



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris*  
Buitenzorg DALAM FOTOBIOREAKTOR KOLOM  
GELEMBUNG SKALA MENENGAH DENGAN  
PENGATURAN KECEPATAN SUPERFISIAL UDARA**

**SKRIPSI**

**ISNAENI**

**0405060334**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENINGKATAN PRODUKSI BIOMASSA *Chlorella vulgaris*  
Buitenzorg DALAM FOTOBIOREAKTOR KOLOM  
GELEMBUNG SKALA MENENGAH DENGAN  
PENGATURAN KECEPATAN SUPERFISIAL UDARA**

**SKRIPSI**

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

**ISNAENI**

**0405060334**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Isnaeni**  
**NPM : 0405060334**  
**Tanda Tangan :**



**Tanggal : 7 Juli 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Isnaeni  
NPM : 0405060334  
Program studi : Teknik Kimia  
Judul skripsi : Peningkatan Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris*  
Buitenzorg Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung  
Skala Menengah Dengan Pengaturan Kecepatan  
Superfisial Udara

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 : 1. Ir Dianursanti, M. T. (.....)  
2. Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng. (.....)  
Penguji : Ir. Tania Surya Utami, M. T. (.....)  
Penguji : Ir. Rita Arbianti M. Si. (.....)

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

Tanggal : 7 Juli 2009

## KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kepada Allah SWT atas izinNya skripsi ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Skripsi dengan judul "Peningkatan Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah Dengan Pengaturan Kecepatan Superfisial Udara" ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Kimia FTUI.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA, selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
2. Ibu Ir. Dianursanti, M.T dan Bapak Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M. Eng atas bimbingan yang telah diberikan.
3. Semua dosen Teknik Kimia FTUI, guru-guru dari TK sampai SMA atas ilmu yang telah diberikan.
4. Ibu, ayah, kakak dan adik-adik yang sangat ingin penulis bahagiakan. Terima kasih atas dukungan, kasih sayang, dan doa yang diberikan.
5. Teman-teman sepenelitian, Gema, Tarryn, Adit Kate, dan Maudhi. Terima kasih atas bantuan yang diberikan.
6. Gema, Tya, Eris, Endah, dan Ita untuk waktu berbagi dan kebersamaannya.
7. Itheung, Yendha, Eja, Febry, Ayu, Lila, Adel, Anggun, Renda, Polu, Wahyudi, Theo dan teman-teman angkatan 2005 lainnya atas kebersamaan dan pertemanannya selama ini.
8. Karyawan Teknik Kimia, Mang Ijal, Kang Jajat, Mba Yanti, Mba fita, Pak Masturo, Mas Sri, Mas Opik, Mang Rinan, Mas Heri, Mas Mugeni dan Mba Ita yang telah menyumbangkan tenaga untuk membantu menyelesaikan skripsi ini.
9. Pihak-pihak lain yang mendukung dan membantu yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga semua dukungan yang telah diberikan mendapat balasan yang baik dari Allah SWT. Amien.

Depok, 7 Juli 2009

Penulis



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

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

Nama : Isnaeni  
NPM : 0405060334  
Program studi : Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

”Peningkatan Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah Dengan Pengaturan Kecepatan Superfisial Udara”

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 7 Juli 2009

Yang menyatakan



(Isnaeni)

## ABSTRAK

Nama : Isnaeni

Program Studi : Teknik Kimia

Judul : Peningkatan Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg  
Dalam Kolom Gelembung Skala Menengah Dengan Pengaturan  
Kecepatan Superfisial Udara.

Pengaturan kecepatan superfisial ( $U_G$ ) udara dalam pengembangbiakkan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg sangat diperlukan agar terjadi pemerataan cahaya dan  $CO_2$  yang diberikan ke dalam media kultur. Dari hasil penelitian, diperoleh bahwa semakin tinggi kecepatan superfisial, jumlah sel yang dihasilkan semakin banyak hingga mencapai titik tertentu, peningkatan kecepatan superfisial akan mengakibatkan penurunan jumlah sel yang dihasilkan. Produksi biomassa dan laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg mencapai maksimum pada kecepatan superfisial 11,917 m/h. Energi terbesar yang digunakan selama kultivasi tertinggi pada kecepatan superfisial 6,851 m/h dan terendah pada kecepatan superfisial 11,917 m/h. Pencahayaan alterasi dilakukan sebagai pembandingan dan dilakukan pada kecepatan superfisial 8,875 m/h menghasilkan laju pertumbuhan yang lebih tinggi dibandingkan dengan pada pencahayaan kontinyu pada kecepatan superfisial yang sama. Namun, tidak lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu pada kecepatan superfisial yang optimum.

**Kata kunci** : *Chlorella sp.*, Produksi Biomassa, Kecepatan Superfisial.



## ABSTRACT

Name : Isnaeni  
Study Program : Chemical Engineering  
Title : Enhancement of *Chlorella vulgaris* Buitenzorg Biomass Production in Medium Scale Bubble Column Photobioreactor with Arrangement of Air Superficial Velocity.

Arrangement of superficial velocity ( $U_G$ ) in *Chlorella vulgaris* Buitenzorg cultivation very need so that happen light generalization and  $CO_2$  that given into culture media. From research, got that speed excelsior superficial, cell total that produced more and more up to achieve certain points, enhancement of superficial velocity will cause cell total depreciation that produced. Production biomass and growth rate *Chlorella vulgaris* Buitenzorg achieve maximum at a speed of superfisial 11,917 m/h. Biggest energy that is used during cultivation highest at a speed of superfisial 6,851 m/h and low at a speed of superfisial 11,917 m/h. Alteration illumination doing at a speed of superfisial 8,875 m/h produce growth rate higher is compared with in continuous illumination at a speed of superfisial same. But, bot more tall compared with continuous illumination at a superficial velocity optimum.

**Keywords** : *Chlorella sp.*, Biomass Production, Superficial Velocity.

## DAFTAR ISI

|   |      |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL.....  | i    |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....   | ii   |
| HALAMAN PENGESAHAN.....   | iii  |
| KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH.....   | iv   |
| HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH .....  | vi   |
| ABSTRAK .....   | vii  |
| ABSTRACT .....  | viii |
| DAFTAR ISI .....  | ix   |
| DAFTAR TABEL.....   | xi   |
| DAFTAR GAMBAR.....  | xii  |
| DAFTAR ISTILAH/SIMBOL.....  | xiii |
| BAB I.....  | 1    |
| PENDAHULUAN .....   | 1    |
| 1.1 Latar Belakang .....  | 1    |
| 1.2 Rumusan Masalah.....  | 3    |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....   | 4    |
| 1.4 Batasan Masalah.....  | 4    |
| 1.5 Sistematika Penulisan.....  | 4    |
| BAB II.....   | 6    |
| TINJAUAN PUSTAKA.....   | 6    |
| 2.1 <i>Chlorella vulgaris</i> .....   | 6    |
| 2.1.1 Morfologi <i>Chlorella</i> .....  | 7    |
| 2.1.2 Fase Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                      | 8    |
| 2.1.3 Manfaat <i>Chlorella</i> .....  | 10   |
| 2.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan <i>Chlorella</i> pada Medium Terbatas ..... | 13   |
| 2.3 Fotosintesis .....  | 15   |
| 2.3.1 Reaksi Fotosintesis .....   | 17   |
| 2.3.2 Faktor Penentu Laju Fotosintesis .....  | 18   |
| 2.3.3 Fotosintesis Pada <i>Chlorella sp.</i> .....  | 19   |
| 2.4 Fotobioreaktor.....   | 20   |
| 2.4.1 Karakteristik Fotobioreaktor.....   | 21   |
| 2.4.2 Jenis Fotobioreaktor .....  | 22   |
| 2.5 Kolom Gelembung .....   | 22   |
| 2.5.1 Perpindahan Massa Fasa Gas ke dalam Fasa Cair di Dalam Kolom Gelembung.....           | 23   |
| 2.5.2 Koefisien Perpindahan Massa .....   | 23   |
| 2.5.3 <i>Gas Hold up</i> .....  | 25   |
| 2.6 Penelitian Yang Telah Dilakukan .....   | 25   |
| BAB III.....  | 28   |
| METODE PENELITIAN.....  | 28   |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian.....  | 28   |
| 3.2 Alat dan Bahan Penelitian .....   | 29   |
| 3.2.1 Alat Penelitian .....   | 29   |
| 3.2.2 Bahan Penelitian.....   | 30   |

|                      |  |    |
|----------------------|--|----|
| 3.3                  | Variabel Penelitian .....  | 30 |
| 3.4                  | Prosedur Penelitian.....   | 31 |
| 3.4.1                | Kalibrasi Flow meter .....   | 31 |
| 3.4.2                | Pengukuran $K_{La}$ dan <i>Gas hold up</i> .....   | 31 |
| 3.4.3                | Sterilisasi Peralatan .....  | 32 |
| 3.4.4                | Pembuatan Medium <i>Benneck</i> .....  | 33 |
| 3.4.5                | Pembiakan Kultur <i>Chlorella vulgaris</i> Dalam Medium <i>Benneck</i> .....                                     | 34 |
| 3.4.6                | Pembuatan Rangkaian Alat .....   | 34 |
| 3.4.7                | Penentuan Jumlah Inokulum .....  | 35 |
| 3.4.8                | Variasi Kecepatan Superfisial Udara ( $U_G$ ).....   | 35 |
| 3.4.9                | Pencahayaan Alterasi pada Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) yang dipilih ..  | 35 |
| 3.4.10               | .....Pengambilan Data  |    |
|                      | 35   |    |
| 3.5                  | Metode Perhitungan Data Penelitian.....  | 36 |
| 3.5.1                | Jumlah Biomassa ( $X$ ).....   | 36 |
| 3.5.2                | Laju Pertumbuhan Spesifik ( $\mu$ ) .....  | 36 |
| 3.5.3                | Pengolahan Data pH .....   | 36 |
| 3.5.4                | Pengolahan Data $I$ .....  | 37 |
| 3.5.5                | Pengolahan Data $K_{La}$ .....   | 38 |
| 3.5.6                | Pengolahan Data <i>Gas Hold up</i> .....   | 39 |
| BAB IV               | .....  | 40 |
| HASIL DAN PEMBAHASAN | .....  | 40 |
| 4.1                  | Pembahasan Umum.....   | 40 |
| 4.2                  | Data Penelitian .....  | 41 |
| 4.3                  | Pengaruh Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) Terhadap Aspek Hidrodinamika... 44                                      |    |
| 4.3.1                | Pengaruh Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) Terhadap <i>Gas Hold up</i> .....                                       | 44 |
| 4.3.2                | Pengaruh Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) Terhadap Koefisien Transfer Massa $CO_2$ .....                          | 45 |
| 4.4                  | Pengaruh Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) Terhadap Produksi Biomassa <i>Chlorella</i> .....                       | 46 |
| 4.4.1                | Laju Pertumbuhan Pada Berbagai Variasi Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ).....                                      | 47 |
| 4.4.2                | Berat Kering ( $X$ ) <i>Chlorella</i> yang dihasilkan Pada Berbagai Variasi Kecepatan Superfisial ( $U_G$ )..... | 48 |
| 4.4.3                | pH Kultur Pada Berbagai Variasi Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) .....  | 49 |
| 4.5                  | Energi Untuk Produksi Biomassa <i>Chlorella</i> .....  | 49 |
| 4.6                  | Pengaruh Pencahayaan Alterasi .....  | 50 |
| BAB V                | .....  | 52 |
| KESIMPULAN           | .....  | 52 |
| DAFTAR PUSTAKA       | .....  | 53 |

## DAFTAR TABEL

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tabel 2.1 | Komposisi Biomassa <i>Chlorella</i> .....  | 12 |
| Tabel 2.2 | Jejak Rekam Riset <i>Chlorella vulgaris</i> Buitenzorg di Teknik Kimia UI.....                               | 25 |
| Tabel 2.3 | Penelitian Mikroalga Skala Internasional .....   | 27 |
| Tabel 3.1 | Bahan Medium <i>Benneck</i> .....  | 33 |
| Tabel 4.1 | Laju Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> Maksimum Pada Berbagai Kecepatan Superfisial Udara ( $U_G$ )..... | 47 |
| Tabel 4.2 | Berat kering yang dihasilkan pada variasi kecepatan superfisial ( $U_G$ ).....                               | 48 |
| Tabel 4.3 | Perbandingan Berat Kering Akhir Volume 750 mL dan 18L.....   | 48 |
| Tabel 4.4 | Energi Pada Berbagai Kecepatan Superfisial.....  | 50 |
| Tabel 4.5 | Perbandingan Pencahayaan Alterasi dan Kontinyu.....  | 50 |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| Gambar 2.1. Koloni <i>Chlorella vulgaris</i> .....  | 6  |
| Gambar 2.2. Struktur Sel <i>Chlorella vulgaris</i> .....  | 7  |
| Gambar 2.3. Kurva Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                     | 9  |
| Gambar 2.4. Penampang daun .....  | 16 |
| Gambar 2.5. Fotobioreaktor Terbuka untuk Pemiakan <i>Chlorella vulgaris</i> .....                 | 20 |
| Gambar 2.6. Proses Perpindahan Massa yang terjadi Dalam Kolom Gelembung .....                     | 23 |
| Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian .....   | 28 |
| Gambar 3.2. Rangkaian Peralatan untuk Running Fotobioreaktor Tunggal .....                        | 34 |
| Gambar 4.1. Berat Kering yang dihasilkan Pada Berbagai Kecepatan Superfisial .....                | 42 |
| Gambar 4.2. pH Kultur Pada Berbagai Kecepatan Superfisial .....                                   | 42 |
| Gambar 4.3. Intensitas belakang reaktor ( $I_b$ ) pada Berbagai Kecepatan Superfisial .....       | 43 |
| Gambar 4.4. Laju Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> pada Berbagai Kecepatan Superfisial .....  | 43 |
| Gambar 4.5. Berat Kering, pH dan Intensitas Cahaya pada Pencahayaan Alterasi .....                | 44 |
| Gambar 4.6. Profil <i>Gas hold up</i> terhadap Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) .....              | 45 |
| Gambar 4.7. Profil Koefisien Transfer Massa $CO_2$ terhadap Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) ..... | 45 |

## DAFTAR ISTILAH/SIMBOL

|                        |  |
|------------------------|--|
| $\alpha_{\text{kaca}}$ | = Efisiensi penyerapan cahaya oleh permukaan kaca bioreaktor                       |
| A                      | = Luas permukaan plat iluminasi ( $\text{m}^2$ )                                   |
| $A_H, B_H, C_H$        | = Konstanta $H_{\text{CO}_2}$ pada Persamaan Henry [-]                             |
| $A_K, B_K, C_K$        | = Konstanta $K_{\text{CO}_2}$ pada Persamaan Henry [-]                             |
| $C_{\text{O}_2}^*$     | = Konsentrasi oksigen terlarut dalam keadaan jenuh                                 |
| $C_{\text{O}_2}$       | = Konsentrasi oksigen terlarut pada $t$  |
| $\varepsilon$          | = Gas hold up  |
| E                      | = Energi cahaya yang diterima oleh kultur medium ( $\text{kJ.g}^{-1}$ )            |
| $E_X$                  | = Energi cahaya yang dimanfaatkan alga dalam pertumbuhannya ( $\text{kJ.g}^{-1}$ ) |
| f                      | = Laju alir flow meter yang telah dikalibrasi                                      |
| I                      | = Intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh kultur medium dalam bioreaktor (lux)  |
| $I_b$                  | = Intensitas cahaya yang keluar dari bioreaktor (lux)                              |
| $I_i$                  | = Intensitas cahaya yang diterima oleh kultur medium dalam bioreaktor (lux)        |
| $I_o$                  | = Intensitas cahaya yang diterima oleh kultur medium dalam bioreaktor (lux)        |
| $K_{La}$               | = Koefisien perpindahan massa  |
| $N_{\text{sel}}$       | = Kerapatan sel (sel/L)  |
| P                      | = Tekanan operasional (atm)  |
| s                      | = Jarak yang ditempuh cahaya dalam kultur medium (m)                               |
| T                      | = Temperatur Operasional (K)   |
| t                      | = Waktu  |
| $U_G$                  | = Kecepatan superficial gas (m/h)  |
| $\mu$                  | = Laju pertumbuhan sel ( $\text{h}^{-1}$ )   |
| $V_G$                  | = Volume gas di dalam reaktor ( $\text{m}^3$ )                                     |
| $V_L$                  | = Volume liquid di dalam reaktor ( $\text{m}^3$ )                                  |
| X                      | = Berat kering sel ( $\text{g/dm}^3$ )   |
| $V_{bs}$               | = Skala <i>bubble soap</i> (mL/menit)  |

# BAB I

## PENDAHULUAN

Bab ini akan membahas mengenai latar belakang masalah dilakukannya penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan hasil penelitian.

### 1.1 Latar Belakang

Mikroalga telah digunakan sebagai alternatif sumber pangan sejak tahun 1950 dimana pada saat itu populasi manusia di dunia mengalami peningkatan dan diprediksikan *supply* protein tidak tercukupi. Kemudian, penelitian mengenai mikroalga terus berlanjut dan mengalami perkembangan sehingga pada tahun 1960, mikroalga mulai dikembangkan pada skala besar untuk dikomersialisasikan. Pada saat sekarang, penggunaan mikroalga sebagai alternatif sumber pangan sangat diperlukan untuk mengatasi kelangkaan bahan pangan di masyarakat akibat dari perubahan iklim global dan krisis ekonomi yang berkepanjangan.

Mikroalga memiliki kandungan nutrisi yang lebih baik dibandingkan dengan makanan yang biasa dimakan oleh masyarakat Indonesia pada umumnya. Sebagai contoh, protein dengan kandungan asam amino dalam mikroalga lebih kaya dibanding telur ayam. Demikian juga dengan kandungan beta karoten yang bisa 900 kali lebih banyak dibanding wortel. Sedangkan kandungan omega-3, mikroalga lebih banyak dibanding minyak ikan, biji rami, dan kedelai, yaitu 50-60 persen ([www.situshijau.co.id/tulisan.php?](http://www.situshijau.co.id/tulisan.php?), April 2003). Diantara jenis-jenis mikroalga yang potensial dan sudah cukup dikenal sebagai sumber pangan antara lain *Chlorella sp.* Sebagai asupan pangan alternatif, *Chlorella* memiliki kandungan protein di atas 53 persen. Selain itu, *Chlorella* juga memiliki manfaat untuk kesehatan dan dapat dijadikan biodiesel. Dalam segi kesehatan, *Chlorella* berguna untuk perkembangan saraf otak, pencegah penyakit jantung, penghambat tumor, dan pencegah kanker usus karena memiliki kandungan klorofil, dinding sel, vitamin A (betakaroten), dan *Chlorella Growth Factor* (CGF). Dalam bidang energi, *Chlorella* dapat dijadikan sebagai biodiesel karena memiliki kandungan lipid yang cukup tinggi yaitu 14-22%. Oleh karena manfaatnya yang cukup

banyak, maka diperlukan usaha untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella*.

Produksi biomassa *Chlorella sp.* dipengaruhi oleh proses fotosintesis yang dilakukannya. *Chlorella* mendapatkan energi untuk tumbuh dan berkembangbiak dengan melakukan fotosintesis. Dalam fotosintesis, pemerataan faktor-faktor yang dibutuhkan seperti cahaya dan CO<sub>2</sub> sangat diperlukan agar fotosintesis dapat berjalan optimal. Cahaya berperan sebagai energi untuk menghasilkan ATP sedangkan CO<sub>2</sub> berperan sebagai sumber karbon dan digunakan untuk menghasilkan glukosa yang merupakan bahan makanan *Chlorella* untuk tumbuh dan berkembangbiak. Pemerataan cahaya dan CO<sub>2</sub> dapat dilakukan dengan proses pengadukan yang dalam penelitian ini dilakukan dengan proses aerasi.

Peningkatan aerasi dapat meningkatkan proses pengadukan dan transfer massa antara gas dan liquid dalam pengembangbiakan *Chlorella*. Namun, tingkat aerasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan *shear stress* untuk sel *Chlorella* dan mengakibatkan sel *Chlorella* bergerak terlalu cepat sehingga CO<sub>2</sub> tidak dapat diserap dengan baik. Pada tingkat aerasi yang rendah, waktu tinggal CO<sub>2</sub> dalam medium lebih lama sehingga CO<sub>2</sub> terserap baik oleh sel. Akan tetapi, tingkat aerasi yang sangat rendah dapat menyebabkan terhambatnya aliran udara ke medium sehingga pengadukan yang terjadi tidak optimal dan menyebabkan sel *Chlorella* mengendap di dasar fotobioreaktor. Akibatnya, sel *Chlorella* tersebut tidak dapat menerima cahaya karena di dasar fotobioreaktor merupakan daerah yang tidak terkena cahaya sehingga laju pertumbuhan sel akan menurun. Hal ini menunjukkan perlunya menentukan laju alir udara optimum yang masuk ke dalam reaktor (kecepatan superfisial) agar laju pertumbuhan *Chlorella* menjadi maksimal.

Berdasarkan hal tersebut, maka pada penelitian ini, dimana digunakan fotobioreaktor kolom gelembung susunan tunggal dengan volume 18L, dilakukan variasi kecepatan superfisial udara untuk mendapatkan kecepatan superfisial udara yang optimum agar proses pengadukan menjadi optimal sehingga cahaya dan CO<sub>2</sub> yang diberikan untuk perkembangbiakan *Chlorella* menjadi lebih merata dan produksi biomassa *Chlorella* juga dapat menjadi maksimal. Nilai variasi kecepatan superfisial udara ( $U_G$ ) yang dilakukan untuk kultivasi *Chlorella*,



diambil berdasarkan perhitungan kecepatan superfisial udara ( $U_G$ ) pada air yang menghasilkan aspek hidrodinamika (koefisien transfer massa  $CO_2$  dan *gas hold up*) yang maksimum.

Cahaya juga menjadi faktor penting bagi pertumbuhan *Chlorella* disamping kecepatan superfisial udara. Semakin banyak jumlah inokulum *Chlorella*, maka semakin besar intensitas cahaya yang dibutuhkan untuk proses fotosintesis. Jika intensitas cahaya yang diberikan tetap seiring peningkatan jumlah inokulum *Chlorella* maka akan terjadi *self-shading* yaitu terhalangnya cahaya akibat dari penumpukan jumlah sel. Untuk mencegah terjadinya *self-shading*, maka besarnya intensitas cahaya yang diberikan harus ditingkatkan seiring meningkatnya jumlah sel *Chlorella* dimana metode pencahayaan seperti ini disebut dengan metode alterasi. Selain itu, dari penelitian sebelumnya juga menunjukkan metode pencahayaan terbaik untuk meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* adalah dengan pencahayaan alterasi sehingga dalam penelitian ini juga akan dilakukan peningkatan intensitas cahaya yang digunakan seiring dengan meningkatnya jumlah sel pada salah satu kecepatan superfisial udara yang bukan optimum dari variasi kecepatan superfisial yang dilakukan. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan dalam pengembangan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* pada skala industri maupun sebagai referensi dalam usaha optimalisasi produksi biomassa *Chlorella vulgaris*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana peningkatan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* dengan pengaturan kecepatan superfisial ( $U_G$ ) pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dengan pencahayaan kontinyu dan susunan tunggal.
2. Bagaimana produksi biomassa *Chlorella vulgaris* dengan pencahayaan alterasi pada salah satu kecepatan superfisial udara yang bukan optimum dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu pada kecepatan superfisial optimum pada fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dengan susunan tunggal.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menentukan besarnya peningkatan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* dengan pengaturan kecepatan superfisial ( $U_G$ ) dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dengan susunan tunggal.
2. Menentukan pengaruh pencahayaan alterasi pada salah satu kecepatan superfisial udara yang bukan optimum dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu pada kecepatan superfisial optimum dalam peningkatan produksi biomassa *Chlorella sp* dalam fotobioreaktor kolom gelembung skala menengah dengan susunan tunggal.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini yaitu :

1. Penelitian dilakukan pada Laboratorium Bioproses dan Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia.
2. *Chlorella* yang digunakan diperoleh dari koleksi kultur Sub Balai Penelitian Perikanan Air Tawar Depok, Dinas Kelautan dan Perikanan. *Chlorella* ini dikultivasi dalam medium Benneck dengan dialiri gas CO<sub>2</sub> 5% dan tekanan udara didalam fotobioreaktor 1 atm.
3. Sistem reaktor yang digunakan adalah fotobioreaktor kolom gelembung tunggal dengan volume 18L.
4. Metode pencahayaan yang digunakan yaitu kontinyu dan alterasi dengan menggunakan lampu Phillip Halogen 23W/ 220V/50 Hz..
5. Produksi biomassa hanya sebatas peningkatan jumlah sel kering yang diperoleh.
6. Perkembangan populasi dihitung berdasarkan kerapatan sel (N).

### 1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang digunakan dalam penulisan skripsi ini yaitu :

Bab I Pendahuluan

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

Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini menjelaskan teori umum tentang *Chlorella sp.*, fotosintesis, faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan produksi biomassa *Chlorella sp.* pada medium terbatas, dan fotobioreaktor.

Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini berisi pembahasan mengenai alur dan prosedur penelitian.

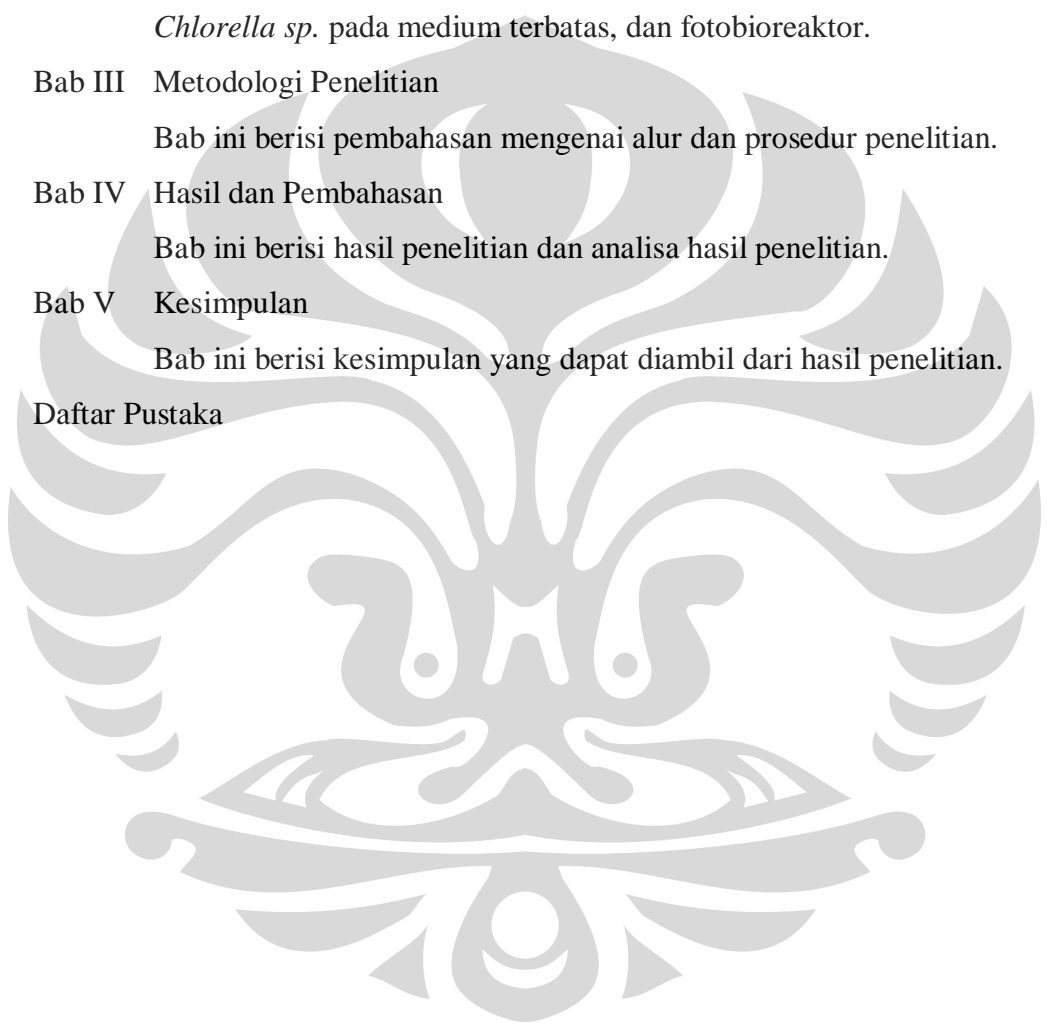
Bab IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisi hasil penelitian dan analisa hasil penelitian.

Bab V Kesimpulan

Bab ini berisi kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian.

Daftar Pustaka



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas mengenai tinjauan pustaka yang menjadi referensi penelitian. Sub bab yang akan dibahas yaitu mengenai *Chlorella sp.*, fotosintesis dan faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan produksi biomassa *Chlorella sp.* pada medium terbatas, fotobioreaktor dan aspek-aspek hidrodinamika pada fotobioreaktor kolom gelembung.

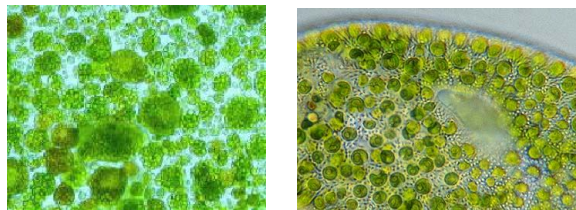
#### 2.1 *Chlorella vulgaris*

*Chlorella* merupakan jasad hidup bersel tunggal yang telah ada sejak kira-kira 2,5 milyar tahun yang lalu dan telah memiliki inti yang jelas. Ganggang ini memiliki tubuh seperti bola dan di dalam tubuhnya terdapat kloroplas berbentuk mangkuk. Perkembangbiakannya terjadi secara vegetatif dengan membelah diri dan pembentukan spora. Setiap selnya mampu membelah diri dan menghasilkan empat sel baru yang tidak mempunyai flagel (Unus Suriwiria : *Chlorella*, 2005).

*Chlorella* memiliki taksonomi sebagai berikut :

|          |                          |
|----------|--------------------------|
| Kerajaan | : <i>Plantae</i>         |
| Divisi   | : <i>Chlorophyta</i>     |
| Kelas    | : <i>Chlorophyceae</i>   |
| Ordo     | : <i>Chlorococcales</i>  |
| Famili   | : <i>Chlorocystaceae</i> |
| Genus    | : <i>Chlorella</i>       |

Lingkungan tempat hidup *Chlorella sp.* yaitu pada tempat lembab, air tawar, dan laut. Secara umum, *Chlorella sp.* hidup secara berkoloni dalam jumlah besar seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini :

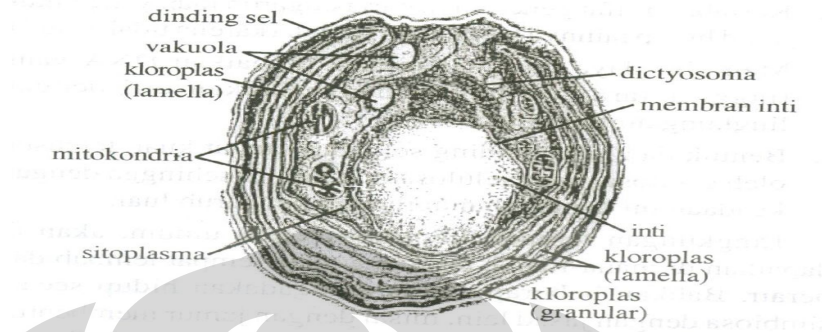


**Gambar 2.1 Koloni *Chlorella vulgaris***

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

### 2.1.1 Morfologi *Chlorella*

*Chlorella* memiliki bentuk tubuh bulat, bulat lonjong dengan garis tengah sel antara 2-8 mikron.



Gambar 2.2 Struktur Sel *Chlorella*

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

Dilihat dari gambar struktur sel *Chlorella* diatas, secara umum sel *Chlorella* terdiri dari :

#### 1. Inti sel (Nukleus)

Nukleus memiliki ukuran yang relatif besar dan dikelilingi oleh sitoplasma. Inti sel ini dilindungi oleh sebuah membran. Umumnya dalam satu sel hanya terdapat satu nucleus, namun ada beberapa jenis sel yang memiliki dua atau lebih nukleus. Inti sel merupakan bagian yang memiliki peran sangat penting karena bertugas mengatur seluruh aktivitas sel seperti berfotosintesis dan berkembang biak. Oleh sebab itu, tanpa inti sel, sel tidak mampu memperbaiki dirinya yang rusak ataupun berkembang biak.

Di dalam inti sel terdapat organel-organel lain seperti membran nukleus yang berfungsi melindungi nukleoplasma yaitu cairan yang mengisi inti sel, nukleous atau anak inti sel yang terbentuk dari kumpulan RNA (*Ribo Nucleic Acid*) dan benang-benang kromatin yang merupakan jaringan-jaringan halus dan mengandung gen yang yang terbentuk dari AND, ARN dan protein.

#### 2. Kloroplast

Kloroplast memiliki bentuk seperti cangkir atau lonceng dan terdiri atas lamella fotosintetik serta diselubungi oleh suatu membran ganda. Bagian ini memegang peranan penting dalam proses fiksasi CO<sub>2</sub> karena mengandung

biomassa yang dapat menyerap energi cahaya untuk digunakan dalam fotosintesis.

### 3. Mitokondria

Mitokondria memiliki struktur-struktur kecil yang tersusun dari protein dan lipid. Mitokondria berperan penting dalam pernafasan, pemecah protein, lemak dan glikogen kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana yang selanjutnya digunakan sebagai sumber energi.

Dinding mitokondria berlapis dua dimana lapisan dalamnya memiliki banyak lekukan yang berguna untuk memperluas bidang permukaan penyerapan oksigen dalam proses respirasi sel dan pada lapisan dalamnya juga terdapat enzim pernafasan dan enzim-enzim lain yang penting untuk reaksi Daur Krebs.

### 4. Badan Golgi

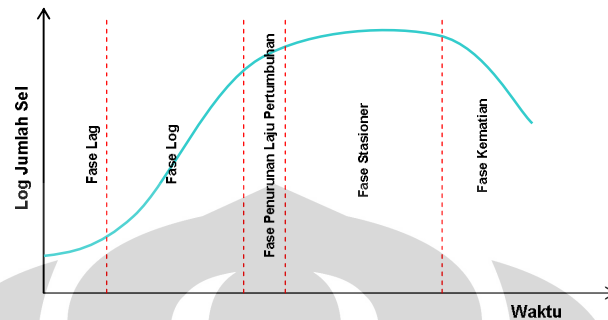
Badan golgi memiliki bentuk kantung pipih dan berfungsi untuk mengumpulkan sekresi protein dan mendistribusikannya di dalam sel tersebut.

#### 2.1.2 Fase Pertumbuhan *Chlorella vulgaris*

*Chlorella sp.* mempunyai waktu generasi yang sangat cepat dan dalam waktu yang relatif cepat. Pada umumnya, perbanyakan sel terjadi dalam waktu 4-14 jam tergantung pada lingkungan pendukungnya (Surawiria, 1987).

Pertumbuhan sel dari *Chlorella vulgaris* terdiri dari lima fase yaitu fase tunda (*lag phase*), fase eksponensial (*log phase*), fase penurunan laju pertumbuhan, fase stasioner, dan fase kematian (*death phase*).

Fase pertumbuhan tersebut dapat ditunjukkan dengan kurva jumlah sel terhadap waktu seperti pada gambar dibawah ini :



**Gambar 2.3. Kurva Pertumbuhan *Chlorella sp.***

(Sumber : Wirosaputro, 2002)

1. Fase tunda (*lag phase*)

*Lag phase* adalah suatu tahap setelah pemberian inokulum ke dalam media kultur dimana terjadi penundaan pertumbuhan yang dikarenakan *Chlorella vulgaris* memerlukan penyesuaian dengan lingkungan yang baru sebelum memulai pembelahan. Penyesuaian disini merupakan suatu masa ketika sel-sel kekurangan metabolit dan enzim akibat dari keadaan tidak menguntungkan dalam pembiakan terdahulu.

2. Fase Pertumbuhan Logaritmik (*log phase*)

Pada fase ini, sel-sel membelah dengan cepat dan terjadi pertambahan jumlah sel dengan kecepatan yang konstan. Selama fase ini, sel-sel berada dalam keadaan yang stabil. Bahan sel baru terbentuk dengan konstan tetapi bahan-bahan baru itu bersifat katalitik dan massa bertambah secara eksponensial. Hal ini bergantung hingga satu dari dua hal terjadi, yaitu kalau tidak satu atau lebih zat makanan dalam pembenihan habis maka tentu hasil metabolisme beracun akan tertimbun dan menghambat pertumbuhan.

3. Fase Penurunan Laju Pertumbuhan

Pada fase ini, tetap terjadi pertambahan jumlah sel namun laju pertumbuhannya menurun. Hal ini dikarenakan terjadinya kompetisi yang sangat tinggi di dalam media hidup karena zat makanan yang tersedia tidak

sebanding dengan jumlah populasi akibat dari penambahan yang sangat cepat pada fase eksponensial sehingga hanya sebagian dari populasi yang mendapatkan makanan yang cukup dan dapat tumbuh serta membelah.

#### 4. Fase Stasioner

Pada fase ini, jumlah sel cenderung konstan. Hal ini disebabkan oleh habisnya zat makanan atau menumpuknya hasil metabolisme yang beracun dalam medium sehingga mengakibatkan pertumbuhan berhenti. Akan tetapi, dalam kebanyakan kasus, pergantian sel terjadi dalam fase stasioner, yaitu adanya kehilangan sel yang lambat karena kematian yang diimbangi oleh pembentukan sel-sel yang baru melalui pertumbuhan dan pembelahan. Bila hal ini terjadi, jumlah seluruh sel akan bertambah secara lambat meskipun jumlah sel yang hidup akan konstan.

#### 5. Fase kematian

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

### 2.1.3 Manfaat *Chlorella*

*Chlorella* memiliki beberapa manfaat yaitu :

#### 1. Dinding sel

Dinding sel *Chlorella* tersusun oleh selulosa, hemiselulosa dan lignin yang merupakan sumber serat yang sangat dibutuhkan oleh manusia dan juga mengandung polisakarida kompleks yang berguna untuk mencegah kanker.

#### 2. Klorofil

*Chlorella* memiliki kandungan klorofil dalam jumlah yang sangat besar ( $\pm$  2,8 %) dan berguna untuk pembersih alami di dalam tubuh manusia, pengontrol kandungan kalsium, membantu pencernaan protein, penyerapan lemak, penyerapan unsur-unsur Fe (besi) serta membersihkan dan menjadikan darah agar tetap bersih, sehat dan berfungsi secara baik.

#### 3. CGF (*Chlorella Grow factor*)

CGF merupakan substansi yang dapat larut dalam air. Kandungan CGF dalam *Chlorella* hanya sekitar 5% saja namun memiliki manfaat yang luas.



Hal ini dikarenakan CGF mengandung senyawa yang bermanfaat yaitu asam amino, peptida, protein, vitamin, asam nukleat, dan glukoprotein. Manfaat dari CGF ini yaitu dapat meningkatkan kekebalan tubuh, mencegah kanker dan dapat menghambat tumor (sarcoma 180) sampai 52,9%. Manfaat lainnya yaitu pada hewan dimana CGF yang terdapat pada *Chlorella* dapat meningkatkan hasil susu atau dagingnya dan pada tumbuhan yaitu dapat menambah jumlah pucuk atau tunas, jumlah bunga dan jumlah buah.

#### 4. Klorellin

Klorellin semacam antibiotika yang dapat menghambat bahkan mematikan bakteri gram positif ataupun gram negatif seperti *Stephylococcus aureus*, *Escherichia Coli* dan *Shigella Shigae*. Walaupun jika dibiakkan secara tersendiri kandungan klorellin hanya 0,01-0,02 gr/liter biakan, manfaatnya sudah banyak digunakan. Manfaat klorellin yaitu pada saat produksi biomassa secara terbuka, kehadiran bakteri kontaminan dan yang bersifat patogen atau penghasil toksin secara alami dapat dihindari.

#### 5. Pro-vitamin A (beta-karoten), B kompleks, C, D

Vitamin yang dihasilkan oleh *Chlorella* bersifat alami sehingga lebih sehat, lebih mudah diserap dan lebih efektif. Beta-karoten pada *Chlorella* berguna untuk menjaga kekebalan tubuh dan untuk kesehatan mata. Sedangkan vitamin B berguna untuk mencegah rasa lapar.

#### 6. Kandungan Protein

*Chlorella* memiliki kandungan protein yang cukup tinggi. Dalam protein tersebut, terdapat beragam asam amino esensial yang sangat dibutuhkan oleh manusia. Protein ini berguna untuk pertumbuhan dan membantu menjaga kandungan gula dalam darah.

Secara umum kandungan biomassa dari *Chlorella vulgaris* dapat dilihat pada tabel berikut :

**Tabel 2.1 Komposisi Biomassa *Chlorella vulgaris*.**

| <b>Komponen</b> |         |           |
|-----------------|---------|-----------|
| Protein         | g/100g  | 33-45     |
| Lemak           | g/100g  | 6,9-16,1  |
| Air             | g/100g  | 4-5       |
| Klorofil        | g/100g  | 0,7-2,7   |
| Sumber Mineral  | g/100g  | 6,5-10,5  |
| Lipid           | g/100g  | 6,5-12,5  |
| Rohfaser        | g/100g  | 6,6-7,5   |
| Ballaststoffe   | g/100g  | 27,1-32,5 |
| Karbohidrat     | g/100g  | 0,9-2     |
| <b>Mineral</b>  |         |           |
| Kalsium         | mg/100g | 321-604   |
| Magnesium       | mg/100g | 273-325   |
| Seng            | mg/100g | 4-6       |
| Besi            | mg/100g | 40-70     |
| Kalium          | mg/100g | 1000-2900 |
| Iodium          | mg/100g | < 0,0005  |
| Selenium        | µg/100g | 2-10      |
| <b>Vitamin:</b> |         |           |
| Betakaroten     | mg/100g | 3,3-11,2  |
| Vitamin B1      | mg/100g | 0,5-1,0   |
| Vitamin B2      | mg/100g | 3,2-3,8   |
| Vitamin B6      | mg/100g | 0,3-3,7   |
| Vitamin B12     | mg/100g | 0,2-1,0   |
| Vitamin E       | mg/100g | 3,6-10,0  |
| Vitamin C       | mg/100g | 13-20     |
| Vitamin K1      | mg/100g | 0,2-0,8   |

(Sumber : [www.gtamart.com](http://www.gtamart.com))

## 2.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan *Chlorella* pada Medium Terbatas

Faktor-faktor yang sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan *Chlorella* pada medium terbatas yaitu (Wirosaputro, 2002) :

### 1. Jenis Medium

Ada banyak jenis medium yang dapat digunakan sebagai media hidup *Chlorella*, seperti medium N-8, Benneck, BG-11, M4N, ASN III, MN medium, Fitzgerald medium, dan lainnya. Semua jenis medium ini memiliki kandungan unsur hara yang dibutuhkan untuk pertumbuhan *Chlorella*, seperti N, P, K, S, Ca dan mineral lainnya. Setiap unsur hara memiliki fungsi khusus, seperti N, P dan S berfungsi untuk pembentukan protein. Sedangkan Na dan Fe untuk pembentukan klorofil. Setiap jenis medium memiliki kandungan unsur hara yang berbeda sehingga memberikan pengaruh yang berbeda terhadap pertumbuhan *Chlorella*.

### 2. Pencahayaan

Cahaya merupakan faktor utama yang mempunyai peranan penting untuk pertumbuhan mikroalga sebagai sumber energi untuk pertumbuhan mikroalga dan fotosintesis.

Faktor pencahayaan terbagi menjadi tiga bagian yaitu :

#### a. Pencahayaan Kontinyu

Pencahayaan kontinyu dalam penelitian ini yaitu *Chlorella vulgaris* diiluminasi dengan cahaya tampak (370-900 nm) secara terus-menerus hingga mencapai fase stasionernya. Menurut penelitian yang telah dilakukan, perlakuan ini memberikan hasil laju pertumbuhan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pencahayaan gelap-terang (fotoperiodesitas).

#### b. Pencahayaan Terang Gelap

Dalam pencahayaan terang gelap, *Chlorella vulgaris* diiluminasi dengan cahaya tampak (370-900 nm) dengan mengatur kondisi terang selama 8 jam dan kondisi gelap selama 16 jam, seperti kondisi alami (periode cahaya matahari). Dari penelitian yang telah dilakukan, perlakuan ini memberikan efisiensi cahaya yang paling besar dibandingkan dengan pencahayaan

kontinyu, namun laju pertumbuhannya masih sedikit di bawah pencahayaan kontinyu.

#### c. Pencahayaan Alterasi

Dalam pencahayaan alterasi, *Chlorella* diberikan perlakuan perubahan cahaya kontinyu dengan memberikan intensitas cahaya yang semakin tinggi seiring dengan penambahan jumlah sel. Dari penelitian-penelitian sebelumnya, diketahui bahwa semakin banyak jumlah sel/biomassa dalam penelitian ini maka kultur akan semakin pekat sehingga cahaya yang diberikan tidak lagi dapat diterima secara merata oleh semua sel. Oleh karena itu, perlu dilakukan peningkatan intensitas cahaya agar cahaya dapat masuk dan diterima secara merata oleh semua sel. Usaha ini telah membuktikan dapat meningkatkan laju pertumbuhan menjadi lebih optimal dan menghasilkan biomassa dengan jumlah yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu.

### 3. Kondisi Operasi

#### a. Temperatur

Secara langsung, temperatur akan mempengaruhi proses metabolisme sel dan secara tidak langsung akan mempengaruhi kondisi lingkungan suatu media. *Chlorella sp.* dapat tahan hidup pada kisaran temperatur 5-35 °C. Namun, temperatur optimum untuk pertumbuhannya yaitu antara 23-30 °C. Beberapa spesies dari *Chlorella sp.* mempunyai toleransi terhadap temperatur yaitu tumbuh paling baik dan aktif pada temperatur 35-40 °C dan dapat menahan temperatur sampai 42 °C.

#### b. Konsentrasi CO<sub>2</sub>

Dalam proses fotosintesis, CO<sub>2</sub> merupakan unsur paling penting. Tersedianya CO<sub>2</sub> yang cukup dalam media akan memperlancar proses fotosintesis yang akan berimbas pada pertumbuhan *Chlorella vulgaris* itu sendiri.

#### c. Laju Alir Udara dan CO<sub>2</sub>

Laju alir udara perlu dipertimbangkan jika jenis reaktor yang digunakan adalah reaktor kolom gelembung. Sedangkan laju CO<sub>2</sub> diatur sesuai dengan model reaktor yang digunakan, luas permukaan kontak dan volume kultur. Hal

ini bertujuan untuk pemerataan suplai CO<sub>2</sub> yang dibutuhkan oleh *Chlorella vulgaris* pada medium terbatas.

d. Derajat Keasaman (pH)

pH memiliki peran dalam mengatur kerja dari enzim. Perubahan pH sangat berpengaruh terhadap kinerja enzim dalam metabolisme sel sehingga akan mempengaruhi laju pertumbuhan sel. pH yang optimum bagi perkembangan *Chlorella vulgaris* adalah 7,0 – 8,0.

e. *Pre-Culture*

*Pre-culture* merupakan tahapan yang sangat penting dalam pembiakan *Chlorella vulgaris*. Pada tahap ini mikroalga dikenalkan pada medium baru agar lebih terbiasa hingga dapat melewati fase lag-nya. Setelah itu, *Chlorella* siap untuk dibiakkan pada fase log. Tahap ini juga bertujuan untuk mengetahui apakah medium yang digunakan sesuai untuk pengembangbiakan *Chlorella*.

f. Kontaminasi

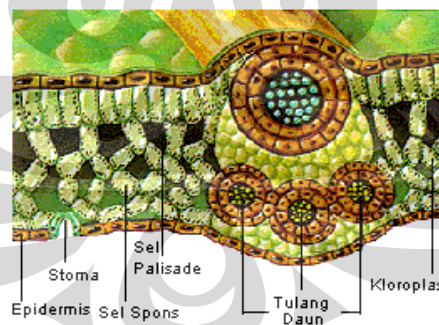
Seluruh kegiatan dalam proses kultivasi *Chlorella sp.* harus dilakukan secara steril. Adanya kontaminan dalam kultur dapat menghambat pertumbuhan *Chlorella*. Kontaminan dapat berebut makanan dengan *Chlorella* dan yang lebih berbahaya jika kontaminan yang ada menjadi predator bagi *Chlorella* itu sendiri. Oleh karena itu, seluruh kegiatan kultivasi *Chlorella vulgaris* harus dilakukan secara steril untuk mencegah adanya kontaminan.

### 2.3 Fotosintesis

Fotosintesis adalah suatu proses biokimia yang dilakukan tumbuhan, alga, dan beberapa jenis bakteri untuk memproduksi nutrisi dengan memanfaatkan energi cahaya. Hampir semua makhluk hidup bergantung dari energi yang dihasilkan dalam fotosintesis. Akibatnya fotosintesis menjadi sangat penting bagi kehidupan di bumi. Fotosintesis juga berjasa menghasilkan sebagian besar oksigen yang terdapat di atmosfer bumi (<http://id.wikipedia.org.../f/o/t/Fotosintesis.html>, April 2008). Fotosintesis merupakan salah satu cara asimilasi karbon karena dalam fotosintesis, karbon bebas dari (CO<sub>2</sub>) diikat (difiksasi) menjadi gula sebagai molekul penyimpan energi.

Energi cahaya yang digunakan dapat dari cahaya alami yaitu matahari yang memiliki spektrum cahaya infra merah (tidak kelihatan), merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, ungu dan ultra ungu (tidak kelihatan). Dalam proses fotosintesis, cahaya yang digunakan adalah spektrum cahaya tampak, dari ungu sampai merah dan dihasilkan karbohidrat serta hasil sampingan yaitu oksigen.

Fotosintesis hanya berlangsung pada sel yang memiliki pigmen fotosintetik. Di dalam daun terdapat jaringan pagar dan jaringan bunga karang, dimana pada keduanya mengandung kloroplast yang mengandung klorofil/pigmen hijau yang merupakan salah satu pigmen fotosintetik yang mampu menyerap energi cahaya matahari. Dilihat dari strukturnya, kloroplast terdiri atas membran ganda yang melingkupi ruangan yang berisi cairan yang disebut stroma. Membran tersebut membentuk suatu sistem membran tilakoid yang berwujud sebagai suatu bangunan yang disebut kantung tilakoid. Kantung-kantung tilakoid tersebut dapat berlapis-lapis dan membentak apa yang disebut grana. Klorofil terdapat pada membran tilakoid dan pengubahan energi cahaya menjadi energi kimia berlangsung dalam tilakoid, sedang pembentukan glukosa sebagai produk akhir fotosintesis berlangsung di stroma (<http://bebas.vlsm.org/biologi/biologi3.htm>, April 2008).



**Gambar 2.4 Penampang daun**

(Sumber : <http://www.e-smartschool.com>)

### 2.3.1 Reaksi Fotosintesis

Secara umum, reaksi fotosintesis terbagi 2 yaitu :

#### 1. Reaksi Terang

Reaksi terang adalah proses untuk menghasilkan ATP dan reduksi NADPH<sub>2</sub>. Reaksi ini memerlukan molekul air. Proses diawali dengan penangkapan foton oleh pigmen sebagai antena.

Pigmen klorofil menyerap lebih banyak cahaya pada warna biru (400-450 nanometer) dan merah (650-700 nanometer) dibandingkan hijau (500-600 nanometer). Fotosintesis akan menghasilkan lebih banyak energi pada gelombang cahaya dengan panjang tertentu dan panjang gelombang yang pendek menyimpan lebih banyak energi.

Di dalam daun, cahaya akan diserap oleh molekul klorofil untuk dikumpulkan pada pusat-pusat reaksi. Tumbuhan memiliki dua jenis pigmen yang berfungsi aktif sebagai pusat reaksi atau fotosistem yaitu fotosistem II dan fotosistem I. Fotosistem II terdiri dari molekul klorofil yang menyerap cahaya dengan panjang gelombang 680 nanometer, sedangkan fotosistem I 700 nanometer. Kedua fotosistem ini akan bekerja secara simultan dalam fotosintesis.

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

Pada saat yang sama dengan ionisasi fotosistem II, cahaya juga mengionisasi fotosistem I, melepaskan elektron yang ditransfer sepanjang rantai transpor elektron yang akhirnya mereduksi NADP menjadi NADPH (<http://id.wikipedia.org/wiki/fotosintesis>, April 2008).

## 2. Reaksi Gelap

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 (dan kemudian menjadi gula seperti glukosa). Reaksi ini disebut reaksi gelap karena tidak bergantung pada ada tidaknya cahaya sehingga dapat terjadi meskipun dalam keadaan gelap (tanpa cahaya) (<http://id.answer.yahoo.com>, 2008).

H<sub>2</sub> yang terlepas akan diikat oleh NADP dan terbentuklah NADPH<sub>2</sub>, sedangkan O<sub>2</sub> tetap dalam keadaan bebas. Menurut Blackman (1905) akan terjadi penyusutan CO<sub>2</sub> oleh H<sub>2</sub> yang dibawa oleh NADP tanpa menggunakan cahaya. Peristiwa ini disebut reaksi gelap dimana NADPH<sub>2</sub> akan bereaksi dengan CO<sub>2</sub> dalam bentuk H<sup>+</sup> menjadi CH<sub>2</sub>O.



Ringkasnya :

Reaksi terang :



Reaksi gelap :



Atau



Atau



Reaksi umum



### 2.3.2 Faktor Penentu Laju Fotosintesis

Berikut adalah beberapa faktor utama yang menentukan laju fotosintesis :

#### 1. Intensitas cahaya

Laju fotosintesis maksimum ketika banyak cahaya.



2. Konsentrasi karbon dioksida

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

3. Suhu

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

4. Kadar air

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

5. Kadar fotosintat (hasil fotosintesis)

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

6. Tahap pertumbuhan

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

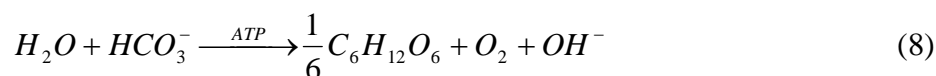
### 2.3.3 Fotosintesis Pada *Chlorella sp.*

Pada *Chlorella sp.*, fotosintesis dilakukan di dalam air/media hidupnya. CO<sub>2</sub> dibutuhkan sebagai *carbon source* dan didapatkan dalam bentuk senyawa bikarbonat yang terbentuk dari reaksi air dengan CO<sub>2</sub> terlarut dalam media hidupnya sebagai berikut :



Senyawa bikarbonat ini kemudian diserap oleh sel *Chlorella*. Proses metabolisme yang terjadi di dalam sel selanjutnya adalah reaksi antara bikarbonat tersebut dengan air yang terdapat dalam sel (siklus Calvin) membentuk senyawa organik seperti glukosa dan ion OH<sup>-</sup> menggunakan energi ATP dan NADPH dari

konversi cahaya pada reaksi terang, sebagaimana tergambar pada persamaan reaksi berikut (Anondho Wijanarko dan Ohtaguchi, 2004) :



Sehingga diketahui bahwa hasil fotosintesis dari *Chlorella sp.* adalah ion  $OH^-$ , oksigen molekular, dan senyawa organik (karbon) yang akan digunakan sebagai cadangan makanan apabila tidak mendapatkan cahaya dan  $CO_2$  yang cukup untuk pertumbuhan dan pembelahan selnya.

## 2.4 Fotobioreaktor

Fotobioreaktor dibutuhkan sebagai tempat hidup dari mikroorganisme (Pulz, 2001). Fotobioreaktor terbagi dalam dua sistem, yaitu sistem terbuka (*open system*) dan sistem tertutup (*closed system*). Sistem terbuka bisa berupa air alami (danau, lagoon (danau di pinggir laut), kolam) dan danau buatan.



Gambar 2.5. Fotobioreaktor Terbuka untuk Pemiakan *Chlorella vulgaris*.

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

Untuk fotobioreaktor sistem tertutup terdiri dari fotobioreaktor tubular dengan *tube* dalam berbagai bentuk, ukuran, dan panjang yang disesuaikan dengan material yang digunakan (Pulz, 2001).

Pada masa yang akan datang, sistem kolam terbuka digunakan untuk memproduksi mikroorganisme dalam skala besar. Namun, mempunyai potensi inovasi yang lebih rendah dibanding sistem tertutup. Untuk produk yang bermutu tinggi, fotobioreaktor sistem tertutup lebih dipilih karena variabel-variabel yang

mempengaruhi dalam perkembangan mikroorganisme dapat dikontrol seperti intensitas cahaya dan temperatur, serta lebih menghemat penggunaan ruang.

#### 2.4.1 Karakteristik Fotobioreaktor

Berikut akan dijelaskan beberapa karakteristik dari fotobioreaktor :

##### 1. Energi Cahaya

Cahaya sebagai sumber energi untuk kehidupan fotoautotropik merupakan faktor pembatas yang mendasar dalam *photobiotechnology*. Pada pencahayaan yang intens, laju fotosintesis akan berbanding lurus proporsional dengan intensitas cahaya, sampai intensitas iluminasi yang tinggi dapat merusak sistem reseptor fotosintetik dalam beberapa menit, yang dinamakan *photoinhibition*.

##### 2. Keseimbangan CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>

Untuk laju fotosintesis yang tinggi, keseimbangan CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> harus disesuaikan. Oksigen dapat menjadi permasalahan dalam kultur mikroalga dengan densitas sel tinggi karena akan menghambat laju fotosintesis. Kandungan CO<sub>2</sub> udara 0,03% menjadi suboptimal bagi pertumbuhan, dan pada umumnya tumbuh-tumbuhan dapat mentoleransi konsentrasi CO<sub>2</sub> hanya sampai 0,1%. Tetapi untuk kebanyakan strain dari mikroalga, telah diteliti bahwa mikroorganisme ini dapat mentoleransi kandungan CO<sub>2</sub> udara sampai 12% pada temperatur 35°C.

##### 3. Temperatur

Temperatur dapat mempengaruhi respirasi dan fotorespirasi secara lebih kuat dibanding dengan fotosintesis. Ketika CO<sub>2</sub> atau cahaya menjadi terbatas untuk proses fotosintesis, pengaruh temperatur menjadi tidak signifikan. Dengan penambahan temperatur, respirasi akan meningkat secara signifikan. Jadi, efisiensi fotosintesis akan menurun dengan kenaikan temperatur tinggi. Efek ini dapat memperburuk kultur suspensi pada kondisi penurunan CO<sub>2</sub> dan kelarutan O<sub>2</sub> pada kenaikan temperatur (Pulz, 2001).

##### 4. Nutrien dan Nilai pH

Suplai nutrien yang cukup untuk mikroalga adalah pre-kondisi untuk fotosintesis yang optimal. Defisiensi nutrien akan menyebabkan gangguan

pada metabolisme dan ketidaksesuaian produksi pada *intermediate* proses fotosintesis. Deviasi dari nilai pH optimum akan mempengaruhi psikologis reaksi dan produktivitas sehingga kondisi yang terkontrol dengan mudah harus dijaga pada rasio optimum dalam fotobioreaktor (Pulz, 2001).

#### 2.4.2 Jenis Fotobioreaktor

Pemilihan desain dari sebuah fotobioreaktor akan sangat mudah mempengaruhi produksi dan efisiensi keseluruhan untuk memproduksi mikroorganisme yang berbasiskan produk. Dikarenakan sistem terbuka biasanya memiliki produktivitas yang kecil, sehingga untuk skala industri banyak digunakan sistem tertutup seperti tubular fotobioreaktor (*biocoil*, *biofence*, *ultrathin sheet*) (Gunther, 2000).

Ada beberapa jenis fotobioreaktor yang sering digunakan dalam kultivasi mikroorganisme, yaitu :

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

Jenis fotobioreaktor tersebut dibedakan berdasarkan bentuknya, *flow regime*, efisiensi energi cahaya, dan luas permukaan kontakannya.

#### 2.5 Kolom Gelembung

Kolom gelembung adalah salah satu alat yang berfungsi sebagai alat kontak antara fasa gas dan fasa cair. Prinsip kerja alat ini cukup sederhana, yaitu fasa gas naik ke atas sebagai gelembung-gelembung gas melalui aliran searah atau berlawanan arah terhadap fasa cair yang kontinyu. Kolom gelembung juga dapat berfungsi sebagai reaktor kimia. Di industri-industri seperti industri kimia dan petrokimia, kolom gelembung telah meluas digunakan sebagai suatu alat tempat berlangsungnya proses perpindahan massa gas ke dalam fasa cair. Keuntungan kolom gelembung diantaranya adalah sederhana dalam desain, mudah dalam pengoperasian dan pemeliharaan alat. Pencampuran yang terjadi antara gas-cairan

diperoleh sendiri dari gerakan-gerakan gelembung gas sehingga dengan demikian tidak diperlukan lagi alat pengaduk.

### 2.5.1 Perpindahan Massa Fasa Gas ke dalam Fasa Cair di Dalam Kolom Gelembung

Secara skematik proses perpindahan massa yang berlangsung di dalam kolom gelembung (aliran fluida searah dari bawah ke atas) dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.6 Proses Perpindahan Massa yang terjadi Dalam Kolom Gelembung

Pada gambar tersebut, yang dipandang sebagai sistem adalah fluida cairnya sedangkan fluida gasnya masuk dari luar ke dalam zat cair. Gambar tersebut juga jelas menunjukkan adanya peristiwa perpindahan massa dari fasa gas ke fasa cair. Kontak antara fasa gas dan fasa cair yang berlangsung cukup lama dan adanya gaya pendorong menyebabkan terjadinya perpindahan massa tersebut.

### 2.5.2 Koefisien Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa ( $K_{La}$ ) adalah suatu besaran yang menyatakan banyaknya massa gas yang berpindah/terlarut ke dalam fasa cair per satuan waktu.

Perpindahan massa di dalam kolom gelembung dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti berikut :

a. Kecepatan Superfisial gas

Kenaikan kecepatan superfisial gas akan meningkatkan harga  $K_{La}$ . Biasanya peningkatan harga  $K_{La}$  adalah kira-kira linier terhadap kenaikan kecepatan superfisial gas. Dengan meningkatnya kecepatan superfisial gas, maka energi kinetik fasa gas makin bertambah sehingga memperbesar massa gas yang dapat terlarut dalam fasa cair.

b. Kecepatan superfisial fasa cair

Sebagian pakar menyimpulkan dari hasil penelitian mereka bahwa kecepatan superfisial cairan tidak mempengaruhi harga  $K_{La}$ , sebagian lagi menyimpulkan bahwa sampai pada kecepatan superfisial tertentu akan menurunkan harga  $K_{La}$  karena waktu tinggal fasa cair dalam kolom berkurang, dan mulai kecepatan tertentu akan kembali menaikkan harga  $K_{La}$  akibat efek turbulensi dari aliran fasa cair.

c. Ukuran gelembung gas

Hal ini ada kaitannya dengan distributor gas (*gas spargers*) yang digunakan, sehingga menghasilkan *gas hold up* yang berbeda dengan distribusi ukuran gelembung gas yang berbeda pula. Untuk ukuran gelembung yang kecil, akan cenderung meningkatkan harga  $K_{La}$  karena luas antarmuka yang makin meningkat. Ukuran gelembung juga dipengaruhi oleh sifat-sifat fisik fluida.

d. Konsentrasi elektrolit

Bila konsentrasi elektrolit dalam fasa cair bertambah maka harga  $K_{La}$  akan menurun. Hal ini dapat diterangkan dengan mengasumsikan adanya *electric double layer* pada permukaan gas-cair sehingga meningkatkan tegangan antar permukaan yang membuat perpindahan massa antar permukaan lebih sulit.

e. Temperatur Sistem

Kelarutan gas dalam fasa cair umumnya akan berkurang dengan naiknya temperatur sistem. Ini berarti kenaikan temperatur pada sistem gas-cair umumnya akan menurunkan harga  $K_{La}$ .

### 2.5.3 Gas Hold up

*Gas hold up* adalah fraksi fasa gas yang mengisi ruang-ruang diantara larutan yang berbentuk gelembung. Kenaikan nilai *hold-up* fasa gas dipengaruhi oleh laju alir volumetrik cairan. Laju alir volumetrik cairan yang meningkat akan meningkatkan pula *gas hold up*. Nilai *gas hold up* dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\varepsilon = \frac{V_g}{V_G + V_l} \quad (2.1)$$

dimana  $V_G$  : volume gas di dalam reaktor ( $m^3$ )

$V_l$  : volume liquid di dalam reaktor ( $m^3$ )

### 2.6 Penelitian Yang Telah Dilakukan

Penelitian mengenai *Chlorella vulgaris* Buitenzorg telah banyak dilakukan di Teknik Kimia UI. Semua penelitian tersebut, bertujuan untuk meningkatkan produksi biomassa dan proses fiksasi yang dilakukan oleh *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dengan melakukan optimasi terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan *Chlorella vulgaris*. Adapun penelitian yang telah dilakukan di Teknik Kimia UI dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2.2 Jejak Rekam Riset *Chlorella vulgaris* Buitenzorg di Teknik Kimia UI

|                              | Metode Pencahayaan  |  |   |
|------------------------------|---|--|---|
|                              | Terang-Gelap  | Kontinyu   | Alterasi  |
| Skala Lab<br>(Volume 750 mL) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Valentino : reaktor tunggal, menghasilkan produksi biomassa lebih rendah dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu.</li> <li>- Muryanto : reaktor seri, menghasilkan produksi biomassa</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- M. Aji S : reaktor seri, menghasilkan produksi biomassa 1,6 kali lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor tunggal.</li> <li>- Yoffi T Puteri : reaktor tunggal, menggunakan <math>U_G</math></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sang Made Kresna Andika : reaktor tunggal, menghasilkan produksi biomassa 1,6 kali lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu.</li> </ul> |

|                                 |  |  |   |
|---------------------------------|--|--|---|
|                                 | 1,2 kali lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor tunggal. | optimum, menghasilkan produksi biomassa 1,58 kali lebih tinggi dibandingkan dengan $U_G$ bukan optimum.  | - Antonius Yudi S : reaktor seri, menghasilkan produksi biomassa 2,62 kali lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu.   |
| Skala Menengah<br>(Volume 18 L) |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Didit Yudi P : reaktor tunggal, menggunakan gas buang.</li> <li>- Rachma N : reaktor tunggal, menggunakan filter, menghasilkan produksi biomassa 1,03 kali lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa filter</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Indah Permata S : reaktor tunggal, menghasilkan produksi biomassa 1,63 kali lebih tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu.</li> <li>- Khozin &gt; reaktor tunggal, menggunakan gas buang.</li> <li>- Ahmed S &gt; reaktor tunggal, menggunakan filter, menghasilkan produksi biomassa 1,26 kali lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa filter dan 1,35 kali lebih</li> </ul> |



|  |  |  |   |
|--|--|--|---|
|  |  |  | tinggi dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu+filter. |
|--|--|--|---|

Penelitian mengenai mikroalga dengan berbagai kecepatan superfisial udara juga telah banyak dilakukan di dunia seperti terlihat pada tabel berikut :

**Tabel 2.3 Penelitian Mikroalga Skala Internasional**

| Fotobioreaktor                    | Volume (L) | Kecepatan Superfisial (m/s) | $K_{La}$ (/s)            | Mikroalga                        | Referensi                  |
|-----------------------------------|------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| <i>Concentric Tube airlift</i>    | 12         | 0,055                       | 0,02                     | <i>Phaeodactylum tricornutum</i> | Contreras et al (1998)     |
| <i>Airlift tubular horizontal</i> | 200        | 0,16                        | 0,014                    | <i>Porphyridium cruentum</i>     | Camacho Rubio et al (1999) |
| <i>Buble Column</i>               | 13         | $5,4-8,2 \times 10^{-4}$    | $1,7-4,7 \times 10^{-3}$ | <i>Porphyridium sp.</i>          | Merchuk et al (2000)       |
| <i>Inclined Tubular</i>           | 6          | 0,02                        | 0,003                    | <i>Chlorella sorokiniana</i>     | Ugwu et al (2002)          |
| <i>Flat Plate</i>                 | 3          | 0,009                       | 0,002                    | <i>Synechocystis aquatilis</i>   | Zhang et al (2002)         |

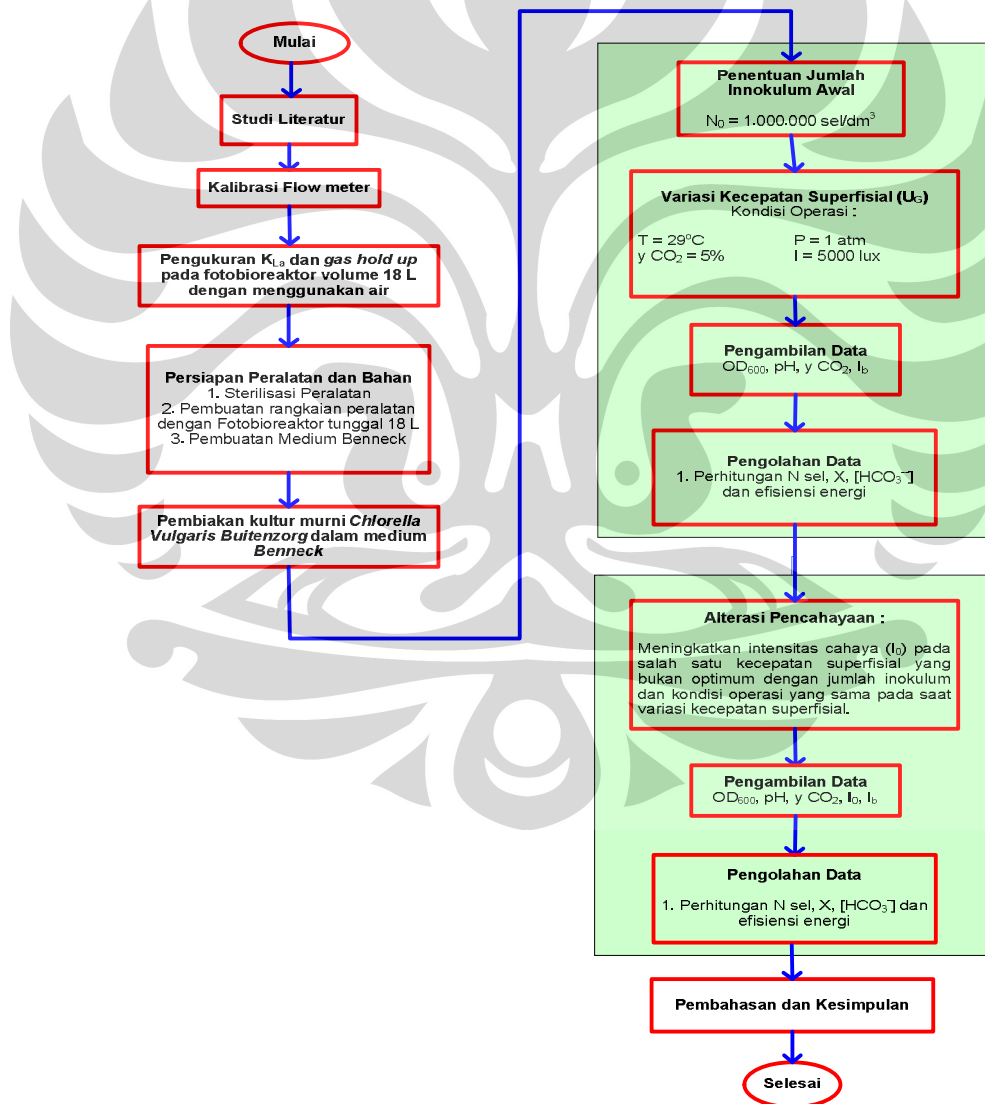
Dari tabel tersebut, terlihat bahwa nilai kecepatan superfisial udara ( $U_G$ ) optimum berbeda-beda untuk tiap fotobioreaktor, volume dan mikroalga.

## BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai diagram alir penelitian, alat dan bahan penelitian, variabel penelitian, prosedur serta metode pengolahan data untuk mendapatkan hasil penelitian.

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Skema proses penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada diagram alir berikut :



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dimulai dengan studi literatur dan dilanjutkan dengan mengukur koefisien transfer massa ( $K_{La}$ ) dan *gas hold up* pada volume 18 L dengan menggunakan air untuk menentukan rentang variasi kecepatan superfisial ( $U_G$ ) yang akan dilakukan. Kemudian merangkai fotobioreaktor dan membuat medium *Benneck*. Selanjutnya, dilakukan pembiakan kultur murni *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dalam medium *Benneck*. Hal ini bertujuan agar *Chlorella* yang akan digunakan dalam penelitian dapat beradaptasi dalam medium baru (melewati fase lag) dan juga untuk memperbanyak jumlah *Chlorella*. Kemudian dilakukan penentuan jumlah inokulum untuk mengetahui jumlah awal *Chlorella* yang digunakan dan data ini kemudian digunakan untuk mengetahui peningkatan biomassa yang dihasilkan dari penelitian. Setelah itu, dilakukan variasi kecepatan superfisial udara dan mengambil data yang diperlukan seperti *Optical Density* (OD) yang diukur dengan spektrofotometer dan kemudian data OD ini digunakan untuk menghitung jumlah sel (N) dan berat kering akhir sel (X), pH yang diukur dengan pH meter dan digunakan untuk menghitung  $[HCO_3^-]$ , dan  $I_0$  serta  $I_b$  untuk menghitung efisiensi energi. Kemudian dilakukan alterasi pencahayaan pada salah satu kecepatan superfisial yang bukan optimum sebagai perbandingan untuk melihat pengaruh dari kecepatan superfisial optimum walaupun dengan menggunakan metode pencahayaan kontinyu yang menghasilkan produksi biomassa tidak lebih baik dibandingkan alterasi. Selanjutnya dilakukan pembahasan hasil penelitian.

## 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

### 3.2.1 Alat Penelitian

Peralatan yang akan dirangkai menjadi satu instrumen di dalam lemari fotobioreaktor untuk melakukan *running* perkembangbiakan *Chlorella vulgaris* terdiri dari :

1. Fotobioreaktor dengan kapasitas 18 L dengan susunan tunggal dengan bahan kaca yang transparan.
2. Kompresor Udara *Portable*.
3. Tabung Gas  $CO_2$  yang dilengkapi dengan *regulator*.
4. *Flowmeter* Udara dan *Flowmeter*  $CO_2$ .

5. Lampu Phillip Hallogen 23W/ 220V/50
6. Selang silikon dan selang plastik.

Peralatan di bawah ini merupakan instrumen untuk pengambilan data penelitian, baik variabel bebas maupun variabel terikatnya, yaitu :

1. Kuvet kaca dengan volume 5 mL sebagai tempat sampel pada pengukuran dengan spektrofotometer UV-VIS.
2. Spektrofotometer UV-VIS (*Spectro UV-VIS Spectrophotometre, LaboMed Inc.*)
3. Luxmeter (*Set Lightmeter Lxtron LX-103*).
4. pH meter (*HANNA Model HI 8014*).
5. *Syringe 1001 RT Hamilton* 1 cm<sup>3</sup>.
6. Unit *Gas Chromatography (GC-TCD Shimadzu GC-8A)* dan Recorder.

Selain itu terdapat juga instrumen tambahan dengan beberapa fungsi tertentu, antara lain :

1. Peralatan *glassware* yang terdiri dari *erlenmeyer*, pipet ukur, pipet tetes, gelas ukur, botol sampel sel, dan *beaker glass* yang memiliki volume tertentu sesuai dengan kebutuhan.
2. *Autoclave* sebagai tempat sterilisasi peralatan.
3. *Sprayer* alkohol 70%.

### 3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. *Starter* mikroalga hijau *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang telah dihitung sel awal-nya (inokulum) menggunakan *spektrofotometer* pada 600 nm.
2. KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub>, dan FeCl<sub>3</sub> untuk membuat medium *Benneck*.
3. Gas CO<sub>2</sub> sebagai bahan untuk fotosintesis mikroalga.
4. *Aquadest* untuk membuat medium *Benneck* dan mencuci peralatan.
5. Alkohol 70% untuk sterilisasi peralatan.

### 3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang dapat ditentukan dalam penelitian ini adalah :

1. Variabel tetap, yaitu jumlah inokulum *Chlorella vulgaris* Buitenzorg (N<sub>0</sub>) dan konsentrasi CO<sub>2</sub> input.

2. Variabel bebas, yaitu kecepatan superfisial ( $U_G$ )  $CO_2$ .
3. Variabel tergantungan, yaitu jumlah sel/kepadatan sel, pH, dan intensitas cahaya yang ditransmisikan keluar reaktor ( $I_b$ ).

### 3.4 Prosedur Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap yaitu uji hidrodinamika, pembiakan kultur murni *Chlorella vulgaris* Buitenzorg, pembuatan medium *Beneck*, sterilisasi peralatan, pembuatan rangkaian alat, penentuan jumlah inokulum *Chlorella vulgaris* Buitenzorg, kultivasi pada berbagai kecepatan superfisial, dan pengambilan data.

#### 3.4.1 Kalibrasi Flow meter

Prosedur kalibrasi flow meter sebagai berikut :

1. Menghubungkan selang untuk gas masukan pada flow meter dengan kompresor dan selang untuk gas keluaran dengan *buble soap*.
2. Men-set flow meter pada laju alir yang diinginkan.
3. Menggelembungkan sabun hingga *buble* mengalir ke atas.
4. Mencatat waktu yang dibuthkan *buble* sampai pada skala *buble soap* yang diinginkan.
5. Menghitung laju alir flow meter yang telah dikalibrasi dengan rumus :

$$f = \frac{V_{bs} \times T_{(1\text{menit})}}{t_{\text{stopwatch}(s)}} \quad (3.1)$$

dimana :  $f$  = laju alir flow meter yang telah dikalibrasi

$V_{bs}$  = skala *buble soap* (mL/menit)

$t$  = waktu yang diperlukan *buble* mencapai skala *buble soap* yang diinginkan (s)

#### 3.4.2 Pengukuran $K_L a$ dan *Gas hold up*

Pengukuran koefisien transfer massa karbon dioksida ( $K_L a$ ) dan *gas hold up* dilakukan dengan menggunakan air. Hal ini bertujuan untuk menentukan rentang variasi kecepatan superfisial ( $U_G$ ) yang akan dilakukan untuk kultivasi *Chlorella*.

Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mengisi fotobioreaktor dengan air sebanyak 18 liter.
2. Menghubungkan fotobioreaktor dengan *air flow* dan *flow meter* dengan menggunakan selang silikon.
3. Mengatur flow meter pada berbagai variasi laju alir udara.
4. Mengukur ketinggian akhir air di dalam fotobioreaktor untuk mendapatkan nilai *gas hold up*.
5. Mengukur oksigen terlarut dalam air dengan menggunakan DO meter yang telah dicelupkan ke dalam fotobioreaktor untuk mendapatkan nilai  $K_La$  pada rentang interval 5 menit untuk setiap variasi laju alir udara.
6. Melakukan hal yang sama untuk beberapa variasi laju alir udara.

### 3.4.3 Sterilisasi Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian harus disterilisasi terlebih dahulu agar tidak terkontaminasi oleh mikroorganisme atau zat pengganggu yang dapat menghambat pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg.

Prosedur sterilisasi peralatan yang terbuat dari gelas tahan panas adalah sebagai berikut:

1. Mencuci peralatan dengan sabun dan dibilas dengan air sampai bersih.
2. Mengeringkan peralatan dengan tisu atau kompresor udara dan kemudian menutup peralatan yang berlubang atau berongga dengan aluminium foil agar tidak terkontaminasi setelah disterilisasi.
3. Memasukkan peralatan yang akan disterilisasi ke dalam *autoclave* dan disterilisasi pada suhu  $120^{\circ}\text{C}$  selama  $\pm 1,5$  jam untuk medium dan  $\pm 45$  menit untuk peralatan gelas.
4. Menyimpan peralatan yang sudah disterilisasi di dalam lemari penyimpanan yang dilengkapi dengan lampu UV.

Prosedur sterilisasi peralatan yang terbuat dari gelas tidak tahan panas adalah sebagai berikut :

1. Mencuci peralatan dengan sabun dan dibilas dengan air sampai bersih.

2. Mengeringkan peralatan dengan tisu atau kompresor udara dan kemudian menutup peralatan yang berlubang atau berongga dengan aluminium foil agar tidak terkontaminasi setelah disterilisasi.
3. Membilas peralatan dengan alkohol 70 % selama  $\pm 5$  menit dan kemudian dibilas dengan aquadest untuk memastikan tidak ada sisa alkohol pada alat.
4. Menyimpan peralatan yang sudah disterilisasi di dalam lemari penyimpanan yang dilengkapi dengan lampu UV selama  $\pm 2$  jam sebelum digunakan. Sterilisasi ini dilakukan sebelum alat tersebut dipakai, karena jika dibandingkan dengan peralatan yang dipanaskan, sterilisasi dengan prosedur ini lebih tidak tahan terhadap kontaminasi.

#### 3.4.4 Pembuatan Medium *Benneck*

Penggunaan medium *Benneck* untuk kultivasi *Chlorella vulgaris* Buitenzorg didasarkan atas pertimbangan antara lain karena nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg terdapat pada medium ini dan juga medium *Benneck* ini mudah dibuat.

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

**Tabel 3.1 Bahan Medium *Benneck***

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

Cara pembuatan 1 dm<sup>3</sup> medium *Benneck* :

1. Menyiapkan bahan-bahan pada tabel 3.1 diatas, kemudian melarutkan bahan-bahan tersebut dalam 1 dm<sup>3</sup> aquadest dan diaduk sampai semuanya larut.
2. Mensterilkan medium menggunakan *autoclave* selama  $\pm 1,5$  jam kemudian didinginkan.

- Menyimpan medium tersebut dalam lemari pendingin bila tidak langsung digunakan. Apabila terdapat endapan di dasar medium maka endapan tersebut harus dipisahkan dahulu sebelum disimpan.

### 3.4.5 Pemiakan Kultur *Chlorella vulgaris* Dalam Medium *Benneck*

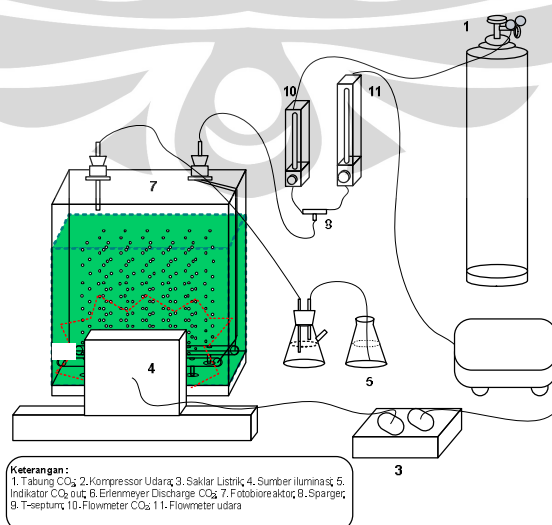
Prosedur pembiakan kultur murni yaitu :

- Menyiapkan medium *Benneck* dan peralatan pembiakan (wadah, selang udara, tutup wadah) yang telah disterilkan terlebih dahulu.
- Memasukkan stok murni *Chlorella vulgaris* Buitenzorg ke dalam wadah steril dan dicampur dengan medium *Benneck*, dengan catatan perbandingan antara jumlah kultur murni dan medium diatur sesuai kebutuhan penelitian.
- Mem-bubbling kultur menggunakan kompresor udara. Pada tahap ini cahaya yang diberikan tetap dengan intensitas yang kecil.
- Kultur murni yang dibiakkan ini harus diregenerasi satu atau dua minggu sekali dengan cara mengganti medium hidupnya agar kebutuhan nutrisi tersedia dalam jumlah yang cukup.

### 3.4.6 Pembuatan Rangkaian Alat

Peralatan yang akan dirangkai menjadi satu instrumen fotobioreaktor seperti yang telah disebutkan sebelumnya dirangkai di dalam suatu lemari tertutup.

Skema fotobioreaktor tunggal seperti berikut :



Gambar 3.2 Rangkaian Peralatan Fotobioreaktor Tunggal



### 3.4.7 Penentuan Jumlah Inokulum

Prosedur ini akan menjadi lebih mudah apabila telah dibuat kurva kalibrasi antara  $OD_{600}$  dengan N sel karena untuk mengetahui jumlah sel hanya memerlukan data  $OD_{600}$  dari sel tersebut. Langkah-langkahnya adalah :

1. Mengambil sampel yang akan ditentukan jumlah selnya kemudian mengukur nilai absorbansinya dengan menggunakan spektrofotometer.
2. Menentukan jumlah selnya dengan melihat hubungan antara  $OD_{600}$  vs jumlah sel pada kurva kalibrasi.

### 3.4.8 Variasi Kecepatan Superfisial Udara ( $U_G$ )

Penelitian ini dilakukan dengan konsentrasi  $CO_2$  input sebesar 5%, pencahayaan secara konstan, dan dengan jumlah inokulum awal ( $N_0$ ) tertentu. Kemudian memvariasikan  $U_G$  udara.

### 3.4.9 Pencahayaan Alterasi pada Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) yang dipilih

Variasi ini dilakukan sebagai perbandingan dengan pencahayaan kontinyu pada kecepatan superfisial ( $U_G$ ) yang dipilih dari variasi kecepatan superficial yang dilakukan untuk kultivasi *Chlorella*. Kondisi operasi dan jumlah inokulum awal yang digunakan pada pencahayaan alterasi sama dengan kondisi operasi dan jumlah inokulum awal yang digunakan pada saat variasi kecepatan superfisial udara.

### 3.4.10 Pengambilan Data

Data yang diambil selama penelitian ini yaitu :

1. Konsentrasi gas  $CO_2$  dalam udara masuk dan keluar reaktor ( $y_{CO_2}$ )
2. Kerapatan sel ( $sel/cm^3$ )
3. Intensitas cahaya depan [ $I_0$ ] dan belakang fotobioreaktor [ $I_b$ ] (lux)
4. pH fotobioreaktor
5. Berat kering akhir (X)

Prosedur pengambilan data adalah sebagai berikut :

1. Mengambil sampel dari dalam fotobioreaktor dan mengukur variabel-variabel yang diperlukan seperti yang disebutkan diatas.

2. Pengambilan data diulang setiap interval waktu yang ditetapkan pada penelitian.

### 3.5 Metode Perhitungan Data Penelitian

Variabel penelitian yang diambil yaitu  $OD_{600}$ , pH,  $y_{CO_2}$ ,  $I_b$  dan berat kering akhir (X) akan diolah menggunakan beberapa metode perhitungan, antara lain :

#### 3.5.1 Jumlah Biomassa (X)

Jumlah biomassa yang dihasilkan dapat dihitung langsung dengan mengkorelasikan kerapatan optik pada 600 nm ( $OD_{600}$ ) dan berat kering sel *Chlorella*.

#### 3.5.2 Laju Pertumbuhan Spesifik ( $\mu$ )

Laju pertumbuhan spesifik adalah laju pertumbuhan sel biomassa pada fase log dan dapat dihitung dengan persamaan *Monod* yaitu :

$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} \text{ atau } \mu = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (3.2)$$

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

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

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

t = waktu (h)

#### 3.5.3 Pengolahan Data pH

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

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

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

$$[HCO_3^-] = K_{CO_2} [CO_2] 10^{-pH} \quad (3.5)$$

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

$$P_{CO_2} = H_{CO_2} \cdot [CO_2] \quad (3.6)$$

$$P_{CO_2} = \frac{y_{CO_2} P_T}{P_T} \quad (3.7)$$

$$\ln \left( \frac{H_{CO_2}}{H_{CO_2,0}} \right) = A_H \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_H \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_H \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \quad (3.8)$$

$$\ln \left( \frac{H_{CO_2}}{H_{CO_2,0}} \right) = A_K \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_K \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_K \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \quad (3.9)$$

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

$$[HCO_3^-] = \left( \frac{K_{CO_2,0}}{H_{CO_2,0}} \right) \left( \frac{y_{CO_2} P_T}{10^{-pH}} \right) \left( \frac{\text{EXP} \left[ A_k \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_k \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_k \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]}{\text{EXP} \left[ A_h \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_h \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_h \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]} \right) \quad (3.10)$$

dengan :  $P_T$  = temperatur operasi. (atm)

$y_{CO_2}$  = konsentrasi gas  $CO_2$  yang diumpankan.

$$K_{CO_2,0} = 4.38 \cdot 10^{-7}$$

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

$T$  = temperatur operasi (K)

$T_0$  = temperatur standar (K)

Konstanta-konstanta aktivitas gas  $CO_2$  :

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

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

### 3.5.4 Pengolahan Data I

Nilai  $I_0$  (jumlah intensitas yang diterima oleh reaktor) dan  $I_b$  (besar intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh reaktor) digunakan untuk menentukan besarnya nilai energi yang tersedia selama kultivasi dan energi yang digunakan untuk produksi biomassa dari *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Nilai energi ini ditentukan melalui persamaan berikut :

$$E_x = \frac{\int_0^t I_t dt}{\Delta X \cdot s} \quad \text{dan} \quad E = \frac{\int_0^t (I_i - I_t) dt}{\Delta X \cdot s} \quad (3.11)$$

dan nilai  $I_i$  dan  $I_t$  ditentukan dengan persamaan :

$$I_i = I_0 \times \alpha_{kaca} \quad \text{dan} \quad I_t = \frac{I_b}{\alpha_{kaca}} \quad (3.12)$$

di mana :  $\Delta X$  = berat biomassa yang dihasilkan selama masa kultivasi ( $\text{g/dm}^3$ )

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

$I_t$  = intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh kultur medium ( $\text{W/m}^2$ )

$t$  = waktu (jam)

dengan nilai konversi  $1 \text{ lx} = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$

### 3.5.5 Pengolahan Data $K_{La}$

Koefisien perpindahan massa karbon dioksida ( $K_{La,CO_2}$ ) dicari dengan menggunakan korelasi ( $K_{La,CO_2}$ ) terhadap ( $K_{La,O_2}$ ). Oleh sebab itu, dalam pengolahan data penelitian ini, yang dilakukan adalah mencari nilai ( $K_{La,O_2}$ ) untuk kemudian dikonversi menjadi ( $K_{La,CO_2}$ ) melalui sebuah persamaan.

Nilai ( $K_{La,O_2}$ ) sendiri dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \frac{dCO_2}{dt} &= K_L a (C_{O_2}^* - C_{O_2}) \\ \frac{dCO_2}{C_{O_2}^* - C_{O_2}} &= K_L a \cdot dt \\ \int_0^C \frac{dCO_2}{C_{O_2}^* - C_{O_2}} &= K_L a \int_0^t dt \\ \ln \left( \frac{C_{O_2}^*}{C_{O_2}^* - C_{O_2}} \right) &= K_L a \cdot t \end{aligned} \quad (3.13)$$

dimana:

$K_{La}$  = koefisien perpindahan massa oksigen

$C_{O_2}^*$  = konsentrasi oksigen terlarut dalam keadaan jenuh

$C_{O_2}$  = konsentrasi oksigen terlarut pada  $t$

$t$  = waktu

Dari persamaan di atas dengan memplot data  $\ln\left(\frac{c_{O_2}^*}{c_{O_2}^* - c_{O_2}}\right)$  dan  $t$  ke dalam sebuah kurva, akan diperoleh gradien kurva yang menyatakan besar  $K_{La,O_2}$ . Selanjutnya  $K_{La,O_2}$  tersebut dikonversi menjadi  $(K_{La,CO_2})$  melalui persamaan:

$$K_{La,CO_2} = (K_{La,O_2})\left(\frac{D_{CO_2}}{D_{O_2}}\right)^{1/2} \quad (3.14)$$

Dimana  $D_{CO_2}$  merupakan koefisien difusivitas karbon dioksida dalam air yang bernilai  $1,96 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $D_{O_2}$  merupakan koefisien difusivitas oksigen dalam air yang bernilai  $2,5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Dengan demikian, persamaan di atas menjadi :

$$K_{La,CO_2} = 0,885 K_{La,O_2} \quad (3.15)$$

### 3.5.6 Pengolahan Data Gas Hold up

Koefisien *gas hold up* dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\varepsilon_G = \frac{V_G}{V_G + V_L} \quad (3.16)$$

dimana:

$\varepsilon_G$  = *gas hold up*

$V_G$  = volume gas dalam kolom gelembung

$V_L$  = volume cairan dalam kolom gelembung

Karena volume = luas alas reaktor dikalikan dengan tinggi fluida dan luas alas reaktor sama maka persamaan untuk mencari *gas hold up* menjadi :

$$\varepsilon_G = \frac{h_G}{h_G + h_L} \quad (3.17)$$

dimana:

$h_G$  = tinggi udara dalam kolom gelembung

$h_L$  = tinggi cairan dalam kolom gelembung

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

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

#### 4.1 Pembahasan Umum

Pada penelitian ini, mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzorg dikultivasi dalam fotobioreaktor kolom gelembung dengan pencahayaan kontinyu dan volume 18 L. Dalam kultivasi, dilakukan variasi kecepatan superfisial udara untuk mendapatkan kecepatan superfisial udara yang menghasilkan produksi biomassa *Chlorella* yang paling tinggi. Kemudian, dilakukan alterasi pencahayaan pada kecepatan superfisial yang dipilih dalam rentang kecepatan superfisial yang diambil, dan dilakukan perbandingan dengan pencahayaan kontinyu.

Penelitian ini dimulai dengan melakukan sterilisasi peralatan yang akan digunakan dan membuat medium yang akan digunakan untuk mengembangbiakan *Chlorella* yaitu medium *Benneck*. Sterilisasi bertujuan agar kultur tidak terkontaminasi oleh kontaminan yang dapat menghambat pertumbuhannya. Pertimbangan penggunaan medium *Benneck* sebagai medium hidup kultur adalah karena di dalam medium ini terdapat banyak senyawa makro yang diperlukan dalam pertumbuhan *Chlorella vulgaris*. Kandungan medium *Benneck* itu sendiri adalah  $MgSO_4$ ,  $KH_2PO_4$ ,  $NaNO_3$  dan  $FeCl_3$  dengan komposisi seperti yang tertera pada tabel 3.1.

Jumlah inokulum awal *Chlorella* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 1.000.000 sel/L. Sebelumnya, dilakukan *pre-culture* pada *Chlorella* yang bertujuan untuk memberikan kesempatan pada mikroalga tersebut beradaptasi dengan lingkungan atau medium yang baru (melewati fase lag), disamping bertujuan untuk memperbanyak stok *Chlorella vulgaris*. Jumlah inokulum awal tersebut didapat dengan mengukur nilai absorbansi dengan menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 600. Kemudian nilai absorbansi tersebut dikorelasikan dengan menggunakan kurva kalibrasi  $OD_{600}$  vs N sel. Namun untuk pengolahan data, yang digunakan yaitu data dari fase log. Intensitas

cahaya yang digunakan yaitu 5000 lux. Nilai intensitas cahaya ini mengacu pada penelitian sebelumnya dimana intensitas cahaya untuk pertumbuhan sel optimum dengan jumlah inokulum awal yang digunakan adalah 5000 lux (Andika, 2005).

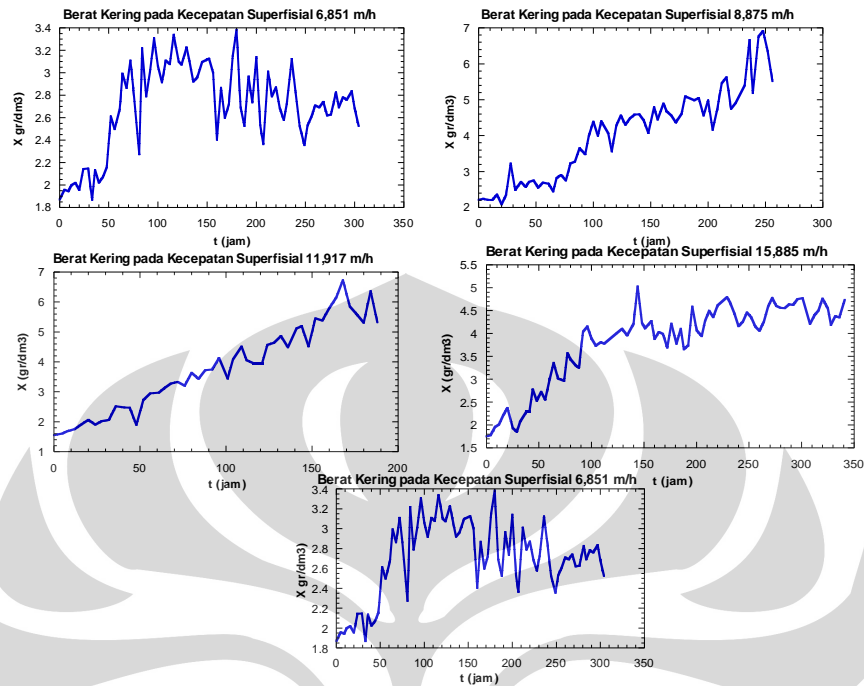
Pada variasi kecepatan superfisial ( $U_G$ ) udara, pencahayaan yang digunakan yaitu pencahayaan kontinu sehingga intensitas cahaya yang diberikan dijaga tetap selama kultivasi. Konsentrasi  $CO_2$  yang digunakan dijaga tetap sebanyak 5% dari total laju alir udara yang masuk ke dalam fotobioreaktor. Setelah mendapatkan kecepatan superfisial ( $U_G$ ) udara yang menghasilkan peningkatan berat kering yang tertinggi, dilakukan juga pencahayaan alterasi pada salah satu kecepatan superfisial ( $U_G$ ) yang dipilih sebagai data perbandingan dengan pencahayaan kontinu. Pada variasi kecepatan superfisial ( $U_G$ ) udara, perbandingan yang dilakukan adalah laju pertumbuhan dan peningkatan biomassa dari *Chlorella vulgaris*.

#### 4.2 Data Penelitian

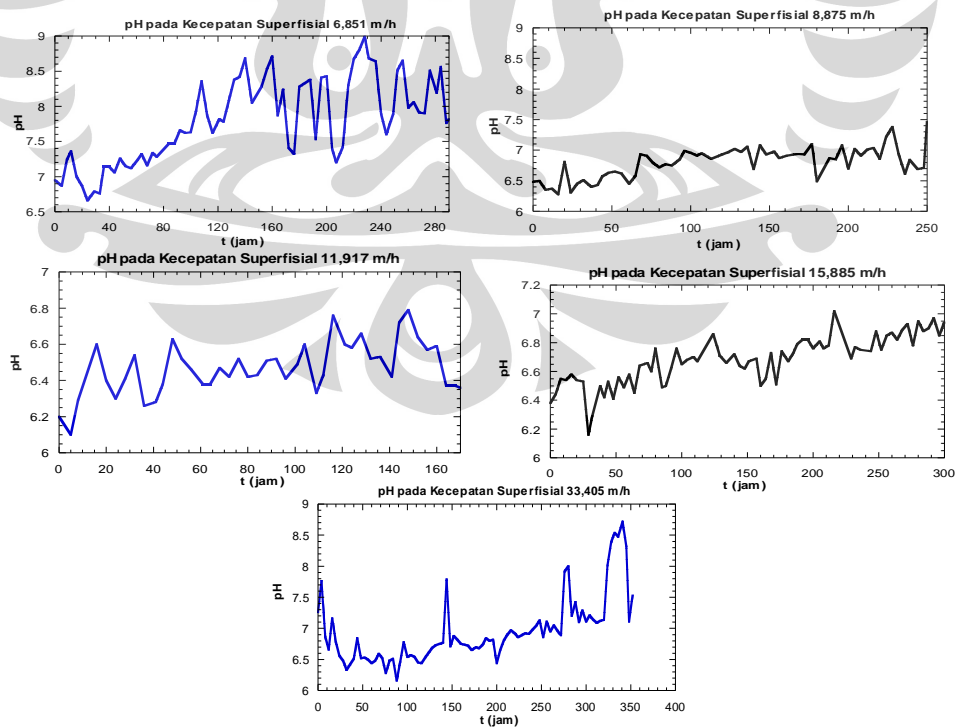
Variasi kecepatan superfisial ( $U_G$ ) udara yang dilakukan yaitu 6,851 m/h; 8,875 m/h; 11,917 m/h; 15,885 m/h dan 33,405 m/h. Nilai rentang ini diambil berdasarkan perhitungan aspek hidrodinamika pada air dengan volume 18 L dimana aspek hidrodinamika yang diukur yaitu koefisien transfer massa  $CO_2$  dan *gas hold up*. Nilai  $U_G$  dimana dicapai koefisien transfer massa  $CO_2$  dan *gas hold up* yang maksimum berturut-turut yaitu 15,663 m/h dan 13,4 m/h sehingga nilai  $U_G$  yang diambil untuk kultivasi *Chlorella vulgaris* berkisar antara rentang yang mencakup nilai tersebut.

Pada penelitian ini, data yang diperoleh yaitu *Optical Density* pada panjang gelombang 600, intensitas cahaya yang masuk ( $I_0$ ) dan keluar reaktor ( $I_b$ ) dan pH selama kultivasi. Data yang diambil, digunakan untuk melihat pengaruh kecepatan superfisial ( $U_G$ ) udara terhadap produksi biomassa *Chlorella*.

Pada variasi kecepatan superfisial ( $U_G$ ) udara, dilakukan dengan pencahayaan kontinyu dan didapatkan grafik sebagai berikut :

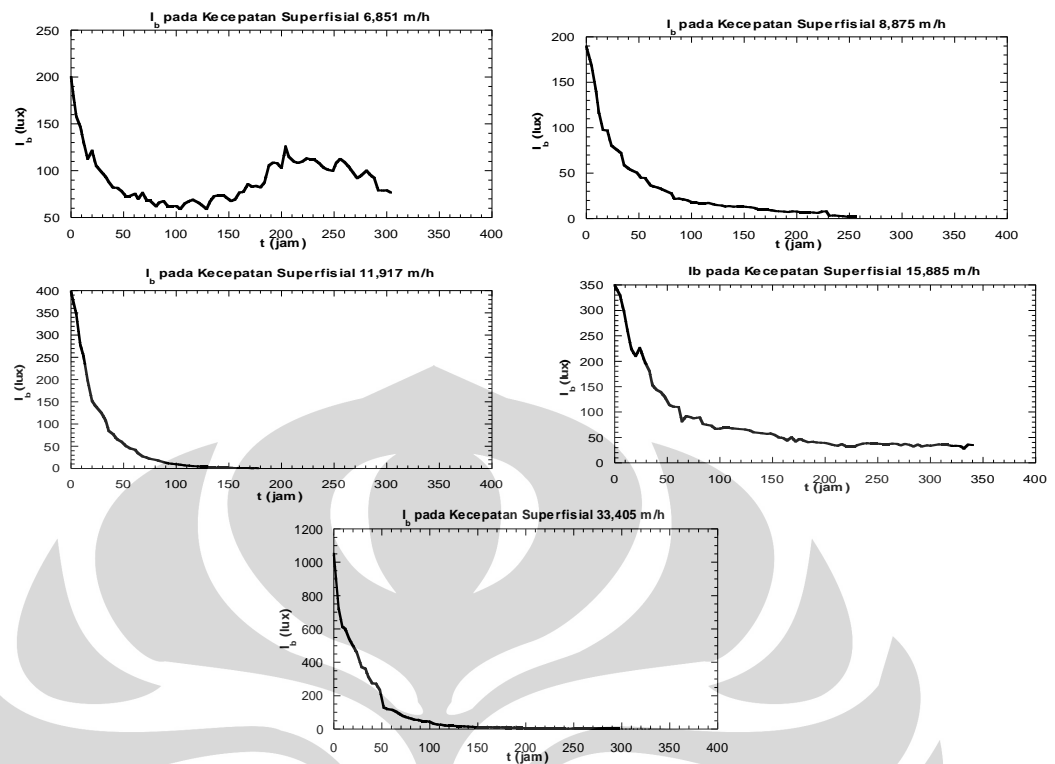


Gambar 4. 1 Berat Kering yang dihasilkan Pada Berbagai Kecepatan Superfisial

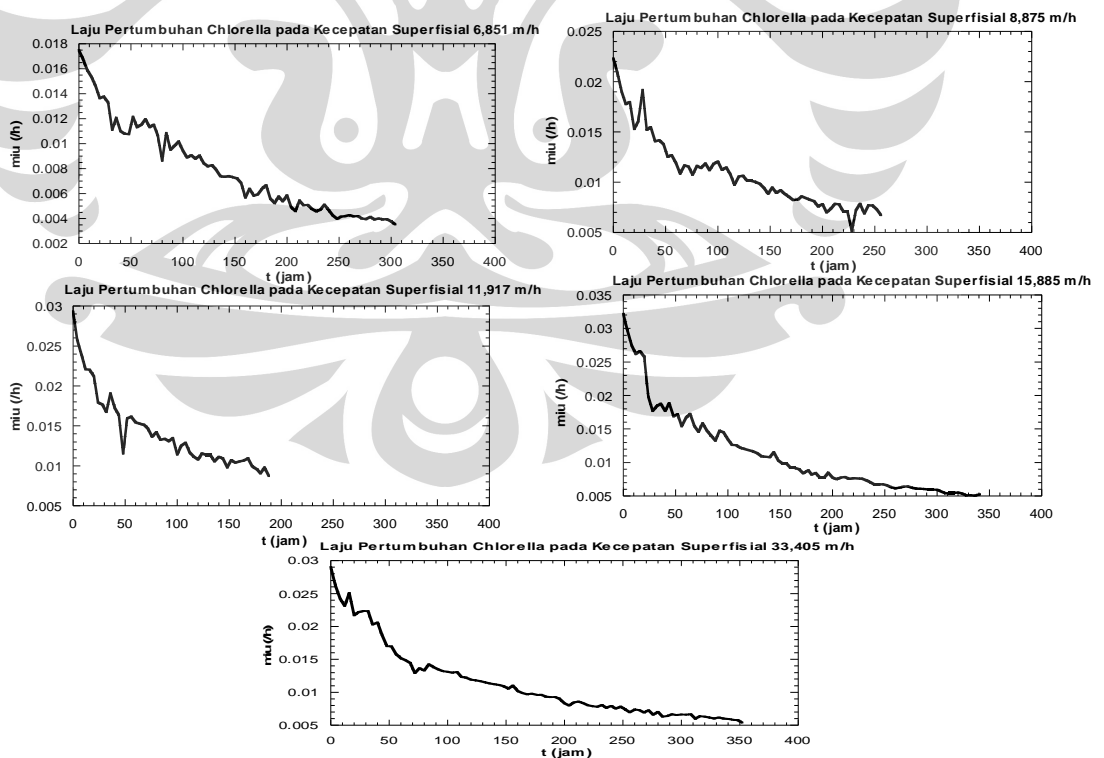


Gambar 4. 2 pH Kultur Pada Berbagai Kecepatan Superfisial



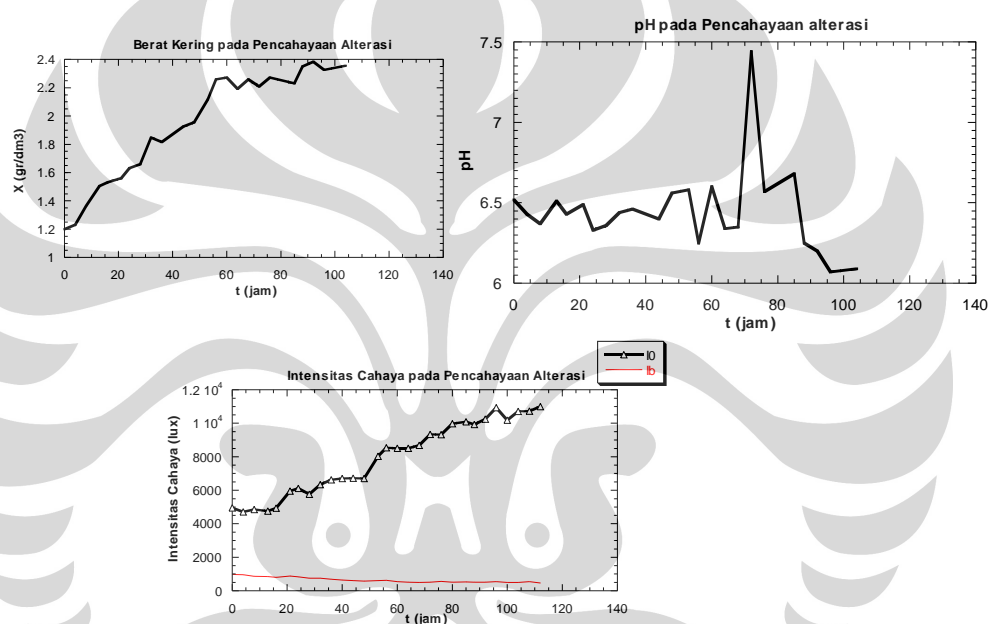


Gambar 4. 3 Intensitas belakang reaktor ( $I_b$ ) pada Berbagai Kecepatan Superfisial



Gambar 4. 4 Laju Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada Berbagai Kecepatan Superfisial

Dari gambar diatas dapat dilakukan perbandingan beberapa parameter dari proses kultivasi *Chlorella vulgaris* yaitu berat kering sel yang dihasilkan, efisiensi energi dan konsentrasi substrat selama proses kultivasi. Data jumlah sel dan berat kering sel yang dihasilkan, digunakan untuk melihat perbandingan laju pertumbuhan *Chlorella* pada setiap nilai kecepatan superfisial sehingga didapatkan nilai  $U_G$  optimum. Kemudian pada salah satu kecepatan superfisial tersebut yaitu pada  $U_G$  8,875 m/h, dilakukan perbandingan dengan pencahayaan alterasi. Pada pencahayaan alterasi didapatkan grafik sebagai berikut :



Gambar 4. 5 Berat Kering, pH dan Intensitas Cahaya pada Pencahayaan Alterasi

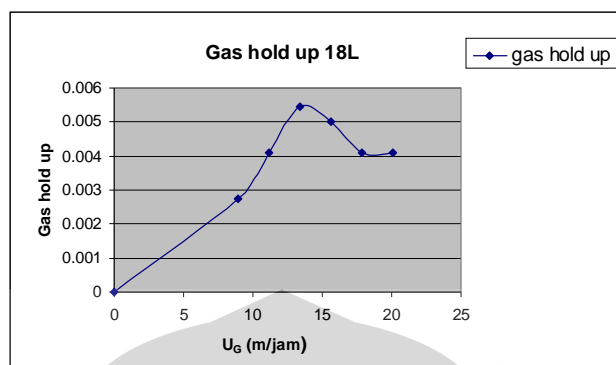
### 4.3 Pengaruh Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) Terhadap Aspek Hidrodinamika

Nilai variasi  $U_G$  yang dilakukan untuk kultivasi *Chlorella*, diambil berdasarkan pengujian aspek hidrodinamika pada air. Aspek hidrodinamika yang dilihat yaitu *gas hold up* dan konsentrasi karbon dioksida terlarut.

#### 4.3.1 Pengaruh Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) Terhadap *Gas Hold up*

*Gas hold up* sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran fluida.

Dari pengukuran *gas hold up* di air, didapatkan grafik seperti dibawah ini :

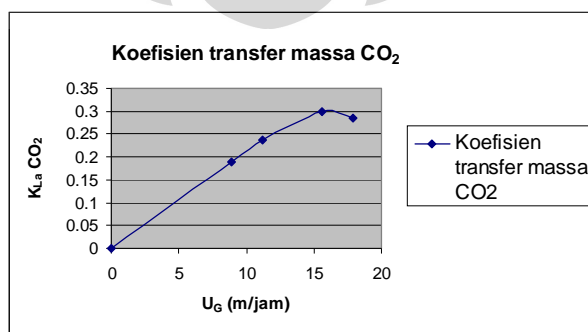


**Gambar 4. 6 Profil *Gas hold up* terhadap Kecepatan Superfisial ( $U_G$ )**

Dari grafik tersebut, dapat dilihat bahwa peningkatan kecepatan aliran udara mengakibatkan *gas hold up* menjadi semakin tinggi. Hal ini disebabkan dengan semakin besarnya aliran udara, maka volume gas dalam kolom akan semakin besar yang ditandai dengan semakin banyaknya penyebaran gelembung dalam kolom. Namun ketika mencapai kecepatan superfisial ( $U_G$ ) 13,4 m/h, peningkatan kecepatan aliran udara akan menurunkan *gas hold up*. Hal ini disebabkan jika kecepatan aliran udara terlalu tinggi, maka waktu tinggal udara di dalam reaktor akan semakin cepat. Akibatnya fraksi udara dalam reaktor juga akan semakin kecil dan hal ini akan menurunkan *gas hold up*.

#### 4.3.2 Pengaruh Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) Terhadap Koefisien Transfer Massa $CO_2$

Aspek hidrodinamika yang diukur selanjutnya yaitu koefisien transfer massa  $CO_2$  dan didapatkan grafik seperti berikut :



**Gambar 4. 7 Profil Koefisien Transfer Massa  $CO_2$  terhadap Kecepatan Superfisial ( $U_G$ )**

Dari grafik di atas, terlihat bahwa konsentrasi karbon dioksida terlarut akan bertambah besar seiring dengan bertambahnya laju alir udara. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya laju alir udara, maka energi kinetik gas akan meningkat sehingga kemampuan CO<sub>2</sub> untuk larut juga akan meningkat. Selain itu, semakin besar laju alir udara, gelembung gas yang terbentuk juga semakin banyak sehingga luas permukaan kontak antara fasa gas dan cair juga semakin luas. Hal ini akan mengakibatkan semakin baiknya proses perpindahan massa CO<sub>2</sub> ke dalam air yang akhirnya dapat memperbesar jumlah CO<sub>2</sub> yang larut dalam air.

Ketika mencapai kecepatan superfisial ( $U_G$ ) 15,633 m/h, peningkatan kecepatan laju alir udara akan menurunkan koefisien transfer massa CO<sub>2</sub>. Hal ini disebabkan semakin besarnya laju alir udara maka gelembung gas yang terbentuk akan semakin banyak dan semakin ke atas, gelembung tersebut cenderung berkelompok dan ukurannya menjadi lebih besar sehingga akan menyebabkan kecepatan naik gelembung meningkat. Dengan meningkatnya kecepatan naik gelembung, maka waktu tinggal CO<sub>2</sub> di dalam reaktor juga semakin cepat sehingga perpindahan massa antara CO<sub>2</sub> dengan air menjadi tidak optimal.

#### **4.4 Pengaruh Kecepatan Superfisial ( $U_G$ ) Terhadap Produksi Biomassa *Chlorella***

Nilai variasi kecepatan superfisial yang dilakukan, diambil berdasarkan pengukuran terhadap aspek hidrodinamika pada air. Pada gambar 4.1, *gas hold up* maksimum dicapai pada kecepatan superfisial 13,4 m/h dan pada gambar 4.2, koefisien transfer massa CO<sub>2</sub> maksimum dicapai pada kecepatan superfisial udara 15,633 m/h sehingga variasi kecepatan superfisial yang dilakukan untuk kultivasi *Chlorella* yaitu 6,851 m/h; 8,875 m/h; 11,917 m/h; 15,885 m/h dan 33,405 m/h. Data yang didapatkan dari variasi kecepatan superfisial ( $U_G$ ) udara, diolah dengan menggunakan persamaan-persamaan matematis seperti pada bab 3 bagian metode perhitungan data penelitian untuk mendapatkan beberapa parameter produksi biomassa yaitu berat kering ( $X$ ), laju pertumbuhan spesifik ( $\mu$ ), dan [HCO<sub>3</sub>].

#### 4.4.1 Laju Pertumbuhan Pada Berbagai Variasi Kecepatan Superfisial ( $U_G$ )

Laju pertumbuhan sel *Chlorella vulgaris* maksimum ( $\mu_{\max}$ ) pada setiap kecepatan superfisial udara dapat dilihat pada tabel berikut :

**Tabel 4. 1 Laju Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Maksimum Pada Berbagai Kecepatan Superfisial Udara ( $U_G$ )**

| $U_G$ (m/h) | $\mu_{\max}$ |
|-------------|--------------|
| 6,851       | 0,017        |
| 8,875       | 0,022        |
| 11,917      | 0,03         |
| 15,885      | 0,03         |
| 33,405      | 0,029        |

Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa laju pertumbuhan paling tinggi yaitu pada kecepatan superfisial ( $U_G$ ) 11,917 dan 15,885 m/h. Grafik laju pertumbuhan tersebut dibuat berdasarkan data pertumbuhan *Chlorella* pada fase logaritmik. Dari grafik tersebut, pada kecepatan superfisial udara ( $U_G$ ) yang lebih kecil dari 11,917 dan 15,885 m/h (6,851 dan 8,875 m/h) laju pertumbuhannya lebih kecil. Hal ini disebabkan pada kecepatan superfisial udara ( $U_G$ ) yang lebih rendah dari 11,917 dan 15,885 m/h, pengadukan yang terjadi tidak optimal sehingga menyebabkan adanya sel *Chlorella* yang mengendap di dasar reaktor. Sel *Chlorella* yang mengendap ini, tidak dapat menerima cahaya yang diberikan karena di dasar reaktor merupakan daerah yang tidak terkena cahaya. Selain itu, pada kecepatan superfisial udara ( $U_G$ ) yang rendah dapat menyebabkan terhambatnya aliran  $CO_2$  ke medium sehingga konsentrasi  $CO_2$  yang larut dalam medium tempat kultivasi *Chlorella* juga kecil. Akibatnya,  $CO_2$  yang tersedia tidak mencukupi untuk berlangsungnya fotosintesis yang maksimal sehingga laju pertumbuhan *Chlorella* juga terhambat dimana melalui proses fotosintesis, *Chlorella* mendapatkan energi untuk tumbuh dan berkembang biak.

Pada kecepatan superfisial ( $U_G$ ) yang lebih tinggi dari 11,917 dan 15,885 m/h yaitu 33,045 m/h juga menghasilkan laju pertumbuhan *Chlorella* yang lebih kecil dibandingkan pada kecepatan superfisial ( $U_G$ ) 15,885 m/h, Hal ini dikarenakan semakin tinggi kecepatan superfisial ( $U_G$ ) dapat menyebabkan pengadukan yang terjadi terlalu cepat sehingga penyerapan  $CO_2$  oleh sel *Chlorella*

*vulgaris* tidak berlangsung dengan baik. Akibatnya, proses fotosintesis juga terhambat sehingga menyebabkan laju pertumbuhan juga menurun.

#### 4.4.2 Berat Kering (X) *Chlorella* yang dihasilkan Pada Berbagai Variasi Kecepatan Superfisial ( $U_G$ )

Berat kering yang dihasilkan selama proses kultivasi untuk berbagai variasi kecepatan superfisial ( $U_G$ ) dapat dilihat pada tabel berikut :

**Tabel 4. 2 Berat kering yang dihasilkan pada variasi kecepatan superfisial ( $U_G$ )**

| $U_G$ (m/h) | X akhir (gr/L) | $\Delta X$ (gr/L) |
|-------------|----------------|-------------------|
| 6,851       | 3,383          | 1,513             |
| 8,875       | 6,915          | 4,700             |
| 11,917      | 6,731          | 5,177             |
| 15,885      | 5,025          | 3,276             |
| 33,405      | 5,914          | 4,823             |

Dari tabel di atas, terlihat bahwa kecepatan superfisial ( $U_G$ ) tidak linear dengan berat kering *Chlorella* yang dihasilkan. Peningkatan berat kering tertinggi dicapai pada kecepatan superfisial 11,917 m/h. Hal ini menandakan bahwa pada kecepatan superfisial 11,917 m/h, proses aerasi yang terjadi cukup baik dan menyebabkan terjadinya pemerataan karbon dioksida dan cahaya yang diberikan untuk kultivasi *Chlorella vulgaris* sehingga proses fotosintesis yang terjadi berlangsung optimal. Hal ini juga ditandai dengan tercapainya laju pertumbuhan yang maksimum pada kecepatan superfisial 11,917 m/h.

Selain itu, penelitian yang sama pada skala lab (volume 750 mL) juga telah dilakukan dan didapatkan perbandingan data pada kecepatan superfisial optimum adalah sebagai berikut :

**Tabel 4.3 Perbandingan Berat Kering Akhir Volume 750 mL dan 18L**

| Volume | $U_G$ Optimum (m/h) | X akhir (gr/L) |
|--------|---------------------|----------------|
| 750 mL | 3,6                 | 7,85           |
| 18 L   | 11,917              | 5,177          |

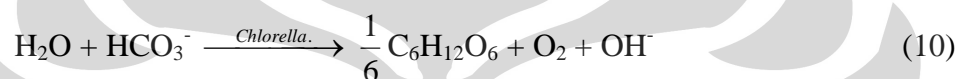
Dari tabel tersebut, terlihat bahwa pada volume 750 mL menghasilkan berat kering akhir sel *Chlorella* lebih besar dibandingkan pada volume 18 L. Hal ini dikarenakan pada volume yang lebih besar lebih sulit untuk mengontrol sistem fotobioreaktor dan menjaga kultivasi *Chlorella* dari kontaminan yang ada.

#### 4.4.3 pH Kultur Pada Berbagai Variasi Kecepatan Superfisial ( $U_G$ )

Pada proses kultivasi *Chlorella*, aerasi dilakukan dengan menggunakan udara yang mengandung 5%  $\text{CO}_2$  yang kemudian  $\text{CO}_2$  larut dalam medium sehingga terbentuk  $[\text{HCO}_3^-]$  dengan mekanisme reaksi seperti berikut :



Bikarbonat yang terbentuk akan diserap oleh sel *Chlorella* dan di dalam sel terjadi metabolisme dengan mekanisme reaksi sebagai berikut :



Pada variasi kecepatan superfisial, terlihat pada gambar 4.2 pH kultur cenderung stabil. Hal ini mungkin dikarenakan adanya sistem *buffer* alami berupa gas  $\text{CO}_2$  terlarut yang terdapat dalam media kultur. Gas  $\text{CO}_2$  terlarut yang terdapat dalam medium kultur akan menjadi asam karbonat yang akan terurai menjadi ion-ion karbonat dan ion bikarbonat. Reaksi kesetimbangan antara  $\text{CO}_2$  terlarut, asam karbonat, ion bikarbonat, dan ion karbonat akan menyebabkan nilai pH cenderung konstan.

#### 4.5 Energi Untuk Produksi Biomassa *Chlorella*

Intensitas cahaya yang terukur pada variasi  $U_G$  selama masa kultivasi dapat dilihat pada grafik 4.3. Data yang diperoleh berupa intensitas cahaya keluar reaktor ( $I_b$ ). Intensitas cahaya yang masuk ke dalam reaktor konstan, sedangkan intensitas cahaya keluar reaktor akan menurun dengan meningkatnya kerapatan sel. Intensitas cahaya yang terukur, akan digunakan untuk menghitung besarnya energi yang terpakai dalam pertumbuhan. Dari perhitungan, didapatkan nilai energi yang digunakan di dalam produksi biomassa dari *Chlorella vulgaris* Buitenzorg adalah sebagai berikut :

**Tabel 4. 4 Energi yang digunakan selama kultivasi pada variasi kecepatan superfisial ( $U_G$ )**

| $U_G$ (m/h) | $E_x$ (kJ/g) | $E$ (kJ/g)  |
|-------------|--------------|-------------|
| 6,851       | 19.169,879   | 518.221,934 |
| 8,875       | 730,722      | 104.424,749 |
| 11,917      | 352,746      | 40.727,361  |
| 15,885      | 3.881,331    | 188.016,546 |
| 33,405      | 2.202,686    | 96.416,209  |

Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa energi terbesar yang digunakan selama kultivasi tertinggi pada kecepatan superfisial 6,851 m/h dan terendah pada kecepatan superfisial 11,917 m/h.

#### 4.6 Pengaruh Pencahayaan Alterasi

Pencahayaan alterasi dilakukan pada kecepatan superfisial udara 8,875 m/h dan sebagai perbandingan digunakan data pencahayaan kontinyu pada kecepatan superfisial udara yang sama. Dari penelitian pencahayaan alterasi yang dilakukan didapatkan perbandingan dengan pencahayaan kontinyu pada kecepatan superfisial yang sama sebagai berikut :

**Tabel 4.5 Perbandingan Pencahayaan Alterasi dan Kontinyu**

|                      | Alterasi | Kontinyu |
|----------------------|----------|----------|
| $\mu$ max (/h)       | 0,025    | 0,022    |
| Efisiensi energi (%) | 13,866   | 0,7      |

Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa dengan pencahayaan alterasi, laju pertumbuhan maksimum yang dicapai lebih besar dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu. Dengan laju yang lebih tinggi ini, maka pertumbuhan biomassa pada pencahayaan alterasi akan terjadi lebih cepat. Pada pencahayaan alterasi, efisiensi konversi energi cahaya untuk pembentukan biomassa juga lebih besar dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu. Pencahayaan alterasi ini dilakukan pada kecepatan superfisial ( $U_G$ ) yang bukan optimum. Jika dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu pada kecepatan superfisial yang optimum, laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang dihasilkan pada pencahayaan alterasi lebih rendah dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu meskipun pencahayaan alterasi merupakan metode pencahayaan yang terbaik



dalam peningkatan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Hal ini membuktikan bahwa sangat penting untuk melakukan pengaturan kecepatan superfisial sehingga didapatkan kecepatan superfisial optimum yang menghasilkan produksi biomassa dan laju pertumbuhan yang maksimal.



## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Kesimpulan dari penelitian ini yaitu :

1. Pengaturan kecepatan superfisial dapat meningkatkan produksi biomassa *Chlorella vulgaris*. Dalam penelitian ini, kecepatan superfisial yang menghasilkan peningkatan biomassa dan laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris* tertinggi yaitu 11,917 m/h.
2. Pada kecepatan superfisial yang terlalu rendah atau sangat tinggi dapat menurunkan produksi biomassa dan laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris*.
3. Pencahayaan alterasi dapat meningkatkan laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris*.
4. Pencahayaan alterasi pada kecepatan superfisial yang bukan optimum menghasilkan laju pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg yang lebih kecil dibandingkan dengan pencahayaan kontinyu pada kecepatan superfisial yang optimum.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. <http://www.republika.co.id/suplemen>. (April 2008).
- Anonim. *Anabolisme*. <http://bebas.vlsm.org/biologi/biologi3.htm>. (April 2008).
- Anonim. *Metabolisme*. <http://id.wikipedia.org/wiki/fotosintesis>. (April 2008).
- Anonim. *Fotosintesis*. <http://id.wikipedia.org.../f/o/t/Fotosintesis.html>. (April 2008)
- Anonim. <http://id.answer.yahoo.com>. (April 2008)
- Anonim. <http://www.e-smartschool.com>. (April 2008)
- Anonim. <http://www.chlorella-world.com/yaeyama.html>. (April 2008).
- Anonim. <http://link.springer.de>. (April 2008).
- Anonim. [sumber.kompas.www.situshijau.co.id/tulisan.php?](http://sumber.kompas.www.situshijau.co.id/tulisan.php?). (April 2008).
- Andika, Sang Made Kresna. 2005. *Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg Dengan Alterasi Pencahayaan Pada Fotobioreaktor Kolom Gelembung*. Depok : Departemen Gas dan Petrokimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Babcock, Roger W, Jos Malda & JoAnn C. Radway. 2002. *Hydrodynamic and Mass Transfer in a Tubular Airlift Photobioreactor*. Honolulu : Civil Engineering Department, University of Hawaii.
- Camacho, Garcia et al. 2000. *Buble Column and Airlift Photobioreactors for Algal Culture*. Almeria : Department of Chemical Engineering, University of Almeria.
- Gunther, William S. 2000. *A Photobioreactor with On-Line Biomass and Growth Rate Estimations for Optimization of Light Intensity in Cultures of Phototrophic Microorganism*. Department of Life Science Aalborg University.
- Pulz, O. 2001. *Photobioreactor : Production System for Phototropic Mikroorganism*.
- Spolaore, Pauline & Elie Duran. 2005. *Commercial Applications of Microalgae*. Paris : Laboratoire de Genie des Procedes et Materiaux.
- Sujarwo, Muhammad Aji. 2006. Skripsi : “*Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dengan Pencahayaan Kontinyu dalam*

*Fotobioreaktor Kolom Gelembung Susun Seri*". Depok : Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Suriawiria, Unus. 2005. *Chlorella Untuk Kesehatan dan Kebugaran*. Jakarta : Papas Sinar Sinanti.

Twidawita, Yoffi. 2006. Skripsi : "*Penentuan Kecepatan Supervisial ( $U_G$ )  $CO_2$  Optimum Untuk Peningkatan Produksi Biomassa Chlorella sp. Dalam Fotobioreaktor Kolom Gelembung Skala Menengah*". Depok : Departemen Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Ugwu et al. 2007. *Photobioreactors for Mass Cultivation of Algae*. Jepang : Institute of Life Sciences and Bioengineering, University of Tsukuba.

Welty, J.R et al. *Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer*.

Wijanarko, A dan K. Ohtaguchi. 2004. *Carbon Dioxide Utilization for Global Sustainability : Reactor in series approximation, an enhancement effort of  $CO_2$  fixation and biomass production by Anabaena cylindrica*. Study in Surface Science and Catalysis Vol 153 pp:461-468.

Wijayanti, Yureana. 2008. *Pengaruh Debit Terhadap Dinamika Gelembung Udara Dalam Kolom Aerator*. Yogyakarta : Teknik Lingkungan.

Wirosaputro, Sukiman. 2002. *Chlorella Untuk Kesehatan Global*. Gadjah Mada : University Press.

## LAMPIRAN A DATA HASIL PENELITIAN

### 1. Kecepatan Superfisial 33,405 m/h

| t (jam) | pH   | [HCO <sup>3-</sup> ] | N sel (sel/L) | X sel (gr/L) | μ (/h) | I <sub>b</sub> (lux) | Ex        | E            |
|---------|------|----------------------|---------------|--------------|--------|----------------------|-----------|--------------|
| 0       | 7,26 | 0,0020               | 1,52E+06      | 1,087        | 0,0290 | 1050                 | 74.580,29 | 17.743,29    |
| 4       | 7,76 | 0,0063               | 1,62E+06      | 1,1543       | 0,0262 | 723,33               | 64.221,91 | 51.182,56    |
| 8       | 6,87 | 0,0008               | 1,71E+06      | 1,2216       | 0,0242 | 613,33               | 65.346,54 | 73.138,83    |
| 12      | 6,66 | 0,0005               | 1,83E+06      | 1,3058       | 0,0231 | 600,67               | 74.663,16 | 86.903,11    |
| 16      | 7,16 | 0,0016               | 2,14E+06      | 1,5246       | 0,0251 | 543                  | 77.137,33 | 107.509,84   |
| 20      | 6,78 | 0,0007               | 2,09E+06      | 1,4909       | 0,0217 | 499                  | 79.747,64 | 127.980,42   |
| 24      | 6,56 | 0,0004               | 2,33E+06      | 1,6592       | 0,0222 | 459,33               | 81.564,79 | 149.244,16   |
| 28      | 6,48 | 0,0003               | 2,56E+06      | 1,8275       | 0,0224 | 372                  | 72.662,51 | 181.227,34   |
| 32      | 6,33 | 0,0002               | 2,80E+06      | 1,9958       | 0,0223 | 361,33               | 76.995,27 | 199.975,48   |
| 36      | 6,42 | 0,0003               | 2,75E+06      | 1,9622       | 0,0203 | 314,33               | 72.561,89 | 227.489,76   |
| 40      | 6,51 | 0,0004               | 3,03E+06      | 2,1641       | 0,0206 | 274                  | 68.116,66 | 255.015,87   |
| 44      | 6,84 | 0,0008               | 2,94E+06      | 2,0968       | 0,0187 | 272                  | 72.449,42 | 273.764,01   |
| 48      | 6,52 | 0,0004               | 2,85E+06      | 2,0295       | 0,0170 | 233                  | 66.198,88 | 303.095,44   |
| 52      | 6,53 | 0,0004               | 3,03E+06      | 2,1641       | 0,0170 | 130                  | 70.135,07 | 322.240,16   |
| 56      | 6,5  | 0,0003               | 2,99E+06      | 2,1305       | 0,0158 | 120                  | 56.467,93 | 358.988,19   |
| 60      | 6,44 | 0,0003               | 3,03E+06      | 2,1641       | 0,0152 | 115                  | 55.106,55 | 383.430,47   |
| 64      | 6,48 | 0,0003               | 3,15E+06      | 2,2483       | 0,0149 | 106,67               | 60.374,52 | 401.243,39   |
| 68      | 6,59 | 0,0004               | 3,22E+06      | 2,2988       | 0,0144 | 93,333               | 48.477,19 | 436.221,62   |
| 72      | 6,52 | 0,0004               | 2,99E+06      | 2,1305       | 0,0129 | 78,333               | 49.483,43 | 458.296,27   |
| 76      | 6,28 | 0,0002               | 3,36E+06      | 2,3964       | 0,0136 | 71,667               | 49.009,90 | 481.850,69   |
| 80      | 6,48 | 0,0003               | 3,44E+06      | 2,4503       | 0,0133 | 61,667               | 49.009,90 | 504.931,59   |
| 84      | 6,51 | 0,0004               | 3,98E+06      | 2,8408       | 0,0143 | 56,667               | 47.352,56 | 529.669,82   |
| 88      | 6,16 | 0,0002               | 4,03E+06      | 2,8778       | 0,0138 | 55                   | 43.090,83 | 557.012,45   |
| 92      | 6,46 | 0,0003               | 4,11E+06      | 2,9316       | 0,0135 | 48,333               | 39.953,73 | 583.230,45   |
| 96      | 6,78 | 0,0007               | 4,20E+06      | 2,9967       | 0,0132 | 48,333               | 38.947,48 | 607.317,59   |
| 100     | 6,54 | 0,0004               | 4,38E+06      | 3,1224       | 0,0131 | 43,5                 | 36.905,40 | 632.440,56   |
| 104     | 6,57 | 0,0004               | 4,55E+06      | 3,2481       | 0,0130 | 32,333               | 32.850,84 | 659.576,02   |
| 108     | 6,54 | 0,0004               | 4,86E+06      | 3,4635       | 0,0131 | 27                   | 31.193,50 | 684.314,26   |
| 112     | 6,45 | 0,0003               | 4,63E+06      | 3,3019       | 0,0123 | 25                   | 31.252,69 | 707.335,96   |
| 116     | 6,44 | 0,0003               | 4,82E+06      | 3,4366       | 0,0122 | 22,333               | 28.322,75 | 733.346,80   |
| 120     | 6,53 | 0,0004               | 4,84E+06      | 3,45         | 0,0119 | 20                   | 29.181,02 | 755.569,43   |
| 124     | 6,61 | 0,0004               | 5,01E+06      | 3,5712       | 0,0118 | 20                   | 27.035,35 | 780.795,99   |
| 128     | 6,69 | 0,0005               | 5,16E+06      | 3,6834       | 0,0117 | 18,167               | 22.480,63 | 808.431,61   |
| 132     | 6,73 | 0,0006               | 5,27E+06      | 3,7597       | 0,0115 | 17                   | 26.280,67 | 827.712,46   |
| 136     | 6,75 | 0,0006               | 5,39E+06      | 3,845        | 0,0114 | 16,333               | 21.817,69 | 855.256,33   |
| 140     | 6,77 | 0,0006               | 5,52E+06      | 3,9393       | 0,0112 | 15                   | 18.698,34 | 881.456,58   |
| 144     | 7,79 | 0,0067               | 5,68E+06      | 4,0548       | 0,0111 | 13                   | 17.757,21 | 905.478,61   |
| 148     | 6,71 | 0,0006               | 5,75E+06      | 4,0997       | 0,0109 | 11,333               | 16.259,69 | 930.057,03   |
| 152     | 6,88 | 0,0008               | 5,63E+06      | 4,0156       | 0,0105 | 11,333               | 14.916,06 | 954.481,55   |
| 156     | 6,82 | 0,0007               | 6,38E+06      | 4,5542       | 0,0110 | 11                   | 15.271,20 | 977.207,30   |
| 160     | 6,75 | 0,0006               | 5,83E+06      | 4,1614       | 0,0102 | 11                   | 14.274,58 | 1.007.055,04 |
| 164     | 6,74 | 0,0006               | 5,66E+06      | 4,038        | 0,0099 | 9,6667               | 13.584,27 | 1.025.056,03 |
| 168     | 6,72 | 0,0006               | 5,71E+06      | 4,0717       | 0,0097 | 8,3333               | 13.341,58 | 1.048.379,60 |

|     |      |        |          |        |        |        |           |              |
|-----|------|--------|----------|--------|--------|--------|-----------|--------------|
| 172 | 6,65 | 0,0005 | 6,03E+06 | 4,3017 | 0,0098 | 8,6667 | 12.518,83 | 1.072.283,25 |
| 177 | 6,7  | 0,0005 | 6,05E+06 | 4,3185 | 0,0096 | 9,3333 | 11.080,50 | 1.096.802,48 |
| 180 | 6,68 | 0,0005 | 6,30E+06 | 4,4924 | 0,0096 | 7,3333 | 9.861,17  | 1.121.102,70 |
| 184 | 6,73 | 0,0006 | 6,23E+06 | 4,4476 | 0,0094 | 7,3333 | 10.062,42 | 1.143.982,35 |
| 188 | 6,84 | 0,0008 | 6,32E+06 | 4,5093 | 0,0093 | 8,1933 | 9.961,80  | 1.167.163,87 |
| 192 | 6,8  | 0,0007 | 6,64E+06 | 4,7337 | 0,0093 | 7,1667 | 10.157,12 | 1.190.049,44 |
| 196 | 6,82 | 0,0007 | 6,46E+06 | 4,6046 | 0,0090 | 7,3333 | 9.097,61  | 1.214.189,85 |
| 200 | 6,44 | 0,0003 | 5,77E+06 | 4,1165 | 0,0083 | 5,6667 | 7.990,75  | 1.238.377,61 |
| 204 | 6,65 | 0,0005 | 5,57E+06 | 3,9763 | 0,0080 | 4,6667 | 8.464,27  | 1.260.984,98 |
| 208 | 6,81 | 0,0007 | 6,36E+06 | 4,5373 | 0,0085 | 5      | 9.281,10  | 1.283.249,04 |
| 212 | 6,9  | 0,0009 | 6,79E+06 | 4,8403 | 0,0086 | 4,6667 | 7.422,51  | 1.308.188,52 |
| 216 | 6,97 | 0,0010 | 6,67E+06 | 4,7561 | 0,0084 | 4      | 7.552,73  | 1.331.139,20 |
| 220 | 6,92 | 0,0009 | 6,35E+06 | 4,5317 | 0,0080 | 3,3333 | 8.583,95  | 1.353.188,88 |
| 224 | 6,86 | 0,0008 | 6,39E+06 | 4,5598 | 0,0079 | 3,3333 | 7.635,60  | 1.377.218,12 |
| 228 | 6,89 | 0,0008 | 6,42E+06 | 4,5766 | 0,0078 | 3      | 7.943,39  | 1.399.991,23 |
| 232 | 6,92 | 0,0009 | 7,10E+06 | 5,0647 | 0,0081 | 3      | 6.238,70  | 1.424.776,82 |
| 236 | 6,91 | 0,0009 | 6,60E+06 | 4,7056 | 0,0077 | 3      | 5.220,62  | 1.448.875,79 |
| 240 | 6,98 | 0,0010 | 7,26E+06 | 5,1803 | 0,0079 | 3,3333 | 5.682,31  | 1.471.495,00 |
| 244 | 7,04 | 0,0012 | 6,80E+06 | 4,8515 | 0,0075 | 2,6667 | 5.386,35  | 1.494.871,85 |
| 248 | 7,13 | 0,0015 | 7,55E+06 | 5,3822 | 0,0078 | 4      | 4.687,90  | 1.518.651,19 |
| 252 | 6,86 | 0,0008 | 6,93E+06 | 4,9413 | 0,0074 | 2,6667 | 3.965,78  | 1.542.454,22 |
| 256 | 7,11 | 0,0014 | 6,36E+06 | 4,5373 | 0,0070 | 2,6667 | 4.024,97  | 1.565.475,92 |
| 260 | 6,95 | 0,0010 | 7,30E+06 | 5,2072 | 0,0074 | 2      | 3.675,74  | 1.588.906,04 |
| 264 | 7,05 | 0,0012 | 7,41E+06 | 5,288  | 0,0073 | 2      | 3.729,01  | 1.611.933,67 |
| 268 | 6,96 | 0,0010 | 6,85E+06 | 4,884  | 0,0069 | 2      | 3.782,29  | 1.634.961,29 |
| 272 | 6,89 | 0,0008 | 7,72E+06 | 5,5102 | 0,0072 | 2      | 4.261,73  | 1.657.562,74 |
| 276 | 7,91 | 0,0088 | 6,59E+06 | 4,7    | 0,0066 | 2      | 3.456,74  | 1.681.448,63 |
| 280 | 8    | 0,0109 | 7,66E+06 | 5,463  | 0,0070 | 2      | 5.256,13  | 1.702.730,13 |
| 284 | 7,2  | 0,0017 | 6,31E+06 | 4,498  | 0,0063 | 2      | 3.551,44  | 1.727.515,71 |
| 288 | 7,42 | 0,0029 | 6,68E+06 | 4,7673 | 0,0064 | 2      | 3.598,79  | 1.750.549,26 |
| 292 | 7,1  | 0,0014 | 7,47E+06 | 5,3284 | 0,0067 | 1,3333 | 2.734,61  | 1.774.494,34 |
| 296 | 7,29 | 0,0021 | 7,38E+06 | 5,2611 | 0,0065 | 1,3333 | 2.770,12  | 1.797.539,72 |
| 300 | 7,11 | 0,0014 | 7,76E+06 | 5,5371 | 0,0066 | 1      | 2.805,64  | 1.820.585,10 |
| 304 | 7,21 | 0,0018 | 7,92E+06 | 5,6515 | 0,0066 | 1      | 2.841,15  | 1.843.630,48 |
| 308 | 7,14 | 0,0015 | 8,29E+06 | 5,9141 | 0,0067 | 1      | 2.876,67  | 1.866.675,86 |
| 312 | 7,09 | 0,0013 | 6,85E+06 | 4,884  | 0,0060 | 1      | 2.912,18  | 1.889.721,24 |
| 316 | 7,12 | 0,0014 | 7,97E+06 | 5,6852 | 0,0064 | 1      | 1.965,13  | 1.913.749,19 |
| 320 | 7,14 | 0,0015 | 8,00E+06 | 5,7054 | 0,0063 | 1      | 1.988,81  | 1.936.806,41 |
| 324 | 8,01 | 0,0111 | 7,89E+06 | 5,6246 | 0,0062 | 1      | 1.513,80  | 1.966.132,53 |
| 328 | 8,39 | 0,0267 | 7,72E+06 | 5,5102 | 0,0061 | 1      | 1.531,56  | 1.989.195,67 |
| 332 | 8,54 | 0,0377 | 8,15E+06 | 5,8131 | 0,0062 | 1      | 1.544,88  | 2.006.493,02 |
| 336 | 8,48 | 0,0329 | 8,05E+06 | 5,7458 | 0,0061 | 1      | 1.562,63  | 2.029.556,16 |
| 341 | 8,72 | 0,0571 | 7,90E+06 | 5,6381 | 0,0059 | 1      | 1.580,39  | 2.052.619,30 |
| 345 | 8,32 | 0,0227 | 7,74E+06 | 5,5236 | 0,0058 | 1      | 1.598,15  | 2.075.682,44 |
| 348 | 7,11 | 0,0014 | 7,78E+06 | 5,5505 | 0,0058 | 1      | 1.615,91  | 2.098.745,58 |
| 352 | 7,53 | 0,0037 | 6,98E+06 | 4,9783 | 0,0054 | 1      | 1.633,66  | 2.121.808,72 |

## 2. Kecepatan Superfisial 15,885 m/h

| t (jam) | pH   | [HCO <sup>3-</sup> ] | N sel (sel/L) | X sel (gr/L) | μ (/h) | I <sub>b</sub> (lux) | Ex        | E            |
|---------|------|----------------------|---------------|--------------|--------|----------------------|-----------|--------------|
| 0       | 6,38 | 0,0003               | 2,45E+06      | 1,749        | 0,0322 | 349,67               | 48.828,65 | 298.790,72   |
| 4       | 6,44 | 0,0003               | 2,50E+06      | 1,7804       | 0,0297 | 330,33               | 50.900,83 | 332.679,16   |
| 8       | 6,55 | 0,0004               | 2,74E+06      | 1,9521       | 0,0275 | 297,67               | 54.467,36 | 401.033,88   |
| 12      | 6,54 | 0,0004               | 2,82E+06      | 2,0127       | 0,0262 | 262,33               | 51.791,66 | 439.670,21   |
| 16      | 6,58 | 0,0004               | 3,11E+06      | 2,218        | 0,0266 | 224                  | 47.459,50 | 479.962,99   |
| 20      | 6,54 | 0,0004               | 3,33E+06      | 2,3729       | 0,0258 | 210                  | 48.538,13 | 526.831,86   |
| 25      | 6,53 | 0,0004               | 2,71E+06      | 1,9319       | 0,0199 | 226,33               | 56.672,76 | 566.644,73   |
| 29      | 6,16 | 0,0002               | 2,60E+06      | 1,8511       | 0,0177 | 198                  | 53.391,94 | 617.873,04   |
| 32      | 6,29 | 0,0002               | 2,91E+06      | 2,0733       | 0,0184 | 180,67               | 52.197,75 | 667.014,74   |
| 38      | 6,5  | 0,0003               | 3,20E+06      | 2,2853       | 0,0188 | 152,67               | 47.048,60 | 720.111,39   |
| 41      | 6,42 | 0,0003               | 3,21E+06      | 2,2887       | 0,0177 | 143,67               | 47.042,18 | 768.065,30   |
| 44      | 6,53 | 0,0004               | 3,89E+06      | 2,7768       | 0,0189 | 139                  | 49.530,08 | 837.498,65   |
| 48      | 6,41 | 0,0003               | 3,54E+06      | 2,5277       | 0,0169 | 128,33               | 47.583,10 | 875.406,26   |
| 52      | 6,56 | 0,0004               | 3,82E+06      | 2,7229       | 0,0172 | 114                  | 43.915,45 | 915.034,53   |
| 56      | 6,49 | 0,0003               | 3,58E+06      | 2,5546       | 0,0154 | 110,33               | 45.159,40 | 973.724,95   |
| 60      | 6,58 | 0,0004               | 4,19E+06      | 2,9877       | 0,0167 | 110                  | 46.612,01 | 1.008.232,97 |
| 64      | 6,45 | 0,0003               | 4,71E+06      | 3,3603       | 0,0172 | 81,333               | 36.031,21 | 1.066.761,26 |
| 68      | 6,64 | 0,0005               | 4,23E+06      | 3,0192       | 0,0154 | 92,333               | 42.682,73 | 1.108.057,24 |
| 74      | 6,66 | 0,0005               | 4,15E+06      | 2,9608       | 0,0146 | 90                   | 43.337,61 | 1.155.349,86 |
| 77      | 6,6  | 0,0004               | 5,01E+06      | 3,5712       | 0,0158 | 87,667               | 43.902,61 | 1.202.732,36 |
| 80      | 6,76 | 0,0006               | 4,82E+06      | 3,4366       | 0,0148 | 89,333               | 46.888,09 | 1.259.681,26 |
| 85      | 6,49 | 0,0003               | 4,63E+06      | 3,3019       | 0,0140 | 76,667               | 41.347,29 | 1.301.182,68 |
| 88      | 6,5  | 0,0003               | 4,56E+06      | 3,2526       | 0,0133 | 74,333               | 41.878,58 | 1.360.585,76 |
| 92      | 6,62 | 0,0005               | 5,66E+06      | 4,038        | 0,0148 | 73                   | 42.181,94 | 1.396.243,02 |
| 96      | 6,76 | 0,0006               | 5,82E+06      | 4,1502       | 0,0145 | 66,667               | 39.806,40 | 1.446.566,07 |
| 100     | 6,65 | 0,0005               | 5,46E+06      | 3,8944       | 0,0134 | 67,333               | 41.825,61 | 1.504.481,23 |
| 104     | 6,68 | 0,0005               | 5,24E+06      | 3,7373       | 0,0126 | 69                   | 44.522,18 | 1.561.719,04 |
| 109     | 6,7  | 0,0005               | 5,34E+06      | 3,8091       | 0,0126 | 69                   | 45.186,69 | 1.585.028,28 |
| 112     | 6,67 | 0,0005               | 5,30E+06      | 3,7777       | 0,0122 | 67,667               | 45.616,85 | 1.632.545,61 |
| 117     |      |                      |               |              |        |                      |           |              |
| 120     |      |                      |               |              |        |                      |           |              |
| 124     | 6,86 | 0,0008               | 5,61E+06      | 4,0043       | 0,0117 | 65,667               | 47.746,81 | 1.762.271,27 |
| 129     | 6,71 | 0,0006               | 5,75E+06      | 4,0997       | 0,0114 | 63,333               | 47.880,04 | 1.834.059,30 |
| 134     | 6,66 | 0,0005               | 5,55E+06      | 3,9595       | 0,0109 | 60,333               | 46.483,60 | 1.871.416,35 |
| 136     |      |                      |               |              |        |                      |           |              |
| 140     | 6,72 | 0,0006               | 5,90E+06      | 4,2119       | 0,0108 | 58,333               | 47.189,85 | 1.966.605,11 |
| 144     | 6,64 | 0,0005               | 7,05E+06      | 5,0254       | 0,0116 | 57                   | 47.209,11 | 2.014.533,35 |
| 148     | 6,62 | 0,0005               | 5,93E+06      | 4,2288       | 0,0103 | 58                   | 49.154,48 | 2.060.535,47 |
| 151     | 6,67 | 0,0005               | 5,76E+06      | 4,1109       | 0,0099 | 55                   | 47.936,22 | 2.121.688,11 |
| 157     | 6,69 | 0,0005               | 5,99E+06      | 4,2736       | 0,0099 | 50,333               | 44.838,38 | 2.172.733,45 |
| 160     | 6,5  | 0,0003               | 5,44E+06      | 3,8809       | 0,0092 | 49                   | 44.358,46 | 2.209.173,99 |
| 164     | 6,55 | 0,0004               | 5,65E+06      | 4,0324       | 0,0092 | 44                   | 40.679,57 | 2.260.800,38 |
| 168     | 6,73 | 0,0006               | 5,60E+06      | 3,9931       | 0,0090 | 50,333               | 47.504,45 | 2.301.923,00 |
| 172     | 6,51 | 0,0004               | 5,17E+06      | 3,6902       | 0,0084 | 42                   | 40.448,44 | 2.356.926,51 |
| 176     | 6,74 | 0,0006               | 5,90E+06      | 4,2119       | 0,0088 | 47,333               | 46.724,37 | 2.410.584,95 |
| 181     | 6,67 | 0,0005               | 5,30E+06      | 3,7799       | 0,0082 | 43,333               | 43.401,82 | 2.449.868,13 |
| 185     | 6,73 | 0,0006               | 5,76E+06      | 4,1053       | 0,0084 | 40,333               | 41.173,94 | 2.500.043,50 |

|     |      |        |          |        |        |        |           |              |
|-----|------|--------|----------|--------|--------|--------|-----------|--------------|
| 188 | 6,79 | 0,0007 | 5,13E+06 | 3,6565 | 0,0077 | 41,667 | 43.337,61 | 2.545.827,33 |
| 192 | 6,82 | 0,0007 | 5,24E+06 | 3,7407 | 0,0077 | 40     | 42.374,56 | 2.594.737,89 |
| 196 | 6,82 | 0,0007 | 6,43E+06 | 4,5878 | 0,0085 | 39,667 | 42.785,46 | 2.642.274,48 |
| 200 | 6,76 | 0,0006 | 5,71E+06 | 4,0717 | 0,0078 | 39     | 43.005,36 | 2.701.988,96 |
| 205 | 6,81 | 0,0007 | 5,53E+06 | 3,9426 | 0,0075 | 37,333 | 41.706,84 | 2.739.248,10 |
| 208 | 6,76 | 0,0006 | 5,99E+06 | 4,2736 | 0,0077 | 35,667 | 40.531,90 | 2.788.370,53 |
| 212 | 6,78 | 0,0007 | 6,31E+06 | 4,498  | 0,0078 | 33,667 | 38.907,55 | 2.837.942,39 |
| 216 | 7,02 | 0,0011 | 6,11E+06 | 4,3578 | 0,0076 | 37     | 43.472,44 | 2.881.324,99 |
| 220 |      | 0,0020 | 6,47E+06 | 4,6159 | 0,0077 | 32,333 | 38.612,21 | 2.934.132,73 |
| 224 |      |        |          |        |        |        |           |              |
| 229 | 6,69 | 0,0005 | 6,72E+06 | 4,7954 | 0,0076 | 32     | 39.446,86 | 3.029.193,07 |
| 232 | 6,77 | 0,0006 | 6,56E+06 | 4,6776 | 0,0074 | 35     | 43.819,14 | 3.072.768,29 |
| 236 | 6,75 | 0,0006 | 6,22E+06 | 4,4363 | 0,0071 | 38     | 48.306,99 | 3.116.227,94 |
| 240 |      | 0,0000 | 5,83E+06 | 4,1614 | 0,0067 | 38,667 | 49.899,25 | 3.162.583,18 |
| 244 | 6,74 | 0,0006 | 5,97E+06 | 4,2568 | 0,0067 | 38     | 49.770,84 | 3.210.659,09 |
| 248 | 6,88 | 0,0008 | 6,25E+06 | 4,4588 | 0,0068 | 38     | 50.502,77 | 3.257.874,66 |
| 252 | 6,75 | 0,0006 | 6,10E+06 | 4,3522 | 0,0066 | 37,333 | 50.335,84 | 3.305.989,09 |
| 256 | 6,85 | 0,0008 | 5,82E+06 | 4,1502 | 0,0063 | 37     | 50.599,07 | 3.353.673,35 |
| 260 | 6,87 | 0,0008 | 5,69E+06 | 4,0604 | 0,0062 | 36,667 | 50.849,47 | 3.401.370,46 |
| 264 | 6,82 | 0,0007 | 5,96E+06 | 4,2512 | 0,0062 | 37,667 | 52.961,77 | 3.447.205,65 |
| 268 | 6,89 | 0,0008 | 6,44E+06 | 4,5934 | 0,0064 | 37,333 | 53.212,17 | 3.494.902,75 |
| 272 | 6,93 | 0,0009 | 6,70E+06 | 4,7786 | 0,0064 | 34,667 | 50.245,95 | 3.557.803,34 |
| 276 | 6,78 | 0,0007 | 6,45E+06 | 4,599  | 0,0063 | 37,333 | 54.650,34 | 3.589.359,58 |
| 280 | 6,95 | 0,0010 | 6,39E+06 | 4,5609 | 0,0061 | 35     | 51.908,83 | 3.640.048,59 |
| 284 | 6,88 | 0,0008 | 6,38E+06 | 4,5542 | 0,0061 | 32,333 | 48.576,65 | 3.691.328,27 |
| 288 | 6,9  | 0,0009 | 6,50E+06 | 4,6349 | 0,0060 | 36     | 54.778,74 | 3.733.073,67 |
| 292 | 6,97 | 0,0010 | 6,48E+06 | 4,6215 | 0,0060 | 32     | 49.308,57 | 3.786.491,34 |
| 296 | 6,85 | 0,0008 | 6,66E+06 | 4,7494 | 0,0059 | 34,667 | 54.252,27 | 3.841.482,02 |
| 301 | 6,97 | 0,0010 | 6,69E+06 | 4,7696 | 0,0059 | 33,667 | 53.173,65 | 3.878.521,27 |
| 304 |      |        |          |        |        |        |           |              |
| 308 | 6,89 | 0,0008 | 5,90E+06 | 4,2108 | 0,0054 | 36,333 | 58.785,07 | 3.968.804,84 |
| 312 | 6,75 | 0,0006 | 6,16E+06 | 4,3926 | 0,0054 | 35,333 | 58.017,83 | 4.029.506,45 |
| 316 | 6,76 | 0,0006 | 6,31E+06 | 4,5003 | 0,0055 | 35,667 | 59.080,40 | 4.064.404,50 |
| 320 | 6,81 | 0,0007 | 6,68E+06 | 4,7629 | 0,0055 | 33,333 | 56.017,88 | 4.127.401,40 |
| 325 | 6,93 | 0,0009 | 6,37E+06 | 4,5474 | 0,0054 | 33,667 | 57.064,40 | 4.162.315,50 |
| 328 | 6,88 | 0,0008 | 5,87E+06 | 4,1906 | 0,0051 | 33,333 | 57.141,45 | 4.210.185,96 |
| 332 | 6,96 | 0,0010 | 6,14E+06 | 4,3791 | 0,0051 | 28,667 | 49.693,80 | 4.265.581,11 |
| 336 | 7,03 | 0,0012 | 6,10E+06 | 4,3522 | 0,0051 | 36     | 63.099,57 | 4.300.122,84 |
| 341 | 7,18 | 0,0016 | 6,64E+06 | 4,7359 | 0,0052 | 35     | 62.020,94 | 4.349.148,96 |

### 3. Kecepatan Superfisial 11,917 m/h

| t (jam) | pH   | [HCO <sup>3</sup> ] | N sel (sel/L) | X sel (gr/L) | μ (/h) | I <sub>b</sub> (lux) | Ex        | E          |
|---------|------|---------------------|---------------|--------------|--------|----------------------|-----------|------------|
| 0       | 6,2  | 0,0002              | 2,18E+06      | 1,5537       | 0,0293 | 398                  | 23.636,88 | 126.345,25 |
| 5       | 6,1  | 0,0001              | 2,25E+06      | 1,6054       | 0,0258 | 347,33               | 24.753,40 | 155.225,16 |
| 8       | 6,29 | 0,0002              | 2,37E+06      | 1,6884       | 0,0239 | 277                  | 23.031,11 | 186.943,88 |
| 12      |      |                     | 2,46E+06      | 1,7535       | 0,0221 | 252,67               | 24.009,05 | 215.962,36 |
| 16      | 6,6  | 0,0004              | 2,68E+06      | 1,9106       | 0,0220 | 198                  | 21.166,29 | 248.801,55 |
| 20      | 6,4  | 0,0003              | 2,89E+06      | 2,0632       | 0,0212 | 152                  | 18.505,66 | 288.957,72 |



|     |      |        |          |        |        |         |           |              |
|-----|------|--------|----------|--------|--------|---------|-----------|--------------|
| 24  | 6,3  | 0,0002 | 2,67E+06 | 1,905  | 0,0179 | 139     | 18.161,20 | 311.799,49   |
| 28  | 6,41 | 0,0003 | 2,83E+06 | 2,0194 | 0,0177 | 125,33  | 17.864,26 | 342.092,87   |
| 32  | 6,54 | 0,0004 | 2,90E+06 | 2,0665 | 0,0168 | 107,67  | 16.625,00 | 373.328,55   |
| 36  | 6,26 | 0,0002 | 3,53E+06 | 2,5176 | 0,0191 | 84,333  | 14.023,76 | 405.926,22   |
| 41  | 6,28 | 0,0002 | 3,47E+06 | 2,4772 | 0,0173 | 77      | 13.947,54 | 443.497,97   |
| 44  | 6,38 | 0,0003 | 3,46E+06 | 2,4671 | 0,0164 | 65,667  | 12.479,64 | 467.463,19   |
| 48  | 6,63 | 0,0005 | 2,66E+06 | 1,8982 | 0,0116 | 60      | 12.115,39 | 497.823,87   |
| 52  | 6,52 | 0,0004 | 3,82E+06 | 2,7263 | 0,0159 | 51,333  | 10.975,12 | 528.960,57   |
| 56  | 6,46 | 0,0003 | 4,14E+06 | 2,9518 | 0,0162 | 45,667  | 10.306,00 | 559.626,12   |
| 61  | 6,38 | 0,0003 | 4,17E+06 | 2,9743 | 0,0154 | 42,333  | 10.056,56 | 589.871,98   |
| 64  | 6,38 | 0,0003 | 4,37E+06 | 3,1179 | 0,0153 | 34,333  | 8.563,92  | 621.361,05   |
| 68  | 6,47 | 0,0003 | 4,59E+06 | 3,275  | 0,0151 | 27,333  | 7.142,54  | 652.778,86   |
| 72  | 6,42 | 0,0003 | 4,67E+06 | 3,3289 | 0,0147 | 24,667  | 6.738,69  | 683.179,13   |
| 76  | 6,52 | 0,0004 | 4,49E+06 | 3,2032 | 0,0136 | 21,667  | 6.176,47  | 713.737,78   |
| 80  | 6,42 | 0,0003 | 5,09E+06 | 3,6341 | 0,0142 | 19      | 5.698,39  | 751.711,39   |
| 84  | 6,43 | 0,0003 | 4,82E+06 | 3,4366 | 0,0133 | 17,333  | 5.352,94  | 774.554,16   |
| 88  | 6,51 | 0,0004 | 5,22E+06 | 3,7238 | 0,0134 | 14,333  | 4.639,28  | 812.763,35   |
| 92  | 6,52 | 0,0004 | 5,25E+06 | 3,7463 | 0,0131 | 11,667  | 3.880,09  | 836.019,87   |
| 96  | 6,41 | 0,0003 | 5,79E+06 | 4,1334 | 0,0135 | 11      | 3.789,03  | 866.107,36   |
| 101 | 6,49 | 0,0003 | 4,83E+06 | 3,4433 | 0,0114 | 9,6667  | 3.473,28  | 903.918,64   |
| 104 | 6,6  | 0,0004 | 5,72E+06 | 4,0829 | 0,0125 | 8,3333  | 3.068,44  | 926.820,80   |
| 109 | 6,33 | 0,0002 | 6,32E+06 | 4,5093 | 0,0129 | 7       | 2.660,63  | 957.225,03   |
| 112 | 6,43 | 0,0003 | 5,68E+06 | 4,0548 | 0,0117 | 6,3333  | 2.482,47  | 987.399,63   |
| 116 | 6,76 | 0,0006 | 5,54E+06 | 3,9538 | 0,0112 | 5,3333  | 2.153,85  | 1.017.724,67 |
| 121 | 6,6  | 0,0004 | 5,54E+06 | 3,9538 | 0,0108 | 4,6667  | 1.953,90  | 1.055.420,15 |
| 124 | 6,58 | 0,0004 | 6,41E+06 | 4,571  | 0,0116 | 4       | 1.710,41  | 1.078.160,97 |
| 128 | 6,66 | 0,0005 | 6,51E+06 | 4,6439 | 0,0114 | 3,5     | 1.538,18  | 1.108.329,62 |
| 132 | 6,52 | 0,0004 | 6,82E+06 | 4,8627 | 0,0114 | 3       | 1.354,07  | 1.138.510,16 |
| 136 | 6,53 | 0,0004 | 6,29E+06 | 4,4868 | 0,0106 | 2,6667  | 1.235,29  | 1.168.625,36 |
| 141 | 6,42 | 0,0003 | 7,18E+06 | 5,1197 | 0,0111 | 2       | 950,23    | 1.198.906,86 |
| 144 | 6,72 | 0,0006 | 7,27E+06 | 5,187  | 0,0109 | 2       | 973,98    | 1.228.879,53 |
| 148 | 6,79 | 0,0007 | 6,34E+06 | 4,5205 | 0,0098 | 2       | 997,74    | 1.258.852,20 |
| 152 | 6,64 | 0,0005 | 7,65E+06 | 5,4563 | 0,0107 | 1,8333  | 936,37    | 1.288.909,99 |
| 156 | 6,57 | 0,0004 | 7,55E+06 | 5,3822 | 0,0104 | 1,1667  | 609,73    | 1.319.233,06 |
| 160 | 6,59 | 0,0004 | 8,13E+06 | 5,7996 | 0,0106 | 1       | 534,50    | 1.349.304,72 |
| 164 | 6,37 | 0,0003 | 8,62E+06 | 6,1497 | 0,0107 | 1       | 546,38    | 1.379.289,26 |
| 168 | 6,37 | 0,0003 | 9,44E+06 | 6,731  | 0,0109 | 1       | 558,26    | 1.409.273,81 |
| 172 | 6,35 | 0,0002 | 8,20E+06 | 5,8513 | 0,0100 | 0,66667 | 380,09    | 1.439.448,41 |
| 176 | 6,74 | 0,0006 | 7,84E+06 | 5,5921 | 0,0095 | 1       | 582,01    | 1.469.242,91 |
| 180 |      | 0,0045 | 7,44E+06 | 5,3093 | 0,0091 | 0       |           | 1.499.821,35 |
| 184 | 6,59 | 0,0004 | 8,92E+06 | 6,3618 | 0,0098 | 0,33333 | 201,92    | 1.529.615,86 |
| 188 | 6,97 | 0,0010 | 7,47E+06 | 5,325  | 0,0087 | 0,33333 | 205,88    | 1.559.608,32 |

#### 4. Kecepatan Superfisial 8,875 m/h

| t (jam) | pH   | [HCO <sup>3-</sup> ] | N sel (sel/L) | X sel (gr/L) | μ (/h) | I <sub>b</sub> (lux) | Ex        | E          |
|---------|------|----------------------|---------------|--------------|--------|----------------------|-----------|------------|
| 0       | 6,48 | 0,0003               | 3,10E+06      | 2,2146       | 0,0223 | 189,33               | 33.837,05 | 442.933,77 |
| 4       | 6,5  | 0,0003               | 3,14E+06      | 2,2382       | 0,0209 | 168,33               | 32.398,15 | 481.047,34 |
| 8       | 6,35 | 0,0002               | 3,10E+06      | 2,2113       | 0,0190 | 143                  | 29.979,75 | 529.309,10 |

|     |      |        |          |        |        |        |           |              |
|-----|------|--------|----------|--------|--------|--------|-----------|--------------|
| 12  | 6,37 | 0,0003 | 3,09E+06 | 2,2045 | 0,0178 | 117    | 26.137,33 | 569.826,19   |
| 16  | 6,28 | 0,0002 | 3,31E+06 | 2,3594 | 0,0180 | 97,667 | 22.825,35 | 600.644,18   |
| 20  | 6,81 | 0,0007 | 2,93E+06 | 2,0901 | 0,0153 | 97     | 24.003,04 | 636.141,16   |
| 24  | 6,31 | 0,0002 | 3,30E+06 | 2,356  | 0,0161 | 80,333 | 20.983,19 | 675.835,70   |
| 28  | 6,45 | 0,0003 | 4,52E+06 | 3,2211 | 0,0192 | 76     | 20.896,12 | 712.597,44   |
| 32  | 6,51 | 0,0004 | 3,49E+06 | 2,4907 | 0,0152 | 72     | 20.786,14 | 749.382,10   |
| 37  | 6,4  | 0,0003 | 3,80E+06 | 2,7128 | 0,0155 | 59     | 17.844,19 | 788.998,73   |
| 41  | 6,43 | 0,0003 | 3,61E+06 | 2,5721 | 0,0141 | 55     | 17.579,55 | 835.106,72   |
| 44  | 6,57 | 0,0004 | 3,80E+06 | 2,7128 | 0,0142 | 52,667 | 17.376,77 | 862.815,50   |
| 48  | 6,63 | 0,0005 | 3,86E+06 | 2,7566 | 0,0138 | 50,667 | 17.413,43 | 899.453,52   |
| 52  | 6,65 | 0,0005 | 3,58E+06 | 2,5513 | 0,0125 | 45     | 16.084,51 | 937.457,12   |
| 56  | 6,62 | 0,0005 | 3,78E+06 | 2,696  | 0,0127 | 44,667 | 16.425,91 | 964.621,73   |
| 61  | 6,45 | 0,0003 | 3,73E+06 | 2,6623 | 0,0119 | 36,667 | 14.240,06 | 1.021.819,59 |
| 65  | 6,58 | 0,0004 | 3,43E+06 | 2,4469 | 0,0109 | 35,333 | 14.086,55 | 1.049.479,12 |
| 68  | 6,93 | 0,0009 | 3,95E+06 | 2,8206 | 0,0117 | 34     | 14.022,40 | 1.086.217,95 |
| 72  | 6,91 | 0,0009 | 4,08E+06 | 2,907  | 0,0115 | 32,167 | 13.708,50 | 1.123.206,53 |
| 76  | 6,8  | 0,0007 | 3,86E+06 | 2,7499 | 0,0108 | 30,667 | 13.490,83 | 1.160.098,87 |
| 80  | 6,72 | 0,0006 | 4,52E+06 | 3,2256 | 0,0116 | 27,667 | 12.551,42 | 1.197.712,96 |
| 84  | 6,77 | 0,0006 | 4,59E+06 | 3,275  | 0,0114 | 21,667 | 10.127,29 | 1.236.811,77 |
| 88  | 6,75 | 0,0006 | 5,12E+06 | 3,652  | 0,0119 | 22     | 10.585,53 | 1.273.028,20 |
| 93  | 6,85 | 0,0008 | 4,89E+06 | 3,4859 | 0,0112 | 21     | 10.393,07 | 1.309.895,34 |
| 96  | 6,99 | 0,0011 | 5,60E+06 | 3,9931 | 0,0118 | 20,333 | 10.342,66 | 1.346.620,43 |
| 100 | 6,96 | 0,0010 | 6,15E+06 | 4,3858 | 0,0120 | 18     | 9.465,12  | 1.393.341,32 |
| 104 | 6,91 | 0,0009 | 5,61E+06 | 3,9987 | 0,0112 | 18     | 9.650,71  | 1.420.661,74 |
| 107 | 6,95 | 0,0010 | 6,17E+06 | 4,4027 | 0,0115 | 16,333 | 9.037,80  | 1.467.117,99 |
| 113 | 6,86 | 0,0008 | 5,70E+06 | 4,0661 | 0,0108 | 16,333 | 9.206,21  | 1.494.455,60 |
| 116 |      |        | 4,99E+06 | 3,5611 | 0,0097 | 17,333 | 10.008,14 | 1.530.328,34 |
| 120 | 6,93 | 0,0009 | 6,00E+06 | 4,2792 | 0,0106 | 15,667 | 9.261,20  | 1.567.749,96 |
| 124 | 6,97 | 0,0010 | 6,39E+06 | 4,5598 | 0,0106 | 15     | 9.124,87  | 1.613.729,64 |
| 128 | 7,02 | 0,0011 | 6,03E+06 | 4,3017 | 0,0101 | 14,333 | 8.867,10  | 1.641.493,41 |
| 132 | 6,97 | 0,0010 | 6,28E+06 | 4,4812 | 0,0101 | 13,333 | 8.431,77  | 1.678.603,43 |
| 136 | 7,06 | 0,0012 | 6,43E+06 | 4,5878 | 0,0100 | 14     | 9.045,82  | 1.714.664,05 |
| 140 | 6,69 | 0,0005 | 6,44E+06 | 4,5934 | 0,0098 | 13     | 8.578,41  | 1.751.806,14 |
| 144 | 7,08 | 0,0013 | 6,20E+06 | 4,4195 | 0,0094 | 13,667 | 9.206,21  | 1.787.853,02 |
| 148 | 6,93 | 0,0009 | 5,72E+06 | 4,0773 | 0,0089 | 13,667 | 9.394,09  | 1.824.339,82 |
| 153 | 6,98 | 0,0010 | 6,72E+06 | 4,7965 | 0,0095 | 12,833 | 8.997,70  | 1.861.410,88 |
| 156 | 6,87 | 0,0008 | 6,23E+06 | 4,4476 | 0,0089 | 12,667 | 9.054,99  | 1.898.028,28 |
| 161 | 6,91 | 0,0009 | 6,86E+06 | 4,8908 | 0,0092 | 11,833 | 8.621,94  | 1.935.136,00 |
| 164 | 6,92 | 0,0009 | 6,55E+06 | 4,6753 | 0,0088 | 10     | 7.423,62  | 1.973.009,00 |
| 168 | 6,94 | 0,0009 | 6,39E+06 | 4,5609 | 0,0086 | 10     | 7.561,10  | 2.009.546,20 |
| 172 | 6,93 | 0,0009 | 6,12E+06 | 4,369  | 0,0082 | 10     | 7.698,57  | 2.046.083,41 |
| 177 | 7,1  | 0,0014 | 6,46E+06 | 4,6046 | 0,0083 | 9      | 7.052,44  | 2.083.404,21 |
| 180 | 6,49 | 0,0003 | 7,14E+06 | 5,0927 | 0,0086 | 8,3333 | 6.644,60  | 2.120.486,73 |
| 184 |      |        |          |        |        |        |           |              |
| 188 | 6,87 | 0,0008 | 6,99E+06 | 4,985  | 0,0082 | 7,6667 | 6.297,48  | 2.185.014,54 |
| 192 | 6,85 | 0,0008 | 7,07E+06 | 5,0456 | 0,0081 | 7,3333 | 6.149,69  | 2.231.005,68 |
| 196 | 7,08 | 0,0013 | 6,39E+06 | 4,5609 | 0,0076 | 8      | 6.818,73  | 2.267.011,31 |
| 200 | 6,7  | 0,0005 | 6,98E+06 | 4,9783 | 0,0078 | 7,6667 | 6.640,02  | 2.303.864,71 |
| 204 | 7,02 | 0,0011 | 5,84E+06 | 4,1637 | 0,0070 | 7      | 6.158,86  | 2.341.020,55 |
| 208 | 6,91 | 0,0009 | 6,63E+06 | 4,7292 | 0,0074 | 7      | 6.255,09  | 2.377.598,99 |

|     |      |        |          |        |        |        |          |              |
|-----|------|--------|----------|--------|--------|--------|----------|--------------|
| 212 | 7,01 | 0,0011 | 7,65E+06 | 5,4585 | 0,0078 | 7      | 6.327,26 | 2.405.032,83 |
| 216 | 7,04 | 0,0012 | 7,88E+06 | 5,6235 | 0,0078 | 6,6667 | 6.140,53 | 2.451.062,91 |
| 220 | 6,86 | 0,0008 | 6,66E+06 | 4,7494 | 0,0071 | 6      | 5.608,96 | 2.488.269,16 |
| 224 | 7,22 | 0,0018 | 6,88E+06 | 4,911  | 0,0071 | 7,6667 | 7.272,40 | 2.523.280,39 |
| 228 | 7,38 | 0,0026 | 4,13E+06 |        | 0,0051 | 8      | 7.726,07 | 2.568.670,08 |
| 232 | 6,93 | 0,0009 | 7,56E+06 | 5,3957 | 0,0072 | 3,3333 | 3.253,56 | 2.600.648,59 |
| 236 | 6,61 | 0,0004 | 9,34E+06 | 6,6603 | 0,0079 | 3,6667 | 3.629,33 | 2.636.947,50 |
| 239 | 6,84 | 0,0008 | 7,27E+06 | 5,187  | 0,0069 | 3      | 3.010,69 | 2.674.240,81 |
| 244 | 6,69 | 0,0005 | 9,48E+06 | 6,7624 | 0,0077 | 2,6667 | 2.712,83 | 2.711.213,35 |
| 248 | 6,71 | 0,0006 | 9,69E+06 | 6,915  | 0,0077 | 2      | 2.062,12 | 2.748.538,75 |
| 252 | 8,28 | 0,0207 | 8,91E+06 | 6,3539 | 0,0073 | 2      | 2.089,61 | 2.785.185,93 |
| 256 | 8,65 | 0,0486 | 7,73E+06 | 5,5169 | 0,0067 | 2      | 2.117,11 | 2.821.833,11 |

### 5. Kecepatan Superfisial 6,851 m/h

| t (jam) | pH   | [HCO <sup>3-</sup> ] | N sel (sel/L) | X sel (gr/L) | μ (/h) | I <sub>b</sub> (lux) | Ex         | E            |
|---------|------|----------------------|---------------|--------------|--------|----------------------|------------|--------------|
| 0       | 6,95 | 0,0010               | 2,62E+06      | 1,8702       | 0,0175 | 200                  | 149.192,65 | 1.753.440,06 |
| 5       | 6,87 | 0,0008               | 2,74E+06      | 1,9577       | 0,0168 | 158                  | 128.385,60 | 1.944.125,02 |
| 9       | 7,24 | 0,0019               | 2,73E+06      | 1,9442       | 0,0159 | 147                  | 125.321,82 | 2.049.115,55 |
| 12      | 7,36 | 0,0025               | 2,80E+06      | 1,9992       | 0,0154 | 131                  | 118.661,44 | 2.191.678,28 |
| 16      | 7    | 0,0011               | 2,83E+06      | 2,0194       | 0,0147 | 112,67               | 108.058,10 | 2.338.183,95 |
| 20      | 6,87 | 0,0008               | 2,74E+06      | 1,9554       | 0,0136 | 121,33               | 121.219,03 | 2.426.949,78 |
| 24      | 6,66 | 0,0005               | 3,01E+06      | 2,144        | 0,0138 | 105,33               | 113.652,83 | 2.638.369,48 |
| 29      | 6,79 | 0,0007               | 3,01E+06      | 2,1473       | 0,0133 | 98,667               | 110.402,56 | 2.743.546,50 |
| 33      | 6,76 | 0,0006               | 2,62E+06      | 1,8679       | 0,0111 | 93,333               | 109.407,94 | 2.880.443,45 |
| 36      | 7,14 | 0,0015               | 2,99E+06      | 2,1339       | 0,0121 | 88                   | 107.844,97 | 3.017.908,76 |
| 40      | 7,14 | 0,0015               | 2,84E+06      | 2,0228       | 0,0110 | 82                   | 104.861,12 | 3.156.794,95 |
| 44      | 7,06 | 0,0012               | 2,90E+06      | 2,0699       | 0,0108 | 81,667               | 108.786,31 | 3.288.772,10 |
| 48      | 7,26 | 0,0020               | 3,02E+06      | 2,1574       | 0,0108 | 78,333               | 108.519,89 | 3.424.940,85 |
| 52      | 7,15 | 0,0015               | 3,66E+06      | 2,6119       | 0,0122 | 73                   | 105.020,97 | 3.564.342,11 |
| 56      | 7,12 | 0,0014               | 3,50E+06      | 2,4974       | 0,0113 | 73                   | 108.910,63 | 3.696.354,78 |
| 61      | 7,24 | 0,0019               | 3,75E+06      | 2,6724       | 0,0115 | 75,333               | 116.405,79 | 3.824.761,96 |
| 64      | 7,32 | 0,0023               | 4,19E+06      | 2,9922       | 0,0120 | 70                   | 112.826,94 | 3.998.218,73 |
| 68      | 7,16 | 0,0016               | 4,02E+06      | 2,8643       | 0,0113 | 76,333               | 126.085,55 | 4.086.886,87 |
| 72      | 7,34 | 0,0024               | 4,36E+06      | 3,1089       | 0,0115 | 68                   | 116.849,81 | 4.266.000,53 |
| 75      | 7,28 | 0,0021               | 4,02E+06      | 2,8643       | 0,0106 | 68                   | 119.567,25 | 4.365.209,84 |
| 81      |      |                      | 3,19E+06      | 2,2752       | 0,0086 | 62                   | 112.320,75 | 4.508.358,68 |
| 84      | 7,47 | 0,0032               | 4,51E+06      | 3,2166       | 0,0109 | 66                   | 123.083,93 | 4.633.497,83 |
| 88      | 7,47 | 0,0032               | 3,91E+06      | 2,7903       | 0,0095 | 67,667               | 130.698,98 | 4.795.760,71 |
| 92      | 7,66 | 0,0050               | 4,22E+06      | 3,0102       | 0,0098 | 62                   | 122.231,40 | 4.906.155,03 |
| 96      | 7,62 | 0,0045               | 4,64E+06      | 3,3064       | 0,0102 | 62                   | 125.534,96 | 5.038.753,82 |
| 100     | 7,63 | 0,0046               | 4,29E+06      | 3,0596       | 0,0094 | 62,333               | 129.531,19 | 5.170.659,92 |
| 104     | 7,94 | 0,0095               | 4,09E+06      | 2,9159       | 0,0089 | 59                   | 125.748,09 | 5.310.345,36 |
| 108     | 8,36 | 0,0249               | 4,36E+06      | 3,1089       | 0,0091 | 65                   | 141.999,43 | 5.429.996,35 |
| 112     | 7,88 | 0,0083               | 4,31E+06      | 3,0775       | 0,0088 | 67,333               | 150.684,57 | 5.557.213,54 |
| 116     | 7,62 | 0,0045               | 4,68E+06      | 3,3378       | 0,0091 | 69                   | 158.090,92 | 5.685.709,53 |
| 121     | 7,82 | 0,0072               | 4,35E+06      | 3,1          | 0,0084 | 66                   | 154.734,09 | 5.824.968,70 |
| 124     | 7,78 | 0,0066               | 4,31E+06      | 3,073        | 0,0082 | 63,667               | 152.656,05 | 5.962.949,08 |
| 129     | 8,15 | 0,0154               | 4,52E+06      | 3,2256       | 0,0083 | 59                   | 144.610,30 | 6.106.897,16 |

|     |      |        |          |        |        |        |            |               |
|-----|------|--------|----------|--------|--------|--------|------------|---------------|
| 132 | 8,38 | 0,0261 | 4,35E+06 | 3,1044 | 0,0079 | 66,667 | 166.953,68 | 6.220.456,12  |
| 136 | 8,42 | 0,0286 | 4,09E+06 | 2,9204 | 0,0074 | 72,667 | 185.851,41 | 6.337.460,72  |
| 140 | 8,68 | 0,0521 | 4,15E+06 | 2,9608 | 0,0073 | 73,667 | 192.334,19 | 6.466.880,28  |
| 145 | 8,05 | 0,0122 | 4,34E+06 | 3,0955 | 0,0074 | 73,667 | 196.259,38 | 6.598.857,43  |
| 148 |      |        |          |        |        |        |            |               |
| 152 | 8,28 | 0,0207 | 4,38E+06 | 3,1269 | 0,0072 | 67,667 | 186.584,05 | 6.846.361,84  |
| 156 | 8,53 | 0,0369 | 4,21E+06 | 3,0012 | 0,0068 | 69,333 | 195.797,59 | 7.007.026,23  |
| 160 | 8,71 | 0,0558 | 3,37E+06 | 2,4043 | 0,0057 | 76,667 | 220.591,99 | 7.118.134,17  |
| 164 | 7,87 | 0,0081 | 4,02E+06 | 2,8666 | 0,0064 | 77,333 | 226.630,74 | 7.247.997,75  |
| 168 | 8,24 | 0,0189 | 3,64E+06 | 2,5973 | 0,0058 | 85,667 | 255.616,74 | 7.354.914,09  |
| 172 | 7,41 | 0,0028 | 3,81E+06 | 2,7184 | 0,0059 | 83     | 252.082,29 | 7.494.350,87  |
| 176 | 7,32 | 0,0023 | 4,42E+06 | 3,1493 | 0,0065 | 83,667 | 257.450,56 | 7.590.909,35  |
| 180 | 8,28 | 0,0207 | 4,74E+06 | 3,3827 | 0,0067 | 82,333 | 258.831,48 | 7.759.406,35  |
| 184 | 8,33 | 0,0233 | 3,77E+06 | 2,6915 | 0,0056 | 87,667 | 280.269,04 | 7.873.871,12  |
| 188 | 8,38 | 0,0261 | 3,54E+06 | 2,5255 | 0,0052 | 105,67 | 343.445,03 | 7.946.597,48  |
| 192 | 7,53 | 0,0037 | 4,16E+06 | 2,9653 | 0,0058 | 108,67 | 360.433,45 | 8.099.486,97  |
| 196 | 8,41 | 0,0280 | 3,84E+06 | 2,7364 | 0,0054 | 108    | 362.538,13 | 8.199.309,04  |
| 200 | 8,43 | 0,0293 | 4,40E+06 | 3,1403 | 0,0058 | 103    | 351.242,12 | 8.346.507,40  |
| 204 | 7,39 | 0,0027 | 3,55E+06 | 2,5344 | 0,0049 | 125,67 | 435.234,03 | 8.398.417,82  |
| 207 | 7,2  | 0,0017 | 3,31E+06 | 2,3639 | 0,0046 | 115    | 404.418,64 | 8.565.135,55  |
| 212 | 7,42 | 0,0029 | 4,22E+06 | 3,0102 | 0,0054 | 109,67 | 391.506,37 | 8.713.950,15  |
| 216 | 8,3  | 0,0217 | 3,91E+06 | 2,7903 | 0,0051 | 108,33 | 392.518,75 | 8.848.840,11  |
| 220 | 8,67 | 0,0509 | 4,02E+06 | 2,871  | 0,0051 | 110    | 404.418,64 | 8.972.842,55  |
| 224 | 8,8  | 0,0687 | 3,76E+06 | 2,6825 | 0,0048 | 113    | 422.974,48 | 9.124.164,64  |
| 228 | 8,99 | 0,1064 | 3,62E+06 | 2,5793 | 0,0046 | 112    | 423.707,12 | 9.225.358,75  |
| 231 | 8,68 | 0,0521 | 3,82E+06 | 2,7229 | 0,0047 | 112    | 429.674,82 | 9.355.293,38  |
| 236 | 8,64 | 0,0475 | 4,38E+06 | 3,1224 | 0,0051 | 108    | 420.083,87 | 9.500.786,67  |
| 240 | 7,89 | 0,0085 | 3,96E+06 | 2,8262 | 0,0047 | 103,33 | 408.814,50 | 9.681.933,96  |
| 244 | 7,6  | 0,0043 | 3,54E+06 | 2,5255 | 0,0043 | 101    | 403.619,39 | 9.789.055,82  |
| 249 | 7,89 | 0,0085 | 3,30E+06 | 2,3549 | 0,0040 | 99,667 | 403.601,63 | 9.924.975,91  |
| 252 | 8,51 | 0,0352 | 3,55E+06 | 2,5299 | 0,0042 | 108,33 | 444.469,76 | 10.020.010,12 |
| 256 | 8,65 | 0,0486 | 3,65E+06 | 2,6062 | 0,0042 | 112,67 | 468.251,78 | 10.132.130,44 |
| 260 | 7,98 | 0,0104 | 3,80E+06 | 2,7095 | 0,0043 | 109    | 458.820,67 | 10.277.463,88 |
| 264 | 8,06 | 0,0125 | 3,77E+06 | 2,6915 | 0,0042 | 104,33 | 446.125,98 | 10.460.036,50 |
| 268 | 7,91 | 0,0088 | 3,84E+06 | 2,7409 | 0,0042 | 98     | 422.961,16 | 10.585.128,07 |
| 272 | 7,9  | 0,0086 | 3,67E+06 | 2,6197 | 0,0040 | 92     | 401.967,62 | 10.742.023,95 |
| 276 | 8,51 | 0,0352 | 3,69E+06 | 2,6287 | 0,0040 | 95     | 420.137,15 | 10.859.756,75 |
| 281 | 8,19 | 0,0169 | 3,96E+06 | 2,8262 | 0,0041 | 100    | 447.577,94 | 10.968.218,29 |
| 284 | 8,56 | 0,0395 | 3,77E+06 | 2,6915 | 0,0039 | 96     | 434.790,00 | 11.116.908,57 |
| 288 | 7,76 | 0,0063 | 3,90E+06 | 2,7813 | 0,0040 | 92,333 | 423.103,24 | 11.264.497,67 |
| 292 | 7,89 | 0,0085 | 3,87E+06 | 2,7588 | 0,0039 | 79     | 366.214,67 | 11.457.288,58 |
| 297 | 8,17 | 0,0161 | 3,97E+06 | 2,8351 | 0,0040 | 78,667 | 367.813,16 | 11.557.616,84 |
| 300 | 8,17 | 0,0161 | 3,76E+06 | 2,6825 | 0,0038 | 79     | 373.581,05 | 11.687.751,3  |
| 304 | 8,51 | 0,0352 | 3,54E+06 | 2,5255 | 0,0035 | 76,667 | 368.674,57 | 11.896.511,3  |

## 6. Pencahayaan Alterasi

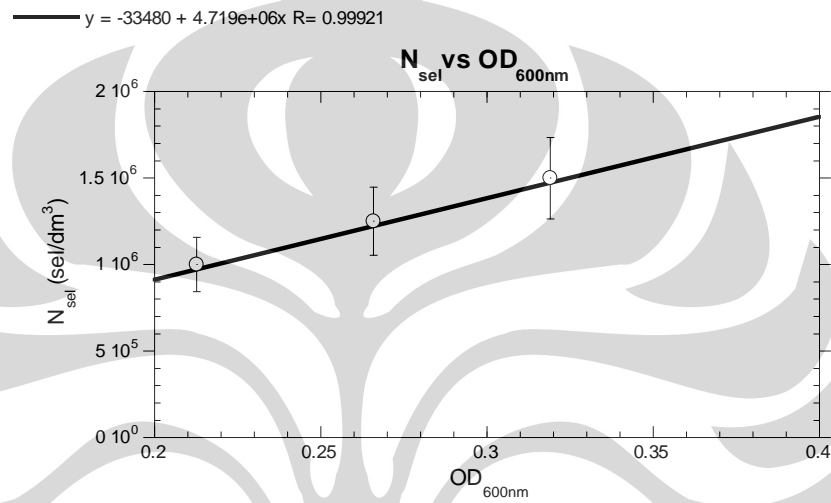
| t (jam) | pH   | [HCO <sup>3-</sup> ] | N sel (sel/L) | X sel (gr/L) | μ (/h) | I <sub>0</sub> (lux) | I <sub>b</sub> (lux) | Ex         | E          |
|---------|------|----------------------|---------------|--------------|--------|----------------------|----------------------|------------|------------|
| 0       | 6,52 | 0,0004               | 1,68E+06      | 1,1992       | 0,0251 | 4950                 | 984,33               | 257.778,26 | 562.923,19 |

|     |      |        |          |        |        |        |        |              |               |
|-----|------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------------|---------------|
| 4   | 6,43 | 0,0003 | 1,73E+06 | 1,2306 | 0,0231 | 4703,3 | 967,33 | 267.202,42   | 642.904,84    |
| 8   | 6,37 | 0,0003 | 1,91E+06 | 1,363  | 0,0234 | 4846,7 | 863,33 | 268.369,56   | 699.185,65    |
| 13  | 6,51 | 0,0004 | 2,11E+06 | 1,5044 | 0,0236 | 4760   | 846,33 | 335.452,45   | 996.320,27    |
| 16  | 6,43 | 0,0003 | 2,15E+06 | 1,5313 | 0,0214 | 4926,7 | 798    | 362.248,32   | 1.263.067,27  |
| 21  | 6,49 | 0,0003 | 2,19E+06 | 1,5605 | 0,0198 | 5956,7 | 876,67 | 390.549,07   | 1.515.243,01  |
| 24  | 6,33 | 0,0002 | 2,29E+06 | 1,6323 | 0,0190 | 6113,3 | 841    | 409.581,01   | 1.692.002,54  |
| 28  | 6,36 | 0,0002 | 2,33E+06 | 1,6592 | 0,0178 | 5773,3 | 750,33 | 419.875,64   | 1.865.937,63  |
| 32  | 6,44 | 0,0003 | 2,59E+06 | 1,8477 | 0,0181 | 6343,3 | 748,67 | 587.207,01   | 3.042.715,64  |
| 36  | 6,46 | 0,0003 | 2,55E+06 | 1,8163 | 0,0168 | 6616,7 | 691    | 698.066,86   | 3.828.829,01  |
| 40  |      |        |          |        |        |        |        |              |               |
| 44  | 6,4  | 0,0003 | 2,70E+06 | 1,9263 | 0,0156 | 6720   | 613,67 | 703.729,92   | 4.453.691,55  |
| 48  | 6,56 | 0,0004 | 2,74E+06 | 1,9554 | 0,0149 | 6700   | 576,67 | 712.413,28   | 4.767.347,03  |
| 53  | 6,58 | 0,0004 | 2,97E+06 | 2,117  | 0,0152 | 8030   | 608,67 | 714.096,89   | 5.052.902,10  |
| 56  | 6,25 | 0,0002 | 3,17E+06 | 2,2584 | 0,0153 | 8530   | 616,33 | 764.736,48   | 5.780.490,19  |
| 60  | 6,6  | 0,0004 | 3,18E+06 | 2,2719 | 0,0146 | 8503,3 | 543,67 | 874.779,19   | 6.000.179,96  |
| 64  | 6,34 | 0,0002 | 3,07E+06 | 2,1911 | 0,0133 | 8503,3 | 518    | 970.222,37   | 7.802.744,81  |
| 68  | 6,35 | 0,0002 | 3,17E+06 | 2,2584 | 0,0132 | 8686,7 | 504    | 1.018.056,86 | 8.152.489,51  |
| 72  | 7,44 | 0,0030 | 3,10E+06 | 2,2079 | 0,0124 | 9340   | 511,33 | 1.040.650,28 | 8.407.240,06  |
| 76  | 6,57 | 0,0004 | 3,18E+06 | 2,2719 | 0,0121 | 9320   | 555,67 | 1.100.722,87 | 9.072.231,71  |
| 80  |      |        |          |        |        |        |        |              |               |
| 85  | 6,68 | 0,0005 | 3,13E+06 | 2,2315 | 0,0110 | 10080  | 524,33 | 1.264.348,60 | 10.491.065,58 |
| 88  | 6,25 | 0,0002 | 3,29E+06 | 2,3493 | 0,0111 | 9933,3 | 512,67 | 1.197.803,94 | 10.176.055,52 |
| 92  | 6,2  | 0,0002 | 3,34E+06 | 2,383  | 0,0108 | 10250  | 519,67 | 1.224.868,97 | 11.180.070,45 |
| 96  | 6,07 | 0,0001 | 3,26E+06 | 2,3257 | 0,0103 | 10933  | 551    | 1.384.640,88 | 11.475.324,59 |
| 100 |      |        |          |        |        |        |        |              |               |
| 104 | 6,09 | 0,0005 | 3,30E+06 | 2,356  | 0,0097 | 10713  | 495,67 | 1.297.738,61 | 12.808.069,18 |

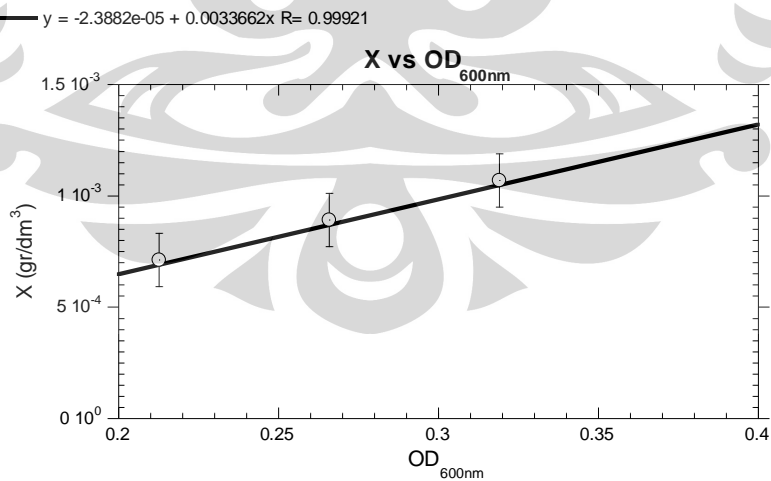
**LAMPIRAN B**  
**KURVA KALIBRASI DAN**  
**TABEL KONVERSI OD<sub>600</sub>, N<sub>sel</sub>, X**

**B.1. Pengolahan Data N<sub>sel</sub> dan X.**

Dari data OD, maka didapatkan nilai N sel dan X dengan menggunakan grafik seperti berikut :



Gambar B.1. Kurva Kalibrasi N<sub>sel</sub> vs OD<sub>600</sub>



Gambar B.2. Kurva Kalibrasi X vs OD<sub>600</sub>

## LAMPIRAN C

### PENGOLAHAN DATA pH

#### C.1. Contoh Pengolahan Data.

Nilai dari pH digunakan untuk menentukan  $[HCO_3^-]$  dengan menggunakan persamaan :

$$[HCO_3^-] = \left( \frac{K_{CO_2,0}}{H_{CO_2,0}} \right) \left( \frac{y_{CO_2} \cdot P_T}{10^{-pH}} \right) \left( \frac{\text{EXP} \left[ A_k \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_k \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_k \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]}{\text{EXP} \left[ A_h \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_h \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_h \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]} \right)$$

dengan nilai :  $P_T$  (*ambient pressure*) = 1 atm = 101.25 kPa

$y_{CO_2} = 10\% = 0,10$

$K_{CO_2,0} = 4.38 \cdot 10^{-7}$

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

$T$  (*ambient temperature*) = 29 °C = 302 K

$T_0 = 298.15 \text{ K}$

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

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

Satuan  $[HCO_3^-] = M$

Dengan memasukkan nilai dari konstanta-konstanta tersebut maka persamaan di atas dapat dituliskan ulang menjadi :

$$[HCO_3^-] = \frac{1,43972 \cdot 10^{-6}}{10^{-pH}}$$

## LAMPIRAN D

### PERHITUNGAN $E_x$ DAN $\eta_{bp}$

Data  $I_0$  dan  $I_b$  yang diambil pada pelaksanaan penelitian digunakan untuk menghitung beberapa parameter efisiensi energi cahaya, antara lain:

- a. Total energi cahaya yang tersedia selama masa kultivasi:

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

- b. Total energi cahaya yang terserap selama masa kultivasi:

$$E_i = A \int_0^t I_t dt$$

dimana : A = luas permukaan plat iluminasi ( $m^2$ )

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

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

t = waktu (jam)

dengan nilai konversi  $1 \text{ lx} = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$

- c.  $E_x$  (energi cahaya yang dimanfaatkan selama kultivasi) dan E (energi cahaya yang tersedia selama kultivasi):

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

dimana :  $\Delta X$  = berat biomassa yang dihasilkan selama masa kultivasi ( $g/dm^3$ )

s = jarak yang ditempuh cahaya didalam kultur (m)