210	956,669.660	0.000683020	0.254	1,164,638.654	0.000831133
0.211	961,396.228	0.000686386	0.255	1,169,365.222	0.000834499
0.212	966,122.796	0.000689752	0.256	1,174,091.790	0.000837865
0.213	970,849.364	0.000693119	0.257	1,178,818.358	0.000841231
0.214	975,575.932	0.000696485	0.258	1,183,544.926	0.000844598
0.215	980,302.500	0.000699851	0.259	1,188,271.494	0.000847964
0.216	985,029.068	0.000703217	0.260	1,192,998.062	0.000851330
0.217	989,755.636	0.000706583	0.261	1,197,724.630	0.000854696
0.218	994,482.204	0.000709950	0.262	1,202,451.198	0.000858062
0.219	999,208.773	0.000713316	0.263	1,207,177.766	0.000861429
0.220	1,003,935.341	0.000716682	0.264	1,211,904.334	0.000864795
0.221	1,008,661.909	0.000720048	0.265	1,216,630.902	0.000868161
0.222	1,013,388.477	0.000723414	0.266	1,221,357.470	0.000871527
0.223	1,018,115.045	0.000726781	0.267	1,226,084.038	0.000874893
0.224	1,022,841.613	0.000730147	0.268	1,230,810.606	0.000878260
0.225	1,027,568.181	0.000733513	0.269	1,235,537.174	0.000881626
0.226	1,032,294.749	0.000736879	0.270	1,240,263.742	0.000884992
0.227	1,037,021.317	0.000740245	0.271	1,244,990.311	0.000888358
0.228	1,041,747.885	0.000743612	0.272	1,249,716.879	0.000891724
0.229	1,046,474.453	0.000746978	0.273	1,254,443.447	0.000895091
0.230	1,051,201.021	0.000750344	0.274	1,259,170.015	0.000898457
0.231	1,055,927.589	0.000753710	0.275	1,263,896.583	0.000901823
0.232	1,060,654.157	0.000757076	0.276	1,268,623.151	0.000905189
0.233	1,065,380.725	0.000760443	0.277	1,273,349.719	0.000908555
0.234	1,070,107.293	0.000763809	0.278	1,278,076.287	0.000911922
0.235	1,074,833.861	0.000767175	0.279	1,282,802.855	0.000915288
0.236	1,079,560.429	0.000770541	0.280	1,287,529.423	0.000918654
0.237	1,084,286.997	0.000773907	0.281	1,292,255.991	0.000922020
0.238	1,089,013.565	0.000777274	0.282	1,296,982.559	0.000925386
0.239	1,093,740.133	0.000780640	0.283	1,301,709.127	0.000928753
0.240	1,098,466.701	0.000784006	0.284	1,306,435.695	0.000932119
0.241	1,103,193.269	0.000787372	0.285	1,311,162.263	0.000935485
0.242	1,107,919.837	0.000790738	0.286	1,315,888.831	0.000938851
0.243	1,112,646.405	0.000794105	0.287	1,320,615.399	0.000942217

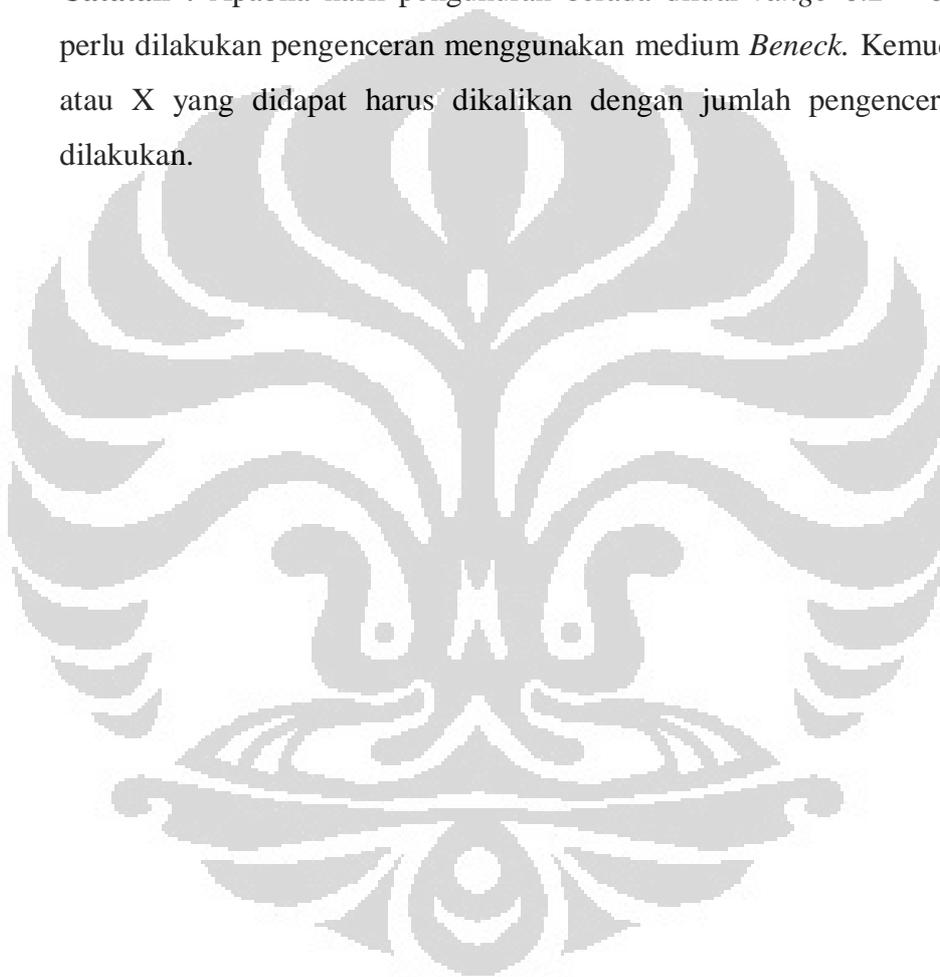
(lanjutan)

OD600	Nsel	X	OD600	Nsel	X
0.288	1,325,341.967	0.000945584	0.337	1,556,943.801	0.001110527
0.289	1,330,068.535	0.000948950	0.338	1,561,670.369	0.001113894
0.290	1,334,795.103	0.000952316	0.339	1,566,396.937	0.001117260
0.291	1,339,521.671	0.000955682	0.340	1,571,123.505	0.001120626
0.292	1,344,248.239	0.000959048	0.341	1,575,850.073	0.001123992
0.293	1,348,974.807	0.000962415	0.342	1,580,576.641	0.001127358
0.294	1,353,701.375	0.000965781	0.343	1,585,303.209	0.001130725
0.295	1,358,427.943	0.000969147	0.344	1,590,029.777	0.001134091
0.296	1,363,154.512	0.000972513	0.345	1,594,756.345	0.001137457
0.297	1,367,881.080	0.000975879	0.346	1,599,482.913	0.001140823
0.298	1,372,607.648	0.000979246	0.347	1,604,209.481	0.001144189
0.299	1,377,334.216	0.000982612	0.348	1,608,936.050	0.001147556
0.300	1,382,060.784	0.000985978	0.349	1,613,662.618	0.001150922
0.301	1,386,787.352	0.000989344	0.350	1,618,389.186	0.001154288
0.302	1,391,513.920	0.000992710	0.351	1,623,115.754	0.001157654
0.303	1,396,240.488	0.000996077	0.352	1,627,842.322	0.001161020
0.304	1,400,967.056	0.000999443	0.353	1,632,568.890	0.001164387
0.305	1,405,693.624	0.001002809	0.354	1,637,295.458	0.001167753
0.306	1,410,420.192	0.001006175	0.355	1,642,022.026	0.001171119
0.307	1,415,146.760	0.001009541	0.356	1,646,748.594	0.001174485
0.308	1,419,873.328	0.001012908	0.357	1,651,475.162	0.001177851
0.309	1,424,599.896	0.001016274	0.358	1,656,201.730	0.001181218
0.310	1,429,326.464	0.001019640	0.359	1,660,928.298	0.001184584
0.311	1,434,053.032	0.001023006	0.360	1,665,654.866	0.001187950
0.312	1,438,779.600	0.001026372	0.361	1,670,381.434	0.001191316
0.313	1,443,506.168	0.001029739	0.362	1,675,108.002	0.001194682
0.314	1,448,232.736	0.001033105	0.363	1,679,834.570	0.001198049
0.315	1,452,959.304	0.001036471	0.364	1,684,561.138	0.001201415
0.316	1,457,685.872	0.001039837	0.365	1,689,287.706	0.001204781
0.317	1,462,412.440	0.001043203	0.366	1,694,014.274	0.001208147
0.318	1,467,139.008	0.001046570	0.367	1,698,740.842	0.001211513
0.319	1,471,865.576	0.001049936	0.368	1,703,467.410	0.001214880
0.320	1,476,592.144	0.001053302	0.369	1,708,193.978	0.001218246
0.321	1,481,318.712	0.001056668	0.370	1,712,920.546	0.001221612
0.322	1,486,045.281	0.001060034	0.371	1,717,647.114	0.001224978
0.323	1,490,771.849	0.001063401	0.372	1,722,373.682	0.001228344
0.324	1,495,498.417	0.001066767	0.373	1,727,100.251	0.001231711
0.325	1,500,224.985	0.001070133	0.374	1,731,826.819	0.001235077
0.326	1,504,951.553	0.001073499	0.375	1,736,553.387	0.001238443
0.327	1,509,678.121	0.001076865	0.376	1,741,279.955	0.001241809
0.328	1,514,404.689	0.001080232	0.377	1,746,006.523	0.001245175
0.329	1,519,131.257	0.001083598	0.378	1,750,733.091	0.001248542
0.330	1,523,857.825	0.001086964	0.379	1,755,459.659	0.001251908
0.331	1,528,584.393	0.001090330	0.380	1,760,186.227	0.001255274
0.332	1,533,310.961	0.001093696	0.381	1,764,912.795	0.001258640
0.333	1,538,037.529	0.001097063	0.382	1,769,639.363	0.001262006
0.334	1,542,764.097	0.001100429	0.383	1,774,365.931	0.001265373
0.335	1,547,490.665	0.001103795	0.384	1,779,092.499	0.001268739
0.336	1,552,217.233	0.001107161	0.385	1,783,819.067	0.001272105

(lanjutan)

OD ₆₀₀	N _{sel}	X	OD ₆₀₀	N _{sel}	X
0.386	1,788,545.635	0.001275471	0.394	1,826,358.179	0.001302401
0.387	1,793,272.203	0.001278837	0.395	1,831,084.747	0.001305767
0.388	1,797,998.771	0.001282204	0.396	1,835,811.315	0.001309133
0.389	1,802,725.339	0.001285570	0.397	1,840,537.883	0.001312499
0.390	1,807,451.907	0.001288936	0.398	1,845,264.451	0.001315866
0.391	1,812,178.475	0.001292302	0.399	1,849,991.020	0.001319232
0.392	1,816,905.043	0.001295668	0.400	1,854,717.588	0.001322598
0.393	1,821,631.611	0.001299035			

Catatan : Apabila hasil pengukuran berada diluar *range* 0.2 – 0.4 maka perlu dilakukan pengenceran menggunakan medium *Beneck*. Kemudian N_{sel} atau X yang didapat harus dikalikan dengan jumlah pengenceran yang dilakukan.



B.1 Reaktor Tunggal Skala Pilot

Jam ke-	Faktor Pegenceran	OD	pH	lo	lb	s
0	1	0.217	7.13	4950.00	984.33	27
4	1	0.226	6.56	4703.33	967.33	27
8	1	0.233	6.58	4846.67	863.33	27
13	1	0.259	6.43	4760.00	846.33	27
16	1	0.296	6.46	4926.67	798.00	27
21	2	0.182	6.52	5956.67	876.67	26
24	2	0.186	6.43	6113.33	841.00	27.5
28	2	0.206	6.37	5773.33	750.33	28.5
32	2	0.227	6.51	6343.33	748.67	26
36	2	0.231	6.43	6616.67	691.00	25
40	2	0.235	6.49	6703.33	643.67	24
44	2	0.246	6.33	6720.00	613.67	24
48	2	0.250	6.36	6700.00	576.67	24
53	2	0.278	6.44	8030.00	608.67	20
56	2	0.273	6.46	8530.00	616.33	18
64	2	0.290	6.40	8503.33	543.67	18
68	2	0.294	6.56	8503.33	518.00	18
72	3	0.212	6.58	8686.67	504.00	18.5
76	3	0.226	6.25	9340.00	511.33	18.5
80	3	0.227	6.60	9320.00	555.67	18.5
85	3	0.219	6.34	9983.33	517.33	16.5
88	3	0.226	6.35	10080.00	524.33	16.5
92	3	0.221	7.44	9933.33	512.67	16.5
96	3	0.227	6.57	10250.00	519.67	16.5
104	3	0.223	6.68	10933.33	551.00	16.5
108	3	0.235	6.25	10186.67	502.67	16.5
112	3	0.238	6.20	10713.33	495.67	16.5
116	3	0.233	6.07	10723.33	541.00	16.5
124	3	0.236	6.09	11003.33	474.33	16.5

B.2 Reaktor Seri Skala Pilot

Jam ke-	Pengenceran			OD600			pH			I0 (lux)			Ib (lux)			s (cm)		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
0	2	2	2	0.237	0.244	0.183	6.47	6.38	6.35	6480.00	7060.00	5423.33	533.67	452.67	752.33	23.5	22.5	25
4	2	2	2	0.253	0.266	0.188	6.39	6.33	6.26	7470.00	7623.33	6353.33	525.67	404.67	781.33	21	20	21.5
8	2	2	2	0.264	0.294	0.176	6.30	6.30	6.27	7633.33	7826.67	7323.33	436.67	311.67	688.33	21	20	21.5
12	2	2	2	0.275	0.272	0.195	6.20	6.22	6.17	7830.00	8810.00	6346.67	403.33	272.67	662.33	20	18	21.5
16	2	2	2	0.297	0.293	0.207	6.31	6.33	6.28	8406.67	8803.33	6820.00	377.33	252.33	644.67	19	18	21
21	3	3	2	0.214	0.228	0.238	6.48	6.50	6.45	8896.67	8796.67	6863.33	328.33	221.33	549.00	18	17.5	20.5
25	3	3	2	0.210	0.222	0.223	6.46	6.43	6.44	9510.00	10056.67	7440.00	386.67	193.33	619.33	15.5	15	20
28	3	3	2	0.223	0.227	0.230	6.67	6.80	6.54	9426.67	10000.00	7493.33	319.67	195.67	576.33	15.5	15	20
32	3	3	2	0.245	0.251	0.260	6.65	6.58	6.46	9686.67	10083.33	7463.33	289.33	177.67	579.67	15.5	15	19.5
36	3	3	2	0.260	0.264	0.270	6.56	6.50	6.41	10390.00	10940.00	7883.33	258.67	170.00	560.67	15.5	15	19.5
41	3	3	2	0.276	0.268	0.272	6.46	6.52	6.43	10550.00	11093.33	8123.33	222.33	168.67	511.67	15.5	15	19.5
44	3	3	2	0.277	0.275	0.255	6.44	6.40	6.35	10196.67	11030.00	8143.33	196.67	144.67	598.00	15.5	15	19.5
48	3	3	2	0.301	0.275	0.271	6.63	6.62	6.70	10623.33	10956.67	8016.67	173.67	135.33	544.00	15.5	15	19.5
52	4	3	2	0.232	0.288	0.251	6.39	6.44	6.37	11710.00	10733.33	8270.00	149.67	127.00	523.00	14	14	17.5
56	4	4	2	0.253	0.235	0.275	6.07	6.45	6.09	11070.00	11036.67	8036.67	151.67	138.33	516.00	14	14	17.5
60	4	4	2	0.274	0.214	0.298	6.59	6.74	6.52	13043.33	11980.00	8203.33	129.33	144.33	493.33	14	14	17.5
65	4	3	2	0.279	0.280	0.297	6.57	6.50	6.46	12776.67	11466.67	9180.00	121.00	156.67	433.33	14	14	17.5
69	4	3	2	0.283	0.299	0.297	6.72	6.75	6.68	13373.33	11516.67	9223.33	107.67	118.33	429.00	14	14	17.5
76	4	3	2	0.287	0.260	0.225	6.62	6.68	6.65	14120.00	11660.00	9226.67	87.67	119.33	448.00	14	14	17.5
81	5	3	2	0.248	0.235	0.184	6.45	6.44	6.35	14443.33	11613.33	9260.00	80.67	119.67	429.67	14	14	17.5
84	5	4	2	0.254	0.235	0.233	6.44	6.49	6.44	14406.67	10213.33	6313.33	81.33	92.00	664.00	14	15	22.5
89	5	4	2	0.242	0.205	0.174	6.45	6.44	6.42	13870.00	10823.33	6706.67	76.67	88.33	658.67	14	15	22.5
92	5	4	2	0.264	0.203	0.199	6.63	6.67	6.63	13200.00	11640.00	6946.67	55.00	72.67	646.33	14	15	22.5
96	5	3	2	0.271	0.237	0.185	6.72	6.75	6.67	12133.33	10776.67	6673.33	62.00	164.00	707.00	13	14.5	21
100	5	3	2	0.265	0.212	0.167	6.79	6.76	6.68	13553.33	10580.00	6416.67	63.00	85.00	875.67	12	14.5	21
104	5	2	2	0.264	0.281	0.175	6.84	6.78	6.71	14016.67	11646.67	6823.33	62.33	270.00	872.33	12	14.5	21

B.3 Reaktor Seri Skala Lab

Jam Running		0	4	8	12	16	20
OD	1	0,263	0,228	0,354	0,287	0,362	0,339
	2	0,263	0,217	0,332	0,271	0,348	0,306
	3	0,263	0,219	0,329	0,260	0,312	0,293
Pengenceran		1	2	2	3	3	4
I_0	1	5.066	6.475	8.285	9.368	10.934	12.773
	2	5.066	6.315	7.972	9.030	10.644	11.880
	3	5.066	6.344	7.929	8.796	9.893	11.525
I_b	1	2.110	2.560	3.010	3.310	2.530	2.260
	2	2.230	2.800	3.050	3.230	2.750	2.490
	3	2.240	2.430	2.800	2.900	2.740	2.400
pH	1	5,37	5,65	5,75	5,97	6,04	6,10
	2	5,30	5,60	5,70	5,95	5,98	6,08
	3	5,26	5,60	5,74	5,94	5,97	6,07
y_{CO_2}	in	7,3986	7,3993	7,8328	8,4315	8,3265	8,6600
	1 - 2	6,8527	6,8897	7,2865	7,9256	7,8523	8,2134
	2 - 3	6,3141	6,5435	6,9918	7,3351	7,3516	7,7598
	out	5,8913	6,0928	6,6675	6,8645	6,8951	7,4142

Jam Running		24	28	32	36	40	44
OD	1	0,339	0,353	0,378	0,395	0,344	0,345
	2	0,281	0,293	0,335	0,330	0,297	0,313
	3	0,274	0,288	0,306	0,312	0,302	0,323
Pengenceran		5	6	7	8	10	12
I_0	1	15.014	17.693	20.841	23.673	25.112	28.360
	2	13.102	15.421	19.075	20.807	226.454	26.642
	3	12.867	15.227	17.841	19.970	22.926	27.196
I_b	1	2.010	1.600	1.530	1.263	1.081	976
	2	2.280	1.960	1.980	1.816	1.665	1.594
	3	1.960	1.770	1.660	1.463	1.435	1.189
pH	1	6,16	6,27	6,32	6,39	6,37	6,39
	2	6,11	6,21	6,24	6,29	6,35	6,36
	3	6,11	6,21	6,24	6,31	6,36	6,37
y_{CO_2}	in	8,9257	8,2149	10,0153	9,8541	8,6682	7,0853
	1 - 2	8,2766	7,9761	9,7611	9,2156	8,3282	6,9308
	2 - 3	7,7051	7,6048	9,4431	8,4552	8,0142	6,5680
	out	7,1963	7,2616	9,1408	8,0654	7,5366	6,3897

Jam Running		48	52	56	60	64
OD	1	0,318	0,262	0,238	0,255	0,255
	2	0,281	0,235	0,219	0,216	0,222
	3	0,292	0,254	0,232	0,227	0,238
Pengenceran		12	15	20	23	24
I ₀	1	28.360	30.821	32.347	33.002	34.427
	2	26.642	28.677	30.571	31.722	32.180
	3	27.196	29.352	31.859	32.624	32.932
I _b	1	788	780	774	736	680
	2	1.309	1.280	1.204	1.139	1.074
	3	950	911	804	757	710
pH	1	6,41	6,42	6,44	6,46	6,47
	2	6,40	6,42	6,43	6,45	6,45
	3	6,41	6,42	6,44	6,48	6,49
y CO ₂	in	9,2261	9,0825	9,1198	10,1358	9,6538
	1 - 2	9,1196	8,8858	8,9540	9,8856	9,3541
	2 - 3	8,9362	8,5215	8,7267	9,5316	8,9675
	out	8,6961	8,2549	8,6355	9,2164	8,6916

Jam Running		68	72	76	80	100
OD	1	0,260	0,263	0,274	0,271	0,265
	2	0,231	0,242	0,240	0,235	0,242
	3	0,245	0,251	0,248	0,235	0,225
Pengenceran		26	26	26	26	25
I ₀	1	35.000	35.000	35.000	35.000	35.000
	2	34.218	35.000	35.000	35.000	35.000
	3	34.821	35.000	35.000	35.000	35.000
I _b	1	638	526	567	493	723
	2	1.074	1.001	859	794	956
	3	710	859	572	596	776
pH	1	6,49	6,50	6,52	6,50	6,50
	2	6,46	6,48	6,49	6,50	6,50
	3	6,49	6,50	6,52	6,52	6,51
y CO ₂	in	9,4351	8,6101	8,8351	8,2788	9,3325
	1 - 2	9,1511	8,2985	8,6927	8,2208	9,3207
	2 - 3	8,8764	8,0113	8,2189	8,0358	9,2716
	out	8,4350	7,7600	7,9806	7,9834	9,2141

C.1 Contoh Pengolahan Data N_{sel} dan X

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, nilai OD₆₈₀ yang diperoleh digunakan untuk menentukan nilai N_{sel} dan X. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan kurva kalibrasi OD₆₀₀ vs N_{sel} dan OD₆₀₀ vs X atau tabel konversi yang terdapat pada Lampiran A.

Contoh perhitungan: Nilai N_{sel} dan X untuk pencahayaan alterasi pada Reaktor 1 rangkaian seri skala pilot pada jam ke-0 di mana OD₆₀₀ = 0.237 dapat diketahui dengan memasukkan nilai OD ke dalam persamaan kurva kalibrasi sebagai berikut:

Nilai N_{sel}:

$$\begin{aligned} N_{\text{sel}} &= (-33480 + (4.71 \times 10^6 \times OD)) \times \text{pengenceran} \\ &= (-33480 + (4.71 \times 10^6 \times 0.273)) \times 2 \\ &= 2,172,992 \text{ sel/cm}^3 \end{aligned}$$

Nilai X:

$$\begin{aligned} X &= ((-2.3882 \times 10^{-5}) + (0.0033662 \times OD)) \times \text{pengenceran} \\ &= ((-2.3882 \times 10^{-5}) + (0.0033662 \times 0.273)) \times 2 \\ &= 1.550059 \text{ g/dm}^3 \end{aligned}$$

Selain itu, nilai N_{sel} dan X juga dapat diperoleh dari tabel konversi pada Lampiran A.

C.2 Hasil Pengolahan Data N_{sel} dan X

C.2.1 Reaktor Tunggal Skala Pilot

Jam ke-	Faktor Pegenceran	OD_{600}	N_{sel}	X
0	1	0.217	992116	0.707705467
4	1	0.226	1034587	0.738001267
8	1	0.233	1066047	0.7604426
13	1	0.259	1187168	0.846841733
16	1	0.296	1361771	0.971391133
21	2	0.182	1681090	1.199170667
24	2	0.186	1725134	1.230588533
28	2	0.206	1910748	1.3629924
32	2	0.227	2108946	1.5043728
36	2	0.231	2146698	1.5313024
40	2	0.235	2187596	1.560476133
44	2	0.246	2288268	1.6322884
48	2	0.250	2326020	1.659218
53	2	0.278	2590284	1.8477252
56	2	0.273	2546240	1.816307333
64	2	0.290	2700394	1.926269867
68	2	0.294	2741292	1.9554436
72	3	0.212	2967804	2.1170212
76	3	0.226	3166002	2.2584016
80	3	0.227	3184878	2.2718664
85	3	0.219	3071622	2.1910776
88	3	0.226	3166002	2.2584016
92	3	0.221	3095217	2.2079086
96	3	0.227	3184878	2.2718664
104	3	0.223	3128250	2.231472
108	3	0.235	3293415	2.349289
112	3	0.238	3340605	2.382951
116	3	0.233	3260382	2.3257256
124	3	0.236	3302853	2.3560214

(lanjutan)

C.2.2 Reaktor Seri Skala Pilot

Jam ke-	Pengenceran			OD ₆₀₀			N _{sel} (sel/cm ³)			X (g/dm ³)		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
0	2	2	2	0.237	0.244	0.183	2172992	2235912	1657048	1.550	1.595	1.182
4	2	2	2	0.253	0.266	0.188	2317708	2440402	1710530	1.653	1.741	1.220
8	2	2	2	0.264	0.294	0.176	2424672	2704666	1594128	1.730	1.929	1.137
12	2	2	2	0.275	0.272	0.195	2525344	2503322	1773450	1.801	1.786	1.265
16	2	2	2	0.297	0.293	0.207	2736126	2701520	1883560	1.952	1.927	1.344
21	3	3	2	0.214	0.228	0.238	2933877	3122637	2176138	2.093	2.227	1.552
25	3	3	2	0.210	0.222	0.223	2872530	3047133	2037714	2.049	2.174	1.454
28	3	3	2	0.223	0.227	0.230	3056571	3117918	2106926	2.180	2.224	1.503
32	3	3	2	0.245	0.251	0.260	3372744	3448248	2390066	2.406	2.460	1.705
36	3	3	2	0.260	0.264	0.270	3585099	3641727	2478154	2.557	2.598	1.768
41	3	3	2	0.276	0.268	0.272	3811611	3698355	2497030	2.719	2.638	1.781
44	3	3	2	0.277	0.275	0.255	3816330	3788016	2339730	2.722	2.702	1.669
48	3	3	2	0.301	0.275	0.271	4165536	3797454	2493884	2.971	2.709	1.779
52	4	3	2	0.232	0.288	0.251	4251604	3981495	2305124	3.033	2.840	1.644
56	4	4	2	0.253	0.235	0.275	4648000	4295648	2528490	3.316	3.064	1.804
60	4	4	2	0.274	0.214	0.298	5038104	3911836	2745564	3.594	2.790	1.958
65	4	3	2	0.279	0.280	0.297	5126192	3863520	2732980	3.657	2.756	1.950
69	4	3	2	0.283	0.299	0.297	5201696	4127784	2732980	3.711	2.944	1.950
76	4	3	2	0.287	0.260	0.225	5283492	3575661	2053444	3.769	2.551	1.465
81	5	3	2	0.248	0.235	0.184	5684160	3231174	1672778	4.055	2.305	1.193
84	5	4	2	0.254	0.235	0.233	5825730	4295648	2135240	4.156	3.064	1.523
89	5	4	2	0.242	0.205	0.174	5542590	3741952	1578398	3.954	2.669	1.126
92	5	4	2	0.264	0.203	0.199	6069545	3704200	1808056	4.330	2.642	1.290
96	5	3	2	0.271	0.237	0.185	6234710	3254769	1675924	4.447	2.322	1.195
100	5	3	2	0.265	0.212	0.167	6085275	2900844	1509186	4.341	2.069	1.077
104	5	2	2	0.264	0.281	0.175	6053815	2585118	1581544	4.318	1.844	1.128

C.2.3 Reaktor Seri Skala Lab

Jam	OD _{680 nm}			Pengen ceran	N sel (sel/cm ³)			X (g/dm ³)		
	1	2	3		1	2	3	1	2	3
0	0.263	0.263	0.263	1	1072620	1072620	1072620	0.8051	0.8051	0.8051
4	0.228	0.217	0.219	2	1935240	1869240	1881240	1.4525	1.4030	1.4120
8	0.354	0.332	0.329	2	2691240	2559240	2541240	2.0202	1.9211	1.9075
12	0.287	0.271	0.260	3	3433860	3289860	3190860	2.5775	2.4694	2.3951
16	0.362	0.348	0.312	3	4108860	3982860	3658860	3.0843	2.9897	2.7464
20	0.339	0.306	0.293	4	5202480	4806480	4650480	3.9052	3.6079	3.4907
24	0.339	0.281	0.274	5	6503100	5633100	5528100	4.8815	4.2283	4.1494
28	0.353	0.293	0.288	6	8055720	6975720	6885720	6.0470	5.2361	5.1685
32	0.378	0.335	0.306	7	9923340	9020340	8411340	7.4490	6.7710	6.3138
36	0.395	0.330	0.312	8	11748960	10188960	9756960	8.8195	7.6482	7.3238
40	0.344	0.297	0.302	10	13156200	11746200	11896200	9.8756	8.8169	8.9296
44	0.345	0.313	0.323	12	15823440	14671440	15031440	11.8778	11.0128	11.2831
48	0.318	0.281	0.292	15	18564300	16899300	17394300	13.9349	12.6848	13.0565
52	0.262	0.235	0.254	20	21392400	19772400	20912400	16.0571	14.8408	15.6967
56	0.238	0.219	0.232	23	22945260	21634260	22531260	17.2223	16.2379	16.9114
60	0.255	0.216	0.227	24	25166880	22358880	23150880	18.8901	16.7818	17.3764
64	0.255	0.222	0.238	26	27264120	24690120	25938120	20.4643	18.5316	19.4687
68	0.260	0.231	0.245	26	27654120	25392120	26484120	20.7571	19.0587	19.8786
72	0.263	0.242	0.251	26	27888120	26250120	26952120	20.9328	19.7029	20.2300
76	0.274	0.240	0.248	26	28746120	26094120	26718120	21.5770	19.5858	20.0543
80	0.271	0.235	0.235	26	28512120	25704120	25704120	21.4013	19.2930	19.2930
100	0.265	0.242	0.225	25	26965500	25240500	23965500	20.2403	18.9451	17.9878

C.3 Penurunan Persamaan Laju Pertumbuhan Spesifik (μ)

Berdasarkan persamaan Monod, dapat diturunkan persamaan sebagai berikut:

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

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

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

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

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

C.4 Hasil Pengolahan Data μ

C.4.1 Reaktor Tunggal Skala Pilot

Jam ke-	μ_x	Jam ke-	μ_x
0	0	64	0.015646
4	0.010479	68	0.014946
8	0.008984	72	0.015219
13	0.013807	76	0.015268
16	0.019794	80	0.014579
21	0.025112	85	0.013296
24	0.023051	88	0.013186
28	0.023407	92	0.012367
32	0.023566	96	0.012149
36	0.02144	104	0.011042
40	0.019768	108	0.01111
44	0.018993	112	0.01084
48	0.017752	116	0.010257
53	0.018107	124	0.009699
56	0.016831		

C.4.2 Reaktor Seri Skala Pilot

Jam ke-	μ			Jam ke-	μ		
	R1	R2	R3		R1	R2	R3
0	0.022827	0.023482	0.015415	52	0.016829	0.015993	0.009933
4	0.022121	0.023313	0.014628	56	0.017072	0.016126	0.010519
8	0.021088	0.023541	0.011557	60	0.017203	0.014444	0.010947
12	0.020139	0.019812	0.012870	65	0.016509	0.013589	0.010348
16	0.020131	0.019751	0.013045	69	0.016010	0.013704	0.009946
21	0.019570	0.020590	0.014484	76	0.015133	0.011526	0.006714
25	0.017885	0.018779	0.012388	81	0.015110	0.010144	0.004640
28	0.018021	0.018241	0.012328	84	0.014935	0.012300	0.006590
32	0.018420	0.018661	0.013491	89	0.013923	0.010678	0.003866
36	0.018240	0.018374	0.013237	92	0.014312	0.010343	0.004852
41	0.017841	0.017355	0.012456	96	0.014078	0.009030	0.004119
44	0.017171	0.016995	0.011142	100	0.013477	0.007901	0.003214
48	0.017401	0.016196	0.011377	104	0.013049	0.006837	0.003460

D.1 Contoh Pengolahan Data

Nilai pH yang diperoleh dari penelitian ini digunakan untuk menentukan konsentrasi ion HCO_3^- dengan menggunakan persamaan:

$$[\text{HCO}_3^-] = \left(\frac{K_{\text{CO}_2,0}}{H_{\text{CO}_2,0}} \right) \left(\frac{y_{\text{CO}_2} \cdot P_T}{10^{-\text{pH}}} \right) \left(\frac{\text{EXP} \left[A_k \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_k \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + C_k \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]}{\text{EXP} \left[A_h \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_h \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + C_h \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]} \right)$$

dengan:

$$P_T = 1 \text{ atm} = 101.25 \text{ kPa}$$

$$y_{\text{CO}_2} = 5\% = 0.05$$

$$K_{\text{CO}_2,0} = 4.38 \times 10^{-7}$$

$$H_{\text{CO}_2,0} = 2900 \frac{\text{kPa} \cdot \text{kg}}{\text{mol}}$$

$$T = 29^\circ\text{C} = 302 \text{ K}$$

$$T_0 = 298.15 \text{ K}$$

Konstanta-konstanta aktivitas gas CO_2 :

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

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

Contoh: Nilai $[\text{HCO}_3^-]$ untuk pencahayaan alterasi pada Reaktor 1 rangkaian seri skala pilot pada jam ke-0 di mana $\text{pH} = 6.47$ dapat diketahui dengan memasukkan nilai tersebut ke dalam persamaan di atas sehingga diperoleh:

$$[\text{HCO}_3^-] = \left(\frac{4.38 \times 10^{-7}}{2900} \right) \left(\frac{0.05}{10^{-6.47}} \right) \left(\frac{\text{EXP} \left[40.557 \left(1 - \frac{298.15}{302} \right) - 36.782 \ln \left(\frac{302}{298.15} \right) + 0 \right]}{\text{EXP} \left[22.771 \left(1 - \frac{298.15}{302} \right) - 11.452 \ln \left(\frac{302}{298.15} \right) - 3.117 \left(\frac{298.15}{302} - 1 \right) \right]} \right)$$

$$[\text{HCO}_3^-] = 0.000321$$

D.2 Hasil Pengolahan Data

D.2.1 Reaktor Tunggal Skala Pilot

Jam ke-	[HCO ₃ ⁻]	Jam ke-	[HCO ₃ ⁻]
0	0.001468	64	0.000273
4	0.000395	68	0.000395
8	0.000414	72	0.000414
13	0.000293	76	0.000194
16	0.000314	80	0.000433
21	0.000360	85	0.000238
24	0.000293	88	0.000244
28	0.000255	92	0.002998
32	0.000352	96	0.000404
36	0.000293	104	0.000521
40	0.000336	108	0.000194
44	0.000233	112	0.000173
48	0.000249	116	0.000128
53	0.000300	124	0.000134
56	0.000314		

D.2.2 Reaktor Seri Skala Pilot

Jam ke-	[HCO ₃ ⁻]			Jam ke-	[HCO ₃ ⁻]		
	R1	R2	R3		R1	R2	R3
0	0.000321	0.000261	0.000244	52	0.000267	0.000300	0.000255
4	0.000267	0.000233	0.000198	56	0.000128	0.000307	0.000134
8	0.000217	0.000217	0.000203	60	0.000424	0.000598	0.000360
12	0.000173	0.000181	0.000161	65	0.000404	0.000344	0.000314
16	0.000222	0.000233	0.000207	69	0.000571	0.000612	0.000521
21	0.000329	0.000344	0.000307	76	0.000454	0.000521	0.000486
25	0.000314	0.000293	0.000300	81	0.000307	0.000300	0.000244
28	0.000509	0.000687	0.000377	84	0.000300	0.000336	0.000300
32	0.000486	0.000414	0.000314	89	0.000307	0.000300	0.000286
36	0.000395	0.000344	0.000280	92	0.000464	0.000509	0.000464
41	0.000314	0.000360	0.000293	96	0.000571	0.000612	0.000509
44	0.000300	0.000273	0.000244	100	0.000671	0.000626	0.000521
48	0.000464	0.000454	0.000546	104	0.000753	0.000656	0.000558

Data intensitas cahaya digunakan untuk menentukan besarnya energi yang digunakan di dalam proses fotosintesis oleh *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Besarnya energi ini dapat dinyatakan dalam persamaan :

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

Dengan: $I_t = I_b \cdot \alpha_{kaca}$

E.1 Reaktor Tunggal Skala Pilot

$$\alpha_{kaca} = 0.685$$

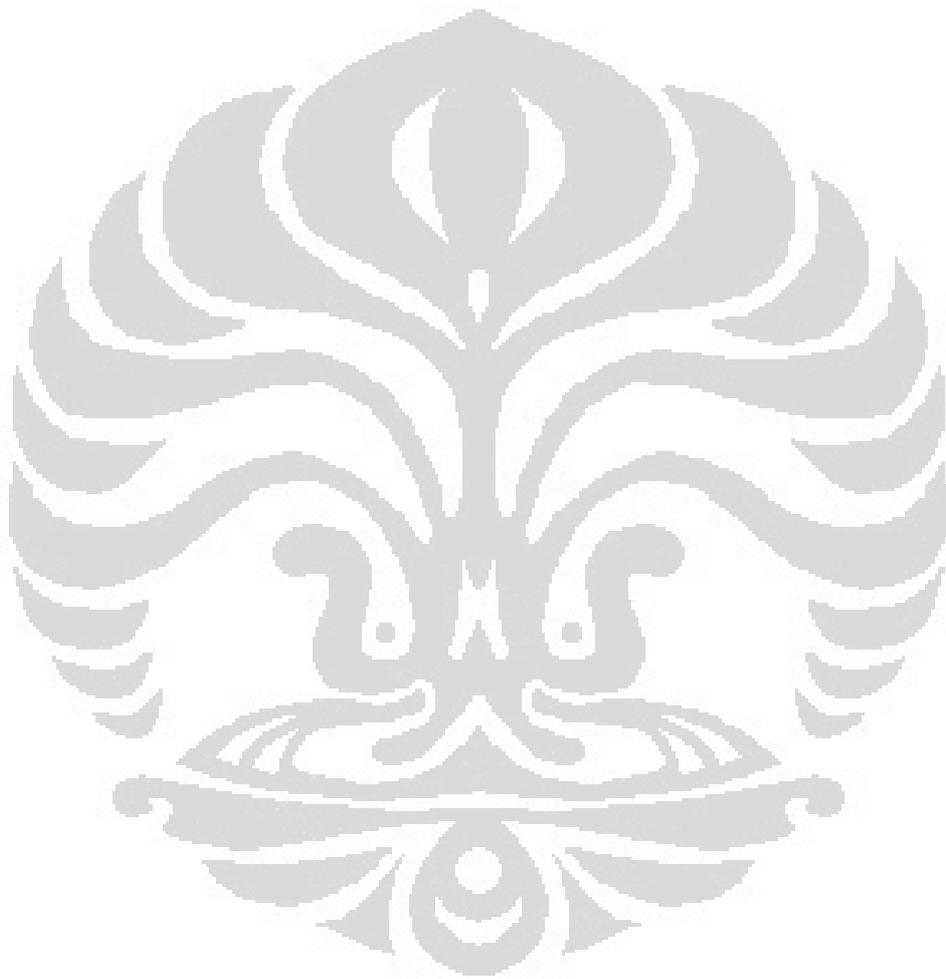
Jam ke-	Ib	s	It	Ex
0	984.33	27	1436.98	0.000000
4	967.33	27	1412.17	0.000374
8	863.33	27	1260.34	0.000668
13	846.33	27	1235.52	0.001065
16	798.00	27	1164.96	0.001236
21	876.67	26	1279.81	0.001850
24	841.00	27.5	1227.74	0.001918
28	750.33	28.5	1095.38	0.001926
32	748.67	26	1092.94	0.002407
36	691.00	25	1008.76	0.002600
40	643.67	24	939.66	0.002803
44	613.67	24	895.86	0.002939
48	576.67	24	841.85	0.003013
53	608.67	20	888.56	0.004214
56	616.33	18	899.76	0.005010
64	543.67	18	793.67	0.005050
68	518.00	18	756.20	0.005113
72	504.00	18.5	735.77	0.005125
76	511.33	18.5	746.47	0.005488
80	555.67	18.5	811.19	0.006278
85	517.33	16.5	755.23	0.006963
88	524.33	16.5	765.45	0.007306
92	512.67	16.5	748.42	0.007468
96	519.67	16.5	758.64	0.007900
104	551.00	16.5	804.38	0.009074
108	502.67	16.5	733.82	0.008596
112	495.67	16.5	723.60	0.008791
116	541.00	16.5	789.78	0.009937
124	474.33	16.5	692.46	0.009313
Jumlah				0.134426

E.2 Reaktor Seri Skala Pilot

α_{kaca} Reaktor 1 = 0.803 α_{kaca} Reaktor 2 = 0.809 α_{kaca} Reaktor 3 = 0.809

Jam ke-	I_b (lux)			s (cm)			I_t (lux)			Ex (J/g)		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
0	533.67	452.67	752.33	23.5	22.5	25	664.59	559.54	929.95	0.000829	0.002981	0.010806
4	525.67	404.67	781.33	21	20	21.5	654.63	500.21	965.80	0.001022	0.003351	0.014584
8	436.67	311.67	688.33	21	20	21.5	543.79	385.25	850.84	0.000938	0.002852	0.014201
12	403.33	272.67	662.33	20	18	21.5	502.28	337.04	818.71	0.000997	0.003037	0.014966
16	377.33	252.33	644.67	19	18	21	469.90	311.91	796.87	0.001067	0.003055	0.016210
21	328.33	221.33	549.00	18	17.5	20.5	408.88	273.59	678.62	0.001078	0.003031	0.015556
25	386.67	193.33	619.33	15.5	15	20	481.53	238.98	765.55	0.001581	0.003314	0.019295
28	319.67	195.67	576.33	15.5	15	20	398.09	241.86	712.40	0.001374	0.003525	0.018869
32	289.33	177.67	579.67	15.5	15	19.5	360.32	219.61	716.52	0.001323	0.003407	0.020720
36	258.67	170.00	560.67	15.5	15	19.5	322.13	210.14	693.04	0.001255	0.003457	0.021256
41	222.33	168.67	511.67	15.5	15	19.5	276.88	208.49	632.47	0.001156	0.003675	0.020783
44	196.67	144.67	598.00	15.5	15	19.5	244.91	178.82	739.18	0.001063	0.003278	0.025262
48	173.67	135.33	544.00	15.5	15	19.5	216.27	167.28	672.44	0.000987	0.003224	0.024159
52	149.67	127.00	523.00	14	14	17.5	186.38	156.98	646.48	0.000988	0.003400	0.027144
56	151.67	138.33	516.00	14	14	17.5	188.88	170.99	637.82	0.001047	0.003875	0.028026
60	129.33	144.33	493.33	14	14	17.5	161.06	178.41	609.81	0.000933	0.004223	0.027986
65	121.00	156.67	433.33	14	14	17.5	150.68	193.65	535.64	0.000919	0.004828	0.025890
69	107.67	118.33	429.00	14	14	17.5	134.08	146.27	530.28	0.000851	0.003794	0.026666
76	87.67	119.33	448.00	14	14	17.5	109.17	147.51	553.77	0.000740	0.004086	0.029740
81	80.67	119.67	429.67	14	14	17.5	100.46	147.92	531.11	0.000712	0.004284	0.029819
84	81.33	92.00	664.00	14	15	22.5	101.29	113.72	820.77	0.000736	0.003154	0.036777
89	76.67	88.33	658.67	14	15	22.5	95.48	109.19	814.17	0.000724	0.003157	0.038027
92	55.00	72.67	646.33	14	15	22.5	68.49	89.82	798.93	0.000532	0.002660	0.038225
96	62.00	164.00	707.00	13	14.5	21	77.21	202.72	873.92	0.000666	0.006408	0.046222
100	63.00	85.00	875.67	12	14.5	21	78.46	105.07	1082.41	0.000756	0.003423	0.059010
104	62.33	270.00	872.33	12	14.5	21	77.63	333.75	1078.29	0.000770	0.011198	0.060541

(lanjutan)



Universitas Indonesia