

**PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* BUITENZORG
DENGAN FILTRASI ALIRAN SIRKULASI MEDIUM KULTUR PADA
PENCAHAYAAN ALTERASI**

SKRIPSI

Oleh

Ahmed Syarif

0404060047



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

**PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* BUITENZORG
DENGAN FILTRASI ALIRAN SIRKULASI MEDIUM KULTUR PADA
PENCAHAYAAN ALTERASI DALAM**

SKRIPSI

Oleh

Ahmed Syarif

0404060047

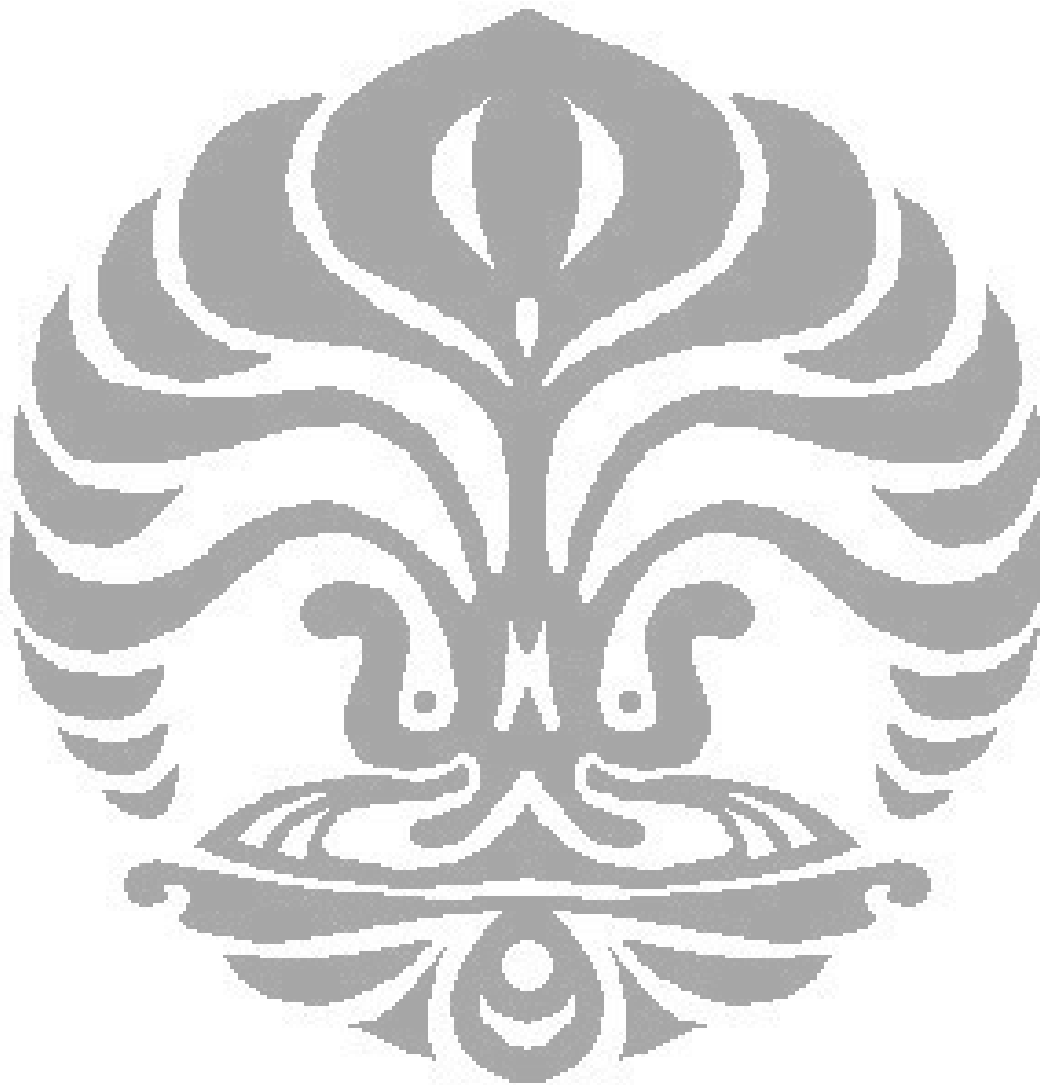


**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

GENAP 2007/2008

2



PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

**PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* BUITENZORG DENGAN
FILTRASI ALIRAN SIRKULASI MEDIUM KULTUR PADA PENCAHAYAAN ALTERASI**

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

Depok, 26 Juni 2008

(Ahmed Syarif)

NPM. 0404060047

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

**PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* BUITENZORG DENGAN
FILTRASI ALIRAN SIRKULASI MEDIUM KULTUR PADA PENCAHAYAAN ALTERASI**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 7 Juli 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 14 Juli 2008

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Dianursanti, MT

Dr.Ir.Anondho Wijanarko, M.Eng

NIP 132 165 710

NIP 132 058 695

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil alamin. Segala puji hanya milik Allah SWT. yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunianya kepada hamba-Nya sehingga dapat terselesaikannya skripsi ini tepat pada waktunya. Shalawat dan dalam semoga tetap tercurah kepada Rasulullah saw. atas segala bimbingan dan petunjuknya. Shalawat dan salam semoga juga terurah kepada keluarga, dan para sahabatnya hingga akhir zaman.

Skripsi ini disusun berdasarkan salah satu persyaratan untuk menjadi seorang Sarjana Teknik Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Demikian skripsi ini saya susun, semoga dapat bermanfaat bagi saya pribadi dan pembaca. Saran dan kritik yang membangun sangat berguna dalam perbaikan skripsi ini kedepannya.

Depok, 26 Juni 2008

Ahmed Syarif

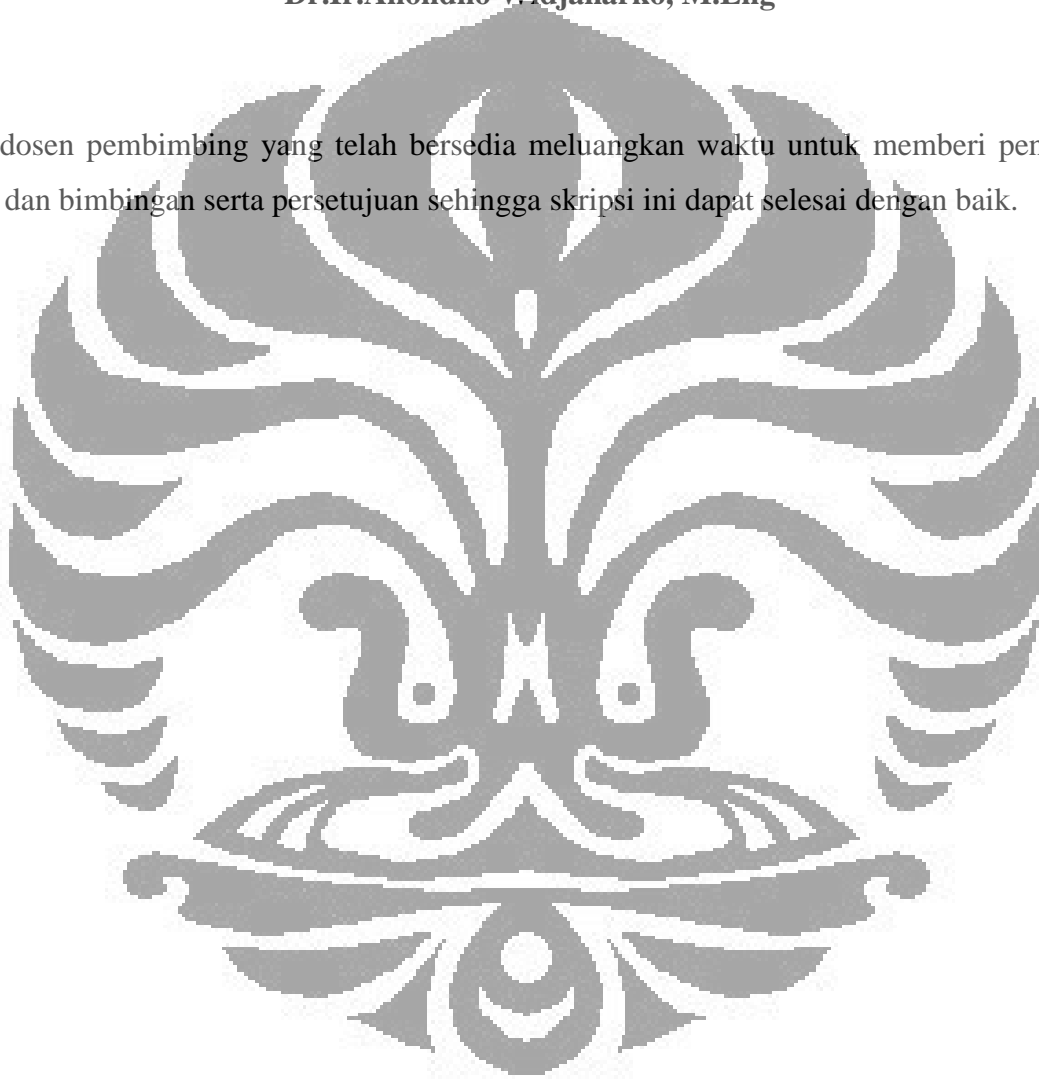
UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Ir. Dianursanti, MT.

Dr.Ir.Anondho Widjanarko, M.Eng

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



Ahmed Syarif	Dosen Pembimbing
NPM 0404060047	I. Ir.Dianursanti,MT.
Departemen Teknik Kimia	II. Dr.Ir.Anondho Widjanarko,M.Eng
PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA <i>Chlorella vulgaris</i> BUITENZORG DENGAN PERLAKUAN ALIRAN SIRKULASI MEDIUM KULTUR PADA PENCAHAYAAN ALTERASI	
ABSTRAK	
<p>Permasalahan pangan menjadi isu yang penting belakangan ini. Rendahnya nutrisi yang dikonsumsi oleh sebagian penduduk menyebabkan banyaknya terjangkit penyakit. Salah satu zat makanan yang bersumber dari alam serta sarat akan nutrisi berasal dari ganggang hijau <i>Chlorella vulgaris</i>. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan <i>Chlorella vulgaris</i> mengandung vitamin A (betakaroten), protein (diatas 53%), dan CGF (<i>Chlorella Growth Factor</i>). Dengan meningkatkan jumlah biomassa <i>Chlorella Vulgaris</i> ini diharapkan akan menghasilkan sumber pangan alternatif yang kaya akan nutrisi.</p> <p>Pada penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya telah didapatkan bahwa pengembangan <i>Chlorella Vulgaris</i> dengan pencahayaan alterasi akan menghasilkan biomassa yang lebih banyak jika dibandingkan dengan pencahayaan lainnya. Saat kepadatan dalam fotobioreaktor meningkat maka akan terjadi penutupan intensitas cahaya oleh sel-sel yang ada di bagian depan (efek shading). Hal ini menyebabkan tidak meratanya jumlah intensitas cahaya yang diterima oleh sel. Sel yang kekurangan cahaya akan mengalami kematian. Maka perlu dilakukannya peningkatan intensitas cahaya yang disesuaikan dengan banyaknya sel dalam fotobioreaktor. Efek penutupan cahaya ini juga dapat ditanggulangi dengan pengurangan kepadatan sel dalam fotobioreaktor melalui proses filtrasi yang dilakukan secara periodik.</p> <p>Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan didapatkan bahwa penggunaan pencahayaan alterasi dan penggunaan filter pada fotobioreaktor dapat meningkatkan perolehan biomassa sebesar 1,26 kali lebih baik dari pada pencahayaan alterasi tanpa proses filtrasi dan 1,35 kali lebih baik jika dibandingkan dengan proses filtrasi dengan pencahayaan kontinu. Proses alterasi yang dilengkapi dengan filtrasi ini juga mampu meningkatkan efisiensi energi hingga mencapai 3,772% sedangkan proses filtrasi dengan pencahayaan kontinu hanya memiliki efisiensi energi sebesar 0,762%.</p>	
Kata kunci :<i>Chlorella Vulgaris</i>, Alterasi, Perlakuan Filtrasi	

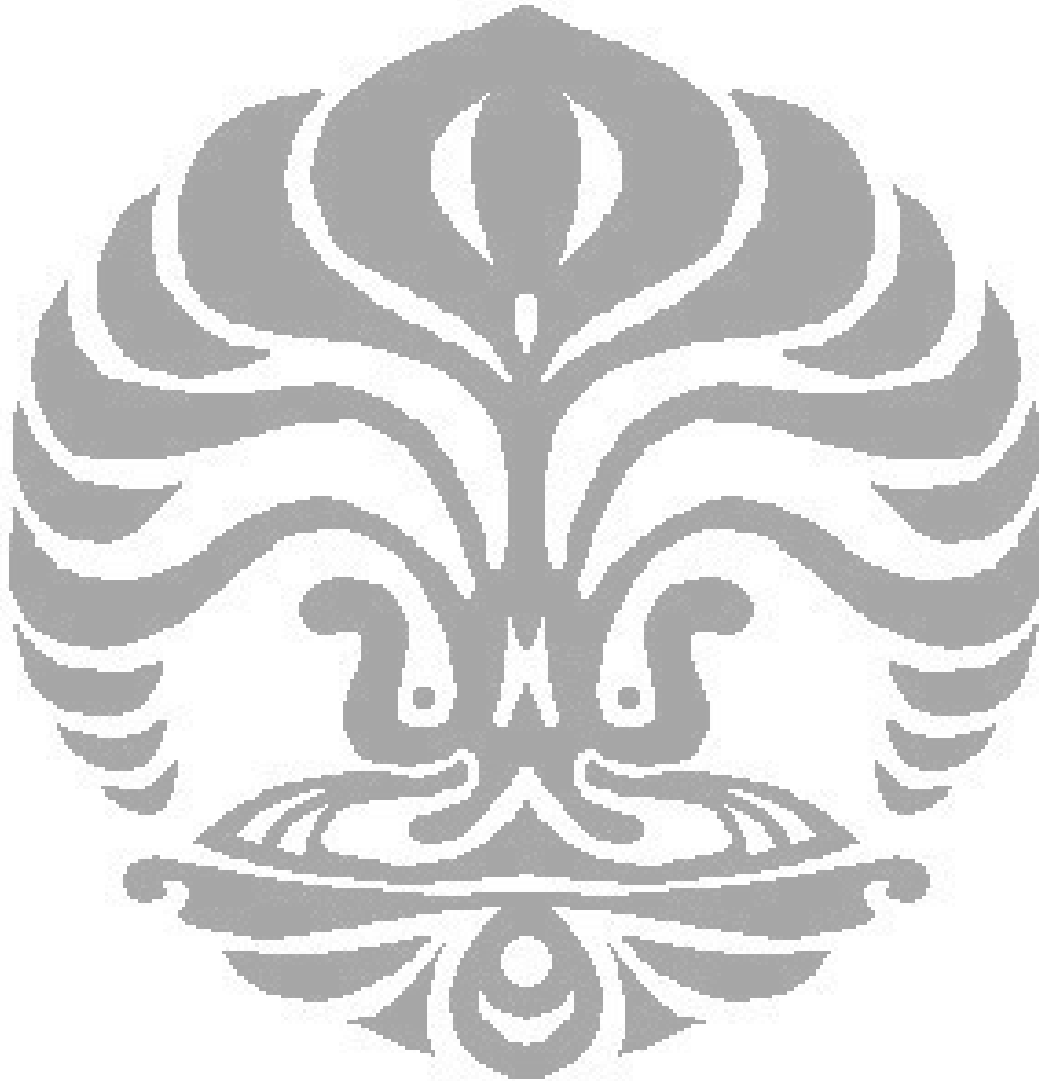
Ahmed Syarif	Counsellor
NPM 0404060047	I. Ir.Dianursanti,MT.
Chemical Engineering Department	II. Dr.Ir.Anondho Widjanarko,M.Eng
Increasing the Biomass <i>Chlorella Vulgaris</i> Buitenzorg Production With Filtration Circulating Media By Alteration Lightening in Bubble Fotobioreactor Mid.Scale.	
ABSTRACT	
<p>Now a day, problem that related with food to be vary important. Low nutrition consumption with some people makes them infected by some disease. <i>Chlorella vulgaris</i> is one of chlorophyta that can supply us some nutrition like vitamin A (betakaroten), protein, and CGF (Chlorella Growth Factor). With increasing the production of biomass, it hopeful will be prepared the high nutrition food for us.</p> <p>In previous research, we know that increasing <i>Chlorella vulgaris</i> Production by alteration lightening would be more effective than continue lightening. When the concentration in fotobioreactor increases, it will cause the shading effect. Based from that, we need to increase the light intensity in line with the number of cell in fotobioreactor. This shading effect also can be solved by decreasing the concentration of cell with filtrate the cell periodically.</p> <p>In this research we get that alteration lightening with filtration treatment in fotobioreactor can increase the production of cell more effective 26% than the only alteration lightening. And more effective 35% than the continue lightening with filtration treatment. This process is also have the highest efficiency (3.722%) if we compare with continue lightening (0.672%).</p>	
Keywords : <i>Chlorella Vulgaris</i>, Alteration, Filtration	

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	4
KATA PENGANTAR	5
Depok, 26 Juni 2008	6
UCAPAN TERIMA KASIH	7
DAFTAR ISI.....	10
DAFTAR LAMPIRAN.....	13
DAFTAR LAMPIRAN.....	13
DAFTAR GAMBAR.....	14
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH.....	1
1.2 RUMUSAN MASALAH.....	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	4
1.4 LATAR BELAKANG MASALAH.....	4
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 MIKROALGA <i>CHLORELLA VULGARIS</i>	6
2.1.1 Taksonomi.....	7
2.1.2 Morfologi.....	7
2.1.3 Fase Pertumbuhan <i>Chlorella Vulgaris</i>	9
2.1.4 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pertumbuhan <i>Chlorella Vulgaris</i>	10
2.1.5 Biomassa <i>Chlorella Vulgaris</i>	12
2.2 PROSES FOTOSINTESIS	12
2.2.1 Gambaran Umum Proses.....	12
2.2.2 Mekanisme Reaksi.....	13
2.2.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Proses Fotosintesis	15

2.3	FOTOBIOREAKTOR	17
2.3.1	Fotobioreaktor Kolom Gelembung.....	17
2.3.2	Jenis-Jenis Fotobioreaktor Kolom Gelembung	18
2.3.3	Kinetika Pertumbuhan Dan Penyerapan Substrat.....	19
2.4	PENCAHAYAAN	20
2.4.1	Jenis-Jenis Pencahayaan	20
2.4.2	Pencahayaan Alterasi.....	21
BAB III METODE PENELITIAN		22
3.1	DIAGRAM ALIR PENELITIAN	22
3.2	ALAT DAN BAHAN	22
3.2.1	Alat Penelitian	23
3.2.2	Bahan Penelitian	24
3.3	VARIABEL PENELITIAN	24
3.3.1	Variabel Bebas.....	24
3.3.2	Variabel Terikat.....	24
3.4	PROSEDUR PENELITIAN.....	24
3.4.1	Persiapan Peralatan Medium	25
3.4.2	Pembiakan Kultur <i>Chlorella Vulgaris</i> Dalam Medium Benneck	26
3.4.3	Penentuan Jumlah Innokulum	26
3.4.4	Alterasi Intensitas Cahaya	26
3.4.5	Pengambilan Data.....	27
3.4.6	Pengolahan Data Penelitian	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		31
4.1	PEMBAHASAN UMUM	34
4.2	DATA PENELITIAN	34

4.3	PENGARUH FILTER PADA PERTUMBUHAN SEL.....	38
4.4	PENGARUH PENGGUNAAN FILTER TERHADAP KONSUMSI ENERGI CAHAYA YANG DIGUNAKAN.....	40
BAB V		45
KESIMPULAN.....		46
DAFTAR PUSTAKA		47



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A.....	47
HASIL PEROLEHAN DATA.....	47
LAMPIRAN B.....	52
PENGOLAHAN DATA OD ₆₀₀	52
B.1. Pengolahan Data X dan N Sel Reaktor.....	52
B.2. Pengolahan Data X dan N Sel Filtrat.....	52
B.3. Penurunan Persamaan Laju Pertumbuhan Spesifik.....	53
LAMPIRAN C.....	54
PENGOLAHAN DATA pH.....	54
C.1. Contoh Pengolahan Data.....	54
C.2. Hasil Pengolahan Data.....	55
LAMPIRAN D.....	57
PENGOLAHAN DATA I.....	57
D.1. Pengukuran α Kaca.....	57
D.2. Pengolahan Data I.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Kenaikan temperature di permukaan bumi akibat pemanasan global.....	1
Gambar 2. 1. Bentuk sel <i>Clorella vulgaris</i>	6
Gambar 2. 2 Morfologi sel	7
Gambar 2. 3 Mitokondria.....	8
Gambar 2. 4 Fasa pertumbuhan <i>Chlorella Vulgaris</i>	9
Gambar 2. 5 Sklus Calvin.....	14
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	23
Gambar 3. 2 Gambar rangkaian sistem fotobioreaktor filter	26
Gambar 4. 1 Hubungan berat kering dan laju pertumbuhan spesifik dengan waktu.....	36
Gambar 4. 2 Konsententrasi HCO_3^- selama masa kultivasi.....	36
Gambar 4. 3 I yang diterima sel dan I yang ditransmisikan dari bagian belakang reaktor.....	37
Gambar 4. 5 Perbandingan pertumbuhan berat kering sel antara kontinu dan alterasi dengan keduanya menggunakan sistem FILTRASI aliran media.....	37
Tabel 4. 2 Perbandingan sistem filtrasi antara pencahayaan kontinu dan alterasi.....	40
Gambar 4. 7 Intensitas pada alterasi, kontinu-filtrasi, dan alterasi-filtrasi	40

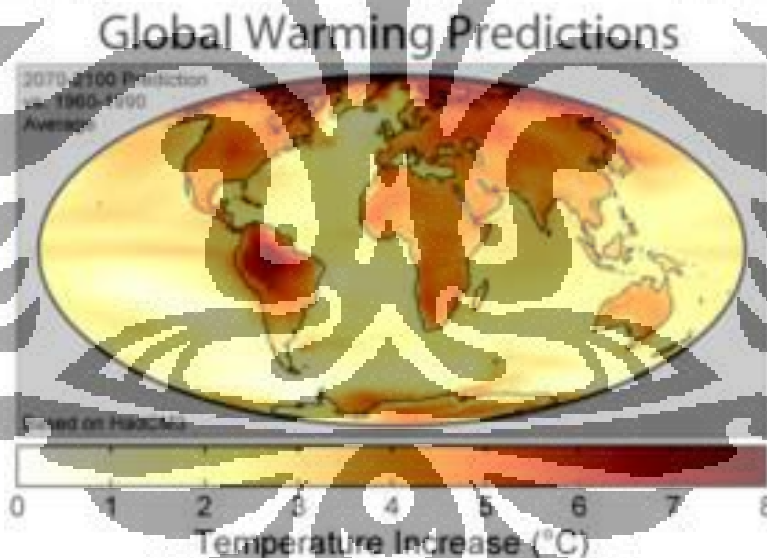
BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Salah satu permasalahan lingkungan yang paling mengawatirkan adalah efek pemanasan global dan permasalahan pangan yang disebabkan oleh rendahnya nilai gizi yang dikonsumsi. Pemanasan global adalah suatu efek peningkatan suhu bumi akibat meningkatnya gas rumah kaca di udara. Salah satu yang termasuk gas rumah kaca adalah karbon dioksida (CO_2). Meningkatnya CO_2 di udara sebagian besar disebabkan oleh emisi kendaraan bermotor, industri, dan sebagainya. Permasalahan ini diperparah oleh penebangan berhektar-hektar hutan yang menjadi paru-paru dunia seperti Kalimantan. Maka akan menjadi semakin sedikit pula proses fiksasi CO_2 yang dilakukan oleh tumbuhan (dalam hal ini tumbuhan tingkat tinggi).

Meningkatnya suhu bumi akibat pemanasan global di permukaan bumi dapat diilustrasikan lewat gambar berikut.



Gambar 1. 1 Kenaikan temperatur di permukaan bumi akibat pemanasan global (www.wikipedia.com, Mei 2007)

Dapat dilihat dari gambar di atas, peningkatan suhu bumi terletak di daerah Kutub Utara, Kutub Selatan, dan sebagian daerah katulistiwa. Hal inilah yang menyebabkan pencairan es di daerah kutub yang selanjutnya mengakibatkan kenaikan permukaan air laut.

Permasalahan berikutnya yang sedang kita hadapi adalah gizi buruk yang dikonsumsi oleh sebagian masyarakat Indonesia. Rendahnya gizi tersebut membuat banyaknya terjangkit berbagai penyakit. Rendahnya konsumsi gizi ini ditunjang juga oleh makin sedikitnya lahan yang dapat digunakan dalam penyediaan tanaman pangan. Saat kondisi ini terjadi maka diperlukanlah bahan pangan yang tidak membutuhkan banyak lahan dalam penyediannya.

Berbagai upaya telah dilakukan untuk menanggulangi masalah ini. Salah satu diantaranya adalah pengembangan dalam bidang bioteknologi, yaitu pemanfaatan mikroalga. Mikroalga adalah makhluk hidup uniseluler yang bersifat fotoautotrof. Karena sifatnya yang demikian, maka mikroalga juga dapat melakukan proses fotosintesis yang melibatkan gas CO₂. Selain CO₂, proses fotosintesis ini juga membutuhkan sinar matahari sebagai sumber cahaya utama. Proses fotosintesis ini selanjutnya mengubah CO₂ menjadi O₂ dan bahan makanan yang dibutuhkan oleh manusia. Hal ini dapat terjadi karena mikroalga memiliki klorofil yang merupakan syarat terjadinya proses fotosintesis. Proses fotosintesis inilah yang kemudian digunakan dalam proses perkembangbiakan mikroalga tersebut. Keistimewaan ini menempatkan mikroalga sebagai salah satu alternatif yang mampu mengurangi konsentrasi CO₂ di udara melalui proses fotosintesis.

Salah satu contoh mikroalga yang sering dibudidayakan untuk sumber pangan alternatif adalah *Chlorella sp.*. Mikroalga ini termasuk jenis *chlorophyta* (alga hijau), yaitu jenis alga berwarna hijau akibat kandungan klorofil di dalamnya. *Chlorella sp.* memiliki kandungan klorofil yang relatif besar jika dibandingkan dengan jenis alga hijau lain, yaitu sebesar 3%. Mikroalga jenis ini merupakan mikroalga bersel tunggal yang banyak diteliti dan diproduksi sebagai penghasil biomassa dalam skala besar.

Selain sebagai alternatif penanggulangan efek pemanasan global, *Chlorella sp.* dapat juga dimanfaatkan dalam hal penyediaan bahan pangan. Hal ini terkait dengan kandungan gizi, lemak, mineral, vitamin, asam amino, dan asam lemaknya yang tinggi. Kandungan gizinya yang tinggi disebabkan oleh kandungan klorofil dinding sel, vitamin A (betakaroten), protein (lebih dari 53%), dan CGF (*Chlorella Growth Factor*). (Surawiria, 2005).

Penelitian terhadap *Chlorella sp.*, terutama dalam bidang kesehatan, telah cukup banyak dilakukan oleh para ilmuwan. Secara umum, konsumsi *Chlorella sp.* diketahui dapat menyembuhkan penyakit kencing manis, jantung koroner, darah tinggi, gangguan ginjal dan

syaraf, dan demam berdarah (Surawiria, 2005). *Chlorella sp.* juga dapat menurunkan kadar kolesterol dan asam urat pada kasus dislipidemia usia lanjut (Sargowo dan Ratnawati, 2002).

Mengingat besarnya manfaat yang dapat diambil dari *Chlorella sp.*, maka alangkah baiknya dilakukan studi tentang pembudidayaan terhadap mikroalga ini agar diperoleh jumlah sel yang maksimal. Di Universitas Indonesia sendiri, khususnya Departemen Teknik Kimia, telah dilakukan beberapa penelitian untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Dan penelitian yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg akan optimum saat pencahayaan yang diberikan dilakukan dengan metode alterasi pencahayaan (Sang Made Krisna, 2005). Pencahayaan alterasi ini adalah pencahayaan dengan peningkatan intensitas cahaya seiring dengan peningkatan jumlah sel (berat kering).

Dari penelitian yang sudah dilakukan di atas didapatkan bahwa peningkatan jumlah sel mikro alga saat digunakan metode alterasi pencahayaan adalah 61 %. Untuk lebih mengoptimalkan pertumbuhan *Chlorella vulgaris* tersebut maka perlu dilakukan variasi terhadap proses perkebang biakan *Chlorella vulgaris* pada fotobioreaktor kolom gelembung dengan pencahayaan alterasi.

Saat mikroalga disinari dengan metode alterasi pencahayaan pada suatu fotobioreiaktor maka jumlah sel semakin lama akan semakin bertambah. Perlu diingat bahwa jumlah CO₂ yang dialirkan pada fotobioreiaktor ini tetap, yang artinya jumlah asupan “makanan” untuk mikroalga ini akan tetap berapapun jumlah selnya. Dari kondisi ini dapat diduga bahwa akan terjadi perebutan CO₂ oleh mikroalga sehingga saat jumlah CO₂ yang difiksasi sedikit maka akan terjadi kematian sejumlah sel yang tidak mendapatkan CO₂.

Setiap sel dari mikroalga membutuhkan intensitas cahaya yang cukup dalam melakukan fotosintesis. Saat jumlah sel amat melimpah, akan ada sebagian sel yang tidak mendapatkan cahaya akibat terhalang oleh sel-sel didepannya. Untuk itulah diperlukan pengurangan sejumlah sel setiap periode tertentu. Hal ini bertujuan untuk mengurangi efek penutupan cahaya (*shading*) pada fotobioreaktor. Untuk tujuan inilah diberikan perlakuan filterasi aliran sirkulasi medium kultur pada *Chlorella vulgaris* tersebut. Saat digunakan filterasi maka setiap waktu tertentu akan dilakukan pemindahan sejumlah sel mikroalga yang tersaring pada filter yang ada. Setelah dilakukan pemindahan sejumlah sel dari fotobiorektor, jumlah sel mikroalga pada fotobioreiaktor tersebut akan berkurang. Pengurangan ini akan mengurangi juga peluang terjadinya perebutan

CO₂. Dengan kondisi ini diharapkan masalah tidak meratanya intensitas cahaya yang diterima sel dapat teratasi sehingga peningkatan jumlah sel akan lebih baik.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Rumusan masalah dari tujuan pelaksanaan penelitian ini dapat diwakili lewat pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Seberapa optimalkah penggunaan sistem filterasi aliran media kultur dalam meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* dengan pencahayaan alterasi?
2. Seberapa besarkah kebutuhan energi untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* jika menggunakan sistem filterasi dengan pencahayaan alterasi?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengkaji pengaruh perlakuan filterasi aliran sirkulasi media kultur terhadap peningkatan produksi biomassa *Chlorella sp.*
2. Menentukan jumlah energi yang ditransmisikan dalam produksi biomassa *Chlorella vulgaris* dengan pencahayaan alterasi skala menengah.

1.4 LATAR BELAKANG MASALAH

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. *Chlorella sp.* yang digunakan pada penelitian ini berasal dari kultur sub balai Perikanan Air Tawar kota Depok.
2. Jenis medium yang digunakan sebagai media hidup *Chlorella sp.* adalah *benneck*.
3. Sistem reactor yang digunakan adalah fotobioreaktor tunggal dengan volume 21,75 L.
4. Konsentrasi gas CO₂ berkisar ±5%.
5. Metode pencahayaan yang digunakan adalah alterasi pencahayaan.
6. Produksi biomassa sebatas peningkatan jumlah sel kering yang diperoleh.

7. U_G yang digunakan sebesar 0.4 SMCF (U_G optimum)
8. Tekanan udara yang ada di dalam reaktor sebesar 1 atm.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut.

BAB 1 PENDAHULUAN

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

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka ini berisi ulasan mengenai *Chlorella vulgaris*, fotobioreaktor, fotosintesis, dan metode pencahayaan.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Pada bab ini berisi tentang diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, variabel, prosedur penelitian, serta metode perhitungan yang digunakan dalam pengolahan data.

BAB 4 PENGOLAHAN DATA

Bab ini menyajikan data-data hasil pengamatan beserta pengolahannya.

BAB 5 KESIMPULAN

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

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 MIKROALGA *Chlorella vulgaris*

Chlorella vulgaris adalah mikroalga yang termasuk kedalam golongan alga hijau (chlorophyta). Bentuk sel *Chlorella vulgaris* bulat, bulat lonjong dengan garis tengah sel antara 2-8 μm . *Chlorella vulgaris* berkembangbiak dengan cara membelah diri dan pembentukan spora. *Chlorella vulgaris* bersifat fotoautotrof, yaitu dapat membentuk makanannya sendiri melalui proses fotosintesis (www.wikipedia.com, Mei 2007)

Chlorella vulgaris memiliki komponen biomassa yang cukup tinggi dengan konsentrasi yang melebihi seluruh tumbuhan fotoautotrof, termasuk tumbuhan tingkat tinggi. *Chlorella vulgaris* adalah mikroalga yang telah hidup semenjak 2,5 miliar tahun yang lalu. Tahannya populasi ini hingga sekarang disebabkan oleh beberapa hal, diantaranya adalah :

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

(Surawiria, 2005)



Gambar 2. 1. Bentuk sel *Chlorella vulgaris*.

Hidup *Chlorella vulgaris* berkoloni di lingkungan yang basah. Beberapa jenisnya juga dapat bersimbiosis dengan jamur membentuk lumut kerak atau hidup diantara hydra. Bentuk *Chlorella vulgaris* dapat dilihat seperti gambar berikut.

2.1.1 Taksonomi

Taksonomi adalah tatanama makhluk hidup berdasarkan tata nama latin. Klasifikasi taksonomi dari *Chlorella vulgaris* adalah sebagai berikut.

Superkingdom : *Eukariota*
Kingdom : *Viridiplantae*
Subkingdom : *Phycobionta*
Filum : *Chlorophyta*
Kelas : *Trebouxiophyceae*
Ordo : *Chlorellales*
Famili : *Chlorellaceae*
Genus : *Chlorella*

2.1.2 Morfologi

Layaknya sebuah sel, *Chlorella vulgaris* memiliki bagian-bagian sel yang memiliki peran dan fungsinya masing-masing. Bagian-bagian dari sel *Chlorella vulgaris* tersebut dijelaskan sebagai berikut.



Gambar 2. 2 Morfologi sel (www.en.wikipedia.com, 4 Juni 2007)

2.1.2.1 Inti Sel

Inti sel adalah bagian terpenting dari sel. Inti sel adalah suatu struktur dengan ukuran yang cukup besar dan dikelilingi oleh sitoplasma. Inti sel juga dilindungi oleh membran.

Peranannya penting dalam hal mengatur seluruh aktivitas sel seperti berfotosintesis dan berkembang biak.

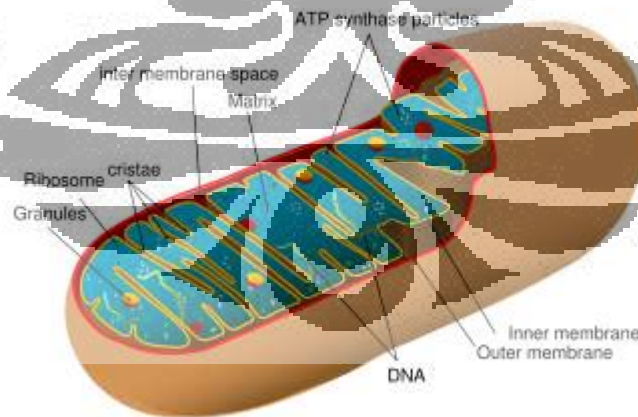
Di dalam inti sel terdapat bagian yang bernama nukleolus. Nukleolus adalah anak inti yang berfungsi mensintesis protein karena ia terdiri dari Ribo Nucleic Acid (RNA). Inti sel juga memiliki jaringan-jaringan halus yang disebut benang kromatin. Benang kromatin ini berfungsi untuk membawa informasi genetik dari sel induk ke sel anak dalam proses reproduksi.

2.1.2.2 Kloroplas

Kloroplas adalah suatu jaringan yang berbentuk cangkir atau lonceng. Kloroplas ini diselubungi oleh membran ganda dan terdiri dari *lamella fotosintetik*. Pada bagian ini merupakan bagian yang cukup penting dalam proses fiksasi CO₂ karena kemampuannya dalam menyerap cahaya yang digunakan dalam reaksi fotosintesis.

2.1.2.3 Mitokondria

Mitokondria berfungsi sebagai pusat pembangkit energi sel dengan menghasilkan ATP sebagai sumber energi. Peranan yang lain dari mitokondria adalah pada proses respirasi sel serta tempat pemecahan molekul protein dan lemak kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana dan selanjutnya digunakan sebagai sumber energi.



Gambar 2. 3 Mitokondria (www.en.wikipedia.org, 27 Mei 2007)

Mitokondria adalah organel sel yang sangat kompleks dan terdiri dari struktur-struktur seperti cerutu. Struktur ini terbentuk dari protein dan lemak yang menjadikan suatu sel stabil dan keras. Mitokondria memiliki dinding berlapis dua dengan dinding bagian dalamnya memiliki banyak lekukan. Lekukan-lekukan ini kemudian berfungsi untuk memperluas permukaan penyerap oksigen pada saat respirasi sel.

2.1.2.4 Dinding Sel

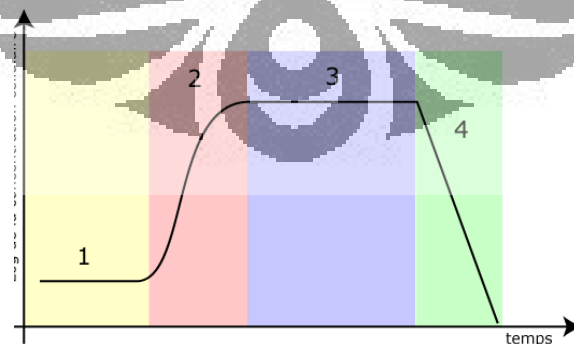
Dinding sel berfungsi sebagai pelindung sel terhadap jaringan-jaringan sel yang ada di dalamnya dari pengaruh bahaya yang datang dari luar sel. Dinding sel ini tersusun oleh *selulosa*, *hemiselulosa*, dan *lignin*. Bagian ini mengandung serat yang dapat dikonsumsi oleh manusia sebagai makanan sehat.

2.1.2.5 Vakuola

Vakuola adalah rongga yang terdapat di dalam sel. Fungsinya sebagai tempat pembuangan (ekskresi) dari zat-zat yang tidak dibutuhkan lagi oleh sel tersebut. Zat-zat yang sudah tidak terpakai ini ditimbun didalam vakuola sehingga ukuran sel semakin lama akan semakin membesar. Timbunan ini kemudian dilepaskan vakuola saat vakuola bergerak ke pinggir sel melalui dinding sel (www.en.wikipedia.org, 27 Mei 2007).

2.1.3 Fase Pertumbuhan *Chlorella Vulgaris*

Dalam pertumbuhan dan perkembangbiakannya, *Chlorella Vulgaris* menjalani empat fase dalam hidupnya. Keempat fase tersebut adalah fase lag, eksponensial, stasioner, dan yang terakhir adalah fase kematian.



Gambar 2. 4 Fasa pertumbuhan *Chlorella vulgaris*

2.1.3.1 Fase Lag

Fase lag adalah fase awal pertumbuhan dari mikroalga setelah mikroalga tersebut telah lama tidak mengalami perkembangbiakan karena pengaruh luar seperti pergantian medium yang menyebabkan mikroalga harus beradaptasi terlebih dahulu. Pada fase ini sel-sel akan kehabisan nutrisi dan tidak dapat melakukan pertumbuhan secara aktif lagi.

Pada fase ini mikroalga membutuhkan sintesis enzim yang menyebabkan tidak terjadinya laju pertumbuhan. Tidak akan terjadi pertumbuhan sel hingga enzim baru yang disintesis telah cukup. Fase ini dapat dikurangi dengan menghindari penggunaan *Chlorella vulgaris* yang berada pada fase stasioner.

2.1.3.2 Fase Eksponensial

Peningkatan jumlah sel cukup besar pada fase ini, dapat dikatakan optimum. Dan pada fase ini sel mengalami pertumbuhan yang stabil. Waktu yang diperlukan mikroalga untuk mencapai dua kali lipatnya bervariasi antara 20 menit hingga beberapa hari.

2.1.3.3 Fase Stasioner

Pertumbuhan jumlah sel sudah tidak terjadi lagi pada fase ini. Dengan kata lain jumlah sel akan tetap pada fase ini. Hal ini disebabkan karena makin menipisnya nutrisi yang menjadi asupan dari mikroalga. Penyebab lainnya adalah karena menumpuknya hasil metabolisme sel di medium yang sifatnya beracun dan akan menyebabkan laju pertumbuhan sel terhenti.

2.1.3.4 Fase Kematian

Pada fase ini mikroalga mengalami kematian yang diakibatkan makin menumpuknya hasil metabolisme sel yang bersifat racun. Hasil metabolisme yang bersifat racun ini kemudian tidak dapat dinetralkan oleh mikroalga. Penyebab lainnya adalah makin menipisnya oksigen yang digunakan mikroalga untuk bernafas.

2.1.4 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pertumbuhan *Chlorella vulgaris*

Beberapa faktor yang mempengaruhi pertumbuhan *Chlorella vulgaris* adalah sebagai berikut.

2.1.4.1 *Jenis Medium*

Setiap makhluk hidup membutuhkan medium yang tepat untuk menjalani hidupnya. Agar *Chlorella vulgaris* dapat hidup dengan baik amat diperlukan medium perkecambah biakan yang memiliki nutrisi yang diperlukan dalam pertumbuhan dan perkecambahannya. Kandungan nutrisi ini selanjutnya akan mempengaruhi laju pertumbuhan mikroalga tersebut. Semakin sedikit kadar nutrisi dalam medium, semakin lambat pula laju pertumbuhannya.

Medium yang digunakan untuk mengembangbiakan *Chlorella vulgaris* ini cukuplah sederhana karena memerlukan nutrisi yang tidak terlalu banyak jika dibandingkan dengan mikroalga yang lain. Sebagian mediumnya tidak membutuhkan *trace* mineral seperti yang dibutuhkan oleh mikroalga yang lain.

Ada beberapa medium yang lazim digunakan untuk mengembangbiakkan *Chlorella vulgaris* yaitu *Benneck*, *Detmer*, *Walme*, dan Pupuk komersial.

2.1.4.2 *Temperatur*

Temperatur yang tinggi dapat menyebabkan reaksi kimiawi di dalam mikroalga berlangsung secara lebih cepat. Namun saat temperatur ini terlalu tinggi maka akan menyebabkan denaturasi protein, asam nukleat, kehilangan enzim, dan metabolisme sel yang dikandung oleh mikroalga tersebut. Berdasarkan kondisi ini maka diperlukan suatu temperatur optimum dalam pertumbuhan dan perkecambahannya. Pada *Chlorella vulgaris* suhu optimum yang dibutuhkan adalah berkisar diantara 23-30°C.

2.1.4.3 *Oksigen Dan Karbondioksida*

Sebagian besar mikroalga membutuhkan oksigen dalam proses respirasinya dan gas CO₂ dalam proses fotosintesisnya. Tanpa adanya CO₂ mikroalga tidak dapat berfotosintesis. Maka jumlah antra oksigen dan karbondioksida di dalam medium harus seimbang agar didapat laju pertumbuhan mikroalga yang optimal.

2.1.4.4 *Derajat Keasaman*

Kerja enzim amat dipengaruhi oleh derajat keasaman pH. Perubahannya dapat mempengaruhi kerja enzim yang ada di dalam mikroalga. Besar pH yang sesuai dengan dengan kondisi pertumbuhan yang optimum adalah berkisar antara 7,0-8,0.

2.1.4.5 *Radiasi Cahaya*

Pada proses fotosintesis, faktor cahaya merupakan syarat dapat dilangsungkannya fotosintesis. Radiasi cahaya ini juga dapat membunuh mikroalga pada panjang gelombang tertentu, terutama pada radiasi sinar ultraviolet dan radiasi cahaya sinar tampak pada warna ungu dan biru. Hal ini disebabkan karena radiasi cahaya-cahaya tersebut memiliki energi yang cukup besar.

2.1.5 **Biomassa *Chlorella vulgaris***

Chlorella vulgaris adalah organisme yang memiliki kemampuan fotosintesis yang efektif. Biomassa yang dihasilkannya cukup besar, melebihi jumlah biomassa yang dihasilkan oleh tumbuhan tingkat tinggi. Organisme ini juga menguntungkan manusia dengan berfungsinya organisme ini sebagai sumber makanan sehat. Dengan demikian pembudidayaan *Chlorella vulgaris* dapat berfungsi sebagai sumber makanan sehat dan dalam proses fiksasi CO₂.

Chlorella vulgaris memiliki berbagai vitamin dan mineral yang esensial bagi tubuh. Salah satu unturnya yang menguntungkan adalah Chlorella Growth Factor (CGF). *Chlorella vulgaris* hanya memiliki 5% CGF. Walaupun hanya 5% namun CGF ini memiliki manfaat yang besar di bidang kesehatan. CGF ini mengandung berbagai asam amino, peptida, vitamin, protein, dan glukoprotein.

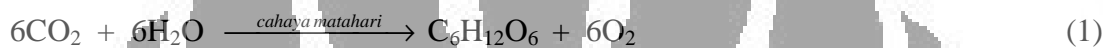
2.2 **PROSES FOTOSINTESIS**

Tumbuhan yang dapat melakukan proses fotosintesis adalah tumbuhan yang memiliki zat hijau daun (chlorofil). *Chlorella* termasuk ke dalam kategori tersebut sehingga dapat melakukan proses fotosintesis.

2.2.1 Gambaran Umum Proses

Menurut asal katanya, fotosintesis berasal dari kata foton yang berarti cahaya dan sintesis yang berarti pembentukan. Maka fotosintesis dapat diartikan sebagai proses pembentukan yang membutuhkan cahaya. Proses pembentukan karbohidrat yang berasal dari zat-zat anorganik (air, H₂S, dan CO₂) dengan bantuan sinar matahari sebagai sumber energi.

Reaksi fotosintesis dapat terjadi dengan menggunakan air dan CO₂ sebagai bahan baku utama sebagai sumber zat anorganik. Reaksi yang berlangsung sesuai dengan persamaan reaksi sebagai berikut.



Namun ada sebagian bakteri yang proses fotosintesisnya berlangsung dengan menggunakan asam sulfida dengan hasil samping belerang berupa endapan. Reaksi yang terjadi sesuai dengan reaksi sebagai berikut.



Peranan cahaya matahari pada reaksi fotosintesis adalah pada proses reduksi NADP⁺ menjadi NADPH dan menyediakan energi untuk membentuk ATP dari ADP dan P⁺. Sintesis ATP terjadi di dalam kloroplas yang disintesis hanya pada waktu ada cahaya. Proses ini disebut sebagai *fotofosforilasi*. Reaksinya berlangsung sebagai berikut.



2.2.2 Mekanisme Reaksi

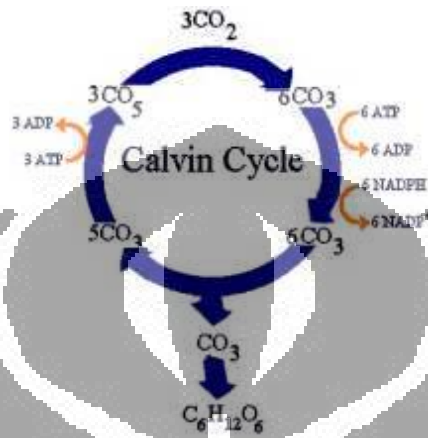
Reaksi fotosintesis terdiri dari reaksi gelap dan reaksi terang. Masing-masing dari reaksi tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

2.2.2.1 Reaksi Terang (Fotolisis)

Energi yang digunakan pada reaksi terang berasal dari cahaya matahari diubah menjadi energi ikatan *phosphoanhidrat* pada ATP dan untuk mengurangi ikatan NADPH.

2.2.2.2 Reaksi Gelap (Siklus Calvin)

Siklus calvin adalah mekanisme utama yang terjadi pada fotosintesis. Nama calvin berasal dari penemunya yaitu Melvin Calvin.



Gambar 2. 5 Siklus Calvin (www.starsandseas.com, 4 Juni 2007)

Siklus ini adalah bagian dari reaksi gelap yang berlangsung pada stroma dari kloroplas. Tahapan-tahapan yang terjadi pada siklus Calvin adalah sebagai berikut.

2.2.2.2.1 Fiksasi

Tahap awal dari proses fiksasi adalah proses kondensasi dari CO₂ dengan menggunakan *Riboluse-1,5-biphospate*. *Riboluse-1,5-biphospate* merupakan gula dengan lima atom karbon. Reaksinya dengan CO₂ akan menghasilkan produk antara dengan enam atom karbon. Senyawa antara ini bersifat tidak stabil dan akan terpecah menjadi dua molekul *asam-3-phosphogliserat*.

Pada fiksasi CO₂ ini dikatalis oleh enzim *riboluse-biphospate carboxylase-oxigenase* (RiBisCO). Senyawa ini hasil bentukan dari delapan senyawa dengan dua sub unit yang berbeda dengan berat molekul (MW) sekitar 550.000. Jenis protein ini merupakan 50% dari total protein yang terdapat dalam daun. RiBisCO adalah protein yang paling menentukan pada fotosintesis, metabolisme karbohidrat, dan fiksasi CO₂.

2.2.2.2.2 Reduksi

Pada proses ini akan merubah *3-phosphogliserat* menjadi *gliseraldehid-3-phosphate* menggunakan energi dari ATP dan mengurangi potensial dari NADPH.

Konversi ini menunjukkan adanya metabolisme sederhana. Sebelum direduksi gugus fungsi tersebut harus diaktifkan. Energi yang digunakan berasal dari ATP. Ikatan ester phosphat dapat mengurangi potensial dari NADPH untuk menghasilkan yield dengan komposisi NADP⁺ dan P⁺ yang lebih besar.

2.2.2.2.3 Regenerasi

Proses regenerasi *riboluse-1,5-biphosphate* dimulai dengan inisiasi enzim *triose phosphate isomerase* yang mengubah *gliseraldehid-3-phosphate* menjadi *dehidroksiaseton phosphate*. Selanjutnya hasil isomerasi mengalami kondensasi aldol membentuk *fruktosa-1,6-biphosphate*. Pada tahapan selanjutnya dibutuhkan enzim yang berfungsi dalam pemindahan dua atom karbon dari molekul donor ke akseptor. Enzim ini disebut dengan transketolase.

Fruktosa-1,6-biphosphate adalah molekul donor dan *gliseraldehid-3-phosphate* merupakan akseptor. Kemudian masing-masing dari molekul tersebut akan membentuk *erythrose-4-phosphate* dan *selulose-5-phosphate*. Kondensasi aldol yang lain adalah *erythrose-4-phosphate* dan *dihidroksiaseton phosphate*. Kedua molekul ini akan membentuk *sedoheptulose-1,7-biphosphate*. Akhirnya *riboluse-5-phosphate* mengalami fosforilasi pada atom karbon nomor 1 sehingga kembali membentuk *riboluse-1,5-biphosphate*.

Ada empat enzim yang berperan pada ketiga tahapan regenerasi. Keempat enzim tersebut adalah *glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase*, *fructose-1,6-biphosphate*, *sedoheptulose-1,7-biphosphate*, dan *riboluse-5-phosphate kinase*. Apabila terdapat energi cahaya maka keempat enzim tersebut akan mengalami reduksi dan menjadi aktif. Aktivasi ini terjadi dengan putusya ikatan sulfida diantara dua residu cis. Yang bertindak sebagai pereduksi adalah *thioredoxin* yang merupakan jenis protein yang larut di dalam air.

Ketiga proses tersebut di atas akan membentuk siklus calvin yang merupakan reaksi utama dari fotosintesis.

2.2.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Proses Fotosintesis

2.2.3.1 Cahaya

Cahaya adalah syarat terjadinya fotosintesis. Hal ini disebabkan karena cahaya berfungsi sebagai pemberi energi utama pada prpses fotosintesis. Semakin tinggi intensitas cahaya maka laju rekasi fotosintesis akan semakin besar pula. Namun seperti yang telah disinggung sebelumnya, intensitas cahaya yang terlalu tinggi akan mengandung energi yang tinggi pula. Pemberian energi yang tinggi ini akan menyebabkan menyebabkan kematian mikroalga. Titik maksimum dari intensitas cahaya yang diberikan ini disebut dengan *titik jenuh cahaya*.

Diantara batas keadaan gelap dan intensitas jenuhnya, ada titik dimana laju reaksi akan sama dengan laju respirasi. Titik ini disebut dengan *titik kompensasi cahaya*.

Pada tumbuhan tingkat tinggi, daun bagian atas akan memiliki daya serap terhadap cahaya yang lebih besar jika dibandingkan dengan daun bagian bawah. Hal ini akan menyebabkan daun bagian atas akan lebih cepat mengalami kejenuhan dari pada daun bagian bawah. Hal ini yang menyebabkan laju fotosintesis tidak dapat ditingkatkan hingga batas maksimumnya.

2.2.3.2 Kadar CO₂

CO₂ amat berpengaruh pada fotosintesis karena merupakan bahan baku utama. Makin besar kadar CO₂ di udara semakin besar pula zat yang dapat digunakan dalam fotosintesis. Hal ini sesuai dengan hukum laju reaksi. Apabila konsenterasi rektan besar maka laju reaksi juga akan menjadi besar. Peningkatan laju reaksinya akan sesuai dengan orde reaksinya. Persamaan laju rekasi yang sesuai dengan pernyataan ini adalah :

$$v_2 = v_1 \cdot k[CO_2]^a$$

Dimana v_2 = laju fotosintesis akhir

V_1 = laju fotosintesis awal

a = perbandingan konsentrasi CO₂ akhir dan awal

Konsentrasi tinggi dari CO₂ akan menyebabkan kerugian. Sebab dapat meracuni tumbuhan dan menutupi stomata. Konsentrasi optimal bagi proses fotosintesis ini adalah berkisar pada rentang 1000-1200 µmol/liter.

2.2.3.3 Temperatur

Temperatur ini terkait dengan reaksi kimia yang dilakukan oleh enzim. Enzim dapat bekerja dengan baik pada temperatur yang cocok. Temperatur yang optimum dapat menghasilkan hasil kerja yang optimum. Laju fotosintesis ini akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur dalam selang temperatur enzim dapat bekerja.

2.2.3.4 Kadar Air

Air adalah juga termasuk bahan baku terjadinya reaksi fotosintesis. Saat kadar air sedikit akan menyebabkan tumbuhan mengalami kekeringan, tertutupnya stomata, dan menjadi penghambat penyerapan atom karbon yang berakibat melambatnya laju fotosintesis. Peningkatan kadar air juga dapat meningkatkan laju reaksinya.

Hal ini sesuai dengan persamaan berikut.

$$v_2 = v_1 \cdot k[H_2O]^a$$

Dimana v_2 = laju fotosintesis akhir

v_1 = laju fotosintesis awal

a = perbandingan konsentrasi H₂O akhir dan awal

2.3 FOTOBIOREAKTOR

Fotobioreaktor memiliki beberapa bagian. Bagian bagian tersebut adalah reaktor vessel, sistem sirkulasi gas, sistem titrasi gas, lemari yang berisi sumber cahaya, dan sistem pengendalian reaktor. Kultivasi mikroalga dapat dilakukan pada reaktor batch atau kontinu. Namun pada beberapa penelitian, kultivasi dilakukan dengan reaktor *semi-batch* dimana gas CO₂ dialirkan secara kontinu ke dalam reaktor dan mikroalga ditempatkan secara batch.

2.3.1 Fotobioreaktor Kolom Gelembung

Pada fotobioreaktor kolom gelembung dengan intensitas cahaya terkontrol (*lomostat*), nilai laju intensitas cahaya spesifik yang diserap dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$q_e = \frac{(E_{in} - E_{out})A}{VC} \dots\dots\dots(2.1)$$

- q_e = laju penyerapan cahaya spesifik
- A = luas permukaan fotobioreaktor
- V = volume kultivasi
- C = kultivasi sel

Pada fotobioreaktor kolom gelembung yang bersifat *batch*, pencahayaan harus dilaksanakan sebaik mungkin. Saat jumlah mikroalga bertambah maka lama kelamaan intensitas cahaya tersebut tidak dapat mengenai seluruh mikroalga secara merata akibat terhalang oleh mikroalga lain yang ada di depannya. Dengan mempertimbangkan hal ini maka perlu dilakukannya peningkatan intensitas cahaya agar pencahayaan dapat mengenai seluruh bagian mikroalga. Peristiwa seperti ini dapat mengganggu laju pertumbuhan dan sering disebut dengan efek *self-shading*.

2.3.2 Jenis-Jenis Fotobioreaktor Kolom Gelembung

Disain fotobioreaktor merupakan hal yang penting untuk diperhatikan. Hal ini disebabkan oleh kaitannya dengan efisiensi dan produksi biomassa yang dikultivasi tersebut. Dalam mendisainnya perlu diperhatikan sistem fotobioreaktor yang sesuai. Terdapat dua kemungkinan sistem fotobioreaktor yang digunakan dalam kultifikasi, yaitu sistem fotobioreaktor terbuka dan fotobioreaktor tertutup.

Sistem yang pertamakali digunakan adalah sistem fotobioreaktor terbuka. Fotobioreaktor ini yang pertama kali digunakan untuk memproduksi biomassa dalam skala industri. Fotobioreaktor jenis ini dapat berupa kolam, danau, lagun, atau kolam buatan. Dari berbagai contoh fotobioreaktor terbuka ini yang paling banyak digunakan untuk memproduksi *Chlorella vulgaris* secara massal adalah menggunakan sistem kolam terbuka.

Walaupun sering digunakan, ada beberapa kelemahan yang dapat terjadi pada fotobioreaktor ini. Kekurangan tersebut adalah mungkin terkontaminasinya fotobioreaktor oleh organisme lain seperti epifit. Hal ini dapat mengganggu pertumbuhan mikroalga tersebut. Sistem pengontrolan yang dimiliki juga tidak baik terutama dalam hal pengendalian temperatur dan intensitas cahaya. Keluaran fotobioreaktor yang minim menyebabkan reaktor ini tidak ekonomis.

Permasalahan lain yang mungkin timbul adalah pada proses perawatan dari mikroalga tersebut. Proses perawatan yang dilakukan hanya memungkinkan dilakukan pada spesies *extremophilik* dan mengandung resiko terkontaminasi yang lebih besar. Kelemahan lainnya adalah terbatasnya cahaya pada lapisan mikroalga yang tebal. Supla cahaya tersebut dapat diperkaya dengan menggunakan sistem kultur jenis *thin layer inclined*.

Dengan melihat berbagai kekurangan ini maka dikembangkan fotobioreaktor sistem tertutup yang dilakukan di dalam ruangan. Hal ini akan lebih melindungi mikroalga dari kontaminan dan dapat dilakukannya pengontrolan berbagai parameter di dalam proses. Pada sistem tertutup terdiri dari fotobioreaktor tubular dengan variasi bentuk, ukuran, dan panjang tube.

Keuntungan pada sistem tertutup ini adalah hampir semua parameter bioteknologi dapat dikontrol dengan baik. Keuntungan lain adalah lebih terjaganya mikroalga dari kontaminan.

2.3.3 Kinetika Pertumbuhan Dan Penyerapan Substrat

Persamaan yang menggambarkan pertumbuhan kultur mikroalga dalam fotobioreaktor kolom gelembung yang paling sederhana adalah persamaan Monod. Persamaan ini adalah persamaan untuk mencari laju pertumbuhan sel dengan menganggap bahwa pertumbuhan sel adalah fungsi dari konsentrasi substrat yang esensial tanpa memperhatikan faktor lain. Persamaan Monod tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} = \frac{\mu_{\max} [S]}{K_s + [S]} \dots\dots\dots(2.2)$$

μ = laju pertumbuhan spesifik

μ_{\max} = nilai maksimum dari μ

K_S = konstanta Michaelis-Menten dengan nilai sama dengan konsentrasi substrat yang esensial pada besar laju pertumbuhan spesifiknya setengah dari laju pertumbuhan spesifik maksimum ($\mu=0,5\mu_{maks}$).

[S] = konsentrasi sumstrat yang esensial.

Pada proses batch, perbedaan antara laju pertumbuhan sebenarnya dengan hasil perhitungan tidaklah signifikan. Hal ini yang menyebabkan persamaan ini banyak digunakan.

Model lain yang mungkin digunakan adalah saat μ dinyatakan sebagai fungsi dari $[HCO_3^-]$. Untuk mencari persamaan yang sesuai, harus dilakukan perbandingan dengan hasil percobaan. Asumsi yang digunakan untuk setiap persamaanpun memiliki asumsi yang berbeda.

1. Persamaan Monod.

$$\mu = \mu_{maks} \cdot \frac{[HCO_3^-]}{K_S + [HCO_3^-]} \dots\dots\dots(2.3)$$

Persamaan ini adalah persamaan yang paling sederhana yang menggambarkan laju pertumbuhan yang dipengaruhi oleh difusi produknya.

2. Persamaan Ierusalimsky.

$$\mu = \mu_{maks} \cdot \frac{[HCO_3^-]}{K_S [HCO_3^-]} \frac{1}{\left(1 + [HCO_3^-] / K_i\right)} \dots\dots\dots(2.4)$$

Pada persamaan ini laju pertumbuhan sel dipengaruhi oleh adanya hambatan produk secara tidak kompetitif.

3. Persamaan Haldane.

$$\mu = \mu_{maks} \cdot \frac{[HCO_3^-]}{K_S + [HCO_3^-]} \frac{1}{\left(1 + [HCO_3^-] / K_i\right)} \dots\dots\dots(2.5)$$

Pada persamaan ini laju pertumbuhan sel dipengaruhi oleh hambatan produk yang kompetitif.

2.4 PENCAHAYAAN

Pencahayaan yang diberikan pada kultivasi dilakukan sebagai pengganti sumber energi matahari pada fotobioreaktor kolom gelembung sistem tertutup yang ada di dalam ruangan. Pencahayaan ini juga sebagai syarat terjadinya proses fotosintesis yang dilakukan oleh *Chlorella vulgaris*.

2.4.1 Jenis-Jenis Pencahayaan

Pada pembiakan mikroalga dengan menggunakan fotobioreaktor sistem tertutup dalam ruangan diperlukan pencahayaan buatan terhadap kultur biakan tersebut. Beberapa jenis pencahayaan yang diberikan pada mikroalga pada fotobioreaktor kolom gelembung adalah :

1. Siklus alami

Pencahayaan jenis ini sama dengan intensitas cahaya yang diberikan oleh sinar matahari.

2. Fotoperiodisasi

Pencahayaan ini hampir sama dengan siklus alami hanya saja dilakukan perbandingan variasi perbandingan masa terang dan masa gelap didalam kultivasi.

3. Pencahayaan kontinu

Yaitu pemberian cahaya dengan intensitas yang besarnya tetap.

4. Alterasi

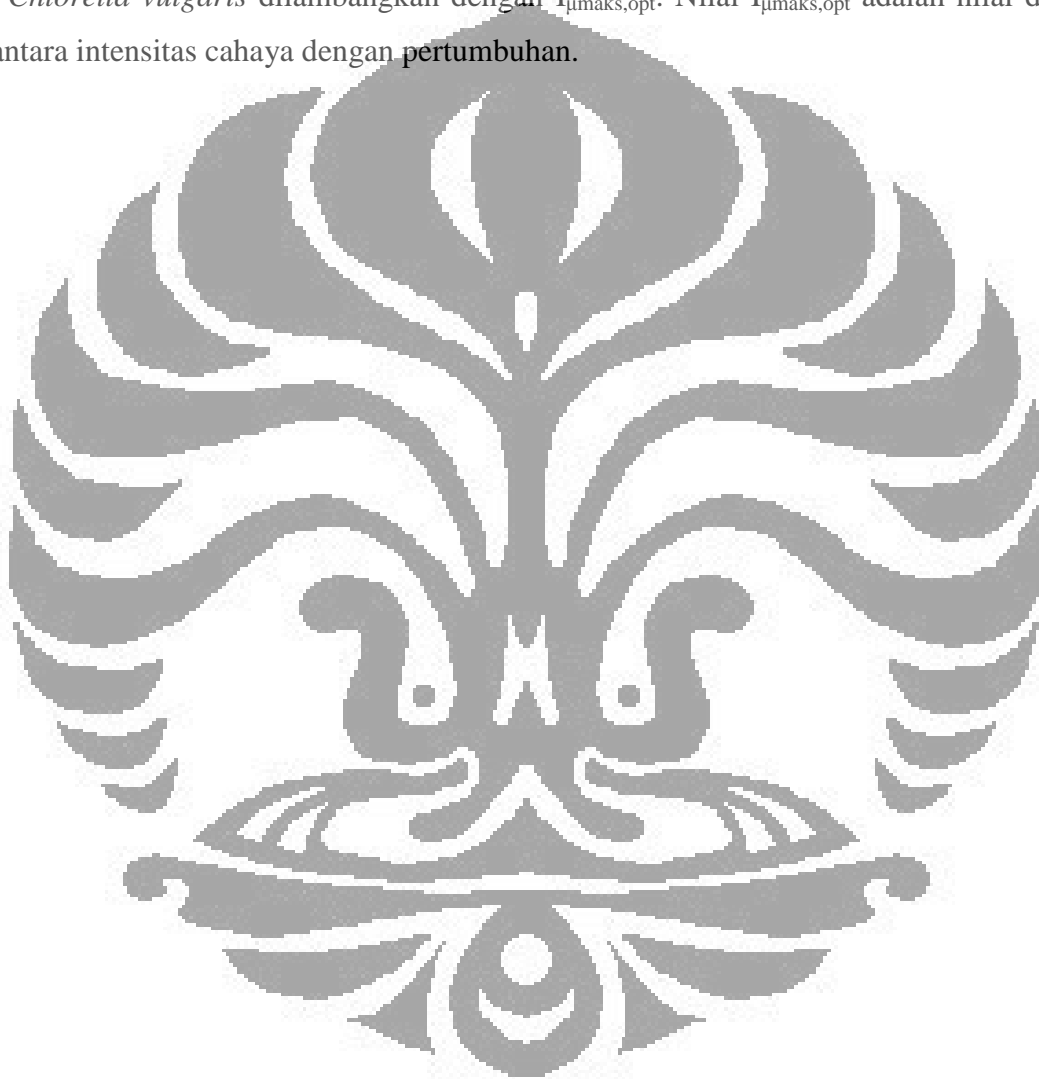
Adalah pencahayaan dengan intensitas cahaya yang disesuaikan dengan jumlah biomassa yang terdapat dalam media kultivasi.

2.4.2 Pencahayaan Alterasi

Pada beberapa penelitian telah dibuktikan bahwa sistem pencahayaan alterasi pada *Chlorella vulgaris* dapat menyebabkan pertumbuhan mikroalga tersebut paling besar (61%). Seperti telah dijelaskan diatas, alterasi adalah sistem pencahayaan dengan peningkatan intensitas cahaya seiring dengan peningkatan jumlah sel. Hal ini terkait dengan efek *self-shading* yang menyebabkan tidak semua bagian terkena cahaya yang diberikan akibat terhalang oleh sel-sel yang ada di depannya. Hal ini disebabkan oleh makin bertambahnya konsentrasi sel akibat

perkembangbiakan. Peningkatan cahaya ini dapat menembus dan mengenai sampai sel-sel bagian belakang.

Metode alterasi ini diharapkan mampu mempertahankan laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris* yang dibudidayakan. Selanjutnya diharapkan pula pengikatan CO₂ akan dapat terus dipertahankan hingga pertumbuhan mencapai titik optimal. Intensitas maksimum yang diberikan kepada *Chlorella vulgaris* dilambangkan dengan $I_{\mu\text{maks,opt}}$. Nilai $I_{\mu\text{maks,opt}}$ adalah nilai di puncak grafik antara intensitas cahaya dengan pertumbuhan.

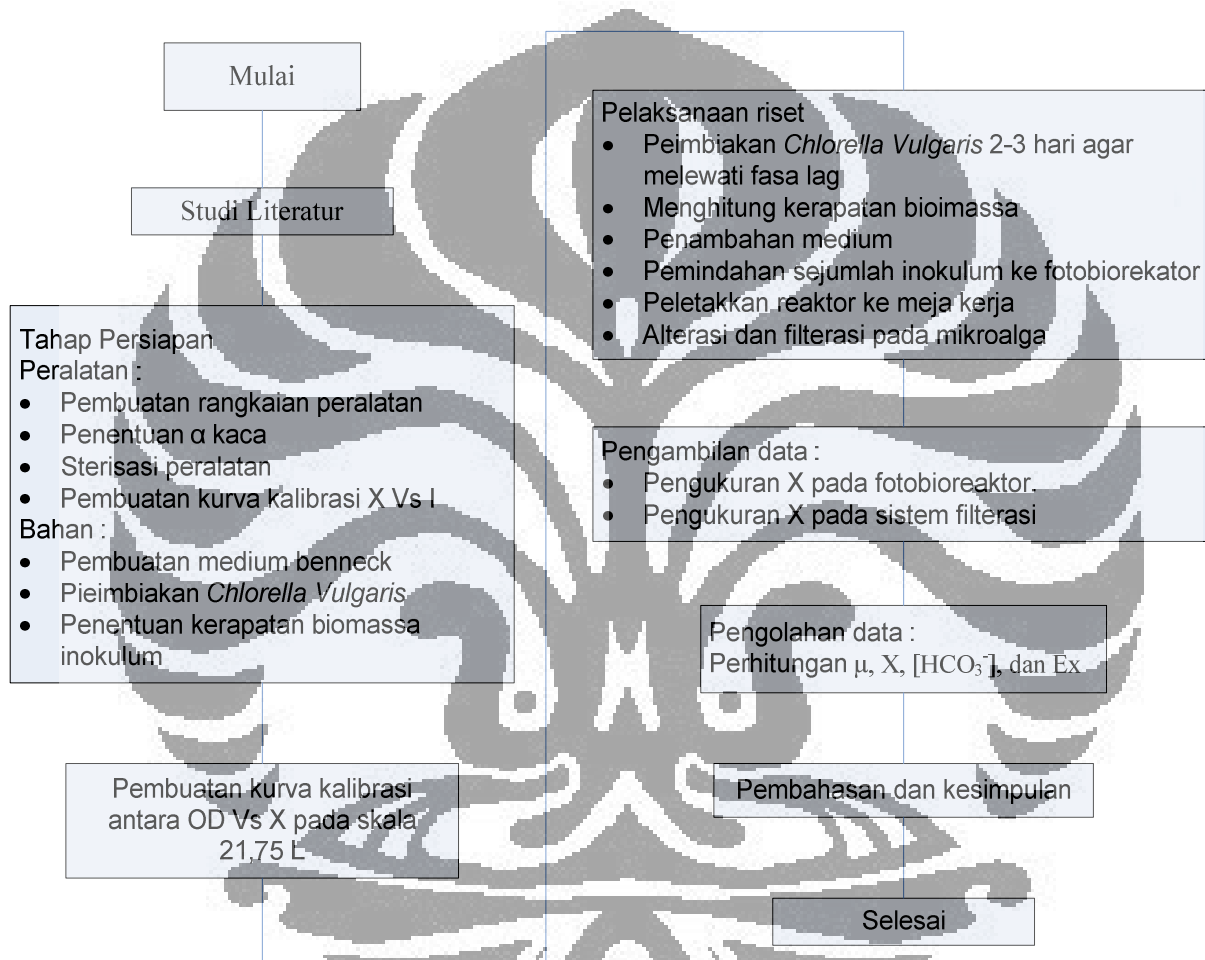


BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Penelitian kali ini dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.2 ALAT DAN BAHAN

Alat dan bahan yang akan digunakan pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut.

3.2.1 Alat Penelitian

Sebelum melakukan pengambilan data, terlebih dahulu alat-alat yang digunakan harus di sterilisasi. Sterilisasi dilakukan dengan mencuci bersih, merebus (memanaskan), disemprot dengan menggunakan alkohol 70 %, dan kemudian disinari dengan lampu UV. Hal ini berguna untuk memastikan agar tidak adanya kontaminan saat melakukan pengambilan data. Peralatan-peralatan yang digunakan adalah :

1. Fotobioreaktor bervolume 21 L
2. *Sparger*
3. Kompresor udara portabel 2 out put 1 hp
4. Tabung gas CO₂ yang dilengkapi dengan regulator
5. Sistem filterasi
6. Flow meter
7. Selang silikon dan selang plastik
8. Lampu Philips TL 23 VA
9. Transfer box
10. Timbangan
11. Spatula

Instrumen pengambilan data yang digunakan adalah:

1. GC TCD
2. Spektrofotometer UV-VIS (*spektra UV-VIS spectrophotometer, LaboMed.Inc*)
3. Cuvet 5 ml
4. Lux meter (*Lux Lightmeter LX-103*).
5. pH meter

Peralatan tambahan yang digunakan adalah :

1. Peralatan glassware yang terdiri dari erlenmeyer, pipet ukur, pipet tetes, gelas ukur,botol sampel, beaker glass dengan volume sesuai dengan kebutuhan.
2. Bunsen
3. Lemari kerja UV

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan adalah :

1. *Chlorella vulgaris* yang didapat dari balai perikanan air tawar kota Depok
2. KH_2PO_4 , MgSO_4 , NaNO_3 , dan FeCl_3 untuk pembuatan medium bennek.
3. Gas CO_2 sebagai bahan fotosintesis mikroalga
4. Aquadest untuk membuat medium benneck dan mencuci peralatan.
5. Alkohol 70% untuk sterilisasi peralatan

3.3 VARIABEL PENELITIAN

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel ini adalah variabel yang diatur pada harga tertentu. Variabel bebas yang ditentukan dalam penelitian ini adalah waktu pengambilan data (t), dan jumlah sel awal (N_0). Selain itu terdapat pula variabel semi bebas. Yaitu variabel yang besarnya kita tentukan sendiri namun pada penentuannya tergantung pada besar variabel lainnya. Variabel semi bebas pada penelitian ini adalah intensitas (I) cahaya yang diberikan pada *Chlorella vulgaris*, yang besarnya bergantung dari banyaknya sel mikroalga tersebut.

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat ini besarnya didapatkan lewat pengukuran (data yang diinginkan). Variabel terikat pada penelitian ini adalah absorbansi (OD), jumlah sel setiap selang waktu tertentu (X), pH, dan besar intensitas cahaya di belakang reaktor (I_b).

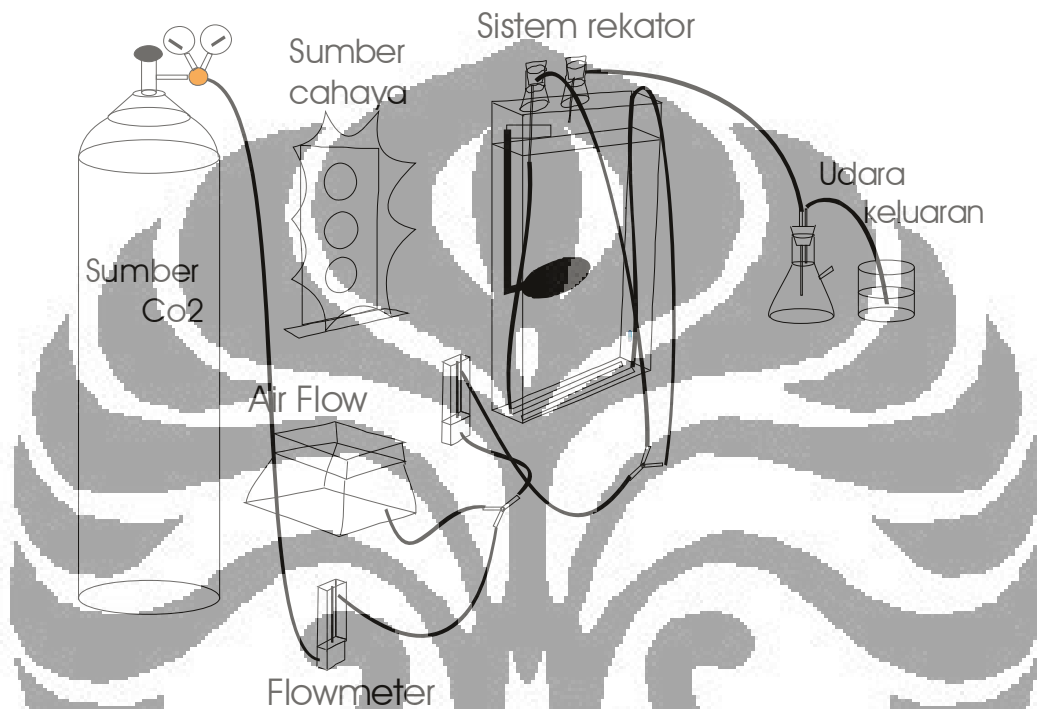
3.4 PROSEDUR PENELITIAN

Penjelasan diagram penelitian pada gambar 3.1 adalah sebagai berikut.

3.4.1 Persiapan Peralatan Medium

Yang dilakukan pada tahap persiapan ini adalah persiapan peralatan dan pembuatan medium *benneck*.

Awalnya kita menggunakan fotobioreaktor yang dirangkai seperti gambar berikut.



Gambar 3. 2 Gambar rangkaian sistem fotobioreaktor filter

Peralatan yang digunakan meliputi aquarium, sparger, kompresor, sistem filter, dan selang plastik. Sebelum dilakukan perangkaian, seluruh peralatan tersebut terlebih dahulu disterilkan dengan mencuci bersih, menyiram dengan air panas (untuk peralatan *glassware*) dan menyemprotkan alkohol 70%. Hal ini bertujuan untuk menghilangkan kemungkinan adanya kontaminan.

Pengaliran CO₂ kedalam fotobioreaktor dilakukan melalui selang plastik yang bersumber dari kompresor yang kemudian melewati flowmeter. Peralatan filter dipasang pada dinding reactor. Selanjutnya penyinaran dilakukan ke dinding reaktor secara memanjang dengan intensitas bervariasi disesuaikan dengan jumlah selnya.

Pembuatan medium benneck dilakukan dengan melarutkan 200 mg $MgSO_4$, 100 mg KH_2PO_4 , 500 mg $NaNO_3$, dan 3-5 mg $FeCl_3$ dalam 1 liter aquadest yang telah direbus sebelumnya. Penggunaan medium *benneck* pada *Chlorella vulgaris* harus terlebih dahulu menunggu hingga keadaannya dingin.

3.4.2 Pemiakan Kultur *Chlorella Vulgaris* Dalam Medium Benneck

Chlorella vulgaris murni yang didapat terlebih dahulu dibiakkan. Hal ini bertujuan untuk memperbanyak *Chlorella vulgaris* atau juga dapat bertujuan untuk melewati mikroalga dari fasa lagnya. Pada fasa ini sel akan berusaha untuk beradaptasi pada media barunya. Pemiakan dilakukan dalam fotobioreaktor dengan *dibubbling* dengan udara murni tanpa menggunakan CO_2 . Hal ini dilakukan dengan selama 2-3 hari atau sekitar 60 jam. Selama dalam masa pemiakan, *Chlorella vulgaris* disinari dengan cahaya dengan intensitas sekitar 5000 lux.

3.4.3 Penentuan Jumlah Innokulum

Penentuan jumlah innokulum dilakukan dengan menggunakan bantuan kurva kalibrasi antara OD_{600} dengan X (berat kering sel) yang telah didapatkan pada penelitian sebelumnya. Hal dilakukan karena untuk mengetahui besarnya X hanya diperlukan data OD dari sel tersebut. Berat kering dapat diketahui dengan mensentrifuge sampel. Kemudian dipisahkan antara padatan dan cairan. Selanjutnya padatan dicuci dengan aquadest, disentrifuge kembali, dan kemudian dipisahkan. Padatan ini dioven pada suhu $110^\circ C$. Langkah-langkah yang dilakukan adalah :

1. Sampel yang akan dihitung jumlah selnya diukur absorbansinya dengan menggunakan spektrofotometer.
2. Penentuan jumlah sel dengan melihat besar absorbansinya dan disesuaikan dengan, menggunakan kurva kalibrasi OD vs X.

3.4.4 Alterasi Intensitas Cahaya

Sebelum dilakukan alterasi maka kita harus terlebih dahulu menentukan jumlah innokulum awal yang akan digunakan. Hal ini dilakukan untuk menentukan besar pengenceran

yang akan dilakukan sebelum alterasi. Prosedur alterasi secara umum dapat dituliskan sebagai berikut.

1. Memindahkan innokulum dan medium benneck ke dalam fotobioreaktor dengan perbandingan tertentu sehingga mencapai konsentrasi yang diinginkan. Pemandahan dilakukan di dalam kotak pemindahan yang telah disterilkan.
2. Fotobioreaktor kemudian dipindahkan diatas meja kerja yang telah disterilkan dengan alkohol 70%.

Pada pencahayaan ini digunakan proses pencahayaan alterasi. Yaitu pencahayaan secara terus menerus dengan besar intensitas cahaya yang disesuaikan dengan banyaknya sel mikroalga tersebut. Pada tahap awal ini digunakan jumlah innokulum sebesar $1.000.000 \text{ sel/cm}^3$ (setara dengan 0.81 mg/L).

Kondisi operasi yang digunakan saat proses alterasi ini dijalankan adalah sebagai berikut.

1. Temperatur fotobioreaktor sebesar 29°C .
2. Tekanan gas dan udara dalam fotobioreaktor sebesar 1 atm.
3. Kecepatan superficial yang digunakan adalah $15,7 \text{ m/jam}$
4. Konsentrasi CO_2 yang digunakan adalah sebesar 5%.

3.4.5 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan setiap 4 jam. Sedangkan pengambilan data filter dilakukan setiap 12 jam. Data yang diambil adalah X, pH, dan Ib. Proses pengambilan data yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Pengambilan data X dilakukan dengan mengambil sampel ke dalam botol sampel sekitar 5 ml dalm 3 botol yang berbeda. Masing sampel tersebut kemudian diukur absorbansinya dengan menggunakan spektrofotometer dan dirata-ratakan nilainya. Dari nilai rata-rata absorbansi yang didapat tersebut dapat dilihat nilai X nya pada kurva kalibrasi X vs OD.
2. Pengambilan data pH dilakukan dengan menggunakan pH meter. Hal ini untuk melihat aktivitas sel mikroalga.

- Pengambilan data Ib dilakukan dengan menggunakan luxmeter yang diletakkan di elakang fotobioreaktor.

3.4.6 Pengolahan Data Penelitian

Data yang diambil dari penelitian ini adalah nilai OD, pH, dan intensitasnya.

3.4.6.1. Pengolahan Data OD

Sampel yang diambil setiap 4 jam kemudian diukur nilai absorbansinya dengan menggunakan spektrofotometer. Dari nilai absorbansi ini kemudian dapat dihitung nilai X nya. Penentuan berat kering ini dilakukan dengan menghubungkan nilai OD yang didapat dengan nilai X yang sesuai pada grafik yang menghubungkan antara X dan OD. Kemudian dari data X yang didapat dibuat juga grafik yang menghubungkan antara X dan t.

Selain itu kemudian ditentukan persamaan yang menghubungkan antara X dengan t atau $X = f(t)$. Persamaan yang digunakan untuk menghitung laju pertumbuhan spesifik adalah persamaan monod. Persamaan ini dapat dituliskan sebagai berikut.

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

- μ = laju pertumbuhan spesifik (jam^{-1})
- X = berat kering biomassa (g/liter)
- t = waktu (jam)

3.4.6.2. Pengolahan Data pH

Nilai pH digunakan untuk menghitung besar $[\text{HCO}_3^-]$ dalam fotobioreaktor dengan menggunakan persamaan Handerson-Haselbach, yaitu :

$$K_{CO_2} = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{CO_2} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$[\text{HCO}_3^-] = K_{CO_2}[CO_2][\text{H}^+]^{-1}$$

$$[HCO_3^-] = K_{CO_2}[CO_2]10^{-pH}$$

Kemudian untuk mengitung Ka dan [CO₂] digunakan pendekatan hokum Henry

$$P_{CO_2} = H_{CO_2}[CO_2] \dots \dots \dots (3.3)$$

$$P_{CO_2} = \frac{y_{CO_2} P_T}{P_T} \dots \dots \dots (3.4)$$

$$\ln\left(\frac{H_{CO_2}}{H_{CO_2,02}}\right) = A_H\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + B_H \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + C_H\left(\frac{T}{T_0} - 1\right) \dots \dots \dots (3.5)$$

$$\ln\left(\frac{H_{CO_2}}{H_{CO_2,02}}\right) = A_K\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + B_K \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + C_K\left(\frac{T}{T_0} - 1\right) \dots \dots \dots (3.6)$$

Dengan menggunakan kedua persamaan di atas [HCO₃⁻] dapat dihitung dengan persamaan berikut.

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

PT = Tekanan operasi (atm)

y_{CO₂} = Konsententrasi gas CO₂ yang diumpankan (5%)

K_{CO₂} = 4,38 x 10⁻⁷

H_{CO₂} = 2900 KPa/mol

T = Temperatur operasi

T₀ = Temperatur standar

3.4.6.3. Pengolahan Data I

Data I digunakan untuk menentukan jumlah energi yang digunakan untuk mengembangbiakkan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg ini. Data yang diambil adalah I₀ (intensitas

cahaya masuk ke fotobioreaktor) dan I_b (intensitas cahaya yang keluar dari fotobioreaktor). Perhitungan energi ini dilakukan dengan persamaan berikut.

$$E_x = \frac{\int_0^t I dt}{\Delta X_s} \dots\dots\dots(3.7)$$

ΔX = Berat biomassa yang dihasilkan pada masa kultivasi (g/dm^3)

S = Jarak yang ditempuh cahaya di dalam kultur medium (m)

I_t = Intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh kultur media (W/m^2)

t = Waktu (jam)



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang pelaksanaan, hasil perolehan data, dan pembahasan.

4.1 PEMBAHASAN UMUM

Chlorella vulgaris Buitenzorg hidup dalam medium cair. Bentuk selnya yang tidak memiliki flagel membuatnya terombang-ambing terbawa arus pergerakan medium yang ditempatinya. Medium berfungsi juga dalam penuplaian nutrisi untuk metabolisme dan pertumbuhannya. Medium yang digunakan adalah medium *benneck*, yang mengandung banyak nutrisi yang dibutuhkan *Chlorella vulgaris*. Medium *benneck* terdiri dari $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $NaNO_3$, $FeCl_3$, dan KH_2PO_4 . Medium ini dibuat sesuai dengan kebutuhan volume yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu 18 liter untuk setiap percobaan.

Sebelum dilakukannya percobaan, terlebih dahulu dilakukan pensterilan alat dengan mencuci bersih alat-alat yang akan digunakan, menyemprotnya dengan alkohol 70%, dan kemudian menyinari dengan lampu UV selama ± 7 menit. Untuk alat-alat yang terbuat dari gelas maka harus dilakukan pembasuhan menggunakan air panas selama beberapa kali setelah tahap pencucian untuk membunuh kuman. Hal ini bertujuan untuk menghilangkan kontaminan yang ada pada alat-alat yang akan digunakan. Masalah kontaminan ini amat penting untuk diperhatikan mengingat amat rentannya *Chlorella vulgaris* ini pada kontaminan dalam bentuk apapun. Keberadaan kontaminan dalam reactor nantinya akan membunuh sel perlahan-lahan yang ditandai dengan menurunnya nilai *Optical Density* dari waktu ke waktu. Saat reaktor sudah dimasuki kontaminan maka seluruh sel yang ada tidak dapat diselamatkan lagi dan harus penelitian harus diulang kembali. Hal ini disebabkan karena kontaminan yang ada tidak dapat dipisahkan dari sel dan medium.

Pada percobaan kali ini, kita akan melihat pertumbuhan biomassa *Chlorella vulgaris* pada fotobioreaktor skala menengah yang bervolume 18 liter dengan metode yang telah teruji pada penelitian sebelumnya, pada skala kecil. Fotobioreaktor yang digunakan berdimensi 38,5 x 10 x 60 cm dengan permukaan bagian depan yang terkena cahaya adalah 38,5 x 60 cm. Jadi disain yang digunakan setipis mungkin. Hal ini bertujuan untuk mengurangi efek *self shading* pada sel-

sel *Chlorella vulgaris*, yaitu efek penghalangan cahaya oleh sel-sel yang ada di depannya. Akibat dari efek ini adalah tidak meratanya intensitas yang diterima oleh setiap sel akibat kerapatan (kepekatan) yang dimilikinya. Ilustrasi dari reaktor yang digunakan dapat dilihat pada gambar pada BAB III.

Pada fotobioreaktor yang digunakan kali ini juga dilengkapi dengan filter yang terbuat dari busa berpori. Penggunaan filter ini bertujuan untuk menyerap sel biomassa yang dihasilkan dari pembelahan sel. Dasar penggunaan filter ini adalah pengurangan sejumlah sel dari fotobioreaktor untuk mengurangi kepekatan sel didalamnya. Pengurangan kepekatan sel ini akan berakibat pada bertambah besarnya peluang sel-sel yang ada di fotobioreaktor untuk mendapatkan cahaya yang cukup dan asupan nutrisi dari medium yang digunakan. Dengan berkurangnya kerapatan sel maka intensitas cahaya yang tembus hingga ke bagian belakang reaktor akan lebih besar. Selain itu penggunaan filter akan memperbesar jumlah biomassa yang dihasilkan. Jumlah biomassa yang dihasilkan menjadi jumlah yang ada dalam fotobioreaktor ditambahkan dengan yang didapatkan dari penyaringan di filter. Dengan metode pemanenan seperti ini diharapkan akan diperoleh jumlah biomassa yang lebih besar dibandingkan yang tanpa filter.

Untuk mengembangbiakkan *Chlorella vulgaris* ini diperlukan sejumlah energi. Energi yang dibutuhkan adalah energi cahaya yang digunakan sel untuk berfotosintesis. Agar dapat menghitung kuantitas energi cahaya yang diperlukan selama proses perkembangbiakan maka fotobioreaktor bagian samping ditutup dengan menggunakan karton yang berwarna hitam. Hal ini bertujuan untuk menghindari adanya penyerapan energi cahaya pada bagian lain selain bagian yang memang seharusnya dikanai cahaya. Dengan menutup semua sisi kecuali bagian depan maka kita dapat menghitung dengan lebih teliti jumlah energi cahaya yang dibutuhkan dalam pembiakannya.

Jumlah sel awal (starter) ditentukan dengan menggunakan bantuan kurva kalibrasi antara X (berat kering sel, mg/liter) dengan OD₆₀₀ yang telah didapatkan pada penelitian sebelumnya. Jumlah sel awal yang digunakan pada percobaan ini adalah sebesar 0.71 mg/liter atau setara dengan satu juta sel per cc. Berat kering ini dicapai saat OD₆₀₀-nya mencapai nilai 0.24 (didapat dari kurva kalibrasi OD Vs X). Penentuan besar OD ini dengan menggunakan spektrofotometer.

Bila angka yang dihasilkan lebih besar dari yang diinginkan maka harus dilakukan pengenceran hingga mencapai besaran OD tersebut. Atau jika nilai yang didapatkan masih terlalu kecil maka harus dilakukan penambahan sel lagi.

Setelah semua peralatan disterilkan dan perangkaian fotobioreaktor telah siap, maka siap untuk dilakukan perlakuan awal pada *Chlorella vulgaris* sebelum memasuki tahap pembiakan. Tahap ini dinamakan tahap pra kultur. Tahap ini bertujuan untuk membiakkan sel dan melewati sel pada fasa lag, sehingga pengambilan data dimulai saat sel telah berada pada fasa log/eksponensial. Selain itu, tahap ini juga berfungsi untuk membantu *Chlorella vulgaris* untuk beradaptasi dengan lingkungannya. Saat waktu beradaptasi ini *Chlorella Vulgaris* tidak dapat berkembang biak dengan baik. Lama dari pra kultur ini berkisar antara 3-4 hari. Pra kultur ini dilakukan dalam fotobioreaktor yang akan digunakan. Prosesnya adalah mengalirkan udara tanpa CO₂ dengan kecepatan supervisial sebesar 15.7 m/jam. Kecepatan ini digunakan karena kecepatan ini adalah kecepatan yang optimal untuk pertumbuhan sel dalam fotobioreaktor.

Udara yang telah dicampur dengan CO₂ sebesar 5% dialirkan ke dalam reactor. CO₂ inilah yang dibutuhkan pada proses fotosintesis. Jika jumlah CO₂ yang diberikan ini terlalu banyak maka akan berdampak buruk pada sel. Sel-sel akan mengalami *shear stress*. Namun jika jumlah yang diberikan terlampaui sedikit akan maka kita akan sulit untuk mendeteksinya dengan Gas Chromatography. Besar kecepatan supervisial ini juga menentukan pertumbuhan sel dalam reactor. Jika terlalu besar maka sel-sel akan sulit untuk menangkap gas yang dilewakan. Namun jika terlalu lambat, akan membuat medium jenuh akan CO₂. Penentuan kecepatan supervisial ini dilakukan dengan melakukan pengujian RTD terhadap variasi volume tertentu dengan berbasis pada nilai kecepatan supervisial optimum pada reactor skala kecil (250 ml).

Dengan jumlah sel awal sebanyak ini maka digunakan intensitas sebesar 5 Klux (W/m²). Ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya tentang intensitas optimal pada jumlah sel tertentu. Pencahayaan yang diberikan ke permukaan bagian depan fotobioreaktor dibuat semerata mungkin. Hal ini bertujuan agar setiap bagian pada permukaan bagian depan fotobioreaktor mendapatkan asupan energi cahaya yang sama besar.

Pada penelitian kali ini digunakan metode pencahayaan alterasi, yaitu penyesuaian besarnya intensitas cahaya dengan jumlah sel yang ada pada fotobioreaktor. Semakin banyak

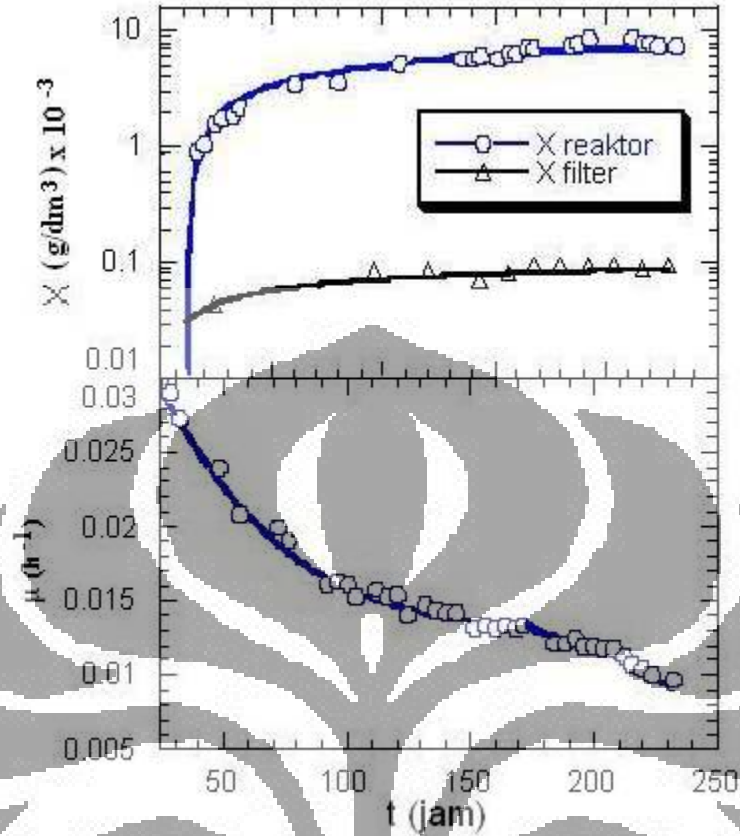
jumlah sel yang ada dalam fotobioreaktor, maka akan semakin besar pula intensitas cahaya yang diberikan pada fotobioreaktor. Pencahayaan terus dilakukan hingga jumlah sel pada fotobioreaktor menunjukkan jumlah yang cenderung konstan. Saat ini terjadi maka *Chlorella Vulgaris* telah memasuki fasa stasioner yang tidak terjadi lagi pertumbuhan sel dalam fotobioreaktor. Saat kondisi ini sudah terjadi maka percobaan dinyatakan selesai.

Selain itu dalam fotobioreaktor juga dijalankan sebuah rangkaian filter terhadap sel dan disirkulasikan ke dalam reaktor kembali. Pengembalian media yang melewati saringan ini berfungsi untuk menjaga volume medium dalam fotobioreaktor agar tetap. Dengan sistem seperti ini maka sejumlah sel akan tersaring dan terperangkap dalam spons yang digunakan sebagai filter. Sel-sel yang terperangkap ini kemudian dipanen setiap 12 jam sekali dan diganti dengan filter yang baru. Hasil panen ini kemudian dihitung berat keringnya dengan menggunakan bantuan kurva kalibrasi OD Vs X.

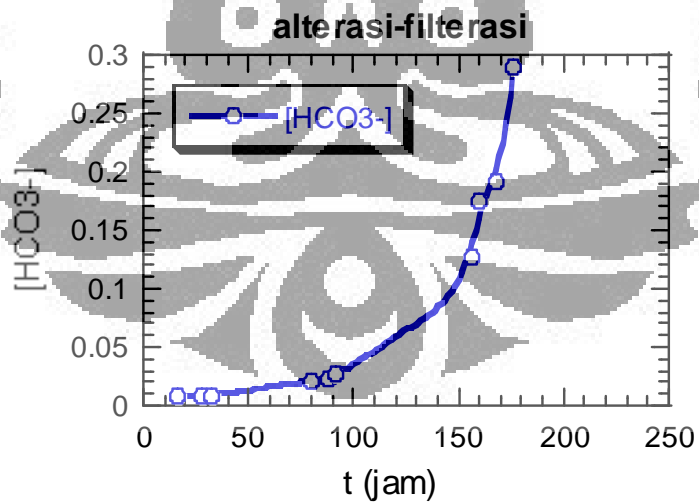
Penentuan pengambilan filter ini didasarkan estimasi antara laju penyaringan dengan laju pertumbuhan sel dalam fotobioreaktor. Jika laju penyaringan ini lebih besar dari laju pertumbuhan sel maka akan ada pengurangan jumlah sel dalam fotobioreaktor secara periodik. Hal ini berlawanan dengan yang diharapkan, yaitu pertumbuhan jumlah sel dari waktu ke waktu. Namun saat jumlah penyaringan jauh lebih kecil dari jumlah pertumbuhan maka akan dihasilkan pengaruh yang kurang signifikan terhadap efek shading dan perebutan nutrisi antar sel.

4.2 DATA PENELITIAN

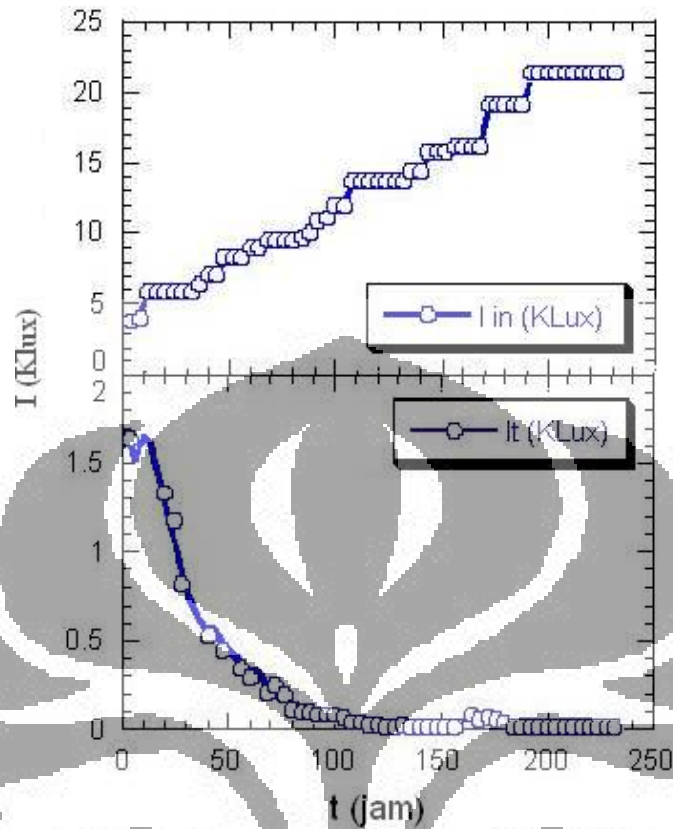
Hasil perolehan dari percobaan yang telah dilakukan selama 244 jam kerja dapat disajikan dalam bentuk grafik sebagai berikut. Hasil dalam bentuk angka dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4. 1 Hubungan berat kering dan laju pertumbuhan spesifik terhadap waktu

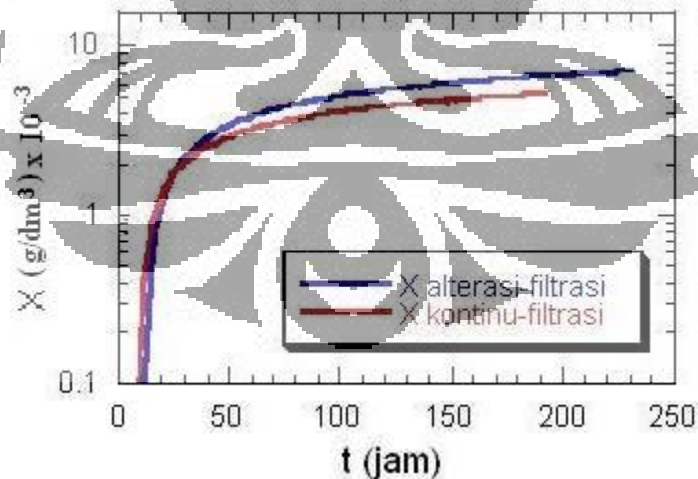


Gambar 4. 2 Konsenterasi HCO_3^- selama masa kultivasi



Gambar 4. 3 I yang diterima sel dan I yang ditransmisikan dari bagian belakang reaktor

Dengan membandingkan perlakuan filtrasi dengan pencahayaan kontinu dan alterasi akan didapatkan gambaran seperti pada grafik di bawah ini.



Gambar 4. 4 Perbandingan pertumbuhan berat kering sel antara kontinu dan alterasi dengan keduanya menggunakan sistem filtrasi

Seperti percobaan yang telah dilakukan pada reaktor skala kecil, pencahayaan alterasi menunjukkan peningkatan pertumbuhan sel yang lebih baik dibandingkan dengan pencahayaan kontinu. Pada grafik terlihat bahwa dengan pencahayaan kontinu *Chlorella Vulgaris* akan lebih cepat mencapai fasa stasioner dibandingkan dengan pencahayaan alterasi. Hal ini disebabkan karena dengan intensitas cahaya yang diberikan pada pencahayaan kontinu (5Klux), cahaya sudah tidak dapat menjangkau sel-sel yang ada di bagian belakang fotobioreaktor. Ketidakmampuan cahaya untuk menembus hingga ke bagian belakang ini diakibatkan oleh sudah terserapnya kuantitas energy cahaya tersebut oleh sel-sel yang ada di bagian depan dan tengah. Akibatnya, sel-sel yang tidak mendapat cukup cahaya tidak mampu untuk melakukan proses fotosintesis yang kemudian akan mati.

Secara kuantitatif hasil akhir dari masing-masing proses dapat dilihat pada table berikut.

Tabel 4. 1 Perbandingan sistem filtrasi-alterasi dan hanya alterasi

Rangkaian reaktor	X total (mg/L)	Waktu <i>running</i> (jam)
Alterasi	7.562	232
Alterasi-filtrasi	6,31	192

Pada percobaan skala menengah ini diperoleh bahwa dengan pencahayaan alterasi dihasilkan jumlah sel 1,27 kali lebih banyak dibandingkan dengan pencahayaan kontinu dengan sama-sama menggunakan perlakuan filtrasi aliran sirkulasi media. Walaupun waktu yang dibutuhkan lebih lama, namun dengan pencahayaan alterasi akan dihasilkan jumlah biomassa yang lebih banyak.

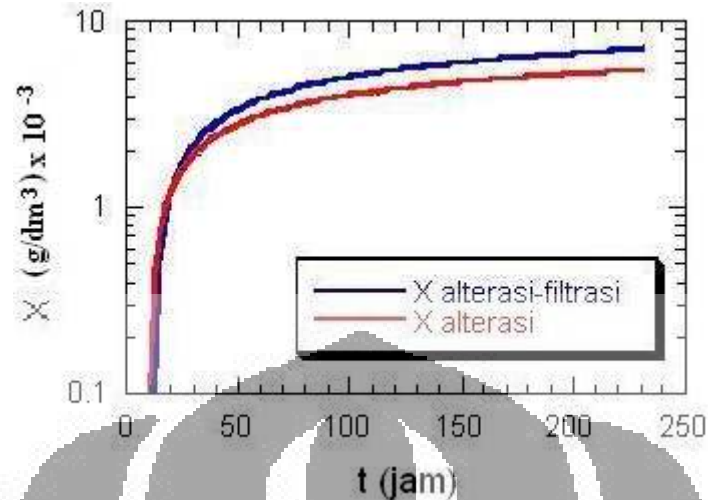
Dengan melakukan peningkatan intensitas cahaya yang diberikan seiring dengan pertumbuhan jumlah sel maka akan semakin banyak pula kebutuhan energi yang diperlukan dalam pengembangan *Chlorella sp.* dengan metode ini. Peningkatan ini dilakukan hingga sel tidak berpengaruh pertumbuhannya terhadap peningkatan intensitas berikutnya. Ini ditandai dengan nilai *Optical Density* (OD) yang cenderung konstan dan semakin lama semakin menurun.

4.3 PENGARUH FILTER PADA PERTUMBUHAN SEL

Alterasi adalah sistem pencahayaan yang disesuaikan dengan jumlah sel/berat kering sel yang terdapat pada fotobioreaktor. Saat fotobioreaktor bertambah padat akan meningkatkan efek shading (penutupan cahaya sebagian sel oleh sel yang lain). Efek ini mengakibatkan kurangnya intensitas cahaya yang diterima oleh sel yang terletak di bagian belakang reaktor. Pada percobaan kali ini efek shading tersebut dikurangi dengan adanya filter dalam fotobioreaktor untuk menyerap sebagian sel dalam fotobioreaktor. Penggantian filter dilakukan setiap 12 jam. Pertimbangannya adalah agar laju pengurangan akibat kerja filter tidak lebih besar dari pada laju pertumbuhan sel dalam fotobioreaktor.

Karena dalam fotobioreaktor selalu mengalami penambahan sel setiap waktu maka fotobioreaktor itu akan semakin pekat dengan sel-sel yang telah tumbuh. Seharusnya jumlah sel yang terserap di dalam filter akan semakin banyak. Namun pada kenyataannya jumlah sel yang terlarut fluktuasi terhadap waktu. Ini disebabkan karena performa filter aliran sirkulasi amat bergantung pada kerja kompresor dan level cairan yang merendam rangkaian filter. Semakin banyak filter terendam medium, akan semakin baik kerja filter. Hal ini dikarenakan semakin mudah kompresor mengangkat medium yang akan disirkulasikan ke dalam fotobioreaktor kembali. Sehingga seiring berjalannya waktu medium dalam fotobioreaktor akan berkurang yang menyebabkan rangkaian filter akan semakin sedikit terendam medium. Ini yang mengakibatkan kinerja filter semakin menurun. Namun disamping itu kerja kompresor pun tidaklah konstan yang menyebabkan kerja filter tidak konstan.

Pengaruh kinerja sistem filter ini dapat digambarkan pada grafik berikut.



Gambar 4.5 X alterasi dengan menggunakan filter dan tanpa filter

Dari grafik di atas dapat terlihat bahwa jumlah pertumbuhan sel dalam fotobioreaktor menunjukkan hasil yang lebih baik jika kita menggunakan sistem filter. Pada grafik ditunjukkan pada ± 25 jam pertama pertumbuhan menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda antara sistem yang menggunakan filter dan tanpa filter. Baru setelah itu mulai mengalami perbedaan jumlah sel yang didapatkan. Saat 25 jam pertama tersebut pengaruh kepekatan fotobioreaktor belum terlalu signifikan. Sel-sel yang ada di dalam fotobioreaktor belum mengalami efek *shading* yang berarti serta kompetisi dalam perebutan nutrisi belum terlalu berarti.

Setelah 25 jam barulah kinerja filter menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan terhadap pertumbuhan sel dalam fotobioreaktor. Pengurangan sel di dalamnya menyebabkan berkurangnya konsentrasi sel dalam fotobioreaktor yang diikuti oleh berkurangnya efek *shading* dan kompetisi memperebutkan nutrisi.

Kinerja filter memiliki batas maksimum. Yaitu ketika seluruh permukaan filter tertutupi oleh sel sehingga sudah tidak terdapat lagi bagian dari permukaan filter yang dapat digunakan untuk menyerap sel-sel berikutnya.

Saat kita membandingkan dengan alterasi yang dilakukan tanpa perlakuan filterasi dengan yang menggunakan perlakuan filterasi, maka yang menggunakan perlakuan filterasi akan menghasilkan berat kering sel yang lebih besar. Hal ini dikarenakan pengurangan efek *shading*

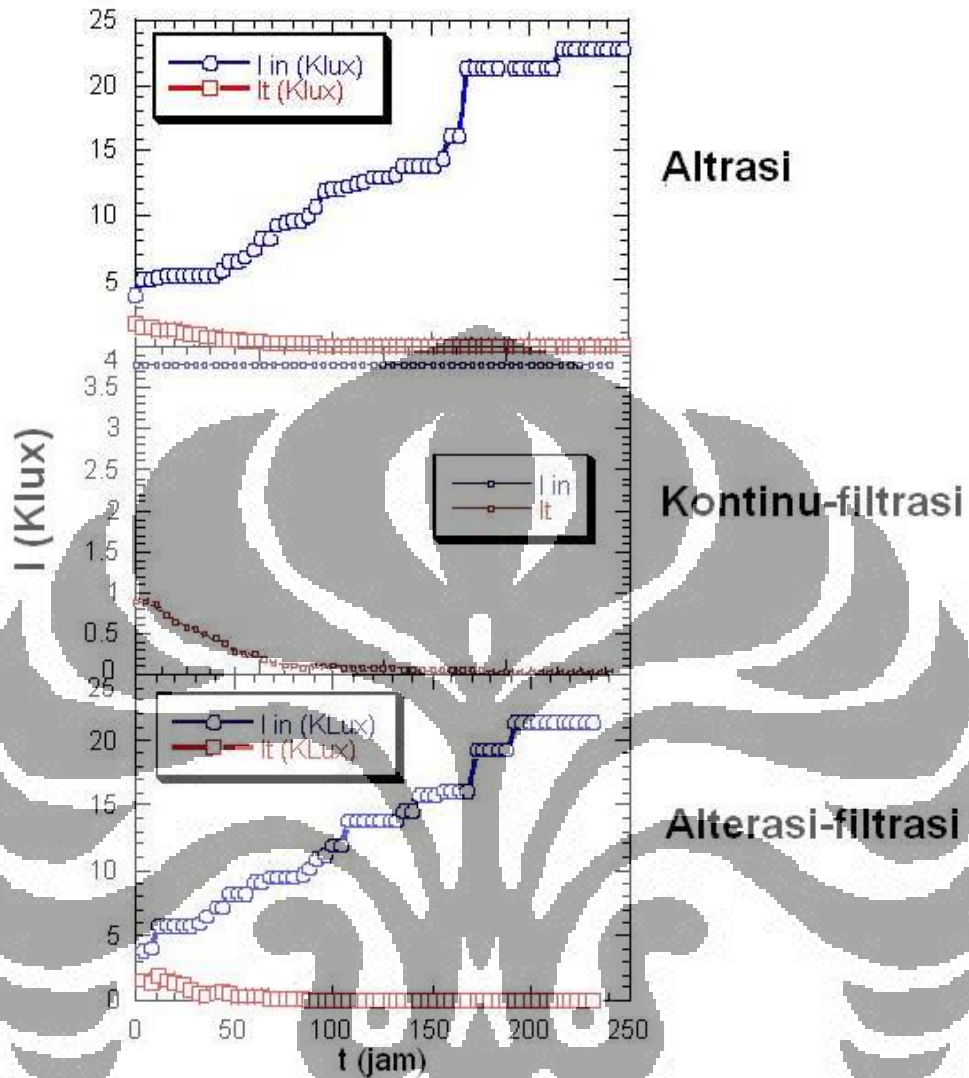
yang dilakukan oleh filter menyebabkan sel-sel dalam fotobioreaktor mendapatkan kesempatan lebih untuk berkembang biak.

Namun pada akhirnya fotobioreaktor akan memiliki kerapatan sel yang sama dengan pencahayaan alterasi yang dilakukan tanpa filterasi. Saat sel mulai menunjukkan kerapatan yang meningkat, maka jumlah sel akan berkurang di dalam fotobioreaktor. Namun secara netto fotobioreaktor tetap akan menunjukkan penambahan sel. Akibat penambahan sel secara terus menerus ini maka akan didapatkan kerapatan sel yang sama di dalam fotobioreaktor dalam rentang waktu tertentu dengan perlakuan alterasi tanpa filterasi. Konsekuensi yang didapatkan adalah, semakin lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan kerapatan sel yang sama dengan perlakuan alterasi tanpa filterasi.

4.4 PENGARUH PENGGUNAAN FILTER TERHADAP KONSUMSI ENERGI CAHAYA YANG DIGUNAKAN

Energi yang digunakan adalah dalam bentuk cahaya. Energi cahaya ini digunakan oleh sel untuk melakukan fotosintesis. Proses fotosintesis inilah yang kemudian akan menghasilkan energy berupa karbohidrat yang dibutuhkan oleh manusia. Energi cahaya dihasilkan dari sumber penerangan buatan, yaitu lampu TL yang bercahaya putih. Lampu yang dipilih adalah lampu yang mengeluarkan cahaya putih agar menyerupai cahaya matahari di luar ruangan. Selain itu lampu putih mampu mengkonversi energy listrik ke dalam energi cahaya lebih baik dibandingkan dengan lampu kuning. Pada lampu kuning selain dihasilkan konversi energi yang rendah juga dihasilkan energi panas yang tidak diinginkan, mengingat *Chlorella Vulgaris* tidak tahan terhadap temperatur yang tinggi yang dihasilkan oleh lampu kuning.

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa intensitas di bagian belakang yang keluar dari fotobioreaktor akan terus menurun seiring dengan peningkatan intensitas yang diberikan, yang berarti peningkatan jumlah sel di dalam fotobioreaktor. Peningkatan jumlah sel ini akan menyebabkan jumlah intensitas cahaya yang diserap oleh sel akan semakin banyak. Energi yang ditranfer melalui cahaya ini digunakan oleh sel untuk melakukan fotosintesis. Yang dengan berlangsungnya proses fotosintesis ini maka sel akan melakukan proses perkembangbiakan.



Gambar 4. 6 Intensitas pada alterasi, kontinu-filtrasi, dan alterasi-filtrasi

Dari grafik diatas dapat terlihat bahwa konsumsi energy terbesar adalah pada fotbioreaktor dengan sistem filtrasi dan pencahayaan terbesar. Dengan perhitungan efisiensi terhadap penggunaan energi maka akan didapatkan data seperti pada tabel berikut.

Tabel 4. 2 Perbandingan penggunaan energi dan efisiensi dari masing-masing reaktor

Sistem reaktor	Ex	E	η
Alterasi	0.219 J/mg	32.51 J/mg	0.673%
Kontinu-filtrasi	0.198 J/mg	25.98 J/mg	0.762%
Altrasi-filtrasi	1.78 J/mg	47.187 J/mg	3.772%

Dari tabel dapat diketahui walaupun penggunaan energi oleh fotobioreaktor dengan menggunakan filter pada pencahayaan alterasi memakan kuantitas energi lebih besar namun efisiensi dari fotobioreaktor tersebut menunjukkan angka yang paling besar. Saat konsentrasi (kepekatan) pada fotobioreaktor dikurangi dengan menggunakan filter, maka akan terjadi penurunan kepekatan sel yang menyebabkan cahaya dapat menembus dengan baik sampai ke bagian bagian belakan belakang fotobioreaktor. Performa ini ditambah lagi dengan meningkatkan besar intensitas cahaya saat terjadi peningkatan jumlah sel dalam fotobioreaktor.

Pada percobaan alterasi tanpa menggunakan filtrasi, intensitas cahaya dinaikkan seiring dengan pertambahan jumlah sel dalam fotobioreaktor. Semakin lama jumlah sel dalam fotobioreaktor ini akan semakin bertambah yang ditandai dengan semakin pekatnya (bertambah hijau) media yang ada dalam fotobioreaktor. Indikator yang menunjukkan ini adalah penurunan besar intensitas keluaran dari fotobioreaktor yang diukur dari celah sempit yang ada di belakang fotobioreaktor meskipun besar intensitas yang diberikan melalui bagian depan ditingkatkan. Intensitas ini hanya dapat ditingkatkan sampai batasan tertentu.

Saat energi yang diberikan terlalu besar maka energy ini akan merusak kloroplas yang dimiliki sel. Akibatnya sel tidak dapat melakukan fotosintesis lebih lanjut dan akhirnya mati. Artinya ada suatu kondisi yang jenuh (sel sudah tidak dapat bertambah lagi) yaitu saat sel telah mencapai fasa stasioner yang kemudian diikuti dengan fasa kematian.

Pada sistem yang dipasang filter kuantitas energi yang diserap akan lebih banyak karena konsenterasi sel di dalam fotobioreaktor dikontrol oleh adanya filter. Energi yang diberikan

benar-benar digunakan oleh sel untuk berkembang biak. Sel dalam fotobioreaktor dengan filtrasi akan mengalami perkembangbiakan dalam rentang waktu yang sama dengan alterasi tanpa filtrasi. Jumlah yang didapatkan akibatnya dapat lebih banyak karena dengan menggunakan filter jumlah sel adalah jumlah sel dalam fotobirektor ditambah dengan jumlah sel yang didapat dari hasil penyaringan filter.

Energi tersebut digunakan sel untuk menjalankan fotosintesisnya. Karena untuk menjalankan proses fotosintesis diperlukan tiga komponen utama, yaitu gas karbon dioksida, air, dan energi cahaya. Energi cahaya ini digunakan untuk membentuk ikatan phosphoanhidrat pada ATP dan mengurangi ikatan NADPH. Akibatnya sebagian besar sel dapat menerima cahaya dengan baik sebagai syarat terjadinya proses fotosintesis.



BAB V

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian kali ini didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Penggunaan filter pada fotobioreaktor dengan pencahayaan alterasi dapat meningkatkan pertumbuhan biomassa hingga 1,26 kali lebih banyak jika dibandingkan fotobioreaktor dengan pencahayaan alterasi dan tanpa menggunakan system filtrasi.
2. Jika dibandingkan dengan reactor yang menggunakan filter maka, pencahayaan alterasi akan menghasilkan produksi biomassa 1,35 kali lebih baik dibandingkan dengan pencahayaan kontinu.
3. Efisiensi energi yang dipancarkan oleh sumber cahaya pada penelitian kali ini dapat mencapai 3,77%.
4. Energi yang dibutuhkan oleh biomassa dalam pertumbuhannya adalah sebesar 1,78 KJ/g.

DAFTAR PUSTAKA

- Andika, S.M.K., “*Skripsi : Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella Vulgaris Buitenzorg Dengan Alterasi Pencahayaan Pada Fotobioreaktor Kolom Gelembung*”, Depok : Departemen Teknik Gas dan Petrokimia Universitas Indonesia, (2005)
- Anonom, “*Calvin Cycle*”, [http://www.starsandseas.com/SAS%20Cells/SAS%20_cellphysiol/SAS%20p\[photosyn/cellcalvin.htm](http://www.starsandseas.com/SAS%20Cells/SAS%20_cellphysiol/SAS%20p[photosyn/cellcalvin.htm)
- Anonim, “*Calvin Cycle*”, <http://www.bio.umass.edu/boilogy/conn.river/calvin.html>, 27 Mei 2007
- Anonim, “*Global Warming*”, http://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming
- Anonim, “*Morfologi Sel*”, http://id.wikipedia.org/wiki/badan_golgi, 27 Mei 2007
- Anonim, “*Photosynthesis*”, <http://www.biologyreference.com/Ph-Po/Photosynthesis.html>,
photosynthesis forum
- Falkowski, Paul G. And John A. Raven, “*Aquatic Photosynthesis*”, Massachusetts, Blackwell Science, Inc., (1997)
- Jr., Jerry Workman and Art W. Spingsteen, “*Applied Spectroscopy ‘A Compact Reference for Practitioner’*”. London, (1997)
- Kirk, John T.O., “*Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*”, Cambridge Univ. Press, Cambridge, (1983)
- Sendjaja, Antonius Yudi, “*Skripsi : Peningkatan produksi Biomassa Chlorella Vulgaris Buitenzorg Dengan Optimasi Pencahayaan Alterasi Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri*”, Depok : Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Universitas Indonesia
- Surawiria, U., “*Chlorella Untuk Kesehatan dan Kebugaran*”, Bandung: Papyrus Sinar Sunanti, (2005)

LAMPIRAN A

HASIL PEROLEHAN DATA

Dari hasil percobaan yang telah dilakukan maka diperoleh hasil penelitian sebagai berikut.

Waktu (jam)	0	4	8	12	16	20
Reaktor						
μN	0	-0,00431	0,028267	0,023224	0,030168	0,072746
μx	0	-0,00431	0,028267	0,023224	0,030168	0,072746
OD	0,241	0,237	0,269	0,242	0,271	0,32
I in (lux)	3.775	3.775	4.077	5.849	5.089	5.142
It (lux)	1.656	1.642	1.470	1.868	1.603	1.338
pH	6,9	7,67	6,38	6,29	6,08	6,21
Nsel (sel/L)	1.103.799	1.084.923	1.235.931	1.108.518	1.245.369	1.476.600
X (mg/L)	0,787372	0,773907	0,881626	0,790738	0,888358	1,053302
Filtrat						
OD				over		
Nsel (sel/L)				9.246.111		
X (mg/L)				0,0732836		

Waktu (jam)	24	28	32	36	40	44
Reaktor						
μN	0,179065	0,202506	0,217276	0,2552	0,237874	0,218575
μx	0,179065	0,202506	0,217276	0,2552	0,237874	0,218575
OD	0,428	0,447	0,503	0,589	0,631	0,613
I in (lux)	5.210	5.210	5.889	6.493	7.173	7.173
It (lux)	1.179	821	530	411	534	763
pH	6,22	6,1	6,1	7,42	7,62	7,76
Nsel (sel/L)	2.198.160	2.481.300	2.632.308	3.019.266	2.858.373	2.646.018
X (mg/L)	1,568012	1,769984	1,877702	2,153731	2,038961	1,887482
Filtrat						
OD	1,22			0,928		

Nsel (sel/L)	5.495.400			3.981.048		
X (mg/L)	0,0435559			0,0315533		

Waktu (jam)	48	52	56	60	64	68
Reaktor						
μ N	0,286979	0,262611	0,292193	0,367001	0,261487	0,356037
μ x	0,286979	0,262611	0,292193	0,367001	0,261487	0,356037
OD	0,717	0,769	0,797	0,808	0,854	0,88
I in (lux)	8305	8305	8305	9060	6493	9513
It (lux)	450,331	397,351	344,371	291,391	423,841	211,921
pH	8,01	8,14	8,08	7,51	8,82	6,52
Nsel (sel/L)	3.438.810	3.155.670	3.552.066	4.741.254	3.141.513	4.585.527
X (mg/L)	2,453004	2,51032	2,533793	3,382075	2,240933	3,270991
Filtrat						
OD	1,003			1,067		
Nsel (sel/L)	3.594.537			4.486.428		
X (mg/L)	0,0284899			0,0355589		

Waktu (jam)	72	76	80	84	88	92
Reaktor						
μ N	0,358454	0,363638	0,38788	0,324891	0,338978	0,370993
μ x	0,358454	0,363638	0,38788	0,324891	0,338978	0,370993
OD	0,939	1,039	0,978	1,042	1,103	1,182
I in (lux)	8305	9513	9513	9664	10117	10872
It (lux)	251,656	198,675	105,96	100,662	92,715	86,093
pH	6,98	7,65	6,47	6,64	6,49	6,57
Nsel (sel/L)	4.557.213	4.727.097	5.208.435	3.981.048	4.283.064	4.868.220
X (mg/L)	3,250793	3,371977	3,715329	2,839798	3,055235	3,472644
Filtrat						
OD	1,265			1,187		
Nsel (sel/L)	6.557.175			6.061.680		
X (mg/L)	0,0519714			0,0480442		

Waktu (jam)	96	100	104	108	112	116
Reaktor						
μ N	0,391456	0,404508	0,39676	0,474898	0,439275	0,442936
μ x	0,391456	0,404508	0,39676	0,474898	0,439275	0,442936
OD	1,204	1,246	1,278	1,394	1,346	1,353
I in (lux)	11174	11929	11476	13741	9301,6	9362
It (lux)	83,444	79,47	68,874	46,358	37,086	30,464
pH	6,86	7,13	7,21	5,98	6,29	6,31
Nsel (sel/L)	5.170.236	5.566.632	5.396.748	7.303.224	6.397.176	6.491.556
X (mg/L)	3,688081	3,970842	3,849658	5,209603	4,563293	4,630617
Filtrat						
OD	1,814			1,491		
Nsel (sel/L)	10.190.358			6.627.960		
X (mg/L)	0,0807676			0,0525324		

Waktu (jam)	120	124	128	132	136	140
Reaktor						
μ N	0,462996	0,434809	0,39676	0,48718	0,49134	0,49506
μ x	0,462996	0,434809	0,39676	0,48718	0,49134	0,49506
OD	1,381	1,34	1,277	1,649	1,661	1,682
I in (lux)	11400,5	12306,5	11476	13722,125	14496	14496
It (lux)	25,166	17,219	13,245	25,517	21,192	17,219
pH	6,42	6,31	6,29	7,57	7,73	8,28
Nsel (sel/L)	6.925.704	6.283.920	5.396.748	7.666.140	7.878.495	7.996.470
X (mg/L)	4,940307	4,482504	3,849658	5,468482	5,619961	5,704116
Filtrat						
OD	1,79			1,884		
Nsel (sel/L)	9.737.334			7.387.272		
X (mg/L)	0,0771769			0,0585506		

Waktu (jam)	144	148	152	156	160	164
Reaktor						
μ N	0,51436	0,46746	0,49987	0,52353	0,52932	0,54647

μx	0,51436	0,46746	0,49987	0,52353	0,52932	0,54647
OD	1,727	1,696	1,778	over	over	over
I in (lux)	15779,5	13722,125	13967,5	16161,53	16161,53	16161,53
It (lux)	14,57	14,57	11,921	11,921	9,272	7,947
pH	8,22	8,4	7,53	7,25	7,39	7,53
Nsel (sel/L)	8.548.146	7.160.760	8.151.750	8.859.600	9.171.054	9.822.276
X (mg/L)	6,097643	5,10798	5,814882	6,319812	6,541981	7,006517
Filtrat						
OD	1,895			over		
Nsel (sel/L)	8.095.122			9.144.426		
X (mg/L)	0,064161			0,0722399		

Waktu (jam)	168	172	176	180	184	188
Reaktor						
μN	0,55228	0,57017	0,59351	0,51517	0,56002	0,5694
μx	0,55228	0,57017	0,59351	0,51517	0,56002	0,5694
OD	over	over	over	over	over	over
I in (lux)	16161,53	19167,185	19167,185	17440,5	18799,5	19101,5
It (lux)	5,298	6,623	5,298	3,974	1,325	1,325
pH	7,43	7,23	7,61	7,21	7,13	7,12
Nsel (sel/L)	9.935.532	10.798.622	11.855.718	8.552.418	10.369.233	10.765.629
X (mg/L)	7,087306	7,703002	8,45703	6,10069	7,396677	7,679438
Filtrat						
OD	over			over		
Nsel (sel/L)	10.567.431			10.237.101		
X (mg/L)	0,0837562			0,081138		

Waktu (jam)	192	196	200	204	208	212
Reaktor						
μN	0,60005	0,5893	0,59351	0,60005	0,61035	0,59628
μx	0,60005	0,5893	0,59351	0,60005	0,61035	0,59628
OD	over	over	over	over	over	over
I in (lux)	21291	16157	19101,5	19403,5	20385	19252,5

It (lux)	1,325	1,325	1,325	1,325	1,325	1,325
pH	7,21	7,2	7,1	7,1	7	7
Nsel (sel/L)	12.053.916	11.657.520	11.855.718	12.053.916	12.681.543	11.987.850
X (mg/L)	8,599411	8,31565	8,45703	8,598411	9,046115	8,551284
Filtrat						
OD	over			over		
Nsel (sel/L)	10.435.299			10.435.299		
X (mg/L)	0,0827089			0,0827089		

Waktu (jam)	216	220	224	228	232
Reaktor					
μ N	0,5779	0,57093	0,56709	0,47823	0,56553
μ x	0,5779	0,57093	0,56709	0,47823	0,56553
OD	over	over	over	over	over
I in (lux)	19026	18875	18724	17063	15855
It (lux)	1,325	1,325	1,325	1,325	1,325
pH	7,2	7,1	7,2	7,2	7
Nsel (sel/L)	11.029.893	10.831.695	10.666.530	7.363.230	10.600.464
X (mg/L)	7,867945	7,726565	7,608748	5,252408	7,561621
Filtrat					
OD	over			over	
Nsel (sel/L)	9.741.606			10.138.002	
X (mg/L)	0,0722108			0,0803526	

LAMPIRAN B

PENGOLAHAN DATA OD₆₀₀

B.1. Pengolahan Data X dan N Sel Reaktor

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

Penentuan Berat Kering Sel (X)

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

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

Dengan memasukkan nilai OD ke x maka akan kita dapatkan berat kering sel.

Misal besar OD pada detik ke 0 sebesar 0.241. Maka :

$$y = 0.0033662 \times 0.241 - 2.3882 \times 10^{-5}$$

$$y = 0,000787273 \text{ g / liter} = 0,787273 \text{ mg / liter}$$

Penentuan Jumlah Sel (sel/ml)

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

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

Dengan memasukkan nilai OD ke x maka akan kita dapatkan berat kering sel.

Misal besar OD pada detik ke 0 sebesar 0.241. Maka :

$$y = 4.719 \times 10^6 \times 0.241 - 33480$$

$$y = 1.103.799 \text{ sel / ml}$$

B.2. Pengolahan Data X dan N Sel Filtrat

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

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

Dimana x adalah OD setelah pengenceran (berada pada rentang 0.2-0.4) dan a adalah factor/jumlah pengenceran. Misal pada 12 jam pertama. OD dari filtrat menunjukkan nilai over. Setelah dilakukan pengenceran sebanyak 7 kali maka nilai OD sebesar 0.287. Maka Besar X dapat dihitung :

$$y = (0.0033662 \times 0.287 - 2.3882 \times 10^{-5}) \times 7$$

$$y = 6,596 \text{ mg / liter}$$

B.3. Penurunan Persamaan Laju Pertumbuhan Spesifik

Dengan memplot data waktu kultivasi dan X maka akan kita dapatkan suatu persamaan polinomial berderajat 4 sebagai berikut.

$$y = -2 \times 10^{-8} x^4 + 10^{-5} x^3 - 0.001x^2 + 0.084x + 0.225$$

Dengan memasukkan persamaan diatas ke dalam persamaan monod maka akan didapat :

$$\mu = \frac{1}{X} \frac{d(-2 \times 10^{-8} x^4 + 10^{-5} x^3 - 0.001x^2 + 0.084x + 0.225)}{dt}$$

$$\mu = \frac{1}{X} (-8 \times 10^{-8} x^3 + 3 \times 10^{-5} x^2 - 0.002x + 0.084)$$

LMAPIRAN C

PENGOLAHAN DATA pH

C.1. Contoh Pengolahan Data

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

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

Dengan nilai : P_T (ambient pressure) = 1 atm = 101.25kPa

$$y_{CO_2} = 5\% = 0,05$$

$$K_{CO_2,0} = 4,38 \times 10^{-7}$$

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

$$T \text{ (ambient temperature)} = 29^\circ\text{C} = 302 \text{ K}$$

$$T_0 = 298,15 \text{ K}$$

$$A_k = 40,557$$

$$A_h = 22,771$$

$$B_k = -36,782$$

$$B_h = -11,452$$

$$C_k = 0$$

$$C_h = -3,117$$

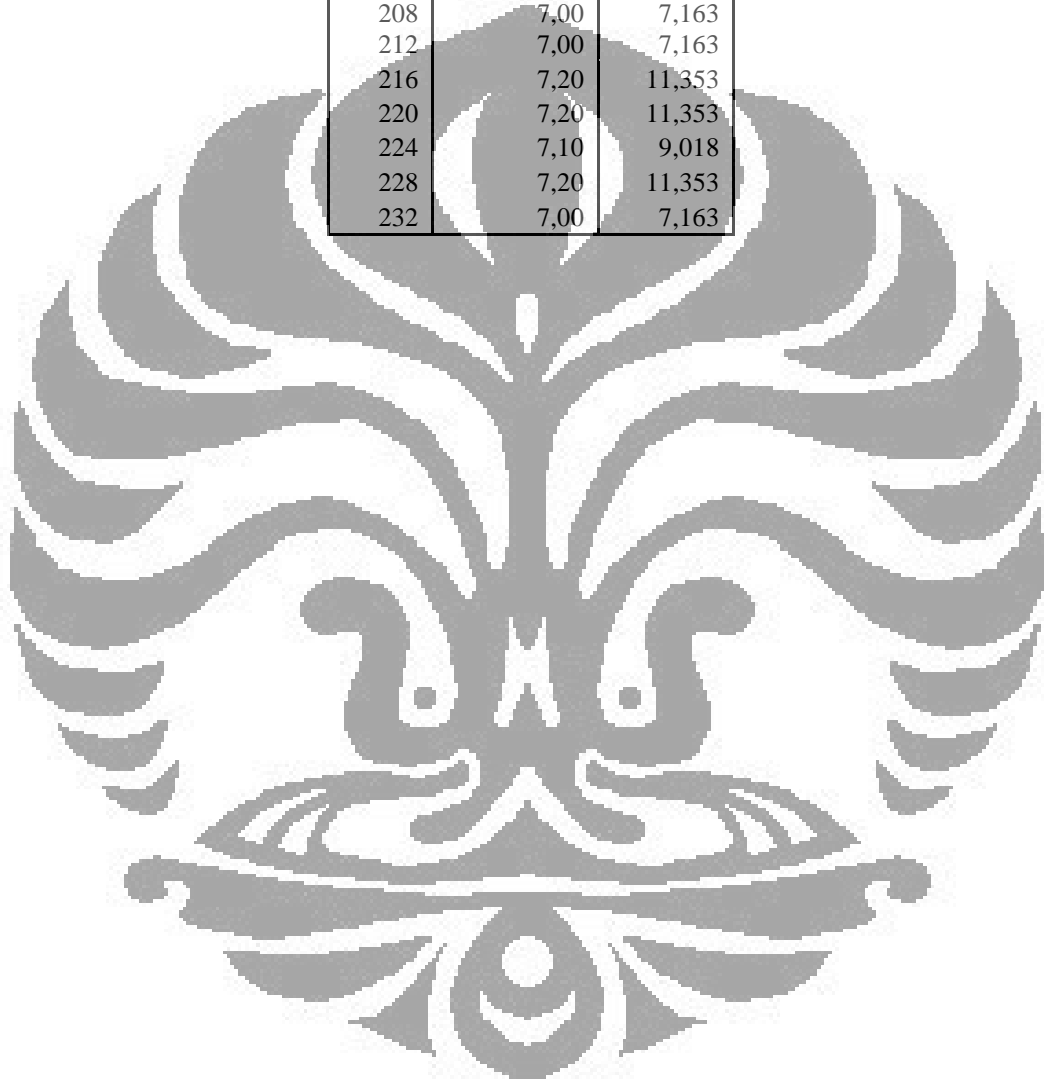
Dengan memasukkan nilai-nilai di atas maka persamaan di atas akan menjadi :

$$[HCO_3^-] = \frac{7,163 \times 10^{-7}}{10^{-pH}}$$

C.2. Hasil Pengolahan Data

Waktu (jam)	pH	[HCO ₃ ⁻]
0	6,90	5,690
4	7,67	33,504
8	6,38	1,718
12	6,29	1,397
16	6,08	0,861
20	6,21	1,162
24	6,22	1,189
28	6,10	0,902
32	6,10	0,902
36	7,42	18,841
40	7,62	29,860
44	7,76	41,219
48	8,01	73,298
52	8,14	98,877
56	8,08	86,118
60	7,51	23,179
64	7,82	47,325
68	6,52	2,372
72	6,98	6,841
76	7,65	31,996
80	6,47	2,114
84	6,64	3,127
88	6,49	2,214
92	6,57	2,661
96	6,86	5,189
100	7,13	9,663
104	7,21	11,617
108	5,98	0,684
112	6,29	1,397
116	6,31	1,462
120	6,42	1,884
124	6,31	1,462
128	6,29	1,397
132	7,57	26,613
136	7,73	38,468
140	8,28	136,488
144	8,22	118,876
148	8,40	179,926
152	7,53	24,271
156	7,25	12,738
160	7,39	17,583
164	7,53	24,271
168	7,43	19,279
172	7,23	12,165
176	7,61	29,181

Waktu (jam)	pH	[HCO ₃ ⁻]
180	7,21	11,617
184	7,13	9,663
188	7,12	9,443
192	7,21	11,617
196	7,20	11,353
200	7,10	9,018
204	7,10	9,018
208	7,00	7,163
212	7,00	7,163
216	7,20	11,353
220	7,20	11,353
224	7,10	9,018
228	7,20	11,353
232	7,00	7,163

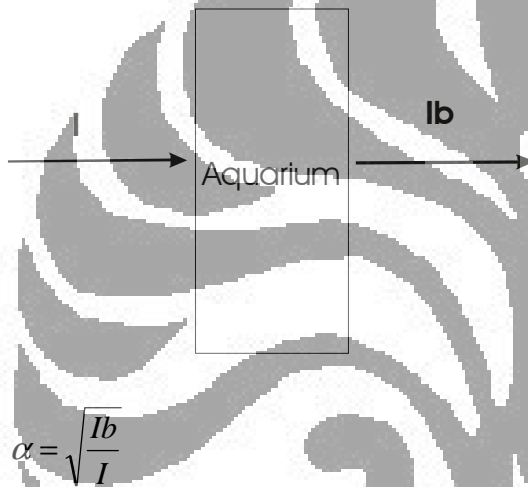


LAMPIRAN D

PENGOLAHAN DATA I

D.1. Pengukuran α Kaca

Saat cahaya melewati sebuah medium padatan maka akan ada sebagian dari energinya yang diserap oleh medium tersebut. Variabel yang digunakan untuk menyatakan kemampuan untuk menyerap energi tersebut dilambangkan dengan α . Besar α ini bergantung dari jenis bahan. Perhitungan α kaca dapat digambarkan sebagai berikut



D.2. Pengolahan Data I

Perhitungan α kaca

Titik	I masuk	I keluar	α kaca
1	1270	400	0,561214
2	1340	540	0,634811
3	1570	870	0,744406
4	1370	910	0,815005
5	1970	690	0,591822
6	1550	880	0,753487
7	980	1040	1,030158
8	1550	930	0,774597
9	1170	930	0,891556
α kaca rata-rata			0,755228