



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN MEMBRAN SERAT BERONGGA SEBAGAI
MEDIA AERASI DALAM PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella*
vulgaris BUITENZORG**

SKRIPSI

CANGGIH RESTHUREDITYA REZA

0806367821

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA
DEPOK
JANUARI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN MEMBRAN SERAT BERONGGA SEBAGAI
MEDIA AERASI DALAM PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella*
vulgaris BUITENZORG**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

CANGGIH RESTHUREDITYA REZA

0806367821

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JANUARI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Canggih Resthureditya Reza

NPM : 0806367821

Tanda Tangan :

Tanggal : 29 Desember 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Canggh Resthureditya Reza
NPM : 0806367821
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : PEMANFAATAN MEMBRAN SERAT
BERONGGA SEBAGAI MEDIA AERASI DALAM PRODUKSI BIOMASSA
Chlorella vulgaris BUITENZORG

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Dianursanti, MT. ()
Pembimbing : Ir. Sutrasno Kartohadjono MSc PhD ()
Penguji : Ir. Tania Surya Utami, MT ()
Penguji : DrEng Muhammad Sahlan Ssi, Meng ()
Penguji : Ir. Setiadi MEng ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Januari 4 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT karena atas berkat dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “**PEMANFAATAN MEMBRAN SERAT BERONGGA SEBAGAI MEDIA AERASI DALAM PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* BUITENZORG**”. Penulisan makalah skripsi ini ditujukan untuk memenuhi sebagian persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Kimia FTUI.

Di dalam makalah skripsi ini, penulis akan memperlihatkan perbandingan hasil produksi *Chlorella vulgaris* yang dibiakkan dengan menggunakan membran serat berongga sebagai media aerasi sehingga didapatkan produksi secara maksimal.

Penulis mengucapkan kepada terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis yang memberikan dukungan moril dan materil dalam pembuatan makalah ini
2. Ibu Dianursanti, selaku dosen pembimbing, atas segala instruksi, arahan dan pinjaman bukunya
3. Teman-teman penulis, terutama Teknik Kimia Ekstensi angkatan 2008, yang ikut memberikan kontribusi dalam pembuatan makalah ini, baik berupa saran, dukungan moril dan doa.
4. Semua pihak yang telah membantu mulai dari proses pembuatan makalah hingga makalah skripsi ini selesai dibuat.

Penulis menyadari bahwa makalah skripsi ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif dari pembaca untuk perbaikan pada pembuatan makalah skripsi selanjutnya.

Depok, Desember 2010

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Canggih Resthureditya Reza
NPM : 0806367821
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : 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 :

PEMANFAATAN MEMBRAN SERAT BERONGGA SEBAGAI MEDIA AERASI DALAM PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* BUITENZORG

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari 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 :

Yang menyatakan

(Canggih Resthureditya Reza)

ABSTRAK

Nama : Canggih Resthureditya Reza
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : PEMANFAATAN MEMBRAN SERAT BERONGGA SEBAGAI MEDIA AERASI DALAM PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris* BUITENZORG

CO₂ di atmosfer sejak tahun 2000 meningkat empat kali lebih cepat ketimbang sepuluh tahun sebelumnya, dan pada tahun 2007 tercatat emisi CO₂ di dunia mencapai sebesar 10 milyar ton dimana laju pertumbuhan ekonomi, penggunaan sumber-sumber energi yang tidak efisien, dan degradasi hutan-hutan dan lautan untuk sistem penyerapan CO₂ terlibat dalam peningkatan CO₂ tersebut. Berbagai upaya telah dilakukan sebagai langkah untuk mendukung kebijakan mengurangi gas rumah kaca di antaranya adalah dengan mengembangkan penelitian-penelitian di bidang bioteknologi dimana salah satunya adalah pemanfaatan mikroalga untuk memfiksasi CO₂ melalui proses fotosintesis. CO₂ dalam hal ini merupakan salah satu komponen utama selain H₂O dalam pembentukan karbohidrat sumber energi mikroalga untuk tumbuh dan berkembang biak.

Chlorella vulgaris—salah satu spesies mikroalga yang dikembangkan untuk biomassa—dibiakkan dengan menggunakan media aerasi membran serat berongga yang bertujuan untuk meningkatkan koefisien perpindahan massa CO₂ dari gelembung gas yang dialirkan melewati media kultur. Semakin banyak CO₂ yang terlarut dalam media kultur akan memberikan kesempatan yang lebih merata bagi mikroalga untuk menyerap CO₂ sehingga diharapkan terjadinya peningkatan produksi biomassa yang lebih tinggi dan fiksasi CO₂ yang lebih efisien.

Kata Kunci: mikroalga, *Chlorella vulgaris*, membran serat berongga, fiksasi CO₂

ABSTRACT

Name : Canggih Resthureditya Reza
Study Program : Chemical Engineering
Title : THE UTILIZATION OF HOLLOW FIBER MEMBRANE AS
AERATION MEDIA ON BIOMASS PRODUCTION OF *Chlorella vulgaris*
BUITENZORG

Since the year of 2000, CO₂ on the atmosphere had increased four times faster than on the previous decade, and on the year of 2007, CO₂ had reached about 10 billion ton which the economic growth rate, the inefficient use of energy, and the degradation of woods and oceans for CO₂ absorption system were involved on the increasing CO₂. There were so many efforts that have been done as measures to support the policy to lower the green house gases which one of them was to develop some researches on biotechnology field by using microalgae to fixate CO₂ through photosynthesis process. CO₂ on this case is one of the main components beside H₂O to form carbohydrate, the energy source for microalgae to grow and reproduce.

Chlorella vulgaris—one of the microalgae species that are developed for biomass—is being cultivated using hollow fiber membrane as the aeration media to increase the mass transfer coefficient of CO₂ from gas bubbles that were flown through the culture media. The more CO₂ dissolved on culture media, the more chance for the microalgae to absorb the CO₂ so it will be expected that there will be a higher increase of biomass production and an efficient fixation of CO₂.

Key Word: microalga, *Chlorella vulgaris*, hollow fiber membrane, CO₂ fixation.

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | iii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iv |
| KATA PENGANTAR | v |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS | vi |
| ABSTRAK | vii |
| ABSTRACT | viii |
| DAFTAR ISI | ix |
| DAFTAR GAMBAR | vi |
| DAFTAR TABEL | vii |
| BAB I | 13 |
| PENDAHULUAN | 13 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah | 13 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 18 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 18 |
| 1.4 Batasan Masalah | 18 |
| 1.5 Sistematika Penulisan | 19 |
| BAB II | 20 |
| TINJAUAN PUSTAKA | 20 |
| 2.1 Alga Hijau <i>Chlorella vulgaris</i> | 20 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 2.2 Membran | 29 |
| BAB III | 34 |
| METODE PENELITIAN | 34 |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian | 34 |
| 3.2 Alat dan Bahan Penelitian | 34 |
| 3.3 Variabel Penelitian | 35 |
| 3.4 Prosedur Penelitian | 36 |
| BAB IV | 46 |
| HASIL DAN PEMBAHASAN | 46 |
| 4.1. Pembahasan Umum | 46 |
| 4.2 Data Penelitian | 50 |
| BAB V | 62 |
| KESIMPULAN | 62 |
| DAFTAR PUSTAKA | 63 |
| LAMPIRAN | 65 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2.1 <i>Chlorella vulgaris</i> | 21 |
| Gambar 2.2 Produk utama dari fotosintesis reaksi gelap dan terang | 23 |
| Gambar 2.3 Kurva Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> | 27 |
| Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian | 34 |
| Gambar 3.2 Rangkaian Peralatan Fotobioreaktor Tunggal | 37 |
| Gambar 4.1 Massa Kering terhadap Waktu | 50 |
| Gambar 4.2 Laju Pertumbuhan pada Media Aerasi yang Berbeda dan penambahan 2 filter | 51 |
| Gambar 4.3 Pengaruh Perbedaan Media Aerasi dan Penambahan 2 filter Filtrasi terhadap $[\text{HCO}_3^-]$ | 54 |
| Gambar 4.4 Persentase Gas CO_2 yang Terfiksasi dengan Media Aerasi yang berbeda dan Penambahan 2 filter | 56 |
| Gambar 4.5 Pengaruh Media Aerasi yang Berbeda dan Penambahan 2 filter terhadap CTR | 57 |
| Gambar 4.6 Pengaruh Media Aerasi yang Berbeda dan Penambahan 2 filter terhadap CUR | 59 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 1.1 <i>Road map</i> penelitian tentang produksi biomassa mikroalga <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg di Laboratorium Rekayasa Bioproses Universitas Indonesia | 15 |
| Tabel 2.1 Karakteristik Jenis Polymer | 32 |
| Tabel 3.1 Bahan – Bahan Pembuatan Medium Benneck | 39 |
| Tabel 3.2 <i>Elemental Analysis</i> Sel <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg | 45 |
| Tabel 4.1 Perbandingan Media Aerasi dan Penambahan 2 filter | 41 |
| Tabel 4.2 Nilai E_x dan Efisiensi yang diperoleh pada Penelitian | 60 |

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

1.1 Latar Belakang Masalah

Banyaknya energi yang telah digunakan dan kian banyak polutan yang mencemari udara mendorong lahirnya Protokol Kyoto pada tanggal 11 Desember 1997 dimana protokol tersebut mewajibkan negara-negara industri maju untuk mengurangi emisi gas rumah kaca—seperti CO₂, CH₄, N₂O, HFCS, PFCS, dan SF₆—minimal 5,5 % dari tingkat emisi tahun 1990 selama tahun 2008 sampai tahun 2012 ([Republika online-http//www.republika.co.id.htm](http://www.republika.co.id.htm), Januari 2007). *Global Carbon Project* menyatakan bahwa kadar CO₂ di atmosfer sejak tahun 2000 meningkat empat kali lebih cepat ketimbang sepuluh tahun sebelumnya, dan pada tahun 2007 tercatat emisi CO₂ di dunia mencapai sebesar 10 milyar ton dimana laju pertumbuhan ekonomi, penggunaan sumber-sumber energi yang tidak efisien, dan degradasi hutan-hutan dan lautan untuk sistem penyerapan CO₂ terlibat dalam peningkatan CO₂ tersebut. Ironisnya, peningkatan terjadi pada periode dimana dunia telah mengakui akan pentingnya kebijakan iklim. Walaupun perubahan iklim telah didefinisikan sebagai “perubahan pada iklim pada rentang waktu yang entah disebabkan oleh variabel alamiah atau hasil dari aktivitas manusia”, *International Panel on Climate Change* menyatakan bahwa kemungkinan 90 hingga 99 % perubahan iklim global itu disebabkan oleh manusia. Oleh sebab itu, perlu adanya usaha untuk mendukung pengurangan emisi gas rumah kaca yang disebabkan oleh manusia itu sendiri.

Berbagai upaya telah dilakukan sebagai langkah untuk mendukung kebijakan mengurangi gas rumah kaca di antaranya adalah dengan mengembangkan penelitian-penelitian di bidang bioteknologi dimana salah satunya adalah pemanfaatan mikroalga untuk memfiksasi CO₂ melalui proses fotosintesis.

Salah satu jenis mikroalga yang banyak terdapat di Indonesia adalah *Chlorella sp.* Efisiensi fotosintesis pada *C. vulgaris* dapat mencapai 8% dari kandungan klorofilnya hingga 28,9 g/kg berat biomassa, paling tinggi jika dibandingkan dengan seluruh mikroalga hijau bahkan tumbuhan tingkat tinggi di dunia (Darmawan, 2010). Oleh karena itu, *C. vulgaris* dapat memfiksasi CO₂ dalam jumlah yang sangat besar dimana secara tidak langsung akan berperan penting dalam penurunan efek pemanasan global.

Banyak masyarakat kota yang kekurangan zat-zat nutrisi seperti vitamin, serat dan mineral akibat aktivitas kerja yang tinggi ditambah dengan banyaknya konsumsi makanan cepat saji. Hal ini mengakibatkan timbulnya penyakit karena metabolisme yang kurang baik. Biomassa *Chlorella* dapat dibuat menjadi suplemen yang dapat memberikan zat nutrisi yang dibutuhkan tubuh manusia karena komposisi biomassa *C. vulgaris* memiliki kandungan protein yang cukup tinggi yaitu sekitar 59.8 % berat kering biomassa (Wijanarko dan Ohtaguchi, 2004). Permasalahan kurangnya asupan gizi bagi masyarakat dapat diatasi dengan hal ini.

Kemampuan mikroalga dalam menetralsir limbah dalam *wastewater treatment* dengan menyerap komponen C, N, dan P yang terkandung dalam limbah tersebut juga menjadi sorotan dalam penanggulangan masalah eutrofikasi di danau, sungai, dan lautan (Larsdotter 2006). *C. vulgaris* bisa jadi merupakan salah satu mikroalga yang dapat dipakai untuk perlakuan di dalam media kultur limbah tersebut walaupun hingga saat ini belum banyak studi mengenai hal tersebut.

Mengingat banyaknya manfaat *C. vulgaris*, maka perlu dilakukan studi lebih lanjut tentang pembudidayaan mikroalga ini agar didapatkan hasil yang optimal. Di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, beberapa penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan produksi biomassa *C. vulgaris*. Penelitian-penelitian di Laboratorium Rekayasa Bioproses Universitas Indonesia yang telah dilakukan sebelumnya ditujukan untuk melihat kondisi pertumbuhan mikroalga *C. vulgaris* yang optimal, seperti tampak pada tabel berikut ini.

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

| Peneliti (tahun) | Fokus Penelitian | | | Studi Hidro dinamika | Kandungan Biomassa |
|--|--|----------|---|-------------------------|-----------------------|
| | Pen Cahaya an | Filtrasi | Ke cepatan super fisial (U _G) | | |
| Rahayu (2006) & Apriayati N. (2006) | Pen Cahaya an alami | | | | |
| Valentino (2006) | Siklus harian atau terang gelap (flip-flop) | | | | |
| Muryanto (2006) | Pen Cahaya an periodik | | | | |
| Sujarwo (2006) | Pen Cahaya An kontinu | | | | |
| Andika(2005), Yudi.S (2006) Syahri (2008) Nisa.G (2009) | Alterasi pen Cahaya an | | | | |
| Syarif (2008) | | Efek | | | |

| | | | | | |
|---------------|--|---|---|---|-----------------------------|
| Rachma (2008) | | filtrasi pada volume kultur 18 L | | | |
| Puteri (2007) | | | U_G optimum untuk volume kultur 600 ml | | |
| Isnaeni(2009) | | | U_G optimum untuk volume kultur 18 L | | |
| Nita (2009) | | | | Penentuan parameter hidrodinamika | |
| Teryn (2009) | | | | | Uji kandungan protein |
| Putu (2010) | | | | Penentuan parameter hidrodinamika | |
| Heru (2010) | | Pengaruh Kecepatan hisap Filter Pada Foto bioreaktor 18 L | | | |

| | | | | | |
|--------------|--|---|--|--|--|
| Ponco (2010) | | Optimasi Pengaturan waktu filtrasi | | | |
|--------------|--|---|--|--|--|

Di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, telah dilakukan beberapa penelitian untuk meningkatkan produksi biomassa *C. vulgaris* dengan menggunakan teknik filtrasi aliran sirkulasi medium kultur pada *C. vulgaris*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan dilakukannya filtrasi dengan rentang waktu tertentu akan terjadi pemindahan sejumlah sel mikroalga yang tumbuh di dalam fotobioreaktor ke dalam filter. Hal ini akan mengakibatkan jumlah sel mikroalga yang ada pada fotobioreaktor berkurang dimana pengurangan jumlah sel ini akan mengurangi peluang terjadinya perebutan CO₂ yang dikarenakan terlalu banyaknya sel di dalam media kultur yang dialiri CO₂. Masalah tidak meratanya intensitas cahaya yang diterima oleh sel karena semakin memadatnya mikroalga yang disebabkan pertumbuhannya akan teratasi pula sehingga peningkatan jumlah sel akan lebih baik.

Pada penelitian kali ini, metode yang dilakukan adalah dengan menggunakan membran serat berongga sebagai media aerasi dengan perlakuan filtrasi pada sirkulasi aliran media kultur. Media aerasi—atau sparger—membran serat berongga berperan sebagai gas distributor yang akan meningkatkan koefisien perpindahan massa CO₂ dari gelembung gas yang dialirkan melewati media kultur. Semakin banyak CO₂ yang terlarut dalam media kultur akan memberikan kesempatan yang lebih merata bagi mikroalga untuk menyerap CO₂ sehingga diharapkan terjadinya peningkatan biomassa yang lebih tinggi. CO₂ merupakan salah satu komponen utama selain H₂O dalam pembentukan karbohidrat sumber energi mikroalga untuk tumbuh dan berkembang biak.

Penelitian ini diperlukan sebagai pembanding dengan metode yang menggunakan media aerasi pipa akuarium yang biasa dipakai pada penelitian-penelitian sebelumnya untuk mengetahui proses yang lebih efektif dalam meningkatkan pertumbuhan biomassa *Chlorella* dalam fotobioreaktor skala industri menengah. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan acuan dalam

penelitian-penelitian selanjutnya, dalam mengoptimalkan produksi biomassa *C. vulgaris* dalam skala besar.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh media aerasi membran serat berongga terhadap produksi biomassa *C. vulgaris*.
2. Bagaimana pengaruh media aerasi membran serat berongga terhadap kemampuan fiksasi CO₂ *C. vulgaris*.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengkaji pengaruh media aerasi membran serat berongga terhadap laju pertumbuhan, konsentrasi bikarbonat, dan total energi cahaya yang dibutuhkan untuk produksi biomassa *C. vulgaris*.
2. Mengkaji pengaruh media aerasi membran serat berongga terhadap laju perpindahan CO₂ pada saat melewati medium kultur alga.

1.4 BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Bioproses dan Laboratorium Rekayasa Reaksi Kimia dan Konversi Gas Alam Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
2. Produksi biomassa dalam penelitian ini baru terbatas pada peningkatan jumlah sel kering.
3. Penelitian ini menggunakan mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang dibudidayakan dalam larutan *Benneck* di fotobioreaktor tunggal volume 18 L dengan aliran udara dengan konsentrasi CO₂ sebesar 5%.
4. Media aerasi yang digunakan adalah sparger membran serat berongga dan sparger pipa akuarium biasa.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

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

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan mengenai teori umum tentang mikroalga *C. vulgaris*, proses fotosintesis, fotobioreaktor dan faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan produksi biomassa mikroalga *C. vulgaris*, dan membran serat berongga.

BAB III METODE PENELITIAN

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

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan data-data hasil pengamatan dan pengolahannya beserta pembahasannya.

BAB V KESIMPULAN

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

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada tinjauan pustaka, akan dibahas mengenai mikroalga *C. vulgaris*, proses fotosintesis, faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan produksi biomassa mikroalga *C. vulgaris* pada medium terbatas dan fotobioreaktor, dan membran serat berongga.

2.1 Alga Hijau *Chlorella vulgaris*

Alga hijau atau *Chlorophyta* merupakan salah satu dari kelompok organisme dengan variabilitas morfologis yang besar mulai dari makroskopik hingga mikroskopik. Alga hijau memiliki klorofil dan sebagian besar hidup di air tawar—ada sebagian yang hidup di laut.

Chlorella merupakan salah satu genus bagian dari *Chlorophyta* berukuran kecil berupa uniseluler dan tidak memproduksi zoospora. Selnya memiliki dinding sel yang tipis dan kloroplas berbentuk seperti mangkuk cangkir. *Chlorella* dapat tumbuh dalam kondisi autotrofik, heterotrofik, dan miksotrofik dimana *Chlorella* tersebut berkembang biak dengan cara membentuk sel keturunan atau dari bentuk yang sama dengan sel induknya. Mikroalga *Chlorella* adalah jenis tumbuhan yang belum mempunyai akar, batang dan daun sebenarnya, tetapi sudah memiliki klorofil sehingga bersifat autotrof. *Chlorella* merupakan alga dengan kategori sel eukariotik yang hidup di dalam air bersih sebagai tanaman bersel tunggal yang mengandung nukleus dan klorofil. Nama *Chlorella* berasal dari bahasa latin yaitu “*chloros*” yang berarti hijau dan “*ella*” yang berarti kecil. Jadi *Chlorella* adalah suatu sel yang sangat kecil dan berwarna hijau. Karakteristik warna hijau gelap disebabkan karena *Chlorella* sangat kaya akan klorofil. Spesies *C. vulgaris* mampu bertahan terhadap segala perubahan alam karena punya ketahanan genetik yang sangat tinggi. Bentuk, ukuran, dan sifat dinding selnya tersusun dari senyawa selulosa dan lignin yang kuat. Akibatnya, *C. vulgaris* mudah

menyesuaikan diri pada kondisi ekstrim. *C. vulgaris* dapat ditemukan di perairan tropis, sub tropis, bahkan hingga kutub sekalipun. (Surawiria, 2005). Bentuk sel *C. vulgaris* bulat, bulat lonjong dengan garis tengah sel antara 2-8 μm . *C. vulgaris* berkembang biak dengan cara membelah diri dan pembentukan spora.



Gambar 2.1 *Chlorella vulgaris*

2.1.1. Struktur Sel Alga Hijau

Organisme yang memiliki klorofil dimana organisme tersebut tidak dapat dibedakan akar, batang, dan daunnya disebut alga. Struktur sel antara alga dengan tumbuhan darat hampir sama. Struktur *C. vulgaris* terdiri atas dinding sel, membran plasma, cytoplasma, dan chloroplast dengan ukuran sel berkisar antara dua hingga dua belas μm berbentuk unisel yang spherical atau ellipsoidal (Richmond, 1990).

2.1.1.1 Dinding sel

Dinding sel mikroalga terdiri dari lapisan microfibrillar selulosa dan dikelilingi oleh lapisan amorf. Dinding sel biasanya tersusun dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Dinding sel ini berfungsi untuk melindungi bagian dalam sel dari pengaruh luar.

2.1.1.2 Inti Sel

Inti Sel atau nukleus merupakan suatu struktur yang berbentuk bulat dan dikelilingi oleh sitoplasma dimana sitoplasmanya dikelilingi oleh membran sel. Bagian ini memiliki peran yang sangat penting karena bertugas mengatur seluruh aktivitas sel seperti berfotosintesis dan berkembang biak. Nukleus terdiri dari nukleoprotein yaitu kombinasi protein dan asam nukleat. Nukleoprotein banyak mengandung enzim. Di dalam inti sel, terdapat sebuah inti lagi yang berukuran lebih kecil yang disebut dengan nukleolus yang terbentuk dari kumpulan RNA (Ribo Nucleic Acid). Nukleolus berperan dalam sintesis protein di dalam sel. Selain itu, inti sel juga memiliki jaringan-jaringan halus yang disebut dengan benang kromatin dan berfungsi sebagai pembawa informasi genetik dari sel induk kepada sel anak pada saat berkembang biak.

2.1.1.3 Mitokondria

Mitokondria terdiri atas struktur-struktur berbentuk seperti cerutu. Struktur-struktur tersebut terdiri dari protein dan lipid yang membentuk suatu sel yang kokoh. Dinding mitokondria berlapis dua dan lapisan dalamnya memiliki banyak lekukan yang berguna untuk memperluas bidang permukaan penyerapan oksigen dalam proses respirasi sel. Mitokondria berfungsi sebagai pusat pembangkit tenaga sel dengan menghasilkan ATP sebagai sumber energi dan berperan dalam proses respirasi sel dan serta merupakan tempat pemecahan molekul protein dan lemak kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana untuk dijadikan sumber energi.

2.1.1.4 Kloroplas

Kloroplas berbentuk seperti cangkir yang letaknya di tepi sel. Kloroplas terdiri atas lamella fotosintetik dan diselubungi oleh suatu membran ganda berisi thylakoids, klorofil, dan stroma. Dalam proses fiksasi CO₂, kloroplast dapat menyerap energi cahaya yang digunakan untuk melakukan proses fotosintesis.

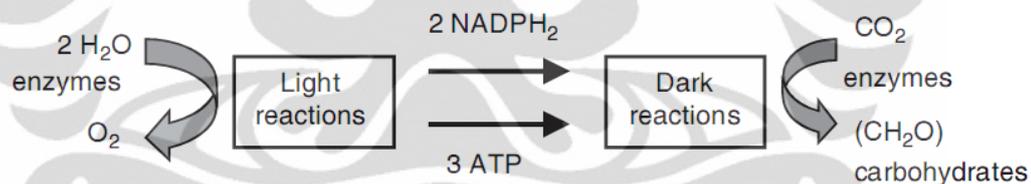
2.1.1.5 Vakuola

Vakuola adalah rongga yang terdapat di dalam sel yang berfungsi 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.

2.1.2 Fotosintesis Alga Hijau

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

Fotosintesis merupakan proses perubahan senyawa anorganik dan energy cahaya menjadi bahan organik yang dilakukan oleh tumbuhan dan mikroorganisme eukariotik. Chlorophyta merupakan salah satu dari mikroorganisme eukariotik tersebut. Organ fotosintesis terletak di kloroplas yang mengandung lapisan membran ganda berisi thylakoids, klorofil, dan stroma. Arti fotosintesis sendiri adalah proses penyusunan atau pembentukan dengan menggunakan energi cahaya atau foton. Sumber energi cahaya alami adalah matahari yang memiliki spektrum cahaya infra merah (tidak kelihatan), merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, ungu dan ultra ungu (tidak kelihatan).



Gambar 2.2 Produk utama dari fotosintesis reaksi gelap dan terang

Fotosintesis bisa dibidang sebagai reaksi redoks yang digerakkan oleh energi cahaya dimana karbondioksida dan air diubah menjadi karbohidrat dan oksigen. Konversi yang terjadi dibagi menjadi dua yaitu reaksi terang dan reaksi gelap. Energi cahaya yang terikat pada membran fotosintesis diubah menjadi energi kimia memberikan reduktor biokimia NADPH₂ dan senyawa berenergi tinggi ATP pada reaksi terang. Dalam reaksi gelap, NADPH₂ dan ATP digunakan dalam konversi karbondioksida menjadi karbohidrat dan berlangsung di stroma. Dalam reaksi gelap, terdapat konsumsi oksigen sebagai masukan proses respirasi dimana oksigen yang dihasilkan pada reaksi terang digunakan kembali untuk proses respirasi pada reaksi gelap. Pada kondisi cahaya terbatas, laju fotosintesis

secara linear tergantung pada intensitas cahaya. Namun, laju fotosintesis akan menurun dan menjadi tidak efisien saat kondisi cahaya optimumnya terlewat.

2.1.2.1 Reaksi Fotosintesis

Fotosintesis adalah reaksi kimia dimana energi pencahayaan diubah menjadi energi kimia dalam glukosa. Mikroalga hijau umumnya menggunakan proses fotosintesis untuk memproduksi gula dan oksigen yang merupakan komponen penting untuk hidup. Secara kimia, proses fotosintesis merupakan reaksi oksidasi-reduksi dimana oksigen dioksidasi dan hidrogen, ATP dan NADP direduksi. Reaksi fotosintesis secara umum dibagi menjadi dua tahap (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

a) Reaksi Terang

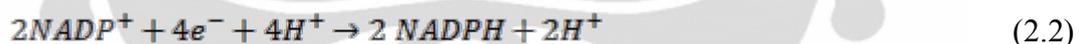
Reaksi terang berlangsung pada system membran yang tersusun dari protein kompleks, elektron *carrier* dan molekul lemak. Reaksi terang merubah energi menjadi berbagai produk (<http://www.biology.arizona.edu/>).

Tiga reaksi utama yang terjadi pada reaksi terang yaitu:

1. Oksidasi H₂O



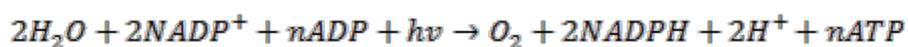
2. Reduksi NADP⁺



3. Sintesis ATP



Jika tiga persamaan diatas digabungkan maka akan didapat persamaan untuk reaksi terang :



Pada organisme fotosintetik oksigenik, terdapat dua pusat reaksi yang berbeda, yaitu fotosistem ke-dua dan fotosistem pertama yang bekerja bersamaan secara seri. Pada keadaan terang, fotosistem ke-dua mengumpan elektron ke fotosistem pertama. Elektron ini akan ditransfer dari fotosistem ke-dua ke

fotosistem pertama oleh *intermediate carrier*. Transfer elektron dari molekul air ke NADP^+ menghasilkan bentuk yang tereduksi yaitu NADPH.

Pada proses fotosintesis, banyaknya energi yang disediakan oleh energi cahaya disimpan sebagai energi bebas redoks dalam NADPH, (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>) yang kemudian akan digunakan untuk mereduksi karbon.

Pengaruh dari reaksi terang adalah konversi energi radian menjadi energi bebas redoks dalam bentuk NADPH dan transfer energi grup fosfat dalam bentuk ATP. NADPH dan ATP yang terbentuk pada reaksi terang menyediakan energi untuk reaksi gelap fotosintesis, yang dikenal sebagai siklus Calvin atau siklus fotosintetik reduksi karbon (<http://www.life.ui.ac.edu/govindjee/paper/gov.html>).

b) Reaksi Gelap

Siklus Calvin merupakan suatu siklus dalam proses fotosintesis yang termasuk dalam reaksi gelap.

Chlorella mengambil CO_2 dari lingkungan dan mereduksinya menjadi karbohidrat melalui siklus Calvin. Proses ini merupakan serangkaian reaksi biokimia yang mereduksi karbon dan menyusun ulang ikatan menghasilkan karbohidrat dari molekul CO_2 . Untuk pengikatan karbon, dibutuhkan ATP (energi) dan NADPH (*reducing power*). ATP dan NADPH yang dihasilkan dalam proses fotosintesis memicu berbagai proses biokimia. Pada tumbuhan proses biokimia yang terpicu adalah siklus Calvin yang mengikat karbon dioksida untuk membentuk ribulosa dimana kemudian menjadi gula seperti glukosa. Reaksi ini disebut reaksi gelap karena tidak bergantung pada ada tidaknya cahaya sehingga dapat terjadi meskipun dalam keadaan tanpa cahaya.

2.1.2.2 Fotosintesis Mikroalga Hijau *C. vulgaris Buitenzorg*

Pada mikroalga hijau *Chlorella*, fotosintesis dilakukan di dalam media hidupnya yaitu air. CO_2 yang dibutuhkan sebagai sumber karbon didapatkan dalam bentuk senyawa bikarbonat yang terbentuk dari reaksi air dengan CO_2 terlarut dalam media hidupnya (pada ekstra selular) sebagai berikut (Wijanarko, 2004)



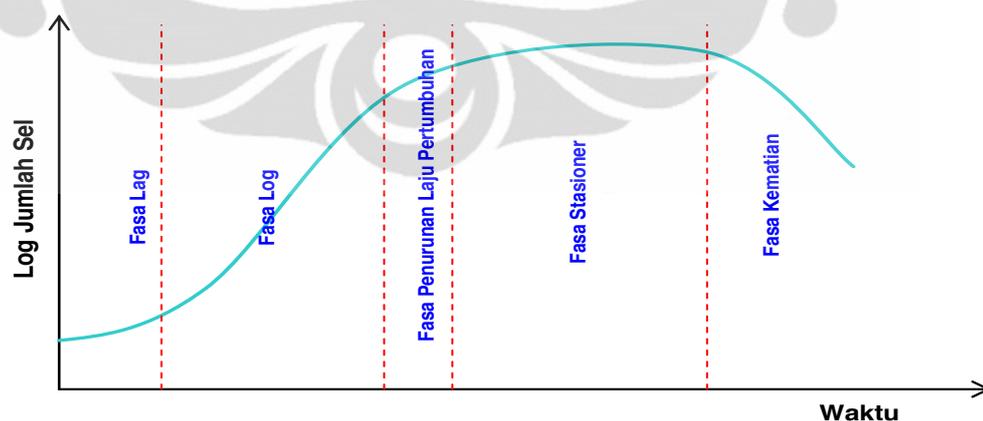
Senyawa bikarbonat ini yang kemudian diserap oleh sel *Chlorella*. Proses metabolisme yang terjadi dalam sel selanjutnya adalah reaksi antara bikarbonat tersebut dan air yang terdapat dalam sel (siklus Calvin) membentuk senyawa organik seperti glukosa dan ion OH^- menggunakan energi ATP dan NADPH dari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



Sehingga diketahui bahwa hasil fotosintesis dari mikroalga hijau *Chlorella* adalah ion OH^- , oksigen molekular, dan senyawa organik yang akan digunakan sebagai cadangan makanan, apabila tidak mendapatkan cahaya dan CO_2 untuk pertumbuhan dan pembelahaan selnya.

2.1.3 Fase Pertumbuhan *Chlorella Vulgaris*

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



Gambar 2.3 Kurva Pertumbuhan *Chlorella vulgaris*(Wirosaputro, 2002)

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 *C. vulgaris* yang berada pada fase stasioner.

2.1.3.2 Fase Eksponensial

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

2.1.3.3 Fase Stasioner

Pertumbuhan jumlah sel sudah tidak terjadi lagi pada fase ini i.e. 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 tidak mampu dinetralkan oleh mikroalga.

2.1.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan *Chlorella vulgaris*

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

2.1.4.1 Jenis Medium

C. vulgaris dapat hidup dengan baik bila tumbuh dalam medium kultur yang memiliki nutrisi yang diperlukan. Kandungan nutrisi ini akan mempengaruhi laju pertumbuhan mikroalga tersebut. Semakin sedikit kadar nutrisi dalam

medium, semakin lambat pula laju pertumbuhannya. Medium yang digunakan untuk mengembangbiakan *C. vulgaris* ini cukup 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 *C. vulgaris* yaitu *Benneck*, *Detmer*, *Walme*, dan pupuk komersial. Dalam kasus tertentu, mikroalga dapat pula dikembangbiakkan dengan medium limbah karena limbah mengandung nitrogen dan fosforus yang dibutuhkan mikroalga untuk tumbuh dan berkembang-biak

2.1.4.2 Suhu

Suhu yang tinggi dapat menyebabkan reaksi kimiawi di dalam mikroalga berlangsung secara lebih cepat. Denaturasi protein, asam nukleat, serta hilangnya enzim, dan metabolisme sel terjadi pada saat suhu terlalu tinggi. Berdasarkan kondisi ini maka diperlukan suatu kondisi suhu optimum dalam pertumbuhan dan perkembangbiakan *C. vulgaris* yang 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 antara oksigen dan karbondioksida di dalam medium harus tercukupi agar didapat laju pertumbuhan mikroalga yang optimal.

2.1.4.4 pH

Perubahan pH dapat mempengaruhi performa enzim yang ada di dalam mikroalga. Besar pH yang sesuai dengan dengan kondisi pertumbuhan yang optimum adalah berkisar antara 7,0 hingga 8,0.

2.1.4.5 Intensitas Cahaya

Pada proses fotosintesis, faktor cahaya merupakan syarat agar dapat dilangsungkannya fotosintesis.

2.1.5 Kebutuhan Sumber Nutrien

Alga membutuhkan berbagai nutrien dalam proses pertumbuhannya dari medium tempatnya tumbuh. Nutrien yang diberikan untuk proses pertumbuhan

alga memiliki faktor pembatasnya. Jika tidak hadir dalam jumlah yang cukup, nutrisi mineral tersebut akan membatasi pertumbuhan alga. Pertumbuhan akan meningkat secara bersamaan sampai mineral lain menjadi terbatas jumlahnya bila nutrisi ini lebih dari faktor pembatasnya. Berikut ini adalah nutrisi dan kondisi yang perlu diperhatikan di dalam medium untuk menunjang pertumbuhan alga:

1. Sumber nutrisi karbon
2. Sumber nutrisi nitrogen
3. Sumber nutrisi fosforus
4. Kandungan garam total yang ditentukan dari lokasi habitat asli alga tersebut.
5. Komponen ion utama seperti K, Mg, Na, Ca, SO dan Cl.

2.2 Membran

Membran didefinisikan sebagai suatu lapisan tipis yang selektif sebagai penghalang antara dua fluida yang melewatinya (Mulder, 1991). Membran untuk separasi gas bekerja dengan prinsip bahwa beberapa gas lebih dapat larut dan lebih dapat melewati membran daripada gas lainnya. Membran dapat dibuat dari berbagai jenis bahan. Saat ini, bahan yang paling banyak digunakan untuk membuat membran adalah polimer karena memiliki kestabilan kimia dan termal serta mekanisme yang baik terhadap pemisahan gas.

2.2.1 Pengkategorian Membran

Dilihat dari porinya, membran dibedakan atas membran berpori dan tidak berpori. Ukuran pori menurut IUPAC 1985 (Mulder 1991) adalah :

1. Makropori, ukuran pori lebih besar dari 50 nm
2. Mesopori, ukuran pori antara 2 - 50 nm
3. Mikropori, ukuran pori lebih kecil dari 2 nm

Berdasarkan strukturnya, membran dibagi menjadi dua, yaitu membran struktur simetris dan struktur asimetris. Suatu membran dikatakan simetris apabila memiliki struktur yang sama dari lapisan atas sampai ke lapisan bawah. Ketebalan membran simetris berkisar antara 10 – 200 μm yang secara keseluruhan akan menentukan besarnya perpindahan massa. Semakin tipis membran, laju

penyerapannya semakin besar. Membran simetris sendiri terdiri dari tiga jenis yaitu membran berpori silinder, membran berpori dan membran homogen.

Membran asimetris adalah membran yang memiliki struktur yang berbeda dari lapisan atas ke lapisan bawah. Membran ini mempunyai lapisan atas yang rapat dengan ketebalan 50 – 100 μm . membran jenis ini menggabungkan selektivitas yang tinggi dari lapisan yang rapat dengan laju permeasi yang tinggi dari membran yang sangat tipis. Tahanan perpindahan massa membran ini ditentukan oleh ketebalan lapisan atasnya. Jenis lain membran asimetris adalah tipe komposit yaitu membran yang lapisan atas dan lapisan pendukungnya terdiri atas polimer yang berbeda. Tebal lapisan atas membran ini berkisar antara 0,1 – 1.0 μm dimana laju permeasinya tergantung dari ukuran pori lapisan pendukung dan komposisi polimer lapisan atas.

Berikut ini adalah deskripsi kelayakan pakai untuk membran:

1. Kosumsi energi yang digunakan relatif rendah karena pada prosesnya tidak memerlukan perubahan fasa dari gas yang akan dipisahkan.
2. Pemisahan hanya dapat dilakukan pada suhu lingkungan karena pemakaian pada suhu tinggi akan menyebabkan pecahnya membran
3. Peralatan yang digunakan relatif lebih sedikit dan fleksible dalam penggunaannya.
4. Prosesnya mudah dikombinasikan dengan proses lain.
5. Waktu pakainya relatif singkat
6. Adanya *membrane fouling*, yaitu kotoran yang mengendap pada permukaan membran yang akan menurunkan kinerjanya sejalan dengan waktu.
7. Membran rentan terhadap senyawa organik dan bahan kimia. Pada keadaan tertentu, hal ini dapat diatasi dengan penggunaan membran anorganik (Mulder, 1991)

2.2.2 Mekanisme Perpindahan Massa pada Membran

Teori yang digunakan untuk menjelaskan perpindahan massa pada membrane berpori rapat adalah teori pelarutan–difusi (*solution-diffusion*). Gas dapat melewati membran karena adanya perbedaan tekanan antara kedua sisi membran sehingga molekul gas dari sisi membrane bertekanan tinggi akan

bergerak menuju permukaan membrane. Molekul gas akan larut di permukaan membrane dan berdifusi ke permukaan lainnya, kemudian gas akan lepas pada sisi membrane bertekanan rendah.

Kontaktor membran adalah suatu alat yang dapat mengakomodasi perpindahan massa gas-cair ataupun cair-cair tanpa adanya dispersi satu fasa ke fasa lainnya, tidak seperti kolom kontak konvensional. Modul membran yang umum digunakan adalah membran serat berongga (*hollow fiber*) berpori mikro (*microporous membrane*), yaitu membran dengan struktur yang rongga yang padat saling terhubung dan terdistribusi acak. Perpindahan massa antar fasa pada kontak membran didorong oleh adanya perbedaan konsentrasi komponen antar fasa dan penurunan tekanan yang diperlukan untuk menahan interfasa antarfluida sangat kecil. Pada proses kontak antar fluida melalui membran, langkah-langkah yang terjadi adalah:

1. Perpindahan massa komponen dari fluida umpan ke membran.
2. Difusi massa tersebut melewati membran.
3. Perpindahan massa dari membran ke fluida lainnya

2.2.3 Membran polipropilen

Polipropilena atau polipropena merupakan polimer termoplastik yang terbentuk dari monomer C_3H_6 . Digunakan pada banyak keperluan baik dalam industri maupun kemasan makanan. Polipropilena ini digunakan baik sebagai plastik maupun serat. Bahan ini merupakan bahan yang relatif murah, mudah dibentuk, ketahanan rendah dengan tampilan luar yang baik. Permukaan material ini seperti lilin dan mudah digores. Kekakuan dan kekuatan biasanya ditingkatkan dengan menggunakan bahan penguat dari gelas, kapur atau talc. Bahan ini buram tetapi bahan ini dapat diwarnai dengan banyak macam warna. Polipropilena sama dengan HDPE tetapi lebih kaku dan meleleh pada suhu 165-170°C.

Sifat-sifat dari polipropilena yaitu :

1. Bersifat ringan dan memiliki densitas yang rendah
2. Tahan terhadap tekanan tinggi

3. Mempunyai softening point yang lebih tinggi dan tahan terhadap suhu tinggi karena titik lelehnya sekitar 165-170°C
4. Memiliki densitas yang lebih kecil (0.9 gr/cm^3).
5. Memiliki sifat dielektrik yang baik
6. Polipropilen terhindar dari proses *cracking* oleh lingkungan, kecuali jika terdapat sulfur dan asam kromat.
7. Memiliki tingkat kekuatan yang tinggi.
8. Tahan terhadap suasana basa dan asam, pelarut organik tetapi kurang tahan terhadap pelarut aromatik, alifatik dan yang mengandung klor juga terhadap sinar UV
9. Tidak beracun
10. Tidak berwarna
11. Mudah diproduksi dan merupakan material yang ekonomis

Tabel 2.1 Karakteristik Jenis Polymer

| Polymer | Polymer Melt Index | Density (gr/ml) |
|----------------------------------|--------------------|-----------------|
| LDPE (Low Density Polyethylene) | 0.2 – 20.0 | 0.916 – 0.930 |
| HDPE (High Density Polyethylene) | 0.2 – 25.0 | 0.950 – 0.960 |
| Polypropylene | 2.0 – 50.0 | 0.910 – 0.928 |

2.2.4 Fouling Membran

Kerugian utama dari proses membran adalah terjadinya *fouling* atau *biofouling* membran akibat penumpukan deposit dari senyawa organik, anorganik, juga mikroorganisme baik pada permukaan dalam maupun luar dari pori membran. *Fouling* ini lebih lanjut dapat menurunkan fluks permeal dan menurunkan efisiensi ekonomi dari plant pengolahan air minum.

Beberapa hal yang umum dilakukan untuk mengurangi *fouling* dari membran diantaranya melakukan pencucian balik/*backwashing* membran secara

periodik, pembersihan membran dengan bahan kimia, dan melakukan pretreatment pada membran (Schlichter, 2003)

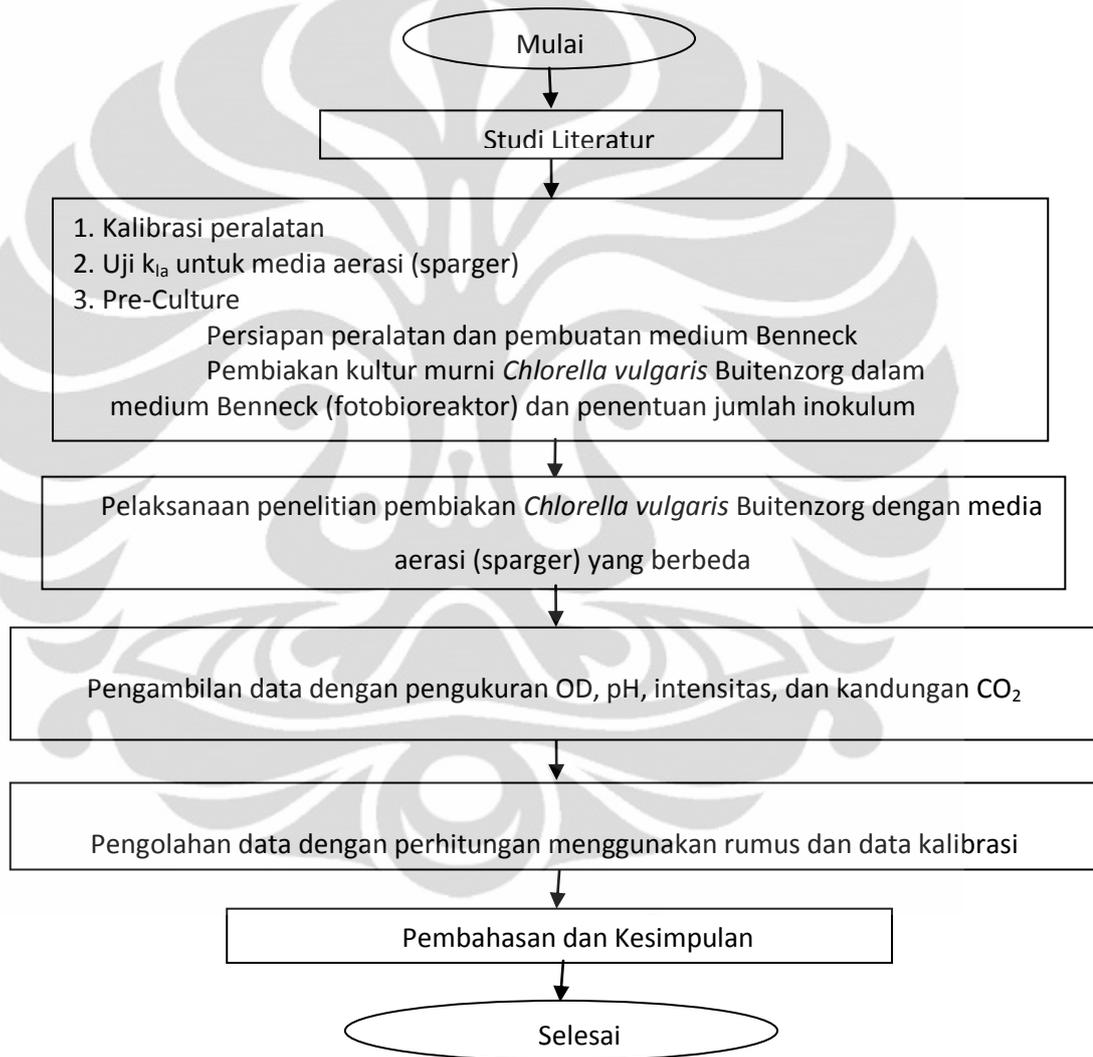
2.2.4 Media aerasi

Aerasi berperan penting dalam produksi biomassa mikroalga karena, dari aerasi, mikroalga bisa mendapatkan sumber karbonnya yang berupa CO₂ dimana CO₂ dialirkan bersama udara melewati medium kultur. Media aerasi yang berperan sebagai distributor gas mempengaruhi kinerja dari pelarutan CO₂ yang diserap oleh mikroalga tersebut. Sparger yang biasa dipakai pada produksi biomassa mikroalga berbentuk pipa yang diberi beberapa lubang berdiameter kurang lebih 2 milimeter untuk tempat keluarnya udara dari pipa menuju medium kultur, sedangkan sparger membran serat berongga memiliki ukuran pori jauh lebih kecil kurang lebih sekitar 2 nm. Sparger pipa akuarium biasa lebih awet dalam penggunaannya karena terbuat dari plastik, sedangkan usia sparger membran serat berongga tidak begitu lama karena banyaknya *fouling* yang menumpuk yang semakin lama akan menghambat laju alir udara yang keluar. Koefisien perpindahan massa pada sparger membran serat berongga lebih tinggi daripada sparger pipa akuarium biasa sehingga bisa memberi peningkatan pada produksi biomassa *C. vulgaris*. Dalam hal ini, sparger membran serat berongga lebih mahal ketimbang sparger pipa akuarium biasa sehingga nilai keekonomisannya harus dihitung bila membandingkan kedua alternatif pada pemilihan sparger untuk produksi biomassa *C. vulgaris*.

BAB III METODE PENELITIAN

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

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

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

Pada penelitian ini akan digunakan peralatan-peralatan sebagai berikut :

1. Fotobioreaktor yang dapat menampung medium volume 18 dm³ dengan bahan dasar kaca transparan yang dilengkapi dengan aliran udara.
2. Media aerasi berupa sparger membran serat berongga dan sparger pipa akuarium biasa.
3. *Air Blower* kapasitas 140 L/m merek resun LP-100
4. Flowmeter udara
5. Lampu Philips Halogen 20W/12V/50Hz sebagai sumber pencahayaan dan transformator 220 V primer/12 V sekunder.
6. Selang silikon dan selang plastik sebagai rangkaian peralatan dan konektor rangkaian.
7. Set Lightmeter Lxtron LX-103 sebagai penghitung kekuatan intensitas cahaya dengan satuan Lux ataupun Foot-Candle.
8. pH meter HANNA Model HI 8014 dengan larutan buffer 4 dan 7
9. Lemari kerja ultraviolet sebagai transfer box.
10. Spectro UV-VIS RS Spectrometer, LaboMed. Inc untuk menghitung OD/absorbansi pada 600 nm.

Sedangkan untuk bahan penelitian yang digunakan adalah :

1. Starter mikroalga hijau *C. vulgaris* Buitenzorg dengan usia kurang lebih 60 jam yang telah dihitung kerapatannya dengan menggunakan spektrofotometer pada 600 nm
2. KH₂PO₄, MgSO₄, NaNO₃, FeCl₃ untuk membuat medium Benneck
3. Aquadest sebagai bahan medium dan mencuci alat seperti gelas, pipet ukur dan lain-lain
4. Alkohol 70% untuk mencuci alat/sterilisasi dan mencegah kontaminasi

3.3 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

3.3.1. Variabel Bebas

Variabel ini merupakan variabel yang diset pada suatu harga tertentu. Variabel bebas pada penelitian ini adalah waktu pengambilan data (t) dan kerapatan awal (X_0)

3.3.2. Variabel Terikat

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

3.3.3. Variabel Tetap

Variabel tetap dalam penelitian ini adalah intensitas cahaya yang digunakan.

3.4 Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian secara umum dapat dilihat pada Gambar 3.1. Masing-masing tahapan tersebut dapat dijabarkan lagi menjadi prosedur-prosedur seperti terlihat pada penjelasan berikut.

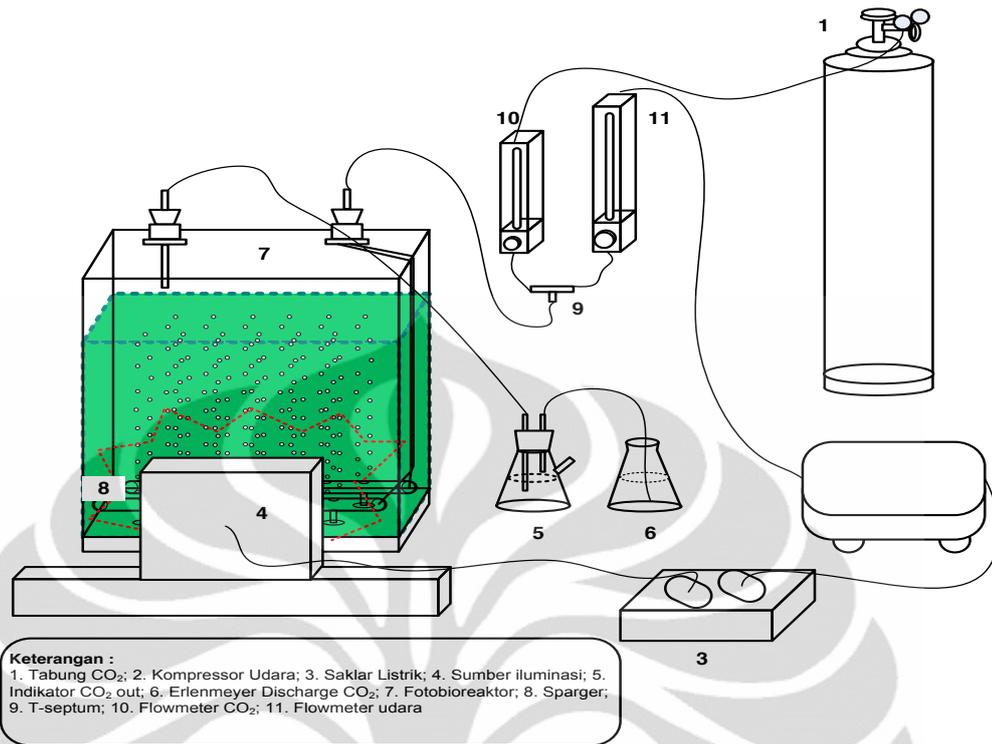
3.4.1. Studi Literatur

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

3.4.2. Persiapan Peralatan dan Medium

a) Pembuatan Rangkaian Peralatan

Peralatan riset dirangkai dalam suatu lemari kaca untuk melindungi reaktor dari kontaminan. Reaktor yang digunakan berkapasitas 18 dm^3 medium alga. Reaktor yang digunakan dihitung nilai α_{kaca} -nya sebagai fungsi dari intensitas. Nilai α_{kaca} ini digunakan untuk mengetahui hambatan cahaya dari reactor. Intensitas cahaya setelah melewati kaca untuk tiap reaktor berbeda-beda sehingga pada perhitungan untuk mengetahui jumlah cahaya yang digunakan untuk pertumbuhan mikroalga secara tepat membutuhkan nilai α_{kaca} untuk masing-masing reaktornya



Gambar 3.2 Rangkaian Peralatan Fotobioreaktor Tunggal

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

Sparger membran serat berongga dimodelkan seperti sparger pipa akuarium yang biasa dipakai di penelitian-penelitian sebelumnya dengan bentuk melebar menutupi sebagian luas dasar reaktor sehingga seluruh media kultur dapat teraliri gas dengan baik..

Kalibrasi flowmeter juga dilakukan agar dapat diketahui dengan tepat skala dari masing-masing flowmeter. Lampu halogen dengan kekuatan intensitas cahaya sampai 110 Klux digunakan untuk sumber iluminasi. Transformator dipasang untuk menurunkan tegangan dari 220 V ke 12 V.

b) **Sterilisasi Peralatan**

Sebelum digunakan, seluruh peralatan untuk riset yang akan bersentuhan

langsung dengan *Chlorella* disterilisasi terlebih dahulu agar tidak terkontaminasi bakteri pengganggu yang dapat menghambat/mengganggu pertumbuhan *Chlorella*.

Langkah-langkah sterilisasi alat :

1. Pencucian Alat

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

2. Pengeringan

Peralatan yang telah dicuci kemudian dibilas sampai bersih dan dikeringkan menggunakan tisu kering atau dengan kompresor udara. 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 kurang lebih 1 jam, sedangkan peralatan dari plastik atau berdimensi besar cukup direndam dalam alkohol 70% selama kurang lebih 5 menit dan direndam lagi sebelum dipakai.

4. Penyimpanan

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

Lingkungan pada lemari kerja dan *transfer box* harus bersih dan steril, sebaiknya dilap terlebih dahulu, disemprot dengan alkohol 70%, lalu diratakan dengan lap/tisu kering dan bersih. Lemari penyimpanan alat dan transfer box harus menggunakan lampu UV untuk mencegah pertumbuhan kuman Tangan praktikan harus selalu bersih, dicuci terlebih dahulu, dan dilumuri spray alkohol 70% sebelum mulai bekerja atau mengambil data.

c). Pembuatan Medium Benneck

Medium awal yang digunakan sebagai medium pembiak mikroalga adalah

medium Benneck. Bahan-bahan yang digunakan untuk membuat medium Benneck yaitu :

Tabel 3.1 Bahan – Bahan Pembuatan Medium Benneck

| Bahan | (mg/dm³ aquadest) |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| KH ₂ PO ₄ | 200 |
| MgSO ₄ .7H ₂ O | 100 |
| NaNO ₃ | 500 |
| FeCl ₃ | 3-5 |

Pertimbangan penggunaan medium ini antara lain karena kandungan nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan *C. vulgaris* Buitenzorg terdapat pada medium ini. Oleh karenanya, stok *C. vulgaris* Buitenzorg murni yang didapat dengan menggunakan medium ini pun mudah dibuat. Penggunaan medium ini juga mengacu pada hasil riset-riset sebelumnya yang menggunakan medium ini dan cukup baik untuk digunakan sebagai media hidup *C. vulgaris* Buitenzorg. Penggunaan medium ini bertujuan untuk mendapatkan tingkat kerapatan biomassa mikroalga yang dibutuhkan sebelum riset dimulai.

Cara membuat satu liter medium :

1. Bahan-bahan MgSO₄ 100 mg, KH₂PO₄ 200 mg, NaNO₃ 500 mg, FeCl₃ 3-5 mg dilarutkan kedalam 1 dm³ aquadest.
2. Medium disterilisasi menggunakan *autoclave* selama ±1,5 jam, lalu didinginkan. Lakukan pemanasan sebanyak ±3 kali untuk memastikan medium benar-benar steril.
3. Medium yang telah steril dan dingin dapat disimpan dalam lemari yang telah disterilisasi dengan UV atau lemari pendingin bila tidak langsung digunakan. Endapan pada dasar medium harus dipisahkan terlebih dahulu sebelum disimpan.

3.4.3 Pemiakan Kultur *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam Medium Benneck

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

Cara pembiakan medium kultur murni :

1. Menyiapkan medium serta peralatan pembiakan (wadah, selang udara, tutup wadah disterilkan terlebih dahulu).
2. Stok murni *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dimasukan kedalam wadah steril dan dicampur dengan medium Benneck yang telah steril. Perbandingan antara jumlah stock *Chlorella* dengan medium dapat diatur sesuai kebutuhan riset.
3. Medium kultur diberikan aliran udara dengan menggunakan *air blower* dan diberikan cahaya dengan intensitas yang kecil kurang lebih 1000 lx.
4. Pemiakan dapat dilakukan selama satu minggu atau lebih bila bertujuan untuk memperbanyak stok yang ada, tetapi jika hanya untuk melewati *lag time* dapat dilakukan selama 2 hingga 3 hari atau kurang lebih 60 jam, tergantung jumlah selnya.

3.4.4 Penentuan Kerapatan Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

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

Langkah-langkah perhitungan :

1. Homogenisasi yang dilakukan dengan pengadukan medium kultur sampai semua endapan *C. vulgaris* Buitenzorg yang ada merata di dalamnya.
2. Pengambilan sejumlah volume inokulum stok yang teraduk merata dan memasukannya ke dalam *glass cuvette*.
3. Penghitungan kerapatan biomassa dapat dilakukan dengan alat bantu spektrofotometer, didapatkan data absorbansi dimana X_{sel} atau N_{sel} dapat dihitung menggunakan kurva kalibrasi OD Vs X_{sel} atau OD Vs N_{sel} .

3.4.5 Pelaksanaan Kegiatan Riset

Pada awal perlakuan riset, selalu dilakukan tindakan *aseptic* dengan menggunakan Bunsen dan alkohol 70% untuk menghindari atau mengurangi efek kontaminasi. Hal ini sangat penting karena efek kontaminasi dapat menghambat pertumbuhan dari mikroalga ini.

Pencahayaan sebesar 14.75 W/M^2 (5000 lux), suhu $29.0 \text{ }^\circ\text{C}$, tekanan 1 atmosfer, dan turbulasi medium dengan menggunakan laju alir udara sebesar $5 \text{ dm}^3/\text{menit}$ dijaga kestabilannya untuk tiap-tiap reaktor.

3.4.6 Pengambilan Data

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

1. Kerapatan biomassa dalam kultur media dalam fotobioreaktor (g/dm^3)
2. pH kultur media dalam fotobioreaktor
3. Intensitas cahaya di depan reaktor I_o (kLux)
4. Intensitas cahaya di balik reaktor I_b (kLux)
5. Konsentrasi CO_2 sebelum melewati medium alga (%)
6. Konsentrasi CO_2 setelah melewati medium alga (%)
7. Kerapatan biomassa yang terperangkap dalam filter (g/dm^3)

Langkah-langkah pengambilan data :

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

3.4.7 Pengolahan Data Penelitian

Variabel penelitian yang diambil yaitu OD_{600} , pH dan I_b akan diolah menggunakan beberapa metode perhitungan, antara lain :

a) Pengolahan Data OD_{600}

Nilai OD yang didapatkan dari hasil penelitian akan dikonversi menjadi nilai N sel dan X dimana N sel adalah jumlah sel *C. vulgaris* yang terdapat di dalam satu satuan volume, sedangkan berat kering biomassa (X) adalah berat dari *C. vulgaris* di luar medium hidupnya. Jumlahnya dapat dihitung secara langsung dengan menggunakan data absorbansi pada 600 nm dan mengkorelasikannya dengan menggunakan kurva kalibrasi OD_{600} Vs Nsel dan OD_{600} Vs X. Kurva pertumbuhan X Vs t dapat dibuat dari perhitungan tersebut.

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 fasa logaritmik dan merupakan waktu yang diperlukan untuk sekali pembelahan sel. Pada pengolahan ini model yang digunakan adalah persamaan kinetika monod, yaitu :

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

dimana :

- μ laju pertumbuhan spesifik (jam^{-1})
- N jumlah sel (sel/dm^3)
- X berat kering sel/biomassa (g/dm^3)
- t waktu (jam)

b) Pengolahan Data pH

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

$$K_{CO_2} = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{\text{CO}_2} \quad (3.2)$$

$$[HCO_3^-] = K_{CO_2}[CO_2][H^+]^1 \quad (3.3)$$

$$[HCO_3^-] = K_{CO_2}[CO_2]10^{-pH} \quad (3.4)$$

Pendekatan hukum Henry digunakan untuk menghitung K_{CO_2} dan $[HCO_3^-]$

$$P_{CO_2} = H_{CO_2}[CO_2] \quad (3.5)$$

$$P_{CO_2} = \frac{y_{CO_2}}{P_T} \quad (3.6)$$

$$\ln\left(\frac{H_{CO_2}}{H_{CO_2,O_2}}\right) = A_H\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + B_H \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + C_H\left(\frac{T}{T_0} - 1\right) \quad (3.7)$$

$$\ln\left(\frac{H_{CO_2}}{H_{CO_2,O_2}}\right) = A_K\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + B_K \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + C_K\left(\frac{T}{T_0} - 1\right) \quad (3.8)$$

$[HCO_3^-]$ dapat dihitung dengan menggunakan dua persamaan di atas

$$[HCO_3^-] = \left(\frac{K_{CO_2}}{H_{CO_2}}\right) \left(\frac{y_{CO_2} \cdot P_T}{10^{-pH}}\right) \left(\frac{\text{EXP}\left[A_k\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + B_k \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + C_k\left(\frac{T}{T_0} - 1\right)\right]}{\text{EXP}\left[A_h\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + B_h \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + C_h\left(\frac{T}{T_0} - 1\right)\right]}\right) \quad (3.9)$$

dimana :

P_T tekanan operasi = 101.3 kPa

y_{CO_2} konsentrasi $CO_2 = 0.05$

K_{CO_2} konstanta equilibrium asam karbonat = $4,38 \times 10^{-7}$

H_{CO_2} konstanta Henry untuk $CO_2 = 2900$ Kpa kg/mol

T suhu operasi = 302 K

T_0 suhu standar = 298.15 K

Konstanta aktivitas gas CO_2

$$A_k = 40.557$$

$$A_h = 22.771$$

$$B_k = -36.782$$

$$B_h = -11.452$$

$$C_k = 0$$

$$Ch = -3.117$$

c) Pengolahan Data Intensitas Cahaya

Untuk menentukan besarnya nilai total energi cahaya yang tersedia melalui plat iluminasi selama kultivasi:

$$E_o = A \int_0^t (I_i - I_t) dt \quad (3.10)$$

Sedangkan total energi cahaya yang terserap selama kultivasi adalah :

$$E_o = A \int_0^t I_t dt \quad (3.11)$$

dimana :

A luas permukaan plat iluminasi (m^2)

I_i intensitas cahaya yang diterima oleh kultur medium (W/m^2)

dimana $I_i = I_o \cdot \alpha$

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

dimana $I_t = I_b / \alpha$

α rasio intensitas cahaya yang melewati kaca fotobioreaktor tanpa ada medium kultur dengan intensitas cahaya sebelum melewati kaca fotobioreaktor.

t waktu (jam)

Nilai konversi $1 \text{ lux} = 2,95 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$

Maka nilai E_x , energi cahaya yang dimanfaatkan selama kultivasi, dan E, energi cahaya yang tersedia selama kultivasi, adalah sebagai berikut :

$$E_x = \frac{\int_0^t I_t dt}{\Delta X \cdot s} \quad (3.12)$$

$$E = \frac{\int_0^t (I_i - I_t) dt}{\Delta X \cdot s} \quad (3.13)$$

dimana :

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

s jarak yang ditempuh cahaya di dalam kultur medium (m)

Besarnya nilai efisiensi konversi energi cahaya untuk pembentukan biomassa:

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

d) Pengolahan Data Laju Perpindahan Karbondioksida (CTR atau *Carbondioxide Transfer Rate*)

Untuk menentukan banyaknya gas CO₂ yang ditransferkan dalam suatu volum medium yang dibutuhkan oleh metabolisme sel selama satu satuan waktu tertentu:

$$CTR = \Delta y_{CO_2} \cdot \alpha_{CO_2} \quad (\text{g/dm}^3 \cdot \text{h}) \quad (3.14)$$

Dalam penelitian ini :

$$\alpha_{CO_2} = \frac{U_g \cdot A \cdot M_{CO_2} \cdot P}{V_{med} \cdot R \cdot T} \quad (3.15)$$

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

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

e) Pengolahan Data Laju Pernyerapan Karbon (CUR atau *Carbon Uptake Rate*)

Untuk menentukan besarnya laju penggabungan CO₂ menjadi suatu biomaterial yang ditentukan berdasarkan laju pertumbuhan (Ohtaguchi et al, 1997).

$$CUR = \frac{44}{\beta} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (\text{g/dm}^3 \cdot \text{h}) \quad (3.16)$$

dimana :

$$\beta = 24,565$$



Tabel 3.2

Elemental Analysis Sel Chlorella vulgaris Buitenzorg

| Elemen (% berat) | | | | |
|------------------|------|-----|------|------|
| C | H | N | O | P |
| 2 | 6.05 | 5.2 | 9.45 | 2.36 |

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

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

4.1. Pembahasan Umum

Pada penelitian ini, mikroalga *C. vulgaris* dikultivasi dalam sebuah fotobioreaktor gelembung dengan perlakuan filtrasi aliran sirkulasi media kultur untuk mengoptimalkan produksi biomasanya. Pembahasan mengenai hasil penelitian akan ditekankan pada pengaruh media aerasi membran serat berongga dalam peningkatan produksi biomassa *C. vulgaris*. Pada penelitian ini, digunakan strain *C. vulgaris* sebagai objek penelitian yang merupakan ganggang bersel tunggal yang didapat dari Balai Penelitian Perikanan Air Tawar Depok. Penamaan Buitenzorg diambil untuk identitas jenis *Chlorella* karena berasal dari daerah Bogor yang pada zaman Belanda disebut sebagai “Buitenzorg” yang berarti “kota yang sejuk”. Penelitian ini menggunakan fotobioreaktor kolom gelembung tembus cahaya skala menengah berkapasitas 18 L dengan ukuran reaktor (38,5 x 10 x 60) cm³. Ukuran tersebut digunakan karena reaktor didesain memiliki ukuran yang sangat tipis—10 cm—yang bertujuan untuk membantu cahaya mudah tembus hingga ke belakang reaktor dan menghindari terjadinya *self-shading*—fenomena terjadinya penutupan satu sel oleh sel lain yang menyebabkan tidak meratanya cahaya dan CO₂ yang didapatkan oleh alga—pada saat kultur semakin padat. Penggunaan kolom gelembung tembus cahaya dilakukan karena merupakan peralatan yang sesuai untuk budidaya mikroorganisme fotosintesa dikarenakan maksimalisasi peningkatan produksi dan penyediaan cahaya yang secara simultan memberikan laju produksi volumetrik yang tinggi. (Wijanarko, 2006).

Fotobioreaktor gelembung dilengkapi dengan filter yang terbuat dari busa berpori. Penggunaan filter bertujuan untuk menyerap sel biomassa yang dihasilkan dari pembelahan sel dimana media disirkulasikan ke dalam reaktor kembali. Pengembalian medium yang melewati saringan ini berfungsi untuk menjaga medium dalam fotobioreaktor berada dalam volume konstan pada saat

rentang waktu filtrasi. Dasar penggunaan filter ini adalah pengurangan sejumlah sel dari fotobioreaktor untuk mengurangi kepekatan sel di dalamnya. Pengurangan kepekatan sel ini akan memberi peluang sel-sel yang ada di fotobioreaktor untuk mendapatkan cahaya yang cukup dan asupan nutrisi dari medium kultur. Intensitas cahaya yang tembus hingga ke bagian reaktor yang terjauh dari sumber cahaya akan lebih besar dengan berkurangnya kerapatan sel. Oleh sebab itu, penggunaan filter akan memperbesar jumlah biomassa yang dihasilkan. Jumlah biomassa yang dihasilkan adalah jumlah yang ada di dalam fotobioreaktor ditambah dengan jumlah biomassa yang didapat dari filter. Dengan metode pemanenan seperti ini, diharapkan akan diperoleh jumlah biomassa yang lebih besar dibandingkan dengan yang tanpa filter.

C. vulgaris membutuhkan sejumlah energi cahaya untuk selnya agar dapat berfotosintesis. Bagian samping fotobioreaktor ditutup dengan menggunakan karton hitam untuk menghindari adanya penyerapan energi cahaya pada bagian lain selain bagian yang memang seharusnya dikenai cahaya. Dengan menutup semua sisi kecuali bagian depan, maka kuantitas jumlah energi cahaya yang dibutuhkan dalam pembiakannya dapat diukur lebih akurat.

Sebelum dilakukan 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 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.

Pada tahap awal penelitian, dilakukan penentuan kurva OD_{600} Vs X. Penentuan kurva OD_{600} Vs X ini bertujuan untuk memudahkan perhitungan terhadap berat kering sel selama masa kultivasi sehingga untuk mengetahui jumlah sel serta berat kering dari sampel cukup dengan mengetahui tingkat absorbansinya yang kemudian dihubungkan dengan kurva OD_{600} Vs X. Kurva OD_{600} Vs X yang digunakan pada penelitian merupakan kurva hasil kalibrasi yang telah dihitung sebelum dimulai tahap penelitian. Panjang gelombang yang digunakan dalam pengukuran absorbansi adalah 600 nm karena absorbansi dari *C.*

vulgaris pada panjang gelombang ini paling maksimum jika dibandingkan pada panjang gelombang cahaya tampak lainnya.

Tahapan penelitian berikutnya adalah kultur terhadap *C. vulgaris* Buitenzorg dalam medium Benneck. Medium Benneck dipilih sebagai medium kultur karena memiliki banyak senyawa makro yang sangat diperlukan untuk pertumbuhan *C. vulgaris* secara optimal dalam fotobioreaktor, seperti NaNO_3 , MgSO_4 dan KH_2PO_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. Selain itu, dipilihnya *Benneck* sebagai medium dalam penelitian ini karena Benneck telah terbukti mampu memberikan asupan nutrisi kepada *C. vulgaris* pada penelitian-penelitian sebelumnya. Pemiakan medium kultur murni *C. vulgaris* dalam medium *Benneck* (*pre-culture*) dilakukan untuk mempersiapkan mikroalga melewati fase adaptasi (*lag phase*) untuk berada pada fase pertumbuhan eksponensial serta untuk membiasakan mikroalga pada kondisi operasi yang akan digunakan pada penelitian ini. Waktu *pre-culture* untuk tiap jenis mikroorganisme berbeda-beda, untuk *C. vulgaris* adalah selama 48 jam. Proses ini dilakukan dalam fotobioreaktor berukuran kecil dengan intensitas penyinaran yang cukup serta aliran udara tanpa CO_2 tambahan.

Langkah berikutnya adalah pembuatan inokulum awal dari mikroalga *C. vulgaris*. Pada tahap ini kerapatan sel awal *C. vulgaris* dalam fotobioreaktor dimulai dari kurang lebih 0,10 g/L. Pembuatan starter ini dilakukan dengan menuangkan *Chlorella* dari hasil *pre-culture* kemudian ditambahkan dengan medium *Benneck* sampai memiliki nilai absorbansi yang setara dengan jumlah sel (X_{sel}) sebanyak 0,10 g/L. Udara yang telah dicampur dengan CO_2 sebesar 5% dialirkan melalui media aerasi yang diletakkan di dasar reaktor. CO_2 inilah yang dibutuhkan pada proses fotosintesis. Besar kecepatan superficial ini juga menentukan pertumbuhan sel dalam reaktor, jika terlalu besar maka sel-sel akan sulit untuk menangkap gas yang dilewatkan, namun jika terlalu lambat akan membuat medium jenuh akan CO_2 . Setelah semua kondisi operasi ditetapkan, penelitian baru dapat dimulai.

Data yang diambil di antaranya adalah OD_{sel} , $\text{OD}_{\text{filtrat}}$, pH, I_o , I_b , $y_{\text{CO}_2\text{in}}$ dan $y_{\text{CO}_2\text{out}}$ untuk rentang waktu yang telah ditentukan.

Dalam penelitian ini, penggunaan membran serat berongga sebagai media aerasi menjadi perhatian karena ini baru pertama kalinya digunakan dalam penelitian mikroalga di Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penelitian ini akan menjadi pembandingan dengan metode yang menggunakan media aerasi pipa akuarium yang biasa dipakai pada penelitian-penelitian sebelumnya. Berbeda dengan sparger pipa akuarium yang biasa dipakai di penelitian-penelitian sebelumnya, sparger membran mengeluarkan gelembung-gelembung yang jauh lebih kecil layaknya buih pada minuman soda. Akibatnya, terjadi foaming di permukaan media kultur alga karena menimbunnya gelembung-gelembung gas yang terperangkap di dalam cairan medium.

Data OD_{sel} digunakan untuk melihat adanya peningkatan berat kering sel dalam masa kultivasi, dan diambil setiap 4 jam sekali. Data $OD_{filtrat}$ digunakan untuk mengetahui berat kering sel yang terperangkap dalam filter yang bertujuan untuk mengurangi kepadatan dalam kultur, dan diambil setiap 12 jam sekali. Penentuan laju pengambilan pada filter berdasarkan estimasi antara laju penyaringan dengan laju pertumbuhan sel dalam fotobioreaktor. Jika laju penyaringan lebih besar dari laju pertumbuhan sel maka akan terjadi pengurangan jumlah sel dalam fotobioreaktor secara terus-menerus karena terlalu banyak sel yang terserap dibandingkan dengan yang tumbuh di media kultur. Padahal yang dibutuhkan adalah pertumbuhan jumlah sel dari waktu ke waktu. Namun pada saat jumlah penyaringan terlalu kecil jika dibandingkan dengan jumlah pertumbuhan maka pengaruh terhadap efek *self-shading* akan menjadi kurang signifikan dan akan tetap terjadi kompetisi untuk nutrisi pada sel mikroalga.

Tingkat pH digunakan untuk perhitungan terhadap konsentrasi substrat HCO_3^- yang terdapat dalam medium. Data I_0 dan I_b digunakan untuk mengetahui besarnya energi cahaya yang tersedia dan dikonversi untuk pertumbuhan *C. vulgaris*. Data yCO_{2in} dan yCO_{2out} digunakan untuk mengetahui seberapa besar CO_2 yang terfiksasi oleh *C. vulgaris*.

4.2 Data Penelitian

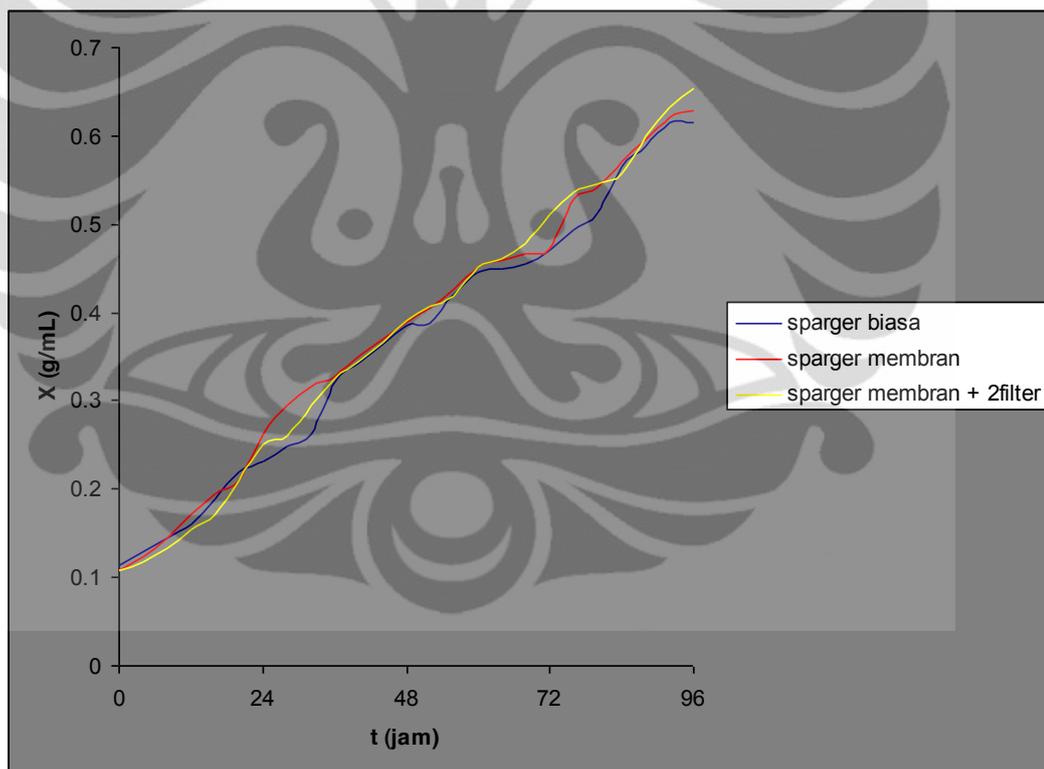
Data hasil pengamatan yang didapat dari penelitian ini disajikan dalam dua bentuk yaitu data dalam bentuk angka dan data dalam bentuk grafik. Adapun

data dalam bentuk angka akan disajikan dalam lampiran pada bagian akhir skripsi ini.

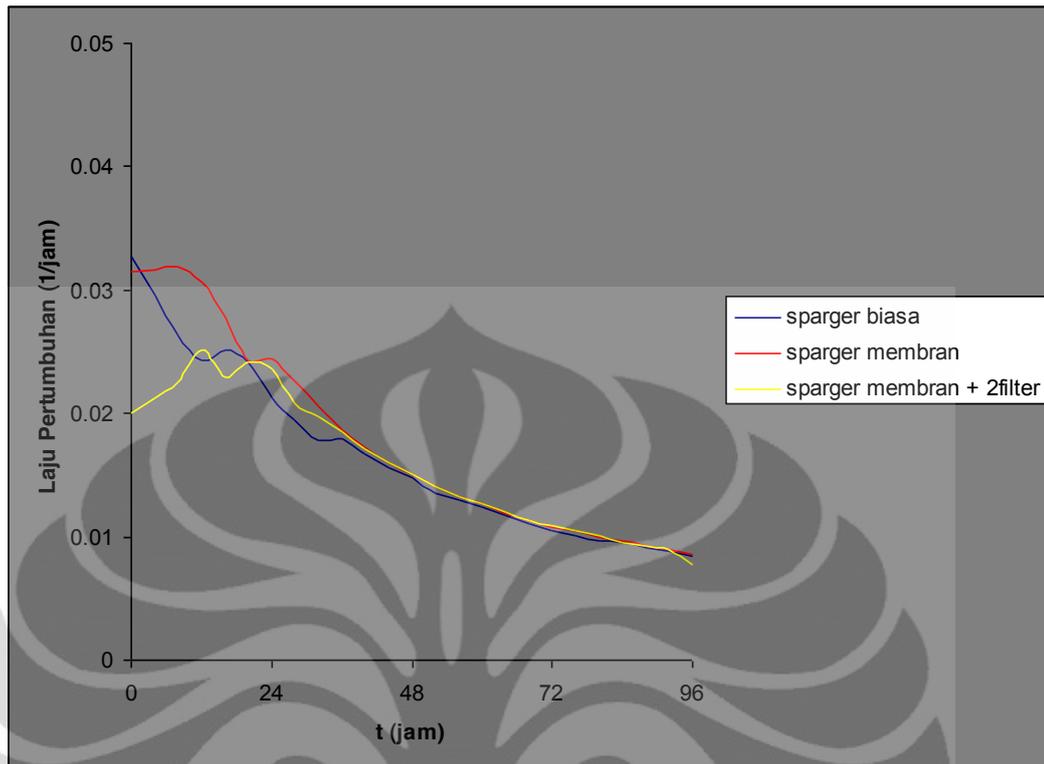
4.2.1 Hasil produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg berdasarkan perbedaan media aerasi dan penambahan 2 filter

Pada penelitian ini, baik penggunaan sparger pipa akuarium biasa, sparger membran serat berongga, serta dengan filtrasi; semuanya menggunakan jumlah innokulum awal sebesar kurang lebih 0.10 g/L dan intensitas cahaya yang digunakan pada kulturisasi adalah 5 kLux secara kontinu.

Grafik hubungan antara massa kering biomassa X terhadap waktu sebagai berikut.



Gambar 4.1 Massa Kering terhadap Waktu



Gambar 4.2 Laju Pertumbuhan pada Media Aerasi yang Berbeda dan penambahan 2 filter

Dari gambar 4.1 terlihat bahwa produksi biomassa mikroalga dengan penggunaan sparger pipa akuarium biasa, sparger membran serat berongga, serta sparger membran serat berongga plus dua filter dalam 96 jam terlihat sedikit berdempatan, namun masih dapat terlihat bahwa kondisi alga dengan sparger membran plus dua filter memiliki pertumbuhan massa yang paling cepat diikuti oleh kondisi alga sparger membran tanpa filter dan sparge pipa akuarium biasa secara berturut-turut. Oleh karena itu dapat dipastikan bahwa laju produksi biomassa pada kondisi alga dengan sparger membran plus dua filter adalah yang paling tinggi dari ketiga kondisi yang diteliti. Hasil perhitungan berat kering sel akhir setelah 96 jam adalah sebagai berikut.

Tabel 4.1 Perbandingan Media Aerasi dan Penambahan 2 filter

| Media Aerasi | $X_f(\text{g/dm}^3)$ |
|--|----------------------|
| Sparger pipa akuarium biasa | 0.614472 |
| Sparger Membran Serat Berongga | 0.628672 |
| Sparger Membran Serat Berongga + 2 filter | 0.653213 |

Dari tabel 4.1 terlihat bahwa biomassa akhir yang dihasilkan pada kondisi kondisi alga dengan sparger membran plus dua filter sedikit lebih tinggi dari kondisi alga sparger membran tanpa filter dan kondisi alga dengan sparge pipa akuarium. Hasil ini tidak terlalu signifikan antara sparger membran plus dua filter dengan alga sparger membran tanpa filter karena hanya dipantau dalam empat hari atau 96 jam. Namun jika kondisi ini diteruskan hingga beberapa hari kemudian, dimungkinkan akan terlihatnya perbedaan dari ketiga kondisi dimana alga dengan sparger membran serat berongga plus dua filter akan tetap paling tinggi laju pertumbuhannya dan lebih banyak menghasilkan biomassa. Penelitian-penelitian penggunaan filter pada produksi biomassa mikroalga yang dilakukan oleh Nuzuliany dan Darmawan sebelumnya memang menunjukkan bahwa perlakuan penggunaan filter memang cenderung menghasilkan biomassa yang lebih banyak daripada yang tanpa filter. Sedangkan antara sparger membran dengan sparger pipa akuarium biasa, walaupun menghasilkan biomassa yang hampir sama, sparger membran hanya memerlukan laju alir udara sekitar 2 liter per menit dibandingkan dengan sparger pipa akuarium biasa yang laju alir udaranya mencapai 8 liter per menit. Ini membuktikan bahwa penggunaan sparger membran dapat meningkatkan efisiensi dari penggunaan CO_2 yang sebesar 5 % dari laju alir udara yang masuk media kultur. Gambar 4.2 menerangkan mengenai laju pertumbuhan dimana laju pertumbuhan biomassa berada dalam fasa logaritmik yang akan terus menurun dengan bertambahnya waktu. Peristiwa ini dapat dimengerti dari persamaan laju pertumbuhan.

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

dimana :

| | |
|-------|--|
| μ | laju pertumbuhan spesifik (jam^{-1}) |
| N | jumlah sel (sel/dm^3) |
| X | berat kering sel/biomassa (g/dm^3) |
| t | waktu (jam) |

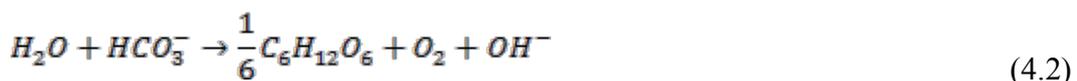
Persamaan tersebut menunjukkan bahwa laju pertumbuhan berbanding terbalik dengan massa kering yang dihasilkan pada rentang tertentu sehingga semakin banyak biomassa yang dihasilkan, semakin kecil laju pertumbuhannya. Laju pertumbuhan pada kondisi alga sparger membran serat berongga plus dua filter menunjukkan hasil lebih tinggi ketimbang dua kondisi lainnya karena selain penggunaan sparger membran serat berongga yang mampu melarutkan CO_2 lebih baik dari sparger pipa akuarium biasa, penambahan filter membantu menurunkan peluang untuk terjadinya *self-shading* yang merugikan bagi pertumbuhan alga.

Perhitungan [HCO_3^-]

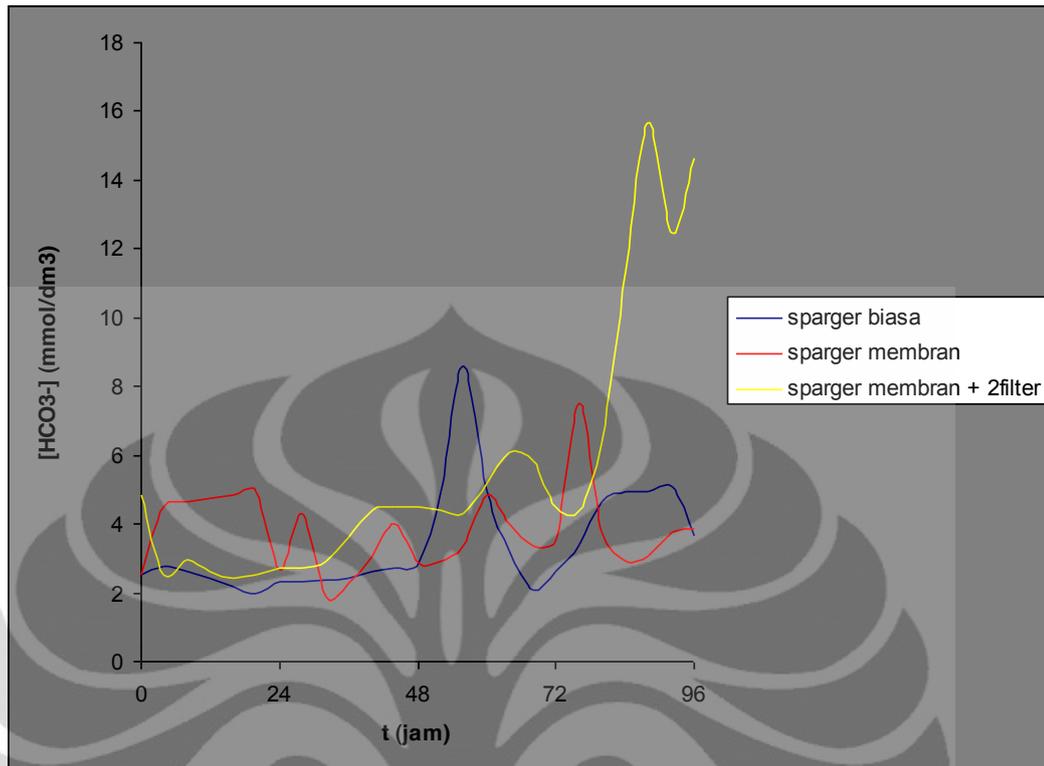
Perhitungan [HCO_3^-] dimaksudkan untuk mengetahui jumlah [HCO_3^-] yang dapat dikonsumsi oleh mikroalga dalam pertumbuhannya. Senyawa bikarbonat [HCO_3^-] terbentuk karena adanya reaksi CO_2 yang terlarut dalam air. Dari hasil penelitian yang sudah pernah dilakukan, jumlah sel meningkatkan tingkat pH karena pada saat gas CO_2 masuk ke dalam kultur terjadi reaksi sebagai berikut.



Senyawa bikarbonat diserap oleh mikroalga dan terjadi reaksi bikarbonat dengan air yang berada dalam sel hingga terbentuk glukosa, oksigen dan OH^- seperti berikut.



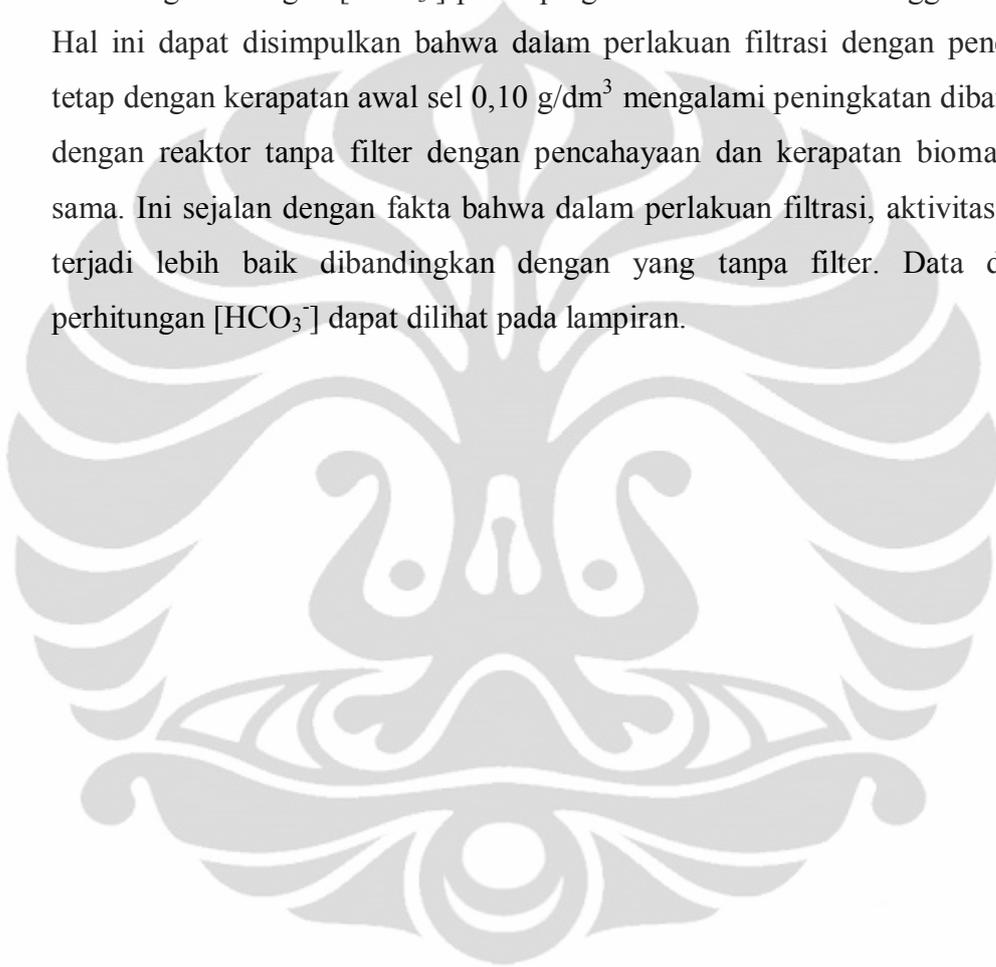
Dengan menggunakan persamaan hukum Henry, konsentrasi [HCO_3^-] dapat dihitung dan terlihat sebagai berikut.



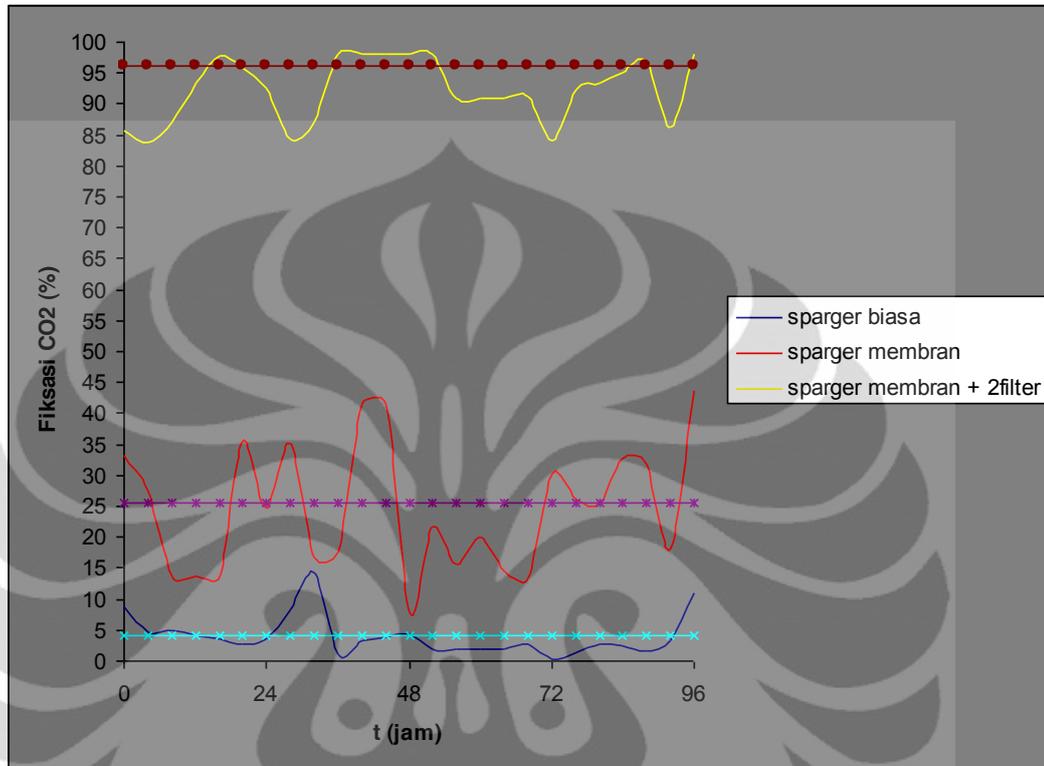
Gambar 4.3 Pengaruh Perbedaan Media Aerasi dan Penambahan 2 filter Filtrasi terhadap [HCO₃⁻]

Konsetrasi [HCO₃⁻] sebanding dengan besarnya nilai pH. Nilai [HCO₃⁻] akan semakin besar dengan naiknya nilai pH dalam kultur. Dari gambar didapatkan bahwa konsetrasi [HCO₃⁻] berfluktuatif namun sedikit demi sedikit menanjak naik seiring dengan waktu. Ini dikarenakan pH dalam kultur tidak stabil, namun pelan-pelan meningkat. Hal ini disebabkan oleh ketidak-stabilan laju alir CO₂ yang seharusnya mendukung pertumbuhan mikroalga. Ketidakstabilan ini bisa dikarenakan terbatasnya peralatan flowmeter yang memadai serta kurang optimumnya tekanan gas CO₂ untuk masuk ke dalam aliran yang didominasi oleh udara. Akibatnya, konsentrasi CO₂ yang seharusnya sekitar 5% pada saat masuk ke dalam media kultur kadang menjadi jauh dibawah 5%. Ini mempengaruhi pH yang ada sehingga menyebabkan nilai konsetrasi [HCO₃⁻] naik pada saat mikroalga tumbuh terlalu cepat dengan dukungan CO₂ yang sedikit. Tim peneliti berusaha untuk memantau konsentrasi CO₂ yang masuk setiap 4 jam dan mencoba untuk menjaganya agar tetap berada dalam rentang sekitar 5%, namun tidak

begitu berhasil. Dibutuhkan metode yang lebih tepat dalam menangani hal ini. Karena besarnya konsentrasi spesi ion $[\text{HCO}_3^-]$ sebanding dengan besarnya nilai pH, maka nilai $[\text{HCO}_3^-]$ akan semakin besar dengan naiknya nilai pH dalam medium kultur. Dari gambar terlihat bahwa $[\text{HCO}_3^-]$ pada reaktor dengan sparger membran serat berongga plus 2 filter menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan $[\text{HCO}_3^-]$ pada sparger membran serat berongga tanpa filter. Hal ini dapat disimpulkan bahwa dalam perlakuan filtrasi dengan pencahayaan tetap dengan kerapatan awal sel $0,10 \text{ g/dm}^3$ mengalami peningkatan dibandingkan dengan reaktor tanpa filter dengan pencahayaan dan kerapatan biomassa yang sama. Ini sejalan dengan fakta bahwa dalam perlakuan filtrasi, aktivitas sel yang terjadi lebih baik dibandingkan dengan yang tanpa filter. Data dan hasil perhitungan $[\text{HCO}_3^-]$ dapat dilihat pada lampiran.



Pengaruh Media Aerasi dengan Perlakuan Filtrasi terhadap Fiksasi CO₂ oleh *Chlorella vulgaris* Buitenzorg



Gambar 4.4 Persentase Gas CO₂ yang Terfiksasi dengan Media Aerasi yang berbeda dan Penambahan 2 filter

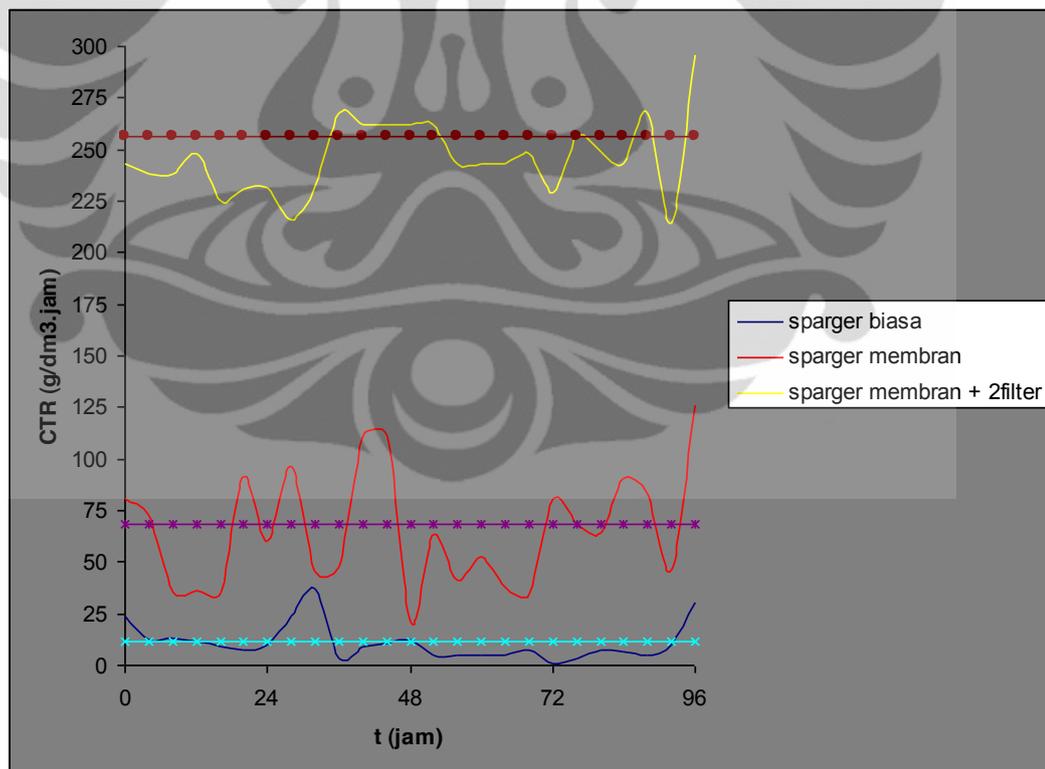
Fiksasi CO₂ di dalam fotobioreaktor ditunjukkan oleh adanya perbedaan konsentrasi inlet dan outlet CO₂. Perbedaan konsentrasi CO₂ yang masuk dan keluar reaktor dalam penelitian ini telah membuktikan adanya proses transfer gas CO₂ dari udara ke medium kultivasi dimana mikroalga mengambil CO₂ untuk tumbuh dan berkembang-biak. Dari gambar 4.4 terlihat bahwa fiksasi pada reaktor dengan sparger membran serat berongga plus 2 filter menunjukkan tingkat yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sparger pipa akuarium biasa, bahkan lebih tinggi daripada sparger membran serat berongga yang tanpa filter. Fiksasi pada reaktor dengan sparger membran serat berongga plus 2 filter dapat mencapai rata-rata 95%, sedangkan sparger membran serat berongga yang tanpa filter hanya mencapai rata-rata 25%. Sparger membran serat berongga masih memiliki fiksasi yang lebih tinggi daripada sparger pipa akuarium biasa yang hanya mampu

menfiksasi sekitar 5%. Hal ini membuktikan bahwa dengan pelarutan CO₂ yang lebih baik—dalam kasus ini, karena pendispersian CO₂ oleh membran serat berongga—maka penyerapan CO₂ oleh mikroalga akan juga mengalami peningkatan sehingga CO₂ yang terambil akan lebih banyak perbandingan jumlahnya.

CTR (*Carbon Transfer Rate*) merupakan banyaknya gas CO₂ yang ditransferkan dalam suatu volume medium kultur yang dibutuhkan oleh metabolisme sel selama satu satuan waktu tertentu (Wijanarko et al, 1997). Nilai CTR didapatkan dari selisih konsentrasi CO₂ masukan dan keluaran (Δy_{CO_2}) dikalikan dengan koefisien transfer spesifik dari CO₂ (α_{CO_2}). Nilai CTR dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$CTR = \Delta y_{CO_2} \cdot \alpha_{CO_2} \quad (4.3)$$

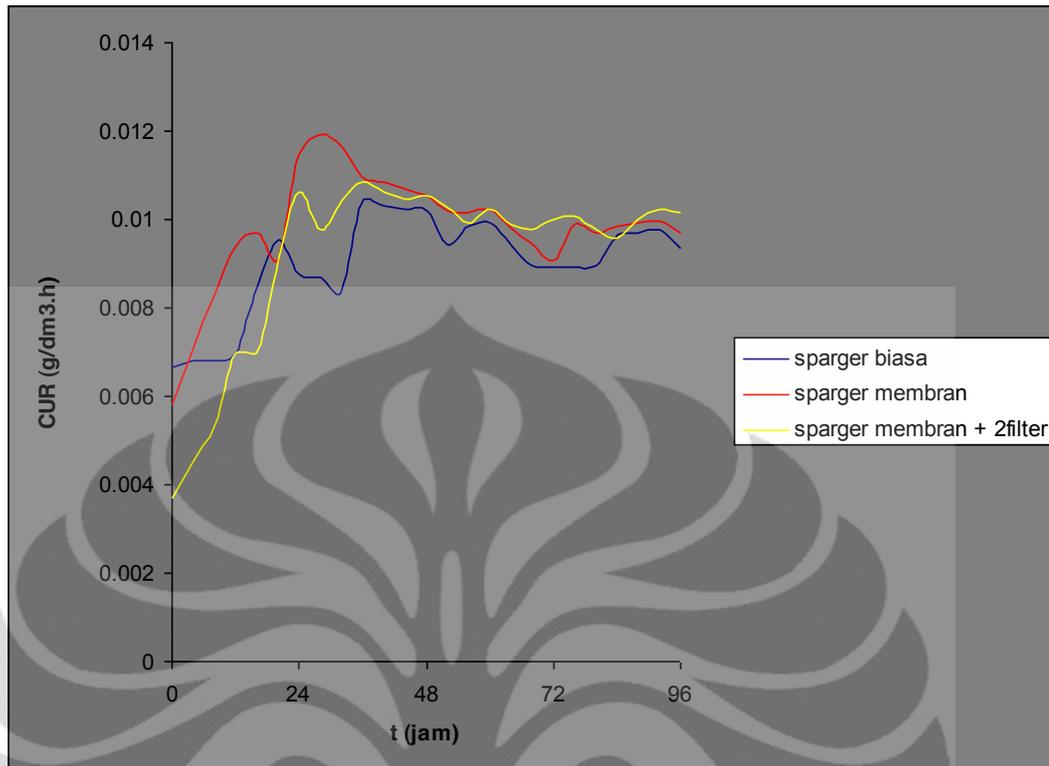
Kurva CTR sebagai fungsi waktu dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.5 Pengaruh Media Aerasi yang berbeda dan Penambahan 2 filter terhadap CTR

Dari gambar 4.5 dapat dilihat nilai CTR berbanding lurus dengan Δy_{CO_2} , sehingga seiring dengan pertambahan waktu nilai CTR cenderung turun akibat tidak seimbangnya peningkatan jumlah sel dengan besarnya fiksasi konsentrasi CO_2 . Medium lama-kelamaan akan jenuh dengan CO_2 terlarut karena sel dapat memproduksi sumber karbonnya sendiri. Gas CO_2 yang dialirkan tidak lagi terserap oleh mikroalga dan sebagian besar lewat begitu saja menuju outlet. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa nilai CTR rata-rata pada kondisi sparger membran serat berongga filtrasi lebih besar dibandingkan dengan yang tanpa filtrasi, hal ini menunjukkan bahwa kemampuan fiksasi CO_2 pada perlakuan filtrasi lebih baik dibandingkan dengan tanpa perlakuan filtrasi. Dalam hal ini, sparger membran serat berongga tetap lebih unggul dalam CTR ketimbang sparger pipa akuarium biasa.

CUR (Carbon Uptake Rate) merupakan laju penggabungan CO_2 menjadi suatu biomaterial yang ditentukan berdasarkan laju pertumbuhan (Ohtaguchi et al, 1997). Kurva kecenderungan CUR sebagai fungsi waktu dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.6 Pengaruh Media Aerasi yang Berbeda dan Penambahan 2 filter terhadap CUR

Nilai CUR didapatkan dengan mengalikan suatu faktor yang didapat dari pengujian *elemental analysis* dengan nilai dX/dt , seperti terlihat pada gambar 4.11. Nilai CUR dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$CUR = \frac{44}{\beta} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (4.4)$$

Dimana β merupakan berat dari formula sel. Rumus formula sel dari *C. vulgaris* dapat diketahui dengan elemental analysis sebagai $CH_{3,3}N_{0,203}O_{0,322}P_{0,041}$ dalam medium Benneck sedangkan nilai dX/dt didapatkan dengan memplot data waktu kultivasi dan X.

Dari gambar 4.6 terlihat bahwa nilai CUR pada perlakuan filtrasi menunjukkan hasil yang lebih besar dibandingkan dengan nilai CUR pada perlakuan tanpa filtrasi hal ini menunjukkan bahwa laju *uptake* CO_2 dari sel yang digunakan untuk pertumbuhan pada perlakuan filtrasi lebih baik dibandingkan dengan tanpa perlakuan filtrasi setelah 96 jam. Sparger membran serat berongga pun lebih unggul dalam CUR ketimbang sparger pipa akuarium biasa.

4.3.4 Pengaruh Perbedaan Media Aerasi dengan Penambahan 2 filter terhadap Besarnya Energi Cahaya Untuk Produksi Biomassa

Proses pertumbuhan mikroalga sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang merupakan sumber energi dalam proses fotosintesis. Besarnya energi yang diperlukan untuk proses metabolisme sel sangat tergantung dari besarnya intensitas cahaya yang digunakan serta kondisi fotobioreaktor yang digunakan. Semakin besar intensitas cahaya yang digunakan maka proses metabolisme akan berlangsung lebih optimal dan semakin baik kondisi fotobioreaktor maka semakin tinggi pula konversi energi cahaya untuk pembentukan biomassa. Tetapi nilai efisiensi kebutuhan energi cahaya pada pembentukan biomassa bergantung pada seberapa besar energi cahaya yang tersedia, besar energi cahaya yang terpakai, dan hasil biomassa yang diproduksi.

Besarnya efisiensi penyerapan cahaya dalam penelitian ini adalah 0.796 untuk seluruh reaktor pada ketiga kondisi operasi. Efisiensi tersebut digunakan untuk mengetahui besarnya intensitas cahaya yang diterima oleh *C. vulgaris* bagian depan fotobioreaktor.

Dari data I_0 dan I_b yang diambil dalam penelitian maka dapat dihitung nilai intensitas cahaya yang diberikan (I_i) dan intensitas cahaya yang ditransmisikan (I_t) pada pencahayaan periodik siklus harian, yang kemudian digunakan untuk menghitung energi yang digunakan untuk produksi biomassa (E_x). Tabel berikut adalah besarnya energi cahaya yang digunakan untuk produksi biomassa dari kedua jenis reaktor yang digunakan :

Tabel 4.2 Nilai E_x dan Efisiensi yang diperoleh pada Penelitian

| Media Aerasi | E_x (kJ/kg) | η_{bp} (%) |
|--|---------------|-----------------|
| Sparger pipa akuarium biasa | 426,2 | 1,92 |
| Sparger Membran Serat Berongga | 205,12 | 0,89 |
| Sparger Membran Serat Berongga + 2 filter | 718,23 | 3,17 |

Dari tabel 4.2, dapat dilihat bahwa efisiensi energi cahaya yang terjadi pada reaktor sparger membran serat berongga dengan 2 filter lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor membran serat berongga tanpa filtrasi. Hal ini disebabkan karena efek self-shading yang lebih kecil pada reaktor dengan filtrasi sehingga distribusi cahaya lebih optimal. Hal ini diindikasikan dengan lebih besarnya cahaya yang ditransmisikan oleh sel pada reaktor dengan filtrasi dibanding reaktor tanpa filtrasi pada rentang waktu yang sama. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa reaktor dengan filtrasi memberikan efisiensi konversi energi cahaya yang lebih baik daripada reaktor tanpa filtrasi. Namun dalam hal ini, sparger pipa akuarium biasa lebih memberikan efisiensi konversi energi cahaya yang baik karena gelembung yang terbentuk berukuran besar-besar dan tidak memantulkan cahaya dibandingkan dengan gelembung yang berbentuk buih-buih kecil yang secara tidak langsung menghalangi cahaya masuk ke bagian terbelakang reaktor.

BAB V KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini dengan mengkultivasi *C. vulgaris* dengan media aerasi membran serat berongga dan dengan penambahan 2 filter pada Fotobioreaktor Kolom Gelembung dalam medium Benneck, temperatur 29°C, tekanan operasi 1 atm, sumber pencahayaan lampu Phillip Halogen 20W/12V/50Hz, dan konsentrasi CO₂ 5 % adalah :

1. Penambahan 2 filter pada media aerasi membran serat berongga pada kultivasi *C. vulgaris* meningkatkan produksi biomassa paling besar dibandingkan dengan biomassa yang dihasilkan pada kultivasi sparger membran serat berongga tanpa filtrasi, bahkan juga sparger pipa akuarium biasa dengan kerapatan dan jenis pencahayaan yang sama walaupun tidak begitu signifikan pada 96 jam observasi. Walaupun menghasilkan biomassa yang hampir sama, sparger membran hanya memerlukan laju alir udara sekitar 2 liter per menit dibandingkan dengan sparger pipa akuarium biasa yang laju alir udaranya mencapai 8 liter per menit. Ini membuktikan bahwa penggunaan sparger membran dapat meningkatkan efisiensi dari penggunaan CO₂ yang sebesar 5 % dari laju alir udara yang masuk media kultur. Disarankan agar dilakukan observasi lebih dari 96 jam agar dapat dilihat jelas perbedaannya.
2. Perlakuan filtrasi pada kultivasi *C. vulgaris* Buitenzorg ini juga menghasilkan fiksasi CO₂ yang lebih baik dibandingkan dengan perlakuan tanpa filtrasi dengan kerapatan dan jenis pencahayaan yang sama. Dalam hal ini, membran serat berongga tanpa filtrasi dapat mengungguli sparger pipa akuarium biasa.
3. Efisiensi energi cahaya yang terjadi pada reaktor dengan filtrasi menunjukkan hasil lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor tanpa filtrasi. Sparger pipa akuarium biasa memberikan efisiensi konversi energi cahaya yang lebih baik karena gelembung yang terbentuk berukuran besar-besar dan tidak memantulkan cahaya dibandingkan dengan gelembung yang berbentuk buih-buih kecil yang secara tidak langsung menghalangi cahaya masuk ke bagian terbelakang reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

- Andika, Sang Made Kresna. 2005. *Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg Dengan Alterasi Pencahayaan Pada Fotobioreaktor Kolom Gelembung*. Departemen Gas dan Petrokimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Falkowsky P. G. and T. G. Owens, "Light-Shade Adaptation", *Plant Physiol.* 66 (1980) pp. 592-595
- Kaplan, A., M. R. Badger, and J. A. Bery, *Photosynthesis and the intracellular inorganic carbon pool in the bluegreen alga Anabaena variabilis: Response to external CO₂ concentration*. *Planta* 149 (1980) pp. 219-226
- Nuzulliany, Rachma. 2006. Skripsi : "Perlakuan Filtrasi Aliran Sirkulasi Medium Kultur Untuk Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella sp. Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah". Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
- Ohtaguchi K and A. Wijanarko, "Elevation of the efficiency of cyanobacterial carbon dioxide removal by monoethanolamine solution", *Technology*, 8 (2002) pp. 267-286
- Pulz, O. 2001. *Photobioreactor : Production System for Phototropic Mikroorganism*.
- Suriawiria, Unus. 2005. *Chlorella Untuk Kesehatan dan Kebugaran*. Jakarta : Papas Sinar Sinanti.
- Syarif, Ahmed. 2004. Skripsi : "Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dengan Perlakuan Aliran Sirkulasi Medium Kultur Pada Pencahayaan Alterasi". Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
- Wijanarko A., K. Asami and K. Ohtaguchi, "The Kinetics of Growth and The CO₂ Concentrating Mechanism of the Filamentous Cyanobacterium Anabaena cylindrica in a Bubble Column", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 37 (2004) pp. 1019-1025
- Wijanarko A., Dianursanti, Heidi, R. W. Soemantojo and K. Ohtaguchi, "Effect of Light illumination alteration on Chlorella vulgaris Buitenzorg's CO₂

- fixation in bubble column photobioreactor*”, International Journal for Algae, 8 (2006) 1, pp. 53-60
- Wijanarko A., Dianursanti, M. Gozan, S. M. K. Andika, P. Widiastuti, H. Hermansyah, A. B. Witarto, K. Asami, R. W. Soemantojo, K. Ohtaguchi, S. K. Song, “*Enhancement of carbon dioxide fixation by alteration of illumination during Chlorella vulgaris Buitenzorg’s growth*”, Biotechnology and Bioprocess Engineering, 11 (2006) pp. 484-488
- Wijanarko A, Dianursanti, A. Y. Sendjaya, H. Hermansyah, A. B. Witarto, B. T. Sofyan, K. Asami, K. Ohtaguchi, R. W. Soemantojo, S. K. Song, “*Enhanced Chlorella vulgaris Buitenzorg Growth by Photon Flux Density Alteration in Serial Photobioreactors*”, Biotechnology and Bioprocess Engineering, 13 (2008) pp. 476-482
- Wijanarko and Dianursanti, “*Simulated flue gas fixation for large-scale biomass production of Chlorella vulgaris Buitenzorg*”, International Journal for Algae, 11 (2009) 4, 351-358
- Wirosaputro, Sukiman. 2002. *Chlorella Untuk Kesehatan Global*. Gadjah Mada University Press.

DATA HASIL PENELITIAN

a. Sparger Biasa

| t | OD ₆₀₀ | pH | yCO ₂ in (%) | yCO ₂ out (%) | I _o (klux) | I _b (klux) | X _{sel} (g/dm ³) | μ _x (h ⁻²) | Δy (%) | CTR (g/dm ³ .h) | [HCO ₃ ³⁻] (mM) | q CO ₂ (h ⁻¹) |
|----|-------------------|------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------|----------------------------|--|--------------------------------------|
| 0 | 0,262 | 6,55 | 5,39 | 4,90 | 5,11 | 0,97 | 0,113 | 0,000 | 0,490 | 24,799 | 2,542 | 218,689 |
| 4 | 0,292 | 6,59 | 5,24 | 5,00 | 5,23 | 0,91 | 0,129 | 0,031 | 0,240 | 12,146 | 2,787 | 94,442 |
| 8 | 0,322 | 6,56 | 5,24 | 4,98 | 5,20 | 0,82 | 0,144 | 0,030 | 0,260 | 13,159 | 2,601 | 91,489 |
| 12 | 0,354 | 6,53 | 5,19 | 4,97 | 5,21 | 0,73 | 0,160 | 0,029 | 0,220 | 11,134 | 2,427 | 69,564 |
| 16 | 0,412 | 6,48 | 5,13 | 4,95 | 5,21 | 0,63 | 0,189 | 0,032 | 0,180 | 9,110 | 2,163 | 48,080 |
| 20 | 0,472 | 6,44 | 5,14 | 4,40 | 5,11 | 0,53 | 0,220 | 0,033 | 0,740 | 37,451 | 1,973 | 170,310 |
| 24 | 0,494 | 6,51 | 5,81 | 5,33 | 5,11 | 0,49 | 0,231 | 0,030 | 0,480 | 24,293 | 2,318 | 105,137 |
| 28 | 0,530 | 6,54 | 5,08 | 4,94 | 5,12 | 0,34 | 0,249 | 0,028 | 0,140 | 7,085 | 2,484 | 28,419 |
| 32 | 0,557 | 6,53 | 5,14 | 4,95 | 5,15 | 0,30 | 0,263 | 0,026 | 0,190 | 9,616 | 2,427 | 36,561 |
| 36 | 0,674 | 6,53 | 5,34 | 5,28 | 5,15 | 0,28 | 0,322 | 0,029 | 0,060 | 3,037 | 2,427 | 9,420 |
| 40 | 0,716 | 6,56 | 5,44 | 5,26 | 5,19 | 0,25 | 0,344 | 0,028 | 0,180 | 9,110 | 2,601 | 26,509 |
| 44 | 0,758 | 6,58 | 5,44 | 5,23 | 5,19 | 0,22 | 0,365 | 0,027 | 0,210 | 10,628 | 2,723 | 29,122 |
| 48 | 0,800 | 6,60 | 5,44 | 5,20 | 5,19 | 0,19 | 0,386 | 0,026 | 0,240 | 12,146 | 2,852 | 31,447 |
| 52 | 0,802 | 6,84 | 5,25 | 5,15 | 5,19 | 0,16 | 0,387 | 0,024 | 0,100 | 5,061 | 4,956 | 13,069 |
| 56 | 0,868 | 6,84 | 5,25 | 5,15 | 5,11 | 0,14 | 0,421 | 0,023 | 0,100 | 5,061 | 4,956 | 12,029 |
| 60 | 0,934 | 6,84 | 5,25 | 5,15 | 5,11 | 0,16 | 0,454 | 0,023 | 0,100 | 5,061 | 4,956 | 11,142 |
| 64 | 0,926 | 6,65 | 5,25 | 5,15 | 5,12 | 0,15 | 0,450 | 0,022 | 0,100 | 5,061 | 3,200 | 11,243 |
| 68 | 0,918 | 6,46 | 5,25 | 5,10 | 5,12 | 0,15 | 0,446 | 0,020 | 0,150 | 7,592 | 2,066 | 17,018 |
| 72 | 0,968 | 6,56 | 5,32 | 5,30 | 5,12 | 0,10 | 0,471 | 0,020 | 0,020 | 1,012 | 2,601 | 2,147 |
| 76 | 1,010 | 6,68 | 5,31 | 5,24 | 5,08 | 0,09 | 0,493 | 0,019 | 0,070 | 3,543 | 3,428 | 7,190 |
| 80 | 1,050 | 6,81 | 5,31 | 5,17 | 5,04 | 0,08 | 0,513 | 0,019 | 0,140 | 7,085 | 4,625 | 13,811 |
| 84 | 1,153 | 6,84 | 5,18 | 5,05 | 5,06 | 0,07 | 0,565 | 0,019 | 0,130 | 6,579 | 4,956 | 11,639 |
| 88 | 1,200 | 6,84 | 5,50 | 5,41 | 5,06 | 0,06 | 0,589 | 0,019 | 0,090 | 4,555 | 4,956 | 7,732 |
| 92 | 1,250 | 6,85 | 5,97 | 5,77 | 5,04 | 0,05 | 0,614 | 0,018 | 0,200 | 10,122 | 5,071 | 16,473 |
| 96 | 1,220 | 6,71 | 5,20 | 4,99 | 5,03 | 0,06 | 0,599 | 0,017 | 0,210 | 10,628 | 3,674 | 17,735 |

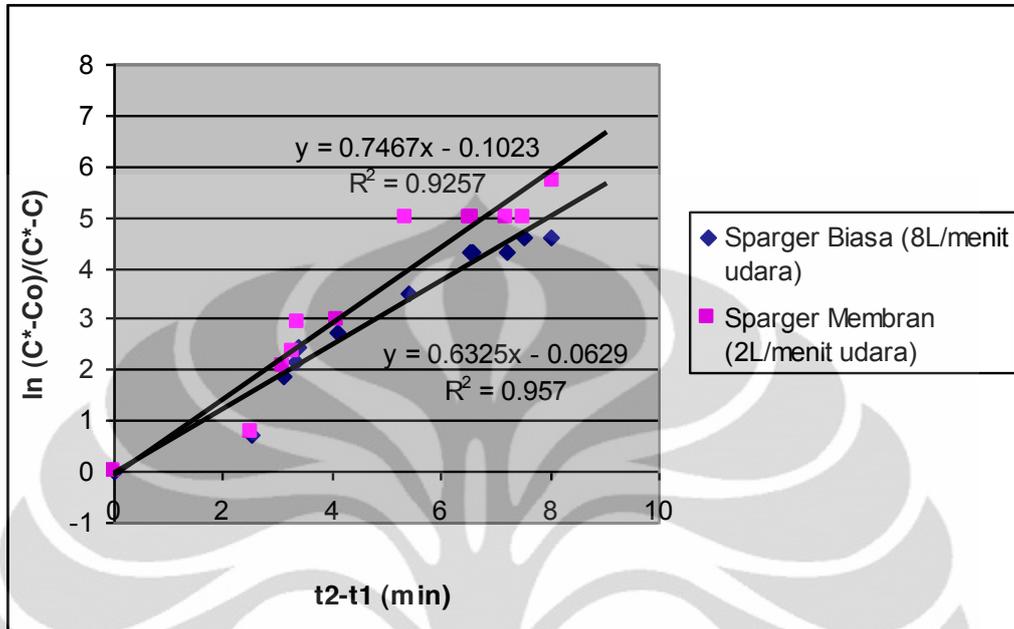
b. Sparger Membran

| t | OD ₆₀₀ | pH | yCO ₂ in (%) | yCO ₂ out (%) | l _o (klu x) | l _b (klu x) | X _{sel} (g/d m ³) | μ _x (h ⁻²) | Δy (%) | [HCO ₃ ⁻] (mM) | CTR (g/dm ³ .h) | q CO ₂ (h ⁻¹) |
|----|-------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|--|-----------------------------------|--------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 0 | 0,252 | 6,55 | 4,80 | 3,20 | 5,36 | 0,88 | 0,108 | 0,000 | 1,60 | 2,542 | 18,944 | 174,879 |
| 4 | 0,283 | 6,80 | 5,24 | 3,80 | 5,32 | 0,81 | 0,124 | 0,034 | 1,44 | 4,520 | 17,050 | 137,443 |
| 8 | 0,329 | 6,55 | 5,10 | 4,40 | 5,34 | 0,70 | 0,147 | 0,038 | 0,70 | 2,542 | 8,288 | 56,236 |
| 12 | 0,376 | 6,67 | 5,12 | 4,41 | 5,30 | 0,58 | 0,171 | 0,038 | 0,71 | 3,350 | 8,406 | 49,099 |
| 16 | 0,423 | 6,61 | 5,10 | 4,40 | 5,35 | 0,47 | 0,195 | 0,037 | 0,70 | 2,918 | 8,288 | 42,492 |
| 20 | 0,453 | 6,84 | 5,11 | 3,30 | 5,46 | 0,40 | 0,210 | 0,033 | 1,81 | 4,956 | 21,430 | 101,921 |
| 24 | 0,555 | 6,57 | 4,80 | 3,61 | 5,33 | 0,30 | 0,262 | 0,037 | 1,19 | 2,661 | 14,090 | 53,778 |
| 28 | 0,686 | 6,78 | 5,45 | 3,54 | 5,42 | 0,26 | 0,328 | 0,040 | 1,91 | 4,316 | 22,614 | 68,855 |
| 32 | 0,620 | 6,42 | 5,37 | 4,47 | 5,36 | 0,23 | 0,295 | 0,031 | 0,90 | 1,884 | 10,656 | 36,127 |
| 36 | 0,663 | 6,50 | 5,40 | 4,45 | 5,37 | 0,20 | 0,317 | 0,030 | 0,95 | 2,265 | 11,248 | 35,509 |
| 40 | 0,730 | 6,63 | 5,30 | 3,10 | 5,37 | 0,17 | 0,351 | 0,029 | 2,20 | 3,056 | 26,048 | 74,264 |
| 44 | 0,769 | 6,75 | 5,30 | 3,10 | 5,39 | 0,14 | 0,371 | 0,028 | 2,20 | 4,028 | 26,048 | 70,300 |
| 48 | 0,808 | 6,60 | 5,16 | 4,36 | 5,36 | 0,13 | 0,390 | 0,027 | 0,80 | 2,852 | 9,472 | 24,268 |
| 52 | 0,835 | 6,61 | 5,77 | 4,52 | 5,38 | 0,10 | 0,404 | 0,025 | 1,25 | 2,918 | 14,800 | 36,634 |
| 56 | 0,879 | 6,67 | 5,18 | 4,37 | 5,36 | 0,09 | 0,426 | 0,024 | 0,81 | 3,350 | 9,590 | 22,496 |
| 60 | 0,960 | 6,83 | 5,25 | 4,20 | 5,38 | 0,07 | 0,467 | 0,024 | 1,05 | 4,843 | 12,432 | 26,598 |
| 64 | 0,927 | 6,75 | 5,15 | 4,40 | 5,34 | 0,07 | 0,451 | 0,022 | 0,75 | 4,028 | 8,880 | 19,704 |
| 68 | 0,943 | 6,67 | 5,15 | 4,46 | 5,36 | 0,07 | 0,459 | 0,021 | 0,69 | 3,350 | 8,170 | 17,807 |
| 72 | 0,970 | 6,69 | 5,30 | 3,70 | 5,34 | 0,06 | 0,472 | 0,020 | 1,60 | 3,508 | 18,944 | 40,096 |
| 76 | 1,080 | 7,02 | 5,20 | 3,85 | 5,37 | 0,05 | 0,528 | 0,021 | 1,35 | 7,501 | 15,984 | 30,258 |
| 80 | 1,107 | 6,72 | 4,97 | 3,70 | 5,35 | 0,05 | 0,542 | 0,020 | 1,27 | 3,759 | 15,037 | 27,746 |
| 84 | 1,162 | 6,61 | 5,49 | 3,70 | 5,37 | 0,05 | 0,570 | 0,020 | 1,79 | 2,918 | 21,194 | 37,192 |
| 88 | 1,215 | 6,63 | 5,17 | 3,52 | 5,36 | 0,04 | 0,597 | 0,019 | 1,65 | 3,056 | 19,536 | 32,739 |
| 92 | 1,262 | 6,72 | 5,04 | 4,12 | 5,37 | 0,03 | 0,621 | 0,019 | 0,92 | 3,759 | 10,893 | 17,553 |
| 96 | 1,278 | 6,73 | 5,70 | 3,21 | 5,36 | 0,03 | 0,629 | 0,018 | 2,49 | 3,847 | 29,482 | 46,895 |

c. Sparger membran + 2 Filter

| t | OD sebenarnya | pH | yCO ₂ in (%) | yCO ₂ out (%) | I _o (klux) | I _b (klux) | X _{sel} (g/dm ³) | μ _x (h ⁻²) | Δy (%) | [HCO ₃ ⁻] (mM) | CTR (g/dm ³ .h) | q CO ₂ (h ⁻¹) |
|----|---------------|-------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 0 | 0,232 | 6,390 | 5,240 | 2,540 | 5,180 | 0,920 | 0,098 | 0,000 | 2,70 | 1,76 | 31,97 | 325,60 |
| 4 | 0,327 | 7,030 | 4,400 | 2,540 | 6,020 | 0,540 | 0,147 | 0,100 | 1,86 | 7,68 | 22,02 | 150,31 |
| 8 | 0,326 | 6,520 | 4,620 | 2,010 | 6,050 | 0,500 | 0,146 | 0,050 | 2,61 | 2,37 | 30,90 | 211,66 |
| 12 | 0,386 | 7,250 | 5,250 | 2,060 | 6,450 | 0,430 | 0,176 | 0,049 | 3,19 | 12,74 | 37,77 | 214,12 |
| 16 | 0,382 | 6,500 | 5,250 | 2,060 | 6,450 | 0,490 | 0,174 | 0,036 | 3,19 | 2,27 | 37,77 | 217,06 |
| 20 | 0,402 | 6,530 | 5,030 | 2,010 | 6,500 | 0,480 | 0,184 | 0,032 | 3,02 | 2,43 | 35,76 | 193,85 |
| 24 | 0,430 | 6,560 | 5,010 | 0,960 | 6,500 | 0,470 | 0,199 | 0,029 | 4,05 | 2,60 | 47,95 | 241,30 |
| 28 | 0,483 | 6,690 | 5,010 | 1,000 | 7,100 | 0,650 | 0,226 | 0,030 | 4,01 | 3,51 | 47,48 | 210,42 |
| 32 | 0,703 | 7,120 | 5,300 | 2,000 | 9,150 | 0,610 | 0,337 | 0,039 | 3,30 | 9,44 | 39,07 | 115,98 |
| 36 | 0,589 | 7,030 | 5,020 | 2,300 | 7,370 | 0,510 | 0,279 | 0,029 | 2,72 | 7,68 | 32,20 | 115,25 |
| 40 | 0,622 | 6,950 | 5,020 | 1,050 | 7,650 | 0,370 | 0,296 | 0,028 | 3,97 | 6,38 | 47,00 | 158,94 |
| 44 | 0,688 | 6,880 | 5,020 | 1,160 | 7,780 | 0,390 | 0,330 | 0,028 | 3,86 | 5,43 | 45,70 | 138,64 |
| 48 | 0,879 | 6,810 | 5,030 | 1,300 | 8,680 | 0,440 | 0,426 | 0,031 | 3,73 | 4,62 | 44,16 | 103,61 |
| 52 | 0,899 | 6,660 | 5,090 | 1,490 | 8,680 | 0,420 | 0,437 | 0,029 | 3,60 | 3,27 | 42,62 | 97,63 |
| 56 | 0,984 | 6,750 | 5,610 | 1,200 | 10,600 | 0,540 | 0,479 | 0,028 | 4,41 | 4,03 | 52,21 | 108,92 |
| 60 | 1,059 | 7,080 | 5,260 | 0,720 | 10,480 | 0,480 | 0,517 | 0,028 | 4,54 | 8,61 | 53,75 | 103,88 |
| 64 | 0,924 | 7,200 | 5,780 | 0,660 | 10,360 | 0,470 | 0,449 | 0,024 | 5,12 | 11,35 | 60,62 | 134,90 |
| 68 | 1,020 | 7,250 | 5,240 | 1,200 | 10,440 | 0,370 | 0,498 | 0,024 | 4,04 | 12,74 | 47,83 | 96,05 |
| 72 | 1,075 | 7,090 | 4,600 | 0,350 | 10,460 | 0,480 | 0,526 | 0,023 | 4,25 | 8,81 | 50,32 | 95,70 |
| 76 | 1,101 | 7,270 | 5,300 | 1,400 | 10,440 | 0,380 | 0,539 | 0,022 | 3,90 | 13,34 | 46,18 | 85,67 |
| 80 | 1,156 | 7,100 | 5,300 | 1,400 | 10,460 | 0,390 | 0,567 | 0,022 | 3,90 | 9,02 | 46,18 | 81,44 |
| 84 | 1,293 | 7,100 | 5,310 | 0,300 | 10,440 | 0,770 | 0,636 | 0,022 | 5,01 | 9,02 | 59,32 | 93,21 |
| 88 | 1,399 | 7,320 | 5,750 | 0,200 | 11,390 | 0,490 | 0,690 | 0,022 | 5,55 | 14,97 | 65,71 | 95,24 |
| 92 | 1,414 | 6,680 | 5,440 | 0,470 | 11,200 | 0,440 | 0,697 | 0,021 | 4,97 | 3,43 | 58,84 | 84,38 |
| 96 | 1,653 | 7,350 | 4,930 | 0,250 | 11,190 | 0,400 | 0,819 | 0,022 | 4,68 | 16,04 | 55,41 | 67,66 |

LAMPIRAN B
HASIL UJI KOEFISIEN PERPINDAHAN MASSA $k_L a$



LAMPIRAN C

PENGOLAHAN DATA OD₆₀₀

C.1 Pengolahan Data X dan N Sel Reaktor

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

❖ Penentuan Berat Kering Sel (X)

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

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

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

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

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

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

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

❖ Penentuan Jumlah Sel (sel/ml)

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

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

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

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

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

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

C.2 Pengolahan Data X dan Nsel Filtrat

Dengan cara yang sama kita dapat menentukan berat kering sel yang ada di filtrat. Hanya saja pada filtrat kita harus memperhitungkan faktor pengenceran. Pengenceran perlu dilakukan karena alat pembaca OD (spektrofotometer) hanya

akurat untuk rentang pembacaan 0.2-0.4. Maka itu filtrat harus diencerkan sehingga pembacaan pada spektro berada pada rentang tersebut. Maka persamaan di atas menjadi

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

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

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

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

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

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

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

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

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

D.1 Contoh Pengolahan Data

D.1.1 Contoh Pengolahan Data $[HCO_3^-]$

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

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

Dimana :

- P_T = tekanan operasi (atm)
- y_{CO_2} = konsentrasi gas CO_2 yang diumpankan (5%)
- K_{CO_2} = $4,38 \times 10^{-7}$
- H_{CO_2} = 2900 KPa/mol
- T = temperatur operasi
- T_0 = temperatur standar
- $A_k = 40,557$ $B_k = -36,782$ $C_k = 0$
- $A_h = 22,771$ $B_h = -11,452$ $C_h = -3,117$

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

D.1.2 Contoh Pengolahan Data CTR (Carbondioxide Transfer Rate)

Contoh perhitungan konsentrasi bikarbonat CTR pada penelitian ini :

Rumus yang digunakan :

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

Dalam penelitian ini :

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

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

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

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

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

D.1.3 Contoh Pengolahan Data q_{CO_2}

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

Rumus yang digunakan :

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

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

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

D.1.4 Contoh Pengolahan Data CUR (Carbon Uptake Rate)

Contoh perhitungan CUR pada penelitian ini :

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

Maka :

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

dimana β merupakan berat formula sel, untuk mendapatkan nilai β , *Chlorella vulgaris* harus dikeringkan terlebih dahulu, pada penelitian kali ini *Chlorella* dikeringkan di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) di Cibinong, Bogor. Setelah dikeringkan barulah kita dapat melakukan Elemental Analysis untuk mengetahui elemen dasar dari *Chlorella*, Elemental Analysis dilakukan

di dua tempat yaitu di Lemigas dan di Departemen Metalurgi Universitas Indonesia, Pengukuran dilakukan di dua tempat karena pengukuran Elemental Analysis yang dilakukan di Lemigas hanya bisa untuk mengukur elemen seperti C, H, dan N saja sedangkan pengukuran Elemental Analysis di Departemen Metalurgi Universitas Indonesia tidak bisa mengukur elemen H. Berikut ini merupakan perhitungan untuk mendapatkan Rumus Formula Sel (RMF) dari *Chlorella vulgaris* Buitenzorg :

Komposisi %berat :

$$C = 22\%$$

$$H = 6,05\%$$

$$N = 5,2\%$$

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

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

Maka :

Komposisi sel kering $CH_xN_yO_zP_A$

Basis : 1 mol karbon

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dari perhitungan didapatkan :

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

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

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

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

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

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



Setelah mendapatkan rumus formula sel maka β dapat diketahui,

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

$$\beta = 24,565$$

dengan memasukan nilai β ke dalam persamaan awal, maka nilai CUR dapat diketahui,

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

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

LAMPIRAN E

PERHITUNGAN E_x dan η_{bp}

Contoh perhitungan E_x dan η_{bp}

Untuk mencari nilai E_x (energi cahaya yang dimanfaatkan selama pertumbuhan) dan E (energi cahaya yang tersedia selama pertumbuhan) adalah sebagai berikut :

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

$$E = \frac{\int_0^t (I_i - I_t) dt}{\Delta X \cdot s}$$

dengan : ΔX = berat biomassa yang dihasilkan selama masa pertumbuhan (g/dm^3)

s = jarak yang ditempuh cahaya di dalam medium kultur medium (m)

dengan demikian dapat dicari besarnya nilai efisiensi konversi energi cahaya untuk pembentukan biomassa (η_{bp}) :

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

Dengan luas permukaan yang terpapar sinar adalah 0,385 m x 0,60 m, sedangkan intensitas cahaya yang ditransmisikan ke medium kultur medium sebesar 6,32 kLux, dan intensitas cahaya yang diterima oleh medium kultur medium sebesar 0,0753 kLux, dimana jarak yang ditempuh cahaya di dalam medium kultur sebesar 0,10 m, dan selisih berat biomassa dari jam ke-0 hingga jam ke-96 adalah 0,501 g/ml, maka energi cahaya yang dimanfaatkan selama pertumbuhan adalah 426,2 kJ/kg, dimana energi cahaya yang tersedia selama pertumbuhan adalah 22203 kJ/kg sehingga efisiensi cahaya sebesar 1,92 %