



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN EMISI CO₂ DARI PLTU BATUBARA DALAM
PENGOLAHAN LIMBAH CAIR DOMESTIK BERBASIS
MIKROALGA**

**(Kajian Pengaruh Laju Alir Emisi CO₂ Terhadap Pertumbuhan Mikroalga
Yang Berpotensi Sebagai Bahan Baku Biofuel dan Kualitas Limbah Cair
Domestik)**

With a Summary in English

**Utilization of CO₂ Emission from Coal Power Plant in Domestic
Wastewater Treatment with Microalgae Based**

**(Study of CO₂ Emissions Flow Rate Effect against Microalgae Growth which
Potentially as Raw Material of Biofuel and Domestic Wastewater Quality)**

TESIS

**DEWI ISTIYANIE
0806469911**

**PROGRAM PASCASARJANA
PROGRAM STUDI KAJIAN ILMU LINGKUNGAN
JAKARTA, JULI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN EMISI CO₂ DARI PLTU BATUBARA DALAM
PENGOLAHAN LIMBAH CAIR DOMESTIK BERBASIS
MIKROALGA**

**(Kajian Pengaruh Laju Alir Emisi CO₂ Terhadap Pertumbuhan Mikroalga
Yang Berpotensi Sebagai Bahan Baku Biofuel dan Kualitas Limbah Cair
Domestik)**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Sains**

**DEWI ISTIYANIE
0806469911**

**PROGRAM PASCASARJANA
PROGRAM STUDI KAJIAN ILMU LINGKUNGAN
JAKARTA, JULI 2011**

HALAMAN PENGESAHAN TESIS

Tesis ini diajukan oleh:

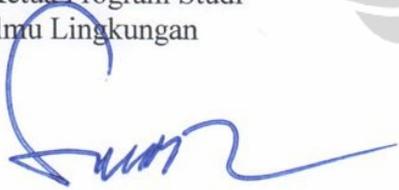
Nama : Dewi Istiyanie
NPM : 0806469911
Program Studi : Kajian Ilmu Lingkungan
Judul Tesis : Pemanfaatan Emisi CO₂ dari PLTU Batubara dalam Pengolahan Limbah Cair Domestik Berbasis Mikroalga (Kajian Pengaruh Laju Alir Emisi CO₂ terhadap Pertumbuhan Mikroalga yang Berpotensi sebagai Bahan Baku Biofuel dan Kualitas Limbah Cair Domestik)

Tesis ini telah disetujui dan disahkan oleh **Komisi Penguji Program Studi Kajian Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Indonesia** pada tanggal **27 Juni 2011** dan telah dinyatakan **LULUS** ujian komprehensif dengan yudisium **SANGAT MEMUASKAN**.

Jakarta, 27 Juni 2011

Mengetahui,

Ketua Program Studi
Ilmu Lingkungan



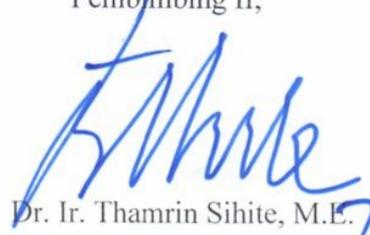
Prof. dr. Haryoto Kusnopranto, SKM, Dr.PH

Tim Pembimbing
Pembimbing I,



Dr. Ir. Setyo S. Moersidik, DEA

Pembimbing II,



Dr. Ir. Thamrin Sihite, M.E.

HALAMAN PENGESAHAN OLEH KOMISI PENGUJI

Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Dewi Istiyanie
NPM : 0806469911
Program Studi : Kajian Ilmu Lingkungan
Judul Tesis : Pemanfaatan Emisi CO₂ dari PLTU Batubara dalam Pengolahan Limbah Cair Domestik Berbasis Mikroalga (Kajian Pengaruh Laju Alir Emisi CO₂ terhadap Pertumbuhan Mikroalga yang Berpotensi sebagai Bahan Baku Biofuel dan Kualitas Limbah Cair Domestik)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Kajian Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Ir. Setyo S. Moersidik, DEA
Pembimbing II : Dr. Ir. Thamrin Sihite, M.E.
Ketua Sidang : Prof. dr. Haryoto Kusnoputranto, SKM, Dr.PH
Sekertaris Sidang : Dr. dr. Tri Edhi Budhi Soesilo, M.Si
Penguji Ahli : Prof. Dr. Ir. Sulistyoweni Widanarko, SKM

Ditetapkan di : JAKARTA

Tanggal : 27 Juni 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Dewi Istiyanie

NPM : 0806469911

Tanda Tangan :



Tanggal : 27 Juni 2011

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Dewi Istiyanie
NPM : 0806469911
Program Studi : Kajian Ilmu Lingkungan
Fakultas : Pascasarjana
Jenis Karya : Tesis

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:

”Pemanfaatan Emisi CO₂ dari PLTU Batubara dalam Pengolahan Limbah Cair Domestik Berbasis Mikroalga (Kajian Pengaruh Laju Alir Emisi CO₂ terhadap Pertumbuhan Mikroalga yang Berpotensi sebagai Bahan Baku Biofuel dan Kualitas Limbah Cair Domestik)”

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 memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 27 Juni 2011

Yang menyatakan,



(Dewi Istiyanie)

BIODATA PENULIS

Nama : Dewi Istiyanie
Tempat/tanggal lahir : Purwokerto, 22 Januari 1976
Status Perkawinan : Menikah
Alamat : Jl. Jati Kramat II Gg. Mangga III no 55 Rt 03/11
Jati Asih, Bekasi-17421
Agama : Islam
Email : dewi_istiyanie@yahoo.com

Riwayat Pendidikan :

1994-1998 Jurusan Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
1991-1994 SMA Negeri 3, Bandung
1988-1991 SMP Negeri 1, Cirebon
1982-1988 SD Kedokan Bunder VI, Karangampel-Indramayu

Riwayat Pekerjaan:

2006-sekarang Staf di Kelompok Teknologi Lingkungan KPRT Proses PPPTMGB “Lemigas” KESDM.
2003-2006 *free lance* di konsultan lingkungan PT. Deserco
1999-2003 Staff Quality Assurance di perusahaan yang bergerak di bidang kimia PT. Propan Raya, I.C.C.

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Sains pada Program Studi Ilmu Lingkungan Program Pasca Sarjana Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak selama masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Dr. Setyo S. Moersidik, DEA, selaku dosen pembimbing I yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini dan pemahaman substansi tesis ini.
- 2) Dr. Ir. Thamrin Sihite, M.E., selaku dosen pembimbing II yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini.
- 3) Prof. dr. Haryoto Kusnopranto, SKM, Dr.PH selaku Ketua Program Studi Ilmu Lingkungan yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan proposal tesis ini.
- 4) Dr. dr. Tri Edhi Budhi Soesilo, M.Si selaku Sekretaris Program Studi Ilmu Lingkungan yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membantu saya dalam penyusunan tesis ini.
- 5) Ibu Faridha, rekan seperjuangan saya dalam menyelesaikan penelitian yang tiada hentinya memberikan bantuan baik waktu, tenaga, dan pikiran sehingga tesis ini dapat selesai.
- 6) Muhammad Fathi Hamzah, yang sangat membantu saya dalam melakukan sampling dan analisis di lapangan.
- 7) Bapak Dedi, Bapak Agus, Bapak Syai'in, Bapak Muhtadi, Bapak Eman, Mas Iyan, Mas Dandi dari PLTU Bukit Asam, Tanjung Enim yang telah banyak membantu selama penelitian di lapangan.
- 8) Suami, Vikaskaya Mastoto Hendra, dan anak-anak saya, Faiza Shafa Diandra, Fadhlán Kiska Anargya Dindra, dan Farzan Athaa Aleandra yang tiada hentinya memberikan kasih sayang dan bantuan berupa dukungan moral maupun material.

- 9) Kedua orang tua dan Ibu mertua saya, Bambang Isworo, Sudiarti dan Haryati yang tidak pernah berhenti mendo'akan saya.
- 10) Fina Amelia dan Rahma Widhiasari, rekan di PSIL angkatan 27A yang terus memberikan dukungan moral, waktu, tenaga, dan masukan dalam perampungan tesis ini.
- 11) Rekan-rekan mahasiswa PSIL angkatan 26 dan 27: Asih Widhiastuti, Ayu Satya, Ade, Damar, Dewi Sri, Eti Purwati, Fakhruddin, Josi Kama Dewi, Kurniati Fitri, Redny Tota, Tiyas Nurcahyani, Silvia Wijaya, dan Yanu Aryani atas segala dukungan, bantuan, dan juga persahabatan selama belajar bersama di Program Studi Ilmu Lingkungan.
- 12) Seluruh staf administrasi dan akademik Program Studi Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Indonesia yang telah membantu kelancaran penulis semasa studi (Mbak Irna, Mbak Erni, Pak Udin, Mas Nasrullah, dan Mas Juju).
- 13) Rekan-rekan sekantor di Kelompok Teknologi Lingkungan KPRT Proses, PPPTMGB "Lemigas": Bu Leni, Bu Ita, Bu Rofiqoh, Bu Yani, Aini, Hanifah, Novi, dan rekan-rekan lainnya yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu, atas segala dukungan dan dorongannya untuk segera menyelesaikan studi.
- 14) Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu penulis menyelesaikan tesis ini.

Saya menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Dengan segala kerendahan hati penulis mohon masukan dan saran bagi perbaikan tesis ini selanjutnya, sehingga dapat bermanfaat bagi masyarakat luas dan perkembangan ilmu pengetahuan. Semoga Allah SWT membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu.

Jakarta, 27 Juni 2011

Penulis

ABSTRAK

Nama : Dewi Istiyanie
NPM : 0806469911
Program Studi : Kajian Ilmu Lingkungan
Judul Tesis : Pemanfaatan Emisi CO₂ dari PLTU Batubara dalam Pengolahan Limbah Cair Domestik Berbasis Mikroalga (Kajian Pengaruh Laju Alir Emisi CO₂ terhadap Pertumbuhan Mikroalga yang Berpotensi sebagai Bahan Baku Biofuel dan Kualitas Limbah Cair Domestik)

Mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* mempunyai kemampuan dalam memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan dalam pengolahan limbah cair domestik. Gas CO₂ digunakan oleh mikroalga untuk melakukan fotosintesis dengan bantuan sinar matahari. Kolam yang digunakan sebagai media pertumbuhan mikroalga adalah HROP (*High Rate Oxidation Pond*). Faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga antara lain: intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, zat hara anorganik (N, P, dan C). Model eksperimen dibuat dalam skala pilot berupa bak yang terbuat dari kayu dengan ukuran 1,2x0,6x0,6 m, dilengkapi dengan *paddle wheel* yang berputar dengan kecepatan 20 cm/detik. Kolam dioperasikan secara kontinu dengan debit 54 ml/menit dan masa pengamatan selama 17 (tujuh belas) hari. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kinerja sistem yang menggunakan kemampuan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* dalam memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan mereduksi cemaran limbah cair domestik. Hasil dari penelitian ini adalah bahwa intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, oksigen terlarut, laju alir emisi CO₂, dan konsentrasi NH₃ masing-masing memberikan pengaruh sebesar 13,03%; 57,76%; 35,76%; 9,06%; 33,52%; dan 25,50% terhadap pertumbuhan mikroalga. Pertumbuhan mikroalga terbaik dicapai oleh Bak dengan laju alir emisi CO₂ sebesar 1 liter/menit dengan kerapatan sel sebesar 1.120.000 sel/ml. Efisiensi penurunan NH₃ dan BOD terbaik dicapai oleh Bak dengan laju alir emisi CO₂ sebesar 1 liter/menit, yaitu dengan efisiensi sebesar 82,08% dan 47,24%. Kolam di mana tumbuh mikroalga paling tinggi berdampak positif terhadap penurunan NH₃ dan penurunan BOD. Penerapan hasil penelitian pada skala lapangan menghasilkan dimensi kolam HROP sebesar 467x6x0,4 m. Produktivitas mikroalga yang dihasilkan selama setahun dari ukuran kolam HROP tersebut adalah sebesar 110,66 ton/Ha/tahun. Gas CO₂ yang berasal dari PLTU Batubara dapat memberikan suplai sebesar 136.500 ton/tahun/unit.

Kata kunci: *Chlorella vulgaris*, faktor-faktor lingkungan, kinerja sistem

ABSTRACT

Name : Dewi Istiyanie
Student Number : 0806469911
Department : Kajian Ilmu Lingkungan
Thesis Title : Utilization of CO₂ Emission from Coal Power Plant in Domestic Wastewater Treatment with Microalgae Based (Study of CO₂ Emissions Flow Rate Effect against Microalgae Growth which Potentially as Raw Material of Biofuel and Domestic Wastewater Quality)

Microalgae *Chlorella vulgaris* has the ability to utilize CO₂ emission from coal POWER PLANT and domestic wastewater treatment. CO₂ gas is used by microalgae to perform photosynthesis with the help of sunlight. The pond used is HROP (High Rate Oxidation Pond) as microalgae growth medium. Environmental factors that affect the growth of microalgae are as follows: sunlight intensity, temperature, pH and inorganic nutrients (N, P and C). Experimental model was made on a pilot scale in the form of wooden pond with a size of 1.2x0.6x0.6 m, equipped with a paddle wheel that rotates with a speed of 20 cm/s. The pond is operated continuously with 54 ml/min water discharge and 17 days of observation. The purpose of the research is to observe the performance of the system that uses microalgae *Chlorella vulgaris*' ability in utilizing CO₂ emission from coal Power Plant and reducing wastewater contamination. The results of this research showed that the intensity of sunlight, temperature, pH, dissolved oxygen, flow rate of CO₂ emissions, and concentrations of NH₃ respectively gives the effect by 13.03%, 57.76%, 35.76%, 9.06%, 33.52% and 25.50% on the growth of microalgae. The best of microalgae growth was achieved in pond with a flow rate of CO₂ emissions by 1 liter/minute with the cell density of 1.12 million cells / ml. The best reduction efficiency of NH₃ and BOD was achieved in pond with a flow rate of CO₂ emissions by 1 liter / minute, with efficiency by 82.08% and 47.24%. The pond with the highest microalgae growth gives the positive impact to the reduction of NH₃ and BOD. The implementation of research results on the field scale develops the HROP dimension by 467 x 6 x 0,4 m. Productivity of microalgae produced for a year of HROP dimension is 110.66 tonnes / ha / year. CO₂ gas derived from coal power plant can provide the supply by 136,500 tons / year / unit.

Keyword: *Chlorella vulgaris*, environmental factors, system performance

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN TESIS	iii
HALAMAN PENGESAHAN OLEH KOMISI PENGUJI	iv
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
BIODATA PENULIS	vii
KATA PENGANTAR	viii
ABSTRAK	x
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
DAFTAR SINGKATAN	xx
RINGKASAN	xxi
SUMMARY	xxv
1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.3.1 Tujuan Umum	6
1.3.2 Tujuan Khusus	7
1.4 Manfaat Penelitian	7
2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Fotosintesis pada mikroalga	8
2.2 Kelebihan Mikroalga dibandingkan tanaman berhijau daun lainnya	9
2.3 Pengaruh gas buang pada pertumbuhan mikroalga	12
2.3.1 Karbondioksida	12

2.3.2	Emisi SO ₂ dan NO _x	13
2.3.3	Debu dan Partikulat	14
2.4	Faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas mikroalga	15
2.4.1	Intensitas Cahaya	16
2.4.2	Temperatur	17
2.4.3	pH	18
2.4.4	Unsur Hara	21
2.5	Pemanfaatan emisi CO ₂ dari PLTU Batubara dan limbah cair domestik terintegrasi untuk pertumbuhan mikroalga	22
2.6	Pertumbuhan mikroalga	25
2.7	Konstanta pertumbuhan sel mikroalga (k)	27
2.7.1	Konstanta pertumbuhan sel mikroalga (k)	27
2.7.2	Konsentrasi CO ₂ terlarut dalam media pertumbuhan mikroalga	28
2.8	Penggunaan Kolam Oksidasi Arus Deras (<i>High Rate Oxidation Pond</i> = HROP) sebagai media pertumbuhan mikroalga	29
2.8.1	Konstruksi kolam	30
2.8.2	Beban Limbah	32
2.9	Pengaruh Amoniak (NH ₃) dalam limbah cair domestik terhadap produktivitas mikroalga	34
2.10	Kerangka Teori	38
2.11	Kerangka Berpikir	39
2.12	Kerangka Konsep	41
2.13	Hipotesis	42
3.	METODE PENELITIAN	
3.1	Pendekatan Penelitian	43
3.2	Tempat dan Waktu Penelitian	43
3.3	Sampel Penelitian	44
3.3.1	Bibit mikroalga	44
3.3.2	Limbah cair domestik	44
3.3.3	Gas buang PLTU Batubara	44
3.4	Variabel Penelitian	45
3.5	Spesifikasi Peralatan	46

3.5.1	Spesifikasi peralatan pendukung percobaan	46
3.5.2	Spesifikasi Kolam HROP	48
3.6	Skema Rancangan Penelitian	49
3.7	Tahapan Penelitian	50
3.7.1	Tahapan penelitian observasional	50
3.7.2	Tahapan penelitian eksperimental	50
3.8	Metode Pengumpulan Data	53
3.9	Analisis Data	54
4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1	Deskripsi Lokasi Penelitian	55
4.1.1	Deskripsi perusahaan	55
4.1.2	Kondisi lingkungan perusahaan	56
4.1.3	Dampak sosial, ekonomi, dan budaya dari berdirinya PLTU	57
4.2	Keterbatasan Penelitian	58
4.3	Tahapan Penelitian Observasional	59
4.3.1	Kerapatan sel bibit mikroalga	59
4.3.2	Karakteristik emisi gas buang dari PLTU Batubara	60
4.3.3	Karakteristik limbah cair domestik	62
4.4	Tahapan Penelitian Eksperimental	66
4.4.1	Perbanyakkan sel mikroalga (<i>seeding</i>)	66
4.4.2	Aklimatisasi (<i>pengadaptasian</i>)	66
4.4.3	Proses pengolahan (<i>feeding</i>)	70
4.5	Pengaruh Faktor-Faktor Lingkungan (Intensitas cahaya matahari, Temperatur, pH, dan Oksigen terlarut) pada Pertumbuhan Mikroalga Jenis <i>Chlorella vulgaris</i> dengan Memanfaatkan Emisi CO ₂ dari PLTU Batubara dan Limbah Cair Domestik yang Terintegrasi	73
4.5.1	Intensitas cahaya matahari dan temperatur	73
4.5.2	pH	77
4.5.3	Oksigen terlarut (DO)	79
4.5.4	Pertumbuhan Mikroalga	81
4.5.5	Hubungan antara intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan Oksigen terlarut, dengan pertumbuhan mikroalga	87

4.6 Pengaruh Laju Alir Emisi CO ₂ dari PLTU Batubara terhadap Pertumbuhan Mikroalga pada Kolam HROP	94
4.7 Pengaruh NH ₃ terhadap Pertumbuhan Mikroalga	98
4.7.1 Konsentrasi NH ₃ selama masa pengamatan	98
4.7.2 Efisiensi penurunan konsentrasi NH ₃	102
4.7.3 Hubungan antara konsentrasi NH ₃ dengan pertumbuhan Mikroalga	103
4.8 Efisiensi Penurunan BOD oleh Mikroalga	104
4.9 Penerapan Hasil Percobaan pada Skala Lapangan	108
4.9.1 Dimensi kolam HROP pada skala lapangan	109
4.9.2 Konsentrasi mikroalga	111
4.9.3 Tenaga yang dibutuhkan untuk proses pencampuran	112
4.9.4 Produktivitas mikroalga	113
4.9.5 Suplai gas CO ₂ dari emisi gas buang PLTU Batubara	113
4.9.6 Manfaat ekonomi, lingkungan, dan sosial	114
5. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	118
5.2 Saran	120
DAFTAR REFERENSI	122
LAMPIRAN	129

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Emisi CO ₂ dari Pembangkit Listrik Tahun 1990-2005	2
Gambar 2.1. Hubungan antara persentase karbondioksida dengan pH	20
Gambar 2.2 Hubungan Simbiosis Antara Mikroalga dan Bakteri di dalam Kolam HROP	24
Gambar 2.3. Konsep Sistem Pengolahan Limbah dan Emisi CO ₂ Industri Terintegrasi	25
Gambar 2.4. Skema laju pertumbuhan mikroalga dalam kultur <i>batch</i>	26
Gambar 2.5. Persentase Kadar Amonia Dan Amonium Yang Dipengaruhi Oleh pH	35
Gambar 2.6. Pengaruh pH dan Nitrogen dalam Fotosintesis	36
Gambar 2.7 Kerangka Teori	38
Gambar 2.8. Kerangka Berpikir	39
Gambar 2.9. Kerangka Konsep	42
Gambar 3.1. Diagram Alir Percobaan	46
Gambar 3.2 Desain Bak Kultivasi Mikroalga	49
Gambar 4.1 Grafik Intensitas Cahaya Matahari Selama Masa Pengamatan	73
Gambar 4.2. Grafik Temperatur Air Selama Masa Pengamatan	74
Gambar 4.3. Grafik pH Selama Masa Pengamatan	77
Gambar 4.4. Grafik Oksigen Terlarut (DO) Selama Masa Pengamatan	80
Gambar 4.5 Grafik Pertumbuhan Mikroalga Selama Masa Pengamatan	82
Gambar 4.6 Konsentrasi H ₂ CO ₃ Berdasarkan pH	95
Gambar 4.7 Konsentrasi NH ₃ selama Masa Pengamatan	99

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Kandungan Minyak Pada Mikroalga dan Tanaman Darat	11
Tabel 2.2 Perbandingan Bahan Baku Biodiesel dari Berbagai Tanaman	12
Tabel 2.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroalga dalam Kolam Oksidasi Arus Deras	33
Tabel 3.1 Definisi Operasional dari Variabel Penelitian	44
Tabel 3.2 Spesifikasi Peralatan	47
Tabel 3.3 Spesifikasi Kolam HROP	48
Tabel 3.4 Skema Rancangan Penelitian	50
Tabel 3.5 Parameter Penelitian dan Metode Analisis	53
Tabel 3.6 Metode untuk Menjawab Tujuan Penelitian	54
Tabel 4.1 Data Hasil Pemantauan dan Pengukuran Kualitas Emisi Periode Bulan Desember 2010	60
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Emisi Gas CO ₂ dari Cerobong PLTU Batubara	61
Tabel 4.3 Karakteristik Awal Limbah <i>Septic Tank</i>	63
Tabel 4.4 Karakteristik Limbah <i>Septic Tank</i> pada Penelitian Sebelumnya	65
Tabel 4.5 Hasil Pemeriksaan Parameter Fisik dan Kimia Tahap Aklimatisasi	67
Tabel 4.6 Hasil Pemeriksaan Konsentrasi NH ₃	68
Tabel 4.7 Hasil Pemeriksaan Kerapatan Sel Tahap Aklimatisasi	68
Tabel 4.8 Karakteristik Limbah Cair <i>Septic Tank</i> Sebelum Proses Pengolahan	71
Tabel 4.9 Nilai Maksimum, Minimum, dan Rata-Rata dari Faktor-Faktor Lingkungan Fisik	74
Tabel 4.10 Nilai Maksimum, Minimum, dan Rata-Rata dari pH	77
Tabel 4.11 Nilai Maksimum, Minimum, dan Rata-Rata dari Oksigen Terlarut	80
Tabel 4.12 Pertumbuhan <i>Chlorella vulgaris</i> dan Laju Pertumbuhan Relatif (k)	84
Tabel 4.13 Maksimum, Minimum, dan Rata-Rata dari Laju Pertumbuhan Relatif	85
Tabel 4.14 Uji Korelasi Pearson terhadap Faktor-Faktor Lingkungan	88
Tabel 4.15 Uji Korelasi Pearson Antara Faktor-Faktor Lingkungan dengan Pertumbuhan Mikroalga	89

Tabel 4.16 Uji Korelasi Pearson Antara Konsentrasi H_2CO_3 pada Masing-Masing Variasi Laju Alir Emisi CO_2 dengan Pertumbuhan Mikroalga	97
Tabel 4.17 Efisiensi Penurunan NH_3 pada Keempat Bak	102
Tabel 4.18 Uji Korelasi Pearson Antara konsentrasi NH_3 dengan Pertumbuhan Mikroalga	103
Tabel 4.19 Efisiensi Penurunan Beban Limbah Cair <i>Septic Tank</i>	105



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Penelitian

Lampiran 2. Prosedur Penelitian dan Hasil Penelitian

Lampiran 3. Data Sekunder

Lampiran 4. Hasil Pemeriksaan Laboratorium



DAFTAR SINGKATAN

ADP	: <i>Adenosine Diphosphate</i>
ATP	: <i>Adenosine Triphosphate</i>
BLH	: Badan Lingkungan Hidup
BOD	: <i>Biochemical Oxygen Demand</i>
COD	: <i>Chemical Oxygen Demand</i>
DESDM	: Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral
DKP	: Dinas Kebersihan dan Pertamanan
DO	: <i>Dissolved Oxygen</i>
ESP	: <i>Electric Static Precipitator</i>
FGD	: <i>Flue Gas Desulfurization</i>
Hiperkes	: Higiene Perusahaan dan Kesehatan
HROP	: <i>High Rate Oxidation Pond</i>
Lemigas	: Lembaga Minyak dan Gas Bumi
LIPI	: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
pH	: derajat keasaman
PLN	: Perusahaan Listrik Negara
PLTU	: Pembangkit Listrik Tenaga Uap
PPTMGB	: Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas
PTBA	: Perusahaan Tambang Bukit Asam
Pusdatin	: Pusat Data dan Informasi
RPL	: Rencana Pemantauan Lingkungan
TKN	: <i>Total Kjeldahl Nitrogen</i>
TP	: <i>Total Phosphorus</i>
TSS	: <i>Total Suspended Solid</i>
U.S	: <i>United State</i>

RINGKASAN
Program Studi Ilmu Lingkungan
Program Pascasarjana Universitas Indonesia
Tesis, Juni 2011

Nama : Dewi Istiyanie
NPM : 0806469911
Judul : Pemanfaatan Emisi CO₂ dari PLTU Batubara dalam Pengolahan Limbah Cair Domestik Berbasis Mikroalga (Kajian Pengaruh Laju Alir Emisi CO₂ terhadap Pertumbuhan Mikroalga yang Berpotensi sebagai Bahan Baku Biofuel dan Kualitas Limbah Cair Domestik)
Jumlah : Halaman permulaan xxvii, halaman isi 121, gambar 19, tabel 28,
Halaman lampiran 4

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah sektor yang paling banyak menyumbangkan emisi CO₂. Hasil pembakaran batubara dari PLTU menghasilkan gas buang berupa CO₂, NO_x, dan SO_x yang mencemari lingkungan. CO₂ merupakan salah satu gas rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global.

Kemampuan mikroalga dalam melakukan fotosintesis dapat digunakan untuk memanfaatkan emisi CO₂ yang berasal dari gas buang PLTU Batubara. Emisi gas buang dari PLTU Batubara dapat mengandung gas CO₂ sebesar 10-20%, sedangkan di alam kandungan gas CO₂ hanya sebesar 0,036%. Sehingga pemanfaatan gas CO₂ dari PLTU Batubara dapat lebih optimal dalam meningkatkan pertumbuhan dan perkembangbiakan mikroalga. Pertimbangan lain dalam memilih mikroalga adalah potensinya yang dapat dikembangkan menjadi bahan baku biofuel karena memiliki kandungan minyak yang tinggi, produksinya relatif cepat dan dapat memperkecil kompetisi penggunaan lahan.

Mikroalga juga mempunyai peranan di dalam pengolahan air limbah. Nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroalga untuk tumbuh dan berkembang biak dapat diperoleh dari air limbah. Pengolahan air limbah dengan menggunakan Kolam Oksidasi Arus Deras yang dikenal dengan istilah *High Rate Oxidation Pond* (HROP), konsep dasarnya telah diperkenalkan oleh Oswald sejak tahun 1962 di California. Kolam ini merupakan kolam pengolah limbah secara aerob yang mencapai efisiensi penurunan cemaran limbah karena terjadi proses simbiosis antara alga dan bakteri dalam kolam. Oksigen yang dihasilkan oleh mikroalga melalui proses fotosintesis dimanfaatkan oleh bakteri aerob untuk mengoksidasi senyawa organik dalam limbah.

Faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga di antaranya adalah intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, konsentrasi zat hara anorganik (N, P, C). Sumber nitrogen diperoleh dari amonia yang terdapat di dalam air limbah, sedangkan sumber karbon selain diperoleh dari udara ambien dan ditambahkan dari emisi gas buang PLTU Batubara.

Berdasarkan uraian di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan yang akan diangkat dalam penelitian ini yaitu belum dimanfaatkannya kemampuan mikroalga

dalam mengolah limbah cair domestik dengan memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara.

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini meliputi tujuan umum dan tujuan khusus. Tujuan umum adalah mengetahui kinerja sistem yang menggunakan kemampuan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* dalam memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan mereduksi cemaran limbah cair domestik. Tujuan khususnya adalah: 1) Menganalisis pengaruh faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga dengan memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan limbah cair domestik yang terintegrasi; 2) Menganalisis pengaruh laju alir emisi CO₂ dari PLTU Batubara terhadap pertumbuhan mikroalga pada Kolam HROP; 3) Menganalisis pengaruh NH₃ terhadap pertumbuhan mikroalga; 4) Mengetahui efisiensi penurunan BOD oleh mikroalga; 5) Mengetahui penerapan hasil percobaan pada skala lapangan.

Hipotesis yang diajukan adalah: 1) Peningkatan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dapat menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga; 2) Penurunan konsentrasi amonia (NH₃) dapat menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga; 3) Peningkatan pertumbuhan mikroalga dapat menyebabkan peningkatan kualitas limbah cair domestik (penurunan nilai BOD).

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen. Lingkup kegiatan penelitian mencakup kegiatan di lapangan. Model eksperimen unit pengolahan limbah cair dibuat dalam skala pilot berupa bak yang terbuat dari kayu dengan ukuran 1,2x0,6x0,6 m, dilengkapi dengan *paddle wheel* yang berputar dengan kecepatan 20 cm/detik. Kolam dioperasikan secara kontinu dengan waktu tinggal air 4 (empat) hari dengan debit 54 ml/menit. Pengamatan dilakukan selama 17 (tujuh belas) hari dan dari hasil eksperimen diperoleh data mengenai pertumbuhan mikroalga (kerapatan sel), intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, Oksigen terlarut (DO), konsentrasi NH₃, dan kualitas air olahan (BOD). Penelitian dilakukan di lokasi PLTU Bukit Asam yang terletak di Desa Lingga, Kecamatan Tanjung Enim, Kabupaten Muara Enim, Propinsi Sumatera Selatan. Waktu penelitian dilakukan selama 2 (dua) bulan yaitu dari bulan Nopember 2010 sampai Januari 2011. Jenis mikroalga yang digunakan adalah *Chlorella vulgaris*. Limbah cair domestik yang digunakan berasal dari *septic tank* perumahan warga di Kabupaten Muara Enim. Penelitian ini menggunakan 4 (empat) variasi yaitu: Bak 1 (kontrol, tanpa tambahan emisi CO₂); Bak 2 (emisi CO₂ dengan laju alir 1 liter/menit); Bak 3 (emisi CO₂ dengan laju alir 2 liter/menit); dan Bak 4 (emisi CO₂ dengan laju alir 3 liter/menit). Hasil penelitian dari percobaan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Faktor-faktor lingkungan seperti intensitas cahaya matahari, temperature, pH, dan oksigen terlarut memberikan pengaruh sebesar 13,03%, 57,76%, 35,76%, dan 9,06% terhadap pertumbuhan mikroalga. Peningkatan pertumbuhan mikroalga baru dimulai pada hari ke-4 (empat) masa pengamatan. Penurunan

intensitas cahaya matahari, temperatur, dan pH menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga. Sedangkan peningkatan oksigen terlarut menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga.

2. Konsentrasi H_2CO_3 pada Bak 1, Bak 2, Bak 3, dan Bak 4 memberikan pengaruh sebesar 42,51%; 33,52%; 38,56%; dan 52,71% terhadap pertumbuhan mikroalga. Pada akhir masa pengamatan (hari ke-17) kinerja terbaik ditunjukkan oleh Bak 2 dengan kerapatan sel sebesar 1.120.000 sel/ml. Kinerja yang ditunjukkan oleh Bak 1, Bak 3, dan Bak 4 pada akhir masa pengamatan memiliki kerapatan sel sebesar 921.250 sel/ml, 846.250 sel/ml dan 832.500 sel/ml.
3. Konsentrasi NH_3 memberikan pengaruh sebesar 25,50% terhadap pertumbuhan mikroalga. Penurunan konsentrasi mikroalga menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga. Kekuatan korelasi antar 2 (dua) variabel bersifat sedang dengan nilai -0,505. Efisiensi penurunan konsentrasi NH_3 pada Bak 1, 2, 3, dan 4 adalah 81,79%; 82,08%; 79,41%; dan 81,82%.
4. Efisiensi penurunan BOD oleh mikroalga terbaik dihasilkan oleh Bak 2 dengan efisiensi sebesar 47,239%. Efisiensi penurunan limbah untuk Bak 1, bak 2, dan Bak 3 adalah 17,76%, 21,61%, dan 12,12%.
5. Penerapan hasil penelitian pada skala lapangan menghasilkan dimensi kolam HROP sebesar 467x6x0,4 m. Produktivitas mikroalga yang dihasilkan selama setahun dari ukuran kolam HROP tersebut adalah sebesar 110,66 ton/Ha/tahun. Gas CO_2 yang berasal dari PLTU Batubara dapat memberikan suplai sebesar 136.500 ton/tahun/unit.

Kesimpulan dari hasil penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh faktor-faktor lingkungan terhadap pertumbuhan mikroalga adalah intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan oksigen terlarut memberikan pengaruh sebesar 13,03%, 57,76%, 35,76%, dan 9,06%. Pertumbuhan mikroalga baru dimulai pada hari pengamatan ke-4 (empat). Faktor yang memberikan pengaruh paling besar terhadap pertumbuhan mikroalga adalah temperatur sebesar 57,76%.
2. Konsentrasi H_2CO_3 pada Bak 1, Bak 2, Bak 3, dan Bak 4 memberikan pengaruh sebesar 42,51%; 33,52%; 38,56%; dan 52,71% terhadap pertumbuhan mikroalga. Pada akhir masa pengamatan (hari ke-17) kinerja terbaik ditunjukkan oleh Bak 2 dengan kerapatan sel sebesar 1.120.000 sel/ml. Penambahan laju alir emisi CO_2 lebih besar dari 1 liter/menit tidak membuat pertumbuhan mikroalga menjadi lebih baik. Ini berarti laju alir emisi CO_2 menjadi faktor pembatas pertumbuhan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris*.
3. Konsentrasi NH_3 memberikan pengaruh sebesar 25,50% terhadap pertumbuhan mikroalga. Penurunan konsentrasi NH_3 menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga. Efisiensi penurunan NH_3 terbaik ditunjukkan oleh Bak 2 dengan

efisiensi sebesar 82,08%. Hal ini menunjukkan bahwa bak dengan pertumbuhan mikroalga tertinggi berdampak positif terhadap penurunan NH_3 .

4. Efisiensi penurunan BOD terbaik ditunjukkan oleh Bak 2 dengan efisiensi sebesar 47,239%. Hal ini menunjukkan bahwa bak di mana mikroalga tumbuh paling tinggi berdampak positif terhadap penurunan BOD.
5. Produktivitas mikroalga yang dihasilkan selama setahun dari ukuran kolam HROP sebesar 467x6x0,4 m adalah 110,66 ton/Ha/tahun. Gas CO_2 yang berasal dari PLTU Batubara dapat memberikan suplai sebesar 136.500 ton/tahun/unit.

Daftar Kepustakaan: 70 (dari tahun 1975-2010)



SUMMARY
Environmental Science Department
University of Indonesia Postgraduate Program
Thesis, June 2011

Name : Dewi Istiyanie
Student Number : 0806469911
Thesis Title : Utilization of CO₂ Emission from Coal Power Plant in Domestic Wastewater Treatment with Microalgae Based (Study of CO₂ Emissions Flow Rate Effect against Microalgae Growth which Potentially as Raw Material of Biofuel and Domestic Wastewater Quality)
Number of Pages : Introduction xxvii, body 121, pictures 19, tables 28, appendix 4

Coal Power Plant is the sector which emits the most CO₂ emission. The burning of coal from Power Plant produces gas waste consisting of CO₂, NO_x and SO_x that contaminates the environment. CO₂ is one of the greenhouse gases that caused global warming.

Microalgae's ability in conducting photosynthesis can be used to utilize CO₂ emission that comes from coal Power Plant gas waste. Gas waste emission from coal Power Plant may contain 10-20% CO₂ gas while CO₂ gas is only 0.036% in the atmosphere. Therefore, the utilization of CO₂ gas from coal Power Plant could be more optimal in increasing the growth and reproduction of the microalgae. Another consideration in selecting the microalgae is its potential to be developed into biofuel because it has high oil content, its production is relatively fast and can reduce the competition of land use.

Microalgae also have a role in wastewater treatment. Nutrients needed by microalgae to grow and reproduce can be obtained from wastewater. The wastewater treatment uses High Rate Oxidation Pond (HROP) which its basic concept has been introduced by Oswald since 1962 in California. The pond is an aerobic waste treatment pond that achieves waste contamination reduction efficiency because of the symbiosis process between algae and bacteria in the pond. Oxygen produced by microalgae through the process of photosynthesis is used by aerobic bacteria to oxidize organic compounds in the waste.

Environmental factors affecting the growth of microalgae include sunlight intensity, temperature, pH, concentration of inorganic nutrients (N, P, C). The source of nitrogen is obtained from ammonia contained in wastewater, while other carbon sources are derived from ambient air and added from the coal Power Plant gas emission.

Based on the description above, it can be formulated that the problem considered in this research is the ability of microalgae in treating domestic wastewater by using CO₂ emissions from coal Power Plant has not been utilized yet.

The goal of this research consists of a general objective and a particular aim. The general objective is to observe the performance of a system that uses the ability of microalgae *Chlorella vulgaris* in utilizing CO₂ emissions from Coal Power Plant and reducing contamination of domestic wastewater. The aim in particular are: 1) to analyze the influence of the environmental factors at the growth of microalgae by using CO₂ emissions from Coal Power Plant and an integrated domestic wastewater; 2) to analyze the influence of flow rate of CO₂ emissions from coal Power Plant on the growth of microalgae in the HROP pond; 3) to analyze the influence of NH₃ on the growth of microalgae, 4) Find out the efficiency of reduction of BOD by microalgae, and 5) Find out the implementation of the result of research on field scale.

Hypotheses are:

- 1) The increase of CO₂ emissions from coal power plant can lead to increase the growth of microalgae.
- 2) The decrease of ammonia (NH₃) concentration can lead to increase the growth of microalgae.
- 3) The increase of microalgae growth can lead to increase the quality of domestic waste water (BOD degradation)

This study uses a quantitative approach with experimental methods. The scope of research activities includes fieldwork. Experimental model of wastewater treatment unit is made on pilot scale in the form of a wooden pond with a size of 1.2 x0.6x0.6 m, equipped with a paddle wheel that rotates with a speed of 20 cm/s. The pond is operated continuously with water residence time of 4 days with the flow 54 ml/min. Observations were carried out for seventeen days and the experimental results obtained from data on microalgae growth (cell density), sunlight intensity, temperature, pH, dissolved oxygen (DO), concentration of NH₃, and treated water quality (BOD). The study was conducted at Bukit Asam Power Plant site located in the village of Lingga, Tanjung Enim sub-district, district of Muara Enim, South Sumatra Province. The research was done in 2 months which is from November 2010 until January 2011. The type of microalgae used was *Chlorella vulgaris*. Domestic wastewater that was used is from septic tanks of housing residents in Muara Enim district. This study uses four (4) variations which are: Pond 1 (control, without additional emissions of CO₂); Pond 2 (CO₂ emissions with a flow rate of 1 liter/min); Pond 3 (CO₂ emissions with a flow rate of 2 liters/minute); and Pond 4 (CO₂ emissions with a flow rate of 3 liters/min). The experiment results carried out are as follows:

1. Environmental factors such as sunlight intensity, temperature, pH, and dissolved oxygen give the effect by 13.03%, 57.76%, 35.76% and 9.06% on the growth of microalgae. Escalation of microalgae growth started on day 4 (four) during the observation period. Degradation in sunlight intensity, temperature, and pH generate the growth of microalgae. Meanwhile the increase in dissolved oxygen generates the growth of microalgae.
2. The concentration of H₂CO₃ in Pond #1, #2, #3, and Pond #4 gives the effect by 42.51%, 33.52%, 38.56% and 52.71% on the growth of microalgae. At the end of the observation period (day to 17), the best performance shown by Pond #2 with a cell density of 1.12 million cells / ml. The increase of CO₂ emissions flow rate more than 1 liter/minute didn't make for the better growth of microalgae.

This means that the flow rate of CO₂ emissions is a limiting factor for the growth of *Chlorella vulgaris* microalgae. The performance shown by Pond #1, #3, and Pond #4 at the end of observation period has a cell density of 921,250 cells/ml, 846,250 cells/ml and 832,500 cells/ml.

3. The concentration of NH₃ gives the effect by 25.50% on the growth of microalgae. Degradation in concentration of NH₃ leads to increase the growth of microalgae. The best reduction efficiency of NH₃ demonstrated in Pond #3 with efficiency by 82.08%. The strength of correlation between 2 (two) variables are moderate correlation with a value by -0.505. The reduction efficiency of NH₃ concentration in Pond #1, #2, #3, and Pond #4 is 81.79%; 82.08%; 79.41%; dan 81.82%.
4. The best of BOD reduction efficiency shown in Pond #2 with efficiency by 47.239%. Efficiency of waste reduction for Ponds #1, #2, and Ponds #3 is 17.76%, 21.61%, and 12.12%.
5. Productivity of microalgae which produced during the year from a HROP pond with dimension by 467x6x0,4 m is 110.66 tonnes/ha/year. CO₂ gas derived from coal power plant can provide the supply of 136,500 tons / year / unit.

The conclusion of the study are as follows:

1. Environmental factors such as sunlight intensity, temperature, pH, and dissolved oxygen give the effect by 13.03%, 57.76%, 35.76% and 9.06% on the growth of microalgae. Escalation of microalgae growth started on day 4 (four) during the observation period. The factor that provide the biggest effect on the growth of microalgae is the temperature by 57.76%.
2. The concentration of H₂CO₃ in Pond #1, #2, #3, and Pond #4 gives the effect by 42.51%, 33.52%, 38.56% and 52.71% on the growth of microalgae. At the end of the observation period (day to 17), the best performance shown by Pond #2 with a cell density of 1.12 million cells / ml. The increase of CO₂ emissions flow rate more than 1 liter/minute didn't make for the better growth of microalgae. This means that the flow rate of CO₂ emissions is a limiting factor for the growth of *Chlorella vulgaris* microalgae.
3. The concentration of NH₃ gives the effect by 25.50% on the growth of microalgae. Degradation in concentration of NH₃ leads to increase the growth of microalgae. The best reduction efficiency of NH₃ demonstrated in Pond #3 with efficiency by 82.08%. This shows that the Pond with the highest growth of microalgae gives the positive impact to NH₃ degradation.
4. The best of BOD reduction efficiency shown in Pond #2 with efficiency by 47.239%. This shows that the Pond where the highest growth of microalgae gives the positive impact on reduction of BOD.
5. Productivity of microalgae which produced during the year from a HROP pond with dimension by 467 x 6 x 0,4 m is 110.66 tonnes/ha/year. CO₂ gas derived from coal power plant can provide the supply of 136,500 tons / year / unit.

List of literature: 70 (from year 1975 to 2010)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

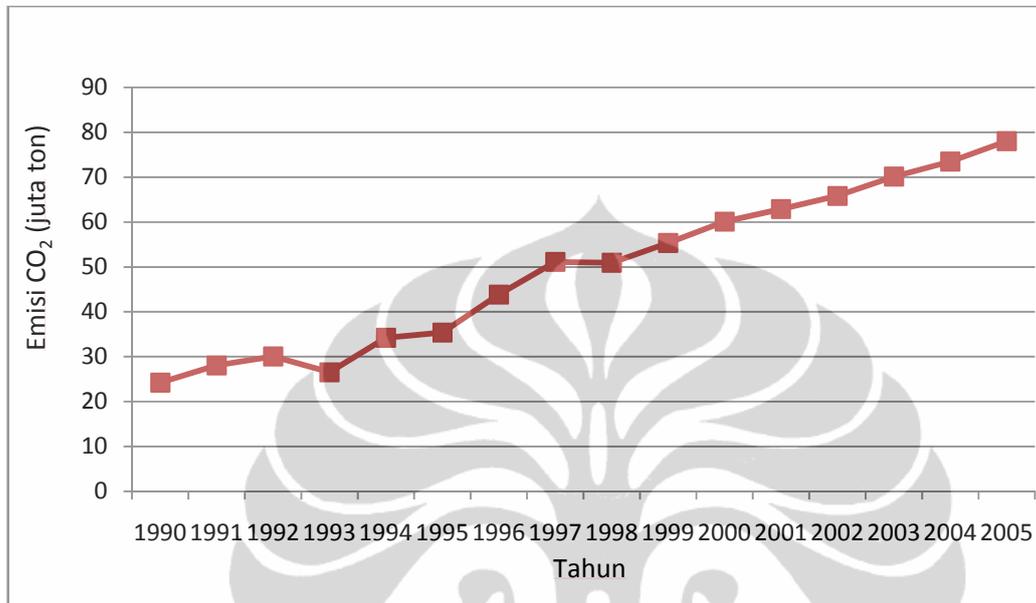
Gas CO₂ adalah salah satu gas rumah kaca yang dapat menyebabkan pemanasan global. Peningkatan emisi CO₂ di atmosfer berkorelasi positif dengan peningkatan jumlah pembakaran bahan bakar fosil. Selain dihasilkan dari sektor transportasi, bahan bakar fosil juga dihasilkan oleh sektor industri. Salah satu industri yang paling banyak menghasilkan emisi CO₂ adalah pembangkit tenaga listrik karena bahan bakarnya menggunakan batubara (Samiaji, 2004). Pemakaian batubara tidak terlepas dari cadangan batubara yang cukup besar dimiliki Indonesia yang mencapai 18,7 miliar ton (DESDM, 2007). Jumlah cadangan energi yang melimpah menjadikan batubara sebagai bahan bakar fosil yang paling lama dalam menyokong kebutuhan energi Indonesia.

Kelemahan dari pemanfaatan batubara sebagai sumber energi diantaranya adalah batubara identik sebagai bahan bakar yang kotor dan tidak ramah lingkungan karena komposisinya yang terdiri dari C, H, O, N, S, dan abu. Selain itu, kandungan C per mol batubara jauh lebih besar dibandingkan bahan bakar fosil lainnya sehingga pengeluaran CO₂ dari batubara jauh lebih banyak. Kandungan S dan N batubara bisa terlepas sebagai SO_x dan NO_x dan menyebabkan terjadinya hujan asam.

Indonesia merupakan salah satu negara yang menghasilkan emisi CO₂ dalam jumlah yang cukup besar. Emisi gas CO₂ dari pembangkit listrik dari tahun 1990 sampai dengan tahun 2005 dapat dilihat pada Gambar 1.1, memperlihatkan bahwa emisi CO₂ mengalami peningkatan setiap tahun kecuali pada tahun 1998 terjadi penurunan, kemungkinan disebabkan pada tahun tersebut pemakaian bahan bakar untuk pembangkit listrik berkurang akibat krisis bahan bakar. Dengan adanya penambahan pembangkit listrik berbahan bakar batubara, dapat dipastikan bahwa gas CO₂ di Indonesia akan semakin meningkat. Pengelolaan lingkungan untuk mencegah terjadinya pencemaran akibat polutan yang dihasilkan dari PLTU Batubara di Indonesia telah dilakukan, misalnya untuk menangani debu/partikulat telah dipasang

Universitas Indonesia

alat penangkap debu, seperti *cyclone* maupun *Electric Static Precipitator* (ESP), untuk mengurangi SO_2 telah digunakan *Flue Gas Desulfurization* (FGD) walaupun masih sangat terbatas, namun untuk pengelolaan CO_2 belum diterapkan. Karena itu muncul berbagai upaya untuk mengurangi emisi gas CO_2 .



Gambar 1.1 Emisi CO_2 dari Pembangkit Listrik Tahun 1990-2005
(Pusdatin-DESDM, 2006)

Laut memiliki kemampuan yang besar untuk menyerap gas CO_2 melalui plankton yang hidup di dalamnya. Di dalam laut tersembunyi biota laut penyerap karbon yang potensial. Biota laut itu di antaranya adalah jenis alga (*algae*) dan plankton—disebut juga mikroalga. Gas CO_2 merupakan sumber karbon utama bagi pertumbuhan tanaman, termasuk mikroalga. Dengan bantuan sinar matahari, klorofil di dalam mikroalga mengkonversi molekul sederhana (CO_2 dan H_2O) menjadi karbohidrat dengan melepaskan O_2 melalui proses fotosintesis. Penelitian tentang tingkat serapan CO_2 oleh jasad renik dan tumbuhan di laut belum banyak dilakukan. Konsep awal pemanfaatan emisi CO_2 dari PLTU Batubara yang digabungkan dengan pertanian alga (mikroalga) untuk menghasilkan biofuel dikemukakan oleh Sheehan pada tahun 1998. Selain itu berbagai penelitian mengenai pemanfaatan emisi CO_2 dari PLTU

untuk pertumbuhan mikroalga telah banyak dilakukan dan telah dipublikasikan, diantaranya adalah oleh U.S. Department of Energy dari tahun 1998-2001, Negoro *et al*, 1991, 1992, 1993; Hamasaki *et al*, 1994; Borowitzka, 1999; Nakamura *et al*, 2002.

Mikroalga juga mempunyai peranan di dalam pengolahan air limbah. Nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroalga untuk tumbuh dan berkembang biak dapat diperoleh dari air limbah. Pengolahan air limbah dengan menggunakan Kolam Oksidasi Arus Deras yang dikenal dengan istilah *High Rate Oxidation Pond* (HROP), konsep dasarnya telah diperkenalkan oleh Oswald sejak tahun 1962 di California, dan kini sudah banyak dipergunakan di berbagai Negara di dunia: Amerika, Kuwait, Phillipina, Thailand, Singapore, Perancis, dan Afrika Selatan (Pouliot & La Noue, 1985; Azov & Shelev, 1987; Nurdogan, 1988; Picot *et al.*, 1991 *dalam* Zulkifli, 1994). Kolam ini merupakan kolam pengolah limbah secara aerob yang mencapai efisiensi penurunan cemaran limbah karena terjadi proses simbiosis antara alga dan bakteri dalam kolam. Proses fotosintesis pada kolam oksidasi bergantung pada intensitas cahaya yang mencapai kolam. Oksigen yang dihasilkan oleh mikroalga melalui proses fotosintesis dimanfaatkan oleh bakteri aerob untuk mengoksidasi senyawa organik dalam limbah. Karbondioksida hasil metabolisme bakteri akan digunakan oleh mikroalga untuk proses fotosintesis. Intensitas cahaya hanya dapat menembus air pada kedalaman terbatas dan dipengaruhi oleh kualitas limbah cair. Intensitas cahaya berpengaruh pada pertumbuhan alga pada kolam dengan kedalaman 70 cm dan kecepatan 20 cm/detik (Londa, 2003). Kolam di mana alga tumbuh paling tinggi akan berdampak positif terhadap penurunan beban limbah. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa mikroalga dapat tumbuh pada berbagai jenis air limbah seperti limbah domestik (Zulkifli, 1994; Mulyadi, 1999), limbah cair argoindustri (Arylyza, 2003), limbah budidaya ikan (Panggabean dan Sutomo, 2002), dan limbah Rumah Potong Hewan (RPH) (Londa, 2003).

Produktivitas mikroalga dalam proses fiksasi CO₂ memerlukan sejumlah besar nutrisi seperti senyawa nitrogen dan fosfor. Tetapi jumlah nutrisi yang berlebihan dapat menimbulkan eutrofikasi. Kebutuhan mikroalga terhadap sumber nitrogen dapat

Universitas Indonesia

diperoleh dari limbah cair domestik yang biasanya banyak mengandung amonia (NH_3). Hasil penelitian yang dilakukan oleh Setiyono (2005) terhadap limbah cair domestik dari berbagai sumber pencemar menunjukkan bahwa konsentrasi minimum amonia (NH_3) mencapai 10,79 mg/l dan konsentrasi maksimumnya adalah 158,73 mg/l. Menurut A. Abeliovich, 1975, amonia pada konsentrasi lebih dari 2,0 mM dan pada pH lebih dari 8,0 dapat menghambat fotosintesis dan pertumbuhan *Scenedesmus obliquus*, spesies yang dominan berada dalam kolam HROP. Mikroalga memiliki kemampuan menurunkan beban organik limbah sehingga melalui kolam HROP dapat mereduksi cemaran limbah cair domestik.

Kelebihan yang dimiliki oleh mikroalga adalah memiliki waktu pertumbuhan yang cepat dibandingkan dengan tanaman darat, yaitu mulai dari hitungan hari sampai beberapa minggu (Uju & Wahyuni, 2007). Pertumbuhan mikroalga dapat mencapai 10-50 kali lebih efisien dibandingkan tanaman lainnya dan memerlukan lebih sedikit energi matahari (Li, Y. *et al*, 2008). Mikroalga jenis *Chlorella* termasuk spesies yang tahan terhadap penyakit, mempunyai tingkat produktivitas yang tinggi dan tidak toksik (Yan Li, 2006), mudah pemeliharaannya dan mampu bertahan dengan kondisi nutrisi yang terbatas (Sutomo, 2005), memiliki toleransi terhadap CO_2 dengan konsentrasi maksimum sebesar 40% (Hanagata *et al*, 1992).

Faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi produktivitas mikroalga di antaranya adalah CO_2 , temperatur, intensitas cahaya matahari, pH, dan unsur hara anorganik seperti nitrogen dan fosfor. Penelitian ini akan melihat faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi produktivitas mikroalga dengan menggunakan media pertumbuhan Kolam Oksidasi Arus Deras (HROP) yang memanfaatkan proses simbiosis antara mikroalga dan bakteri aerob di dalam kolam dan memanfaatkan emisi CO_2 dari PLTU Batubara. Jadi penelitian ini mengintegrasikan kemampuan mikroalga dalam mengolah air limbah dan memanfaatkan emisi CO_2 dari PLTU Batubara untuk proses fotosintesis. Kondisi lingkungan geografis Indonesia yang beriklim tropis dengan kelimpahan sinar matahari sepanjang tahun menjadi faktor positif bagi pertumbuhan mikroalga.

Universitas Indonesia

1.2 Perumusan Masalah

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah sektor yang paling banyak menyumbangkan emisi CO₂. Hasil pembakaran batubara dari PLTU menghasilkan gas buang berupa CO₂, NO_x, dan SO_x yang mencemari lingkungan. CO₂ merupakan salah satu gas rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global. Untuk itu, diperlukan suatu upaya untuk pengelolaan emisi CO₂ dari PLTU Batubara.

Kemampuan mikroalga dalam melakukan fotosintesis dapat digunakan untuk memanfaatkan emisi CO₂ yang berasal dari gas buang PLTU Batubara. Emisi gas buang dari PLTU Batubara dapat mengandung gas CO₂ sebesar 10-20%, sedangkan di alam kandungan gas CO₂ hanya sebesar 0,036%. Sehingga pemanfaatan gas CO₂ dari PLTU Batubara dapat lebih optimal dalam meningkatkan pertumbuhan dan perkembangbiakan mikroalga. Pertimbangan lain dalam memilih mikroalga adalah kemampuannya dalam mereduksi cemaran limbah cair domestik melalui hubungan simbiosis antara mikroalga dengan mikroorganisme yang hidup di dalam limbah cair.

Kebutuhan mikroalga akan nutrisi dapat diperoleh dari limbah cair domestik. Sumber nitrogen dapat diperoleh dari limbah cair domestik dalam bentuk amonia (NH₃). Mikroalga dapat tumbuh pada berbagai media, baik air laut, payau, sungai, maupun air limbah. Dengan melihat potensi yang dimiliki oleh mikroalga, maka pemanfaatan CO₂ dari PLTU batubara untuk pertumbuhan mikroalga dapat dikembangkan di Indonesia.

Di Indonesia, penelitian yang mengintegrasikan kemampuan mikroalga dalam memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan pengolahan limbah cair domestik belum dilakukan. Sementara itu, di negara-negara maju pengembangan mikroalga dengan memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan limbah cair domestik yang terintegrasi sudah banyak dilakukan. Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian yang lebih besar yang dilakukan oleh Faridha (2011) yang berjudul "Pemanfaatan Emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan Limbah Cair Domestik yang Terintegrasi untuk Pertumbuhan Mikroalga sebagai Bahan Biofuel dalam Mendukung Sistem Energi

Berkelanjutan”. Namun, kajian yang akan dilakukan oleh peneliti pada penelitian ini adalah melihat faktor-faktor lingkungan yang akan mempengaruhi pertumbuhan mikroalga dan kualitas air hasil olahan dengan memanfaatkan emisi gas CO₂ dari PLTU Batubara.

Berdasarkan uraian di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan yang akan diangkat dalam penelitian ini yaitu **belum dimanfaatkannya kemampuan mikroalga dalam menyerap emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan pengolahan limbah cair domestik.**

Berdasarkan rumusan permasalahan di atas, maka pertanyaan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh faktor-faktor lingkungan (intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, oksigen terlarut) terhadap pertumbuhan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* pada Kolam HROP dengan memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan limbah cair domestik yang terintegrasi?
2. Bagaimana pengaruh laju alir emisi CO₂ dari PLTU Batubara terhadap pertumbuhan mikroalga pada Kolam HROP?
3. Bagaimana pengaruh NH₃ terhadap pertumbuhan mikroalga?
4. Bagaimana efisiensi penurunan BOD oleh mikroalga tersebut?
5. Bagaimana penerapan hasil percobaan pada skala lapangan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini meliputi tujuan umum dan tujuan khusus.

1.3.1 Tujuan umum

Mengetahui kinerja sistem HROP yang menggunakan kemampuan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* dalam memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan mereduksi cemaran limbah cair domestik.

1.3.2 Tujuan khusus

1. Menganalisis pengaruh faktor-faktor lingkungan (intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan oksigen terlarut) terhadap pertumbuhan mikroalga dengan memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan limbah cair domestik yang terintegrasi.
2. Menganalisis pengaruh laju alir emisi CO₂ dari PLTU Batubara terhadap pertumbuhan mikroalga pada Kolam HROP.
3. Menganalisis pengaruh NH₃ terhadap pertumbuhan mikroalga.
4. Mengetahui efisiensi penurunan BOD oleh mikroalga tersebut.
5. Mengetahui penerapan hasil percobaan pada skala lapangan

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yaitu:

1. Memperkaya khasanah ilmu pengetahuan tentang pemanfaatan emisi CO₂ untuk pertumbuhan mikroalga yang diintegrasikan dengan pengolahan limbah cair domestik.
2. Meningkatkan kualitas lingkungan karena didapat suatu cara untuk mengurangi emisi CO₂ sekaligus mengolah limbah cair domestik dengan memanfaatkan kemampuan mikroalga dalam melakukan fotosintesis dan mereduksi limbah.
3. Memberikan manfaat sosial kepada masyarakat di sekitar PLTU karena terkonversinya limbah cair domestik yang dihasilkan mereka menjadi sel-sel baru mikroalga.
4. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai data awal untuk penelitian selanjutnya, khususnya pemanfaatan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* yang dapat digunakan sebagai bahan baku biofuel.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fotosintesis Pada Mikroalga

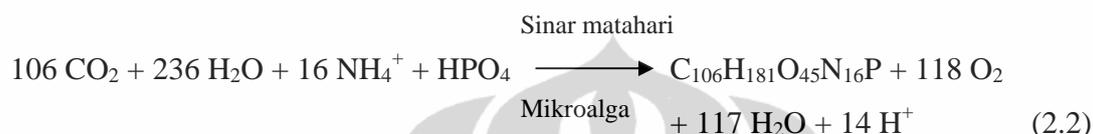
Mikroalga merupakan organisme sederhana yang dapat berfotosintesis, namun tidak memiliki akar, batang, dan daun seperti tumbuhan sejati. Mikroalga banyak ditemukan di lingkungan berair seperti perairan tawar, payau, dan laut, juga terdapat di tanah terutama permukaan lembab. Sebagian besar fitoplankton merupakan mikroalga. Fitoplankton adalah makhluk hidup mikroskopis yang berfotosintesis di permukaan laut. Tumbuhan menangkap cahaya menggunakan pigmen yang disebut klorofil. Pigmen inilah yang memberi warna hijau pada tumbuhan. Klorofil mengandung organel yang disebut kloroplas. Kloroplas yang menyerap cahaya yang akan digunakan dalam fotosintesis. Mikroalga memiliki berbagai jenis pigmen dalam kloroplasnya, maka panjang gelombang cahaya yang diserapnya pun lebih bervariasi. Semua mikroalga menghasilkan oksigen dan kebanyakan bersifat autotrof. Hanya sebagian kecil saja yang bersifat heterotrof yang berarti bergantung pada materi yang dihasilkan oleh organisme lain. Kloroplas menangkap energi cahaya, yang digunakan untuk mengkonversi molekul sederhana (CO_2 dan H_2O) menjadi karbohidrat dengan melepaskan O_2 , biasanya hasil fotosintesis dikirim ke jaringan-jaringan terdekat terlebih dahulu. Persamaan reaksi yang menghasilkan glukosa dapat dilihat pada persamaan di bawah ini:



Glukosa dapat digunakan untuk membentuk senyawa organik lain seperti zat tepung dan selulosa dan dapat pula digunakan sebagai bahan bakar. Proses ini berlangsung melalui respirasi seluler yang terjadi baik pada hewan maupun tumbuhan. Secara umum reaksi yang terjadi pada respirasi seluler berkebalikan dengan persamaan di atas.

Pada respirasi, gula (glukosa) dan senyawa lain akan bereaksi dengan oksigen untuk menghasilkan karbondioksida, air, dan energi kimia.

Pada dasarnya yang dibutuhkan mikroalga untuk melakukan fotosintesis adalah intensitas cahaya matahari yang cukup, waktu tinggal, nutrisi, dan suhu. Berdasarkan persamaan stoikiometri, pembentukan mikroalga diperoleh dari persamaan berikut (Moersidik, 1988):



Persamaan di atas menunjukkan kebutuhan garam nutrisi dalam pembentukan mikroalga yang terjadi melalui komposisi Karbon (C), Nitrogen dalam Amonia (NH_4^+), dan Fosfor (P).

Hasil riset Laboratorium Energi Terbarukan di Amerika dan Jerman menunjukkan bahwa mikroalga merupakan tanaman yang paling efisien dalam menangkap dan memanfaatkan energi matahari dan CO_2 untuk keperluan fotosintesis. Hal ini menyebabkan mikroalga memiliki waktu pertumbuhan yang cepat dibandingkan dengan tanaman darat, yaitu mulai dari hitungan hari sampai beberapa minggu (Uju & Wahyuni, 2007). Pertumbuhan mikroalga dapat mencapai 10-50 kali lebih efisien dibandingkan tanaman lainnya dan memerlukan lebih sedikit energi matahari (Li, Y. *et al.*, 2008).

2.2 Kelebihan Mikroalga Dibandingkan Tanaman Berhijau Daun Lainnya

Sheehan *et al.*, (1998) membagi mikroalga ke dalam 4 (empat) kelompok, terutama dari segi kelimpahannya yaitu Diatom (*Bacillariophyceae*), Alga Hijau (*Chlorophyceae*), Alga Biru Hijau (*Cyanophyceae*) dan Alga Emas (*Chrysophyceae*). Diatom dan Alga Hijau adalah dua jenis utama mikroalga yang dapat menghasilkan biodiesel. Menurut Edward (2008), sifat-sifat yang harus dimiliki spesies alga untuk memproduksi biofuel adalah kandungan *lipid* yang konstan dan tinggi, pertumbuhan

kontinyu, efisiensi fotosintesis tinggi, produktivitas biomassa yang konstan dan tinggi, dapat bertahan pada perbedaan musim dan perubahan temperatur, mudah untuk dipanen dan diekstraksi lemaknya.

Spesies mikroalga yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Chlorella vulgaris*. Jenis mikroalga ini banyak terdapat di perairan Indonesia dan telah banyak digunakan untuk keperluan penelitian maupun komersial. Bentuk sel *Chlorella* bulat atau bulat telur, merupakan alga bersel tunggal (*unicellular*), tetapi kadang-kadang dijumpai bergerombol. Diameter selnya berkisar antara 2-8 mikron, berwarna hijau karena klorofil merupakan pigmen yang dominan, dinding selnya keras terdiri atas selulosa dan pektin. Gerakan *Chlorella* sangat lambat sehingga pada pengamatan seakan-akan tidak bergerak. Alga ini dapat tumbuh dengan kisaran salinitas yang besar yaitu antara 0-35 ppt dengan salinitas optimum sebesar 10-20 ppt (Isnansetyo & Kurniastuty, 1995). Kisaran suhu 25-30°C merupakan kisaran suhu yang optimal untuk pertumbuhan mikroalga jenis ini.

Mikroalga jenis *Chlorella* termasuk spesies yang tahan terhadap penyakit, mempunyai tingkat produktivitas yang tinggi dan tidak toksik (Yan Li, 2006), mudah pemeliharaannya dan mampu bertahan dengan kondisi nutrien yang terbatas (Sutomo, 2005), memiliki toleransi terhadap CO₂ dengan konsentrasi maksimum sebesar 40% (Hanagata *et al.*, 1992), dan memiliki kandungan minyak yang tinggi yaitu sebesar 28-32 % *dry wt* sehingga berpotensi untuk dijadikan biofuel (Chisty, 2007). Laju pertumbuhan mikroalga berkisar antara 15-25 g berat kering/m².hari (Chelf *et al. dalam* D.J. Stepan *et al.*, 2002). Sebagian besar mikroalga mampu melakukan *doubling time* (yaitu waktu yang dibutuhkan untuk biomassa memiliki berat dua kali lipat) adalah 2,4-24 jam (Sakai *et al.*, 1995; Kurano *et al.*, 1995; Michiki, 1995 *dalam* D.J. Stepan *et al.*, 2002). Sedangkan jenis *Chlorella sp* umumnya memiliki laju pertumbuhan sebesar 26 g berat kering/m².hari dan memiliki kemampuan *doubling time* sebesar 2,5-8 hari.

Mikroalga merupakan tanaman yang memiliki potensi yang besar sebagai bahan baku biodiesel karena kemampuannya untuk tumbuh dengan cepat, memiliki waktu beregenerasi yang singkat, dan mudah dikultivasi dalam kondisi laboratorium (Graham & Wilcox, 2000). Kandungan biomassa mikroalga terdiri dari bahan-bahan yang penting yang sangat bermanfaat, seperti protein, karbohidrat, vitamin, dan minyak. Mikroalga mempunyai kandungan minyak yang komposisinya mirip seperti tanaman darat. Kandungan minyak dalam mikroalga pada spesies tertentu cukup tinggi, yaitu rata-rata 40%, bahkan pada spesies tertentu misalnya *Botryococcus braunii* dapat melebihi kadar minyak tanaman darat sebagai sumber penghasil minyak, seperti kelapa, jarak, dan sawit (Tabel 2.1).

Tabel 2.1. Kandungan Minyak Pada Mikroalga dan Tanaman Darat

	Jenis Tanaman	Kandungan Minyak (%)
Mikroalga ¹⁾	<i>Botryococcus braunii</i>	44.5-85
	<i>Dunaliella salina</i>	47
	<i>Chlorella vulgaris</i>	40
	<i>Monalanthus salina</i>	70
Tanaman Darat ²⁾	Kelapa	40-55
	Jarak (<i>Jatropha curcas</i>)	43-59
	Sawit	45-70

Sumber: ¹⁾ Borowitzka, 1998 dan Pootet, 2006

²⁾ Pootet, 2006 dalam Uju & Wahyuni, 2007

Mikroalga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan jenis tanaman lain yang digunakan sebagai bahan baku biodiesel. Keuntungan utamanya antara lain tidak berkompetisi dengan pertanian, mempunyai hasil yang tinggi, tidak toksik dan bersifat *biodegradable*, tidak memerlukan tanah untuk pertumbuhannya, dapat memanfaatkan emisi CO₂ dari industri untuk pertumbuhan mikroalga (Piccolo, 2007). Hasil riset *National Renewable Energi Laboratory Colorado* menunjukkan bahwa untuk luasan areal yang sama, mikroalga dapat menghasilkan minyak 30 kali lebih banyak dibandingkan tanaman darat. Hasil penelitian Shifrin (1984) dalam Uju & Wahyuni (2007) diperoleh bahwa rata-rata produktivitas mikroalga dapat mencapai 15-25

gram/m²/hari. Perbandingan produksi minyak dari mikroalga dibandingkan dengan bahan baku dari tanaman lain dapat dilihat pada Tabel 2.2. (Chisty, 2007).

Tabel 2.2 Perbandingan Bahan Baku Biodiesel dari Berbagai Tanaman

Tanaman	Minyak yang Dihasilkan (Liter/Hektar)
Jagung	172
Kedelai	446
Canola	1190
Jarak	1892
Kelapa	2689
Kelapa Sawit	5950
Mikroalga (70% oil (by wt) in biomassa)	136900
Mikroalga (30% oil (by wt) in biomassa)	58700

Sumber: Chisty, 2007

Menurut Schulz (2006), keberhasilan memproduksi mikroalga bergantung pada parameter yang berkaitan dengan: penggunaan lahan (ketersediaan, kesesuaian, dan biaya), mikroalga (jenis, produktivitasnya, pemanenan, dan proses produksi) dan nilai/harga dari produk yang diproduksi dari mikroalga.

2.3 Pengaruh Gas Buang Pada Pertumbuhan Mikroalga

PLTU Batubara menghasilkan gas buang yang mengandung komponen CO₂, SO₂, NO_x, dan debu. Masing-masing komponen gas tersebut memberikan pengaruh bagi pertumbuhan mikroalga pada batasan-batasan tertentu.

2.3.1 Karbondioksida (CO₂)

Karbon merupakan elemen kunci kimia dari seluruh kehidupan. Sumber karbon mikroalga berasal dari CO₂ yang dibutuhkan dalam proses fotosintesis dan dapat menjadi faktor pembatas dalam produktivitas. Pembangkit Listrik berbahan bakar batubara menghasilkan gas buang sekitar 10-20% CO₂, dibandingkan konsentrasi CO₂ normal yang ada di udara adalah 300-600 kali lebih besar (Karube *et al*, 1992). Konsentrasi CO₂ di atmosfer hanya sekitar 0,036%, maka pemanfaatan emisi CO₂ dari

emisi gas buang PLTU Batubara dapat lebih signifikan dalam membantu proses fotosintesis dari mikroalga.

Menurut Maeda *et al.* (1995) dan Brown (1996), peningkatan konsentrasi CO₂ akan memberikan respon yang lebih baik pada mikroalga dan akan meningkatkan pertumbuhan mikroalga. Pertumbuhan alga jenis *Chlorella vulgaris* memperlihatkan peningkatan yang tajam dalam sintesis klorofil dan produksi biomassa ketika CO₂ ditingkatkan dari 1% menjadi 6%, namun peningkatan konsentrasi CO₂ lebih lanjut hingga 20% justru menurunkan sintesis klorofil dan produksi biomasanya (Chinnasamy, S. *et al.*, 2009). Penelitian yang dilakukan oleh Chrismadha *et al.* (2006) terhadap pertumbuhan mikroalga strain air tawar jenis *Chlorella vulgaris*, dengan tambahan CO₂ sebesar 0,05%, 2%, 5% dan 10%, kepadatan sel tertinggi diperoleh pada perlakuan dengan 5% CO₂ (102 juta sel/ml). Hal ini menunjukkan bahwa mikroalga hanya membutuhkan tambahan CO₂ pada konsentrasi tertentu. Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Panggabean (2007) menunjukkan bahwa biakan *Chorella* sp dalam medium f/2 yang diinjeksi dengan 5% CO₂ secara kontinu tumbuh lebih baik dari pada perlakuan injeksi secara interval maupun kontrol.

2.3.2 Emisi SO₂ dan NO_x

Gas buang yang berasal dari PLTU Batubara tidaklah murni, ada unsur lainnya seperti SO₂, NO_x, CO, debu, dan partikulat. CO₂ murni tidak diperlukan dalam kultur mikroalga, beberapa unsur yang ada pada gas buang seperti SO₂ dan NO_x dapat efektif digunakan sebagai nutrisi bagi mikroalga (Nakamura, 2003). Sulfur oksida, terutama SO₂, dapat memberikan pengaruh yang signifikan pada angka pertumbuhan dan kesehatan mikroalga. Sulfur dioksida dapat mempengaruhi pH media pertumbuhan mikroalga. Ketika konsentrasi SO₂ mencapai 400 ppm, maka pH media dapat menjadi lebih rendah dari 4 setelah beberapa hari, sehingga akan mempengaruhi produktivitas mikroalga. Tetapi jika pH tetap dipertahankan pada kondisi 8 dengan menggunakan NaOH, maka produktivitas mikroalga tidak akan menurun (Matsumoto, 1997). Peneliti-peneliti lain sudah melakukan penelitian terhadap toleransi sulfur oksida pada sekitar setengah dari apa yang Matsumoto dan Coworkers (1997) lakukan (Brown,

1996; Zeiler *et al.*, 1995). Penelitian yang dilakukan oleh Negoro *et al.* (1991) terhadap mikroalga jenis *Nannochloris sp.* (NANNO02) menemukan bahwa jenis mikroalga ini tahan sampai konsentrasi SO₂ mencapai 50 ppm dengan pH yang terjaga, tetapi tanpa kontrol pH, konsentrasi SO₂ sebesar 300 ppm dalam 20 jam dapat menghambat pertumbuhan mikroalga.

Keberadaan nitrogen oksida dalam emisi gas buang dari PLTU Batubara juga dapat mempengaruhi pH media mikroalga. Tetapi jika dibandingkan dengan pengaruh sulfur oksida, berada pada tingkat yang lebih kecil. Mikroalga menunjukkan toleransi dan tumbuh pada media yang mengandung 240 ppm NO_x dengan pengaturan pH. Penelitian yang dilakukan oleh Brown (1996) dan Zeiler & coworkers (1995) juga memperlihatkan bahwa mikroalga tidak terhambat pertumbuhannya dengan keberadaan NO sebesar 150 ppm. Negoro dan coworkers (1991) menemukan bahwa NANNO02 tumbuh dengan kehadiran 300 ppm NO sesudah fase lag. Kehadiran NO dapat menjadi sumber nitrogen bagi mikroalga. NO di-*absorb* ke dalam media dan dioksidasi menjadi NO₂ dengan kehadiran oksigen (Negoro *et al.*, 1991). Kandungan oksigen yang lebih besar di dalam media, dapat memperbesar produksi NO₂ dan angka produktivitas mikroalga (Matsumoto *et al.*, 1997; Brown, 1996). Tetapi, peningkatan konsentrasi oksigen dalam photorespirasi alga, akan dapat menghambat pertumbuhan mikroalga.

2.3.3 Debu dan Partikulat

Partikel abu yang berasal dari hasil pembakaran batubara pada PLTU merupakan abu terbang (*fly ash*) yang akan menuju ke cerobong dan akan ditangkap oleh *Electro Static Precipitator* (ESP) yang mempunyai tingkat efisiensi sebesar 99,9% (Sumitro, S., 2002). Matsumoto dan Coworkers (1997) menyatakan bahwa konsentrasi *soot dust* lebih besar dari 200.000 mg/m³ (0,2 g/l) akan mempengaruhi produktivitas mikroalga. Namun jarang sekali konsentrasi soot dust mencapai nilai tersebut karena umumnya kandungan debu adalah 50 mg/m³ (5 x 10⁻⁵ g/l).

Partikulat batubara biasanya mengandung logam berat seperti kromium, kadmium, merkuri, timbal, dan arsen kandungan radioaktif. Selama proses pembakaran batubara, unsur-unsur anorganik yang tidak terbakar akan tetap ada dalam partikulat/abu batubara. Senyawa kimia logam berat yang tidak terbakar akan berubah-ubah, namun unsur logamnya tetap ada dan per-unit volume atau berat konsentrasinya dapat lebih tinggi dibandingkan pada saat berada dalam batubara (Sumitro, S., 2002). Hal ini dapat mempengaruhi produktivitas mikroalga jika berada dalam konsentrasi tinggi, namun jarang sekali ditemukan gas buang dengan konsentrasi partikulat yang tinggi.

2.4 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Produktivitas Mikroalga

Variabel kimia lingkungan perairan memainkan peranan penting di dalam menentukan tingkat pertumbuhan dan kualitas sel alga. Mikroalga dapat menyerap nutrisi dari seluruh lapisan perairan, karena bisa mengabsorpsi langsung melalui membran sel. Komunitas fitoplankton dan mikroalga pada umumnya di suatu perairan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang ada. Ada empat unsur dasar yang harus tersedia dalam proses pertumbuhan mikroalga, yaitu nitrogen, fosfor, karbondioksida, dan sinar matahari.

Di dalam kondisi perairan alami, konsentrasi *trace metal* biasanya cukup terpenuhi, tetapi kandungan makro nutrisi nitrat dan fosfat biasanya terbatas. Untuk fosfor biasanya terbatas keberadaannya di perairan tawar dan nitrat biasanya terbatas di perairan laut (Darley, 1982). Kultur mikroalga akan tumbuh baik di dalam media kultur dengan kandungan nutrisi makro dan komposisi *trace metal* daripada perairan alami. Biasanya kandungan nitrat di dalam kultur mikroalga secara intensif bisa mencapai 100-1000 kali lebih tinggi daripada kondisi di alam. Pada kondisi kandungan nitrogen rendah, sel alga mempunyai tingkat fotosintesis dan respirasi yang rendah pula, serta diikuti kandungan protein kurang dari 10%, serta terjadi tingginya kandungan karbohidrat dan lemak (Fogg, 1959).

Produktivitas mikroalga dalam proses fiksasi CO₂ memerlukan sejumlah besar nutrisi seperti senyawa nitrogen dan fosfor. Tetapi jumlah nutrisi yang berlebihan dapat menimbulkan eutrofikasi.

Secara umum komunitas fitoplankton dan mikroalga di suatu perairan dipengaruhi oleh intensitas cahaya, suhu, pH, salinitas, konsentrasi zat hara anorganik, senyawa pemacu dan penghambat pertumbuhan, serta adanya pemangsa akan mempengaruhi kondisi alga tersebut (Schlan, 1972; Welch, 1980 *dalam* Krisanti, 2003).

2.4.1 Intensitas Cahaya

Intensitas cahaya mutlak diperlukan bagi berlangsungnya proses fotosintesis, terutama bagi kultivasi mikroalga di ruang terbuka. Proses ini hanya dapat berlangsung jika intensitas cahaya yang sampai ke suatu sel alga cukup bagi berlangsungnya fotosintesis. Tetapi intensitas cahaya yang terlampau kuat akan menyebabkan laju fotosintesis menurun (Fogg, 1980). Radiasi cahaya matahari pada fotosintesis (400-700 nm) hanya dapat menembus perairan sampai kedalaman tertentu yang amat terbatas. Umumnya sekitar 90% radiasi cahaya yang menembus batas udara-air diserap pada 10-20% kedalaman air. Konsentrasi maksimum pertumbuhan alga dibatasi oleh tingkat penetrasi cahaya ke dalam kolam tersebut, di mana pencampuran dilakukan secara terus-menerus.

Radiasi cahaya matahari yang digunakan, tidak seluruhnya digunakan untuk proses fotosintesis. Hasil analisis menyatakan intensitas cahaya mempengaruhi pertumbuhan alga yang dinyatakan dalam jumlah klorofil-a. Klorofil-a, sebagai pigmen utama dalam fotosintesis hanya dapat menangkap 30-40% dari radiasi aktif fotosintesis (Williams & Laurens, 2010). Menurut Erickson & Lee (1986), alga tidak mampu menyimpan energi dalam periode waktu pendek, atau alternatif lain dengan pencampuran yang sangat rendah untuk dapat mendistribusikan energi cahaya yang diserap. Sehingga pertumbuhan alga pada kolam yang lebih dalam (100 cm) tidak terlalu baik dibandingkan dengan kolam yang lebih dangkal (70 cm). Penelitian yang dilakukan oleh Londa (2003) menemukan bahwa intensitas cahaya berpengaruh pada pertumbuhan alga pada kolam dengan kedalaman 70 cm dan kecepatan 20 cm/detik. Kolam di mana alga tumbuh paling tinggi akan berdampak positif pada penurunan beban limbah.

Pada malam hari, saat tidak ada sinar matahari, alga memetabolisme bahan organik dengan cara yang sama dengan organisme yang tidak berfotosintesis. Kebutuhan metabolik alga diperoleh dengan cara penggunaan energi kimia dari pemecahan cadangan karbohidrat atau lemak, atau mengkonsumsi protoplasma alga sendiri (Manahan, 1994).

Azov dan Goldman (1981) menemukan suatu pengaruh yang besar dari peningkatan cahaya terhadap toksisitas amonia. Hal ini berarti toksisitas amonia terhadap alga yang dikultur di luar ruangan/alam terbuka akan lebih tinggi karena pada kultur di luar ruangan, intensitas cahaya dan lamanya pemaparan cahaya matahari tidak dapat dikontrol.

2.4.2 Temperatur

Selain dipengaruhi oleh intensitas cahaya, laju fotosintesis alga juga dipengaruhi oleh suhu. Suhu dapat meningkatkan kecepatan proses dalam sel. Peningkatan suhu dapat mengakibatkan peningkatan viskositas, reaksi kimia, evaporasi, dan volatilisasi. Penurunan kelarutan gas dalam air seperti, O₂, CO₂, N₂, CH₄, dan sebagainya juga disebabkan oleh peningkatan suhu (Haslam, 1995 *dalam* Effendi, 2003). Selain itu, peningkatan suhu juga dapat menyebabkan peningkatan kecepatan metabolisme dan respirasi organisme air, dan selanjutnya adalah meningkatkan konsumsi oksigen. Konsumsi oksigen oleh organisme akuatik akan naik sebesar 2-3 kali lipat jika terjadi peningkatan suhu sebesar 10°C. Akibat adanya peningkatan konsumsi oksigen oleh organisme akuatik, menyebabkan kadar oksigen terlarut menjadi berkurang, sehingga keberadaan oksigen seringkali tidak mampu memenuhi kebutuhan oksigen bagi organisme akuatik untuk melakukan proses metabolisme dan respirasi. Peningkatan suhu juga menyebabkan terjadinya peningkatan dekomposisi bahan organik oleh mikroba (Effendi, 2003).

Nilai maksimum kecepatan proses fotosintesis terjadi pada kisaran suhu 25-40°C (Reynolds, 1990). Pertumbuhan mikroalga pada suatu kolam terbuka akan terganggu pada temperatur ekstrim, baik yang terlalu tinggi ataupun terlalu rendah (Edward,

2008). Menurut Fogg (1975), suhu yang baik untuk kultur alga di laboratorium berkisar antara 20-30°C dan suhu optimum untuk kebanyakan alga berkisar antara 20-25°C. Smith (1950) dalam Krisanti (2003) menyatakan bahwa suhu tidak menjadi faktor pembatas pada alga alami selama banyak spesies mampu tumbuh dalam kondisi lingkungan lain yang sesuai, namun suhu sangat berpengaruh terhadap cepat dan lambatnya pertumbuhan dan reproduksi. Perubahan temperatur optimal bagi pertumbuhan fitoplankton dapat terjadi karena intensitas cahaya dan konsentrasi nutrisi tertentu, dan fitoplankton tersebut dapat beradaptasi terhadap temperatur tinggi atau rendah yang kadang-kadang terjadi (Fogg, 1975).

2.4.3 pH

Proses fotosintesis pada mikroalga di dalam air akan mengambil sumber karbon yang berasal dari karbondioksida yang terlarut di dalam air maupun ion bikarbonat sebagai sumber karbon (Jeffries dan Mills, 1996 dalam Effendi, 2003). Tumbuhan akuatik, seperti algae, lebih menyukai karbondioksida sebagai sumber karbon dibandingkan dengan bikarbonat dan karbonat. Bikarbonat dapat berperan sebagai sumber karbon, namun di dalam kloroplas bikarbonat harus dikonversi terlebih dahulu menjadi karbondioksida dengan bantuan enzim karbonik anhidrase (Boney, 1989 dalam Effendi 2003). Hal ini mengakibatkan penurunan kandungan CO₂ terlarut di dalam air sehingga akan meningkatkan pH.

CO₂ bebas digunakan untuk menjelaskan CO₂ yang terlarut dalam air, selain yang berada terikat sebagai ion bikarbonat (HCO₃⁻) dan ion karbonat (CO₃²⁻). CO₂ bebas menggambarkan keberadaan gas CO₂ di perairan yang membentuk kesetimbangan dengan CO₂ di atmosfer. Nilai CO₂ yang terukur biasanya berupa CO₂ bebas. CO₂ total menunjukkan penjumlahan dari semua bentuk anorganik dari CO₂, seperti: CO₂, H₂CO₃, HCO₃⁻, dan CO₃²⁻ (Mackereth *et al.*, 1989). Oleh karena itu, penurunan karbondioksida, perubahan bentuk karbon yang ada di perairan dan tingginya nilai pH menjadi faktor pembatas laju fotosintesis (Tailing, 1976 dalam Reynold 1990).

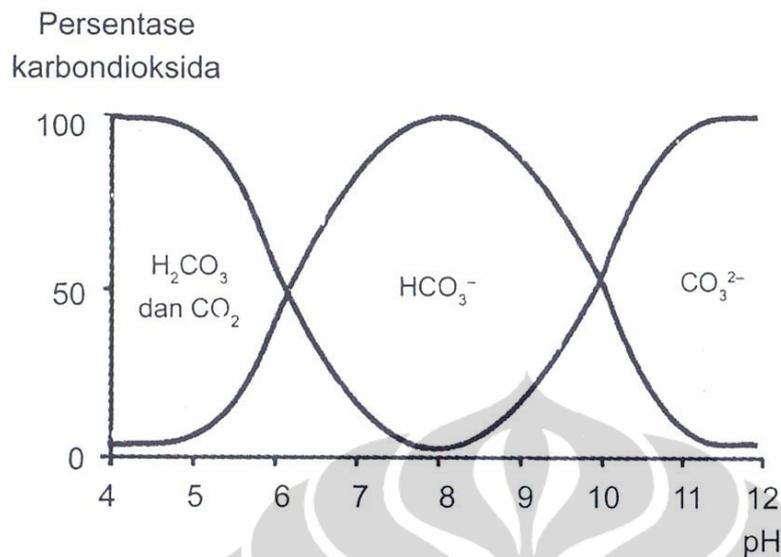
Sebagian kecil karbondioksida yang terdapat di atmosfer larut ke dalam uap air membentuk asam karbonat, yang selanjutnya jatuh sebagai hujan. Itulah sebabnya air hujan selalu bersifat asam dengan nilai pH sekitar 5,6 (Moss, 1993 *dalam* Effendi, 2003), seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (2.3) dan (2.4). Begitu pula hal yang terjadi pada karbondioksida yang masuk ke badan air; sekitar 1% karbondioksida bereaksi dengan air membentuk asam karbonat (Cole, 1988 *dalam* Effendi 2003).



Pada persamaan reaksi kesetimbangan (2.4) terbentuk ion H^+ sehingga pH perairan menurun. Karbondioksida yang terlarut di dalam air membentuk beberapa kesetimbangan, yang secara terperinci ditunjukkan dalam persamaan (2.5-2.10) (Mackereth *et al.*, 1989).



Jadi, keberadaan karbondioksida di perairan terdapat dalam bentuk gas karbondioksida bebas (CO_2), ion bikarbonat (HCO_3^-), ion karbonat (CO_3^{2-}), dan asam karbonat (H_2CO_3) (Boney, 1989 dan Cole, 1988 *dalam* Effendi, 2003). Proporsi dari keempat bentuk karbon tersebut berkaitan dengan nilai pH dapat diperlihatkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Hubungan antara persentase karbondioksida dengan pH (Willoughby, 1978 dalam Effendi, 2003)

Pada Gambar 2.1 terlihat bahwa jika pH turun hingga 4,3, kesetimbangan (2.6) bergeser ke kiri. Pada kondisi ini tidak ditemukan ion bikarbonat. Jika pH meningkat lagi, maka kesetimbangan (2.7) akan bergeser ke kanan, kadar CO_2 dan H_2CO_3 mulai berkurang, digantikan oleh ion HCO_3^- yang merupakan hasil disosiasi H_2CO_3 . Pada pH 8,3, CO_2 dan H_2CO_3 tidak ditemukan lagi, hanya terdapat ion HCO_3^- . Jadi, reaksi kesetimbangan (2.8) akan berlangsung jika pH perairan sekitar 8,3.

Round (1993) menyatakan bahwa pH media berkisar antara 7,0-8,0 cukup baik untuk digunakan dalam kultur alga di laboratorium walaupun pH tersebut lebih rendah dibandingkan dengan pH air laut. Menurut Becker (1994), CO_2 dalam medium cair bentuknya bervariasi tergantung pada suhu, pH, dan konsentrasi nutrisi di dalam medium. Pada pH 4-5 CO_2 dalam bentuk bebas, pada pH 5,5-9 CO_2 dalam bentuk bikarbonat dan pada pH di >9 CO_2 berbentuk karbonat. Bentuk karbonat (CO_3^{2-}) tidak dapat diasimilasi oleh mikroalga. Karena itu ketersediaan CO_2 menjadi faktor pembatas pertumbuhan mikroalga. Brown (1996) menyatakan bahwa mikroalga

mengambil CO₂ dalam jumlah besar dibandingkan tumbuhan tingkat tinggi dan mempunyai toleransi terhadap beberapa variasi kondisi lingkungan.

pH juga mempengaruhi toksisitas suatu senyawa kimia. Senyawa amonium yang dapat terionisasi banyak ditemukan pada perairan yang memiliki pH rendah. Amonium bersifat tidak toksik. Namun, pada suasana alkalis (pH tinggi) lebih banyak ditemukan amonia yang tak terionisasi dan bersifat toksik. Amonia tak terionisasi ini lebih mudah terserap ke dalam tubuh organisme akuatik dibandingkan dengan amonium (Tebbut, 1992 dalam Effendi, 2003).

Sebagian besar biota akuatik sensitif terhadap perubahan pH dan menyukai nilai pH sekitar 7-8,5. Nilai pH sangat mempengaruhi proses biokimiawi perairan, misalnya proses nitrifikasi akan berakhir jika pH rendah (Effendi, 2003). Pada pH<4, sebagian besar tumbuhan air mati karena tidak dapat bertoleransi pada pH rendah. Namun, algae jenis *Chlamidomonas acidophila* masih dapat bertahan hidup pada pH sangat rendah (pH 1), dan algae jenis *Euglena* masih dapat bertahan hidup pada pH 1,6 (Haslam, 1995 dalam Effendi 2003).

2.4.4 Unsur Hara

Fitoplankton akan tumbuh dengan baik dengan tersedianya unsur hara yang dibutuhkan untuk pertumbuhannya. Round (1973), Raymont (1980), Reynolds (1990), dan Harmelen dan Oonk (2006) menyebutkan bahwa unsur hara yang dibutuhkan alga terdiri atas unsur hara makro dan unsur hara mikro. Unsur-unsur yang termasuk dalam unsur hara makro adalah C, H, N, P, K, S, Mg, dan Ca; sedangkan unsur hara mikro adalah Fe, Cu, Mn, Zn, Co, Mo, Bo, Vn, dan Si. Di antara unsur hara tersebut, N dan P sering menjadi faktor pembatas pertumbuhan fitoplankton (Krisanti, 2003). Khusus bagi jenis-jenis yang memiliki dinding sel yang mengandung Si, misalnya *diatom* dan *silicoflagellata*, unsur Si turut berperan sebagai faktor pembatas. Unsur hara mikro berperan dalam sistem enzim, proses oksidasi, dan reduksi dalam metabolisme fitoplankton, dan memproduksi klorofil (Thompson dan Troeh dalam Garcia dan Garcia, 1985).

Nitrogen dan fosfor adalah unsur hara anorganik utama yang dibutuhkan mikroalga untuk tumbuh dan bereproduksi. Nitrogen dalam bentuk nitrat (NO_3^-), nitrit (NO_2^-) atau ammonium (NH_4^+) dan fosfor dalam bentuk fosfat (PO_4^{3-}) (Nybakken, 1988). Unsur hara anorganik dan organik hanya dibutuhkan dalam jumlah kecil tetapi harus dipenuhi untuk melengkapi daur hidup fitoplankton.

Nitrogen adalah komponen organik terbesar pada tumbuhan. Nitrogen dalam alga digunakan untuk membentuk asam amino, nukleotida, dan vitamin. Komponen nitrogen organik terdiri dari asam amino (pembentuk protein), asam nukleat, enzim-enzim, dan materi-materi pentransfer energi seperti klorofil, ADP (*adenosine diphosphate*), dan ATP (*adenosine triphosphate*). Produksi protein dan materi-materi lain yang dibutuhkan untuk memproduksi sel-sel baru akan terbatas jika kekurangan nitrogen (Garcia dan Garcia, 1985).

Kecenderungan dari alga umumnya mengambil berturut-turut: nitrat, nitrit, dan amonium. Nitrat dan nitrit harus terlebih dahulu direduksi melalui sistem enzim sebelum dapat digunakan oleh sel sedangkan amonium biasanya digunakan langsung untuk sintesis asam-asam amino melalui transaminasi. Alga fitoplankton mempunyai kecenderungan untuk lebih dulu menggunakan N-anorganik dan urea, sedangkan asam amino hanya digunakan bila sumber-sumber N lainnya sudah terkuras (Nontji, 1984).

Fosfor diperoleh fitoplankton atau alga dari senyawa organik (ion ortofosfat), dalam kasus-kasus tertentu diperoleh dari fosfor organik terlarut. Fosfor yang telah diserap oleh sel akan menjadi bagian dari komponen struktural sel dan berperan pula dalam proses-proses pengalihan energi di dalam sel (Nontji, 1984).

2.5 Pemanfaatan Emisi CO_2 Dari PLTU Batubara dan Limbah Cair Domestik Terintegrasi Untuk Pertumbuhan Mikroalga

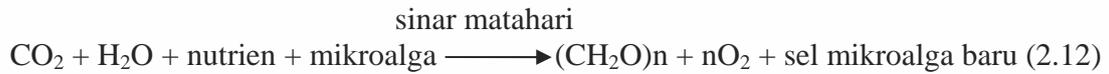
Mikroalga memiliki peranan yang sangat penting dalam proses pengolahan limbah secara biologis. Salah satu cara untuk menekan biaya operasional adalah

mengintegrasikan pertanian alga dengan pengolahan limbah. Penggunaan limbah sebagai media pertumbuhan mikroalga dimaksudkan untuk mengurangi biaya operasional untuk pembuatan media. Salah satu limbah yang dapat digunakan adalah limbah domestik. Jenis *Chlorella vulgaris* mampu hidup di air limbah domestik. Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* lebih baik pada limbah domestik dengan kandungan amonia awal 4,7 mg/l sehingga diperoleh nilai OD (*Optical Density*) sebesar 0,940 pada jam ke-52 (Fitri, 2010). Sedangkan menurut Kriens (1994) menyatakan bahwa batas toleransi amonia bebas (NH₃) untuk *Chlorella vulgaris* adalah sebesar 6 mg/l. Fallowfield dan Barret (1985) melakukan penelitian terhadap limbah *dilute pig slurry* yang hasilnya menunjukkan bahwa jenis mikroalga ini mampu mereduksi nitrogen dengan presentasi removal sebesar 54-98% dalam waktu 4,5 hari. Penelitian lain juga dilakukan oleh Sreesai dan Pakpain (2007) yang menggunakan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* untuk mengolah limbah *septic tank* di kota Bangkok. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa pertumbuhan *Chlorella vulgaris* dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari dan konsentrasi biomasa maksimum diperoleh pada hari ke-4 (empat) dengan konsentrasi sebesar 390 mg/l dan konsentrasi klorofil sebesar 5,8 mg/l pada intensitas cahaya matahari dari alam.

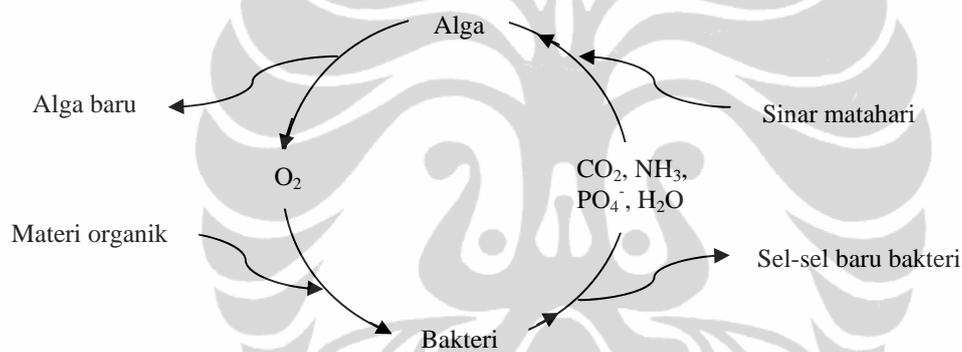
Penelitian yang dilakukan oleh Barnett (1997) menyatakan bahwa jika nutrisi yang diabsorpsi dan kondisi lingkungan memenuhi syarat pertumbuhannya, maka mikroalga dapat berkembang biak dengan cepat. Mikroalga juga sangat toleran terhadap perubahan kondisi lingkungan dan karena kemampuannya berfotosintesis, maka alga dapat bersimbiosis dengan bakteri pengurai limbah. Oksigen yang dihasilkan oleh mikroalga melalui proses fotosintesis dengan bantuan sinar matahari akan digunakan oleh bakteri aerob untuk mendegradasi materi-materi organik yang terdapat di dalam air limbah menjadi sel-sel baru. Sedangkan CO₂ yang dihasilkan dari hasil respirasi bakteri aerob digunakan oleh mikroalga sebagai sumber karbon. Reaksi simbiosis yang saling menunjang antara mikroalga dengan bakteri pengurai limbah adalah sebagai berikut.



Universitas Indonesia

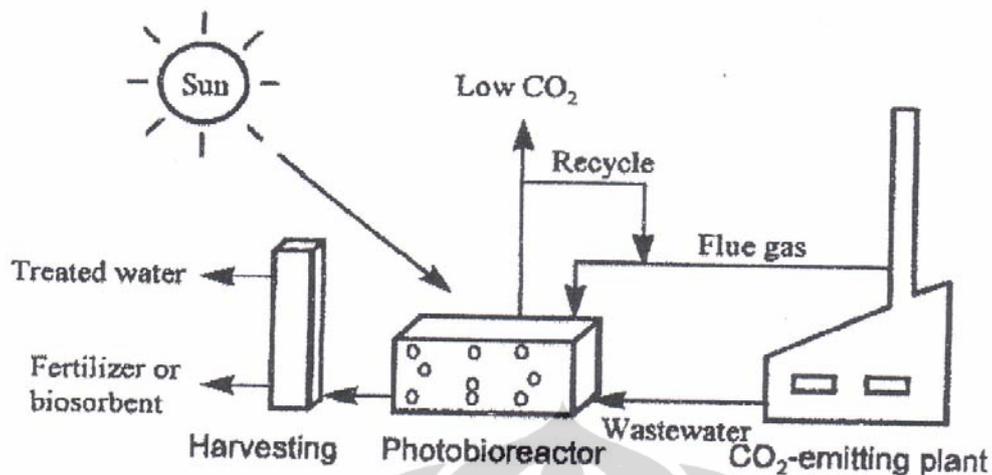


Berdasarkan reaksi di atas terlihat bahwa materi organik yang terkandung dalam air limbah akan diuraikan oleh bakteri dalam keadaan aerob menjadi CO_2 dan H_2O dan sel bakteri baru. Sedangkan mikroalga akan mensintesis CO_2 dan H_2O dengan bantuan sinar matahari menjadi bahan organik dan oksigen yang dibutuhkan oleh bakteri (Taber, 1976 dalam Muslimin, 1995). Hubungan simbiosis antara mikroalga dan bakteri pengurai juga dapat digambarkan dengan skema di bawah ini.



Gambar 2.2. Hubungan Simbiosis Antara Mikroalga dan Bakteri di dalam Kolam HROP (Metcalf & Eddy, 1991)

Konsep pengolahan limbah cair yang diintegrasikan dengan *fixation* emisi CO_2 untuk pertumbuhan mikroalga telah lama muncul. Konsep ini telah dikembangkan oleh Yun *et al.*, 1997 seperti yang terlihat pada Gambar 2.3 . Penelitian yang dilakukan Yun *et al.* bertujuan untuk menghilangkan amonia dari limbah cair industri baja dan menyerap emisi CO_2 yang dikeluarkan industri tersebut dalam upaya pengembangan sistem kelayakan ekonomi dari pengolahan limbah.



Gambar 2.3. Konsep Sistem Pengolahan Limbah dan Emisi CO₂ Industri Terintegrasi (Yun *et al.*, 1997)

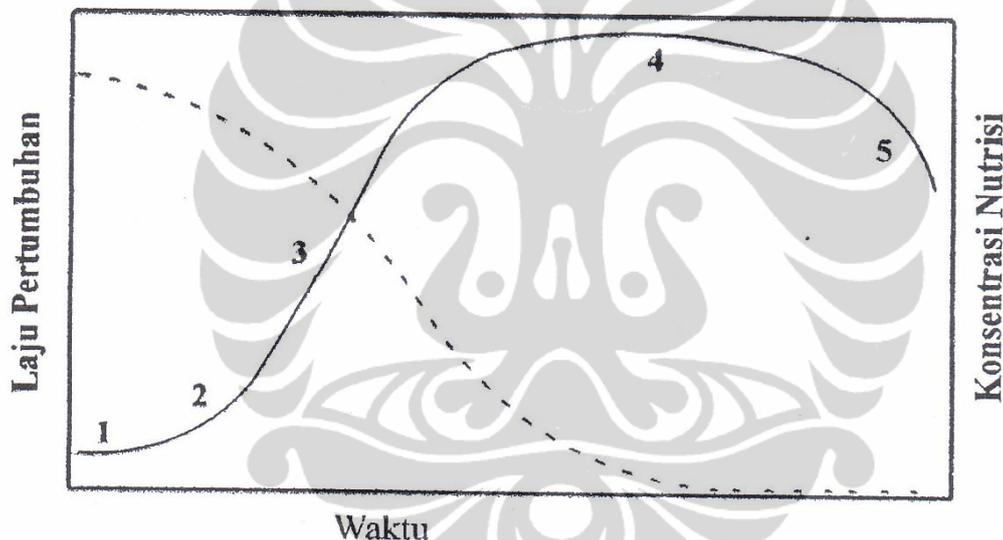
2.6 Pertumbuhan Mikroalga

Pertumbuhan fitoplankton atau mikroalga khususnya dalam kultur dapat ditandai dengan bertambah besarnya ukuran sel atau bertambah banyaknya jumlah sel. Untuk mengetahui pertumbuhan mikroalga dalam kultur pakan alami, hingga saat ini yang dipergunakan secara luas adalah kepadatan sel (Isnansetyo & Kurniastuty, 1995). Ada lima fase pertumbuhan mikroalga, yaitu:

1. Fase Lag atau fase istirahat disebut juga fase adaptasi, yaitu penyesuaian diri dengan medium dan kondisi lingkungan di sekitarnya. Ukuran sel pada umumnya meningkat tetapi belum terjadi pembelahan sel sehingga kepadatan sel belum meningkat.
2. Fase Logaritmik atau Eksponensial, yaitu pada fase ini diawali oleh pembelahan sel dengan laju pertumbuhan tetap. Pada fase ini sel membutuhkan energi lebih banyak dibandingkan fase lainnya sehingga laju pertumbuhan mencapai maksimal.
3. Fase Pertumbuhan Linier, yaitu pada fase ini ditandai dengan berkurangnya nutrisi dalam media sehingga mempengaruhi kemampuan pembelahan sel sehingga hasil produksi sel semakin berkurang.

4. Fase Stationer, yaitu pada fase ini pertumbuhan mulai mengalami penurunan dibandingkan dengan fase logaritmik. Pada fase ini laju reproduksi sama dengan laju kematian sehingga kepadatan mikroalga tetap.
5. Fase Kematian, yaitu pada fase ini laju kematian lebih cepat daripada laju reproduksi. Jumlah sel menurun secara geometrik.

Nutrisi berupa N, P, dan C sering menjadi faktor pembatas dan pemacu pertumbuhan mikroalga. Laju pertumbuhan jika diplotkan sebagai fungsi dari konsentrasi nutrisi dapat diperlihatkan pada Gambar 2.4. Garis hitam merupakan laju pertumbuhan dan garis putus-putus merupakan konsentrasi nutrisi.



Gambar 2.4. Skema laju pertumbuhan mikroalga dalam kultur *batch* (Ricica, 1966 dalam Grobbelaar, 2004)

Keterangan:

1. Fase lag,
2. Fase pertumbuhan eksponensial
3. Fase pertumbuhan linier,
4. Fase pertumbuhan stasioner,
5. Fase kematian.

Kuantitas mikroalga dapat dinyatakan dengan biomassa yang pada hakekatnya bermakna banyaknya zat hidup (*living matter*) per satuan luas atau per satuan volume pada satu daerah dan pada satu waktu tertentu (Cushing, Humphrey, Banse, Laevastu, 1958 *dalam* Nontji, 1984). Salah satu metode pendekatan untuk penentuan biomassa mikroalga adalah dengan metode klorofil. Kelebihan metode ini adalah karena klorofil (khususnya klorofil-a) dalam perairan terdapat hanya pada fitoplankton. Teknik pengukurannya secara kimia juga dapat dikerjakan dengan cepat, baik secara spektrofotometrik maupun fluorometrik. Selain itu, karena klorofil merupakan reseptor energi matahari dalam proses fotosintesis, maka data klorofil bersama-sama dengan data intensitas cahaya dapat digunakan untuk memperkirakan produktivitas primer di laut (Ryther dan Yentsch, 1957; Saijo dan Ichimura, 1960; Strickland, 1960 *dalam* Nontji, 1984).

2.7 Konstanta Pertumbuhan Sel Mikroalga (k) dan Konsentrasi CO₂ Terlarut dalam Media Pertumbuhan Mikroalga

2.7.1 Konstanta Pertumbuhan Sel Mikroalga (k)

Laju pertumbuhan sel mikroalga secara eksponensial dapat diekspresikan dengan berbagai cara (Hoogenhout & Amesz, 1965 *dalam* Borowitzka, 1988). Biasanya laju pertumbuhan mengikuti persamaan di bawah ini:

$$K = \log_2 \frac{N_2}{N_1} \times \frac{1}{t} \quad 2.13$$

Di mana,

N_1 = Kepadatan sel pada saat awal

N_2 = Kepadatan sel pada waktu t

T = periode waktu (hari)

Dengan menggunakan \log_2 , dan menentukan t sebagai 1 hari, konstanta pertumbuhan menjadi ekuivalen dengan jumlah penggandaan sel per-hari (*number of doublings*). Konstanta pertumbuhan sering diekspresikan dengan menggunakan $t = 1$ hari dan $\log_e (K_e)$ atau $\log_{10} (K_{10})$ dalam persamaan 2.13. Jumlah penggandaan sel per hari (k) dapat dihitung dengan Persamaan 2.14 di bawah ini:

$$k \left(\frac{\text{div}}{\text{hari}} \right) = \frac{K_e}{0,69} = \frac{2,30}{0,69} K_{10} = 3,32 K_{10} \quad 2.14$$

2.7.2 Konsentrasi CO₂ terlarut dalam media pertumbuhan mikroalga

Untuk menghitung konsentrasi CO₂ terlarut di dalam media pertumbuhan mikroalga, maka digunakan persamaan reaksi sebagai berikut:



$$K_H = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{p\text{CO}_2} \quad 2.15$$



$$K_1 = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} \quad 2.16$$



$$K_2 = \frac{[\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad 2.17$$

Jadi, $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] + [\text{HCO}_3^-] + 2 [\text{CO}_3^{2-}]$

Dengan mengasumsikan, $[\text{OH}^-] \ll [\text{H}^+]$, dan $K_2 \ll K_1$, sehingga $[\text{CO}_3^{2-}] \ll [\text{HCO}_3^-]$.

Dengan menggunakan pendekatan Hukum Henry, akhirnya didapat persamaan untuk K_1 sebagai berikut:

$$K_1 = \frac{[H^+]^2}{K_H \times pCO_2} \quad 2.18$$

$$[H^+] = (K_H \times K_1 \times pCO_2)^{1/2}$$

Keterangan:

K_H	= konstanta tetapan CO_2 dalam air
K_1	= konstanta tetapan H_2CO_3
K_2	= konstanta tetapan HCO_3^-
pCO_2	= tekanan partial CO_2
$[CO_2]$	= konsentrasi CO_2
$[H_2CO_3]$	= konsentrasi H_2CO_3
$[HCO_3^-]$	= konsentrasi HCO_3^-

2.8 Penggunaan Kolam Oksidasi Arus Deras (*High Rate Oxidation Pond* = HROP) Sebagai Media Pertumbuhan Mikroalga

Pengolahan air limbah dengan menggunakan Kolam Oksidasi Arus Deras yang dikenal dengan istilah *High Rate Oxidation Pond* (HROP) merupakan kolam pengolah limbah secara aerob yang mencapai efisiensi penurunan cemaran limbah karena terjadi proses simbiosis antara alga dan bakteri dalam kolam. Konsep dasarnya telah diperkenalkan oleh Oswald sejak tahun 1962 di California, dan kini sudah banyak dipergunakan di berbagai Negara di dunia: Amerika, Kuwait, Phillipina, Thailand, Singapore, Perancis, dan Afrika Selatan (Pouliot & La Noue, 1985; Azov & Shelev, 1987; Nurdogan, 1988; Picot *et al.*, 1991 dalam Zulkifli, 1994). Oksigen yang dihasilkan oleh mikroalga melalui proses fotosintesis dimanfaatkan oleh bakteri aerob untuk mengoksidasi senyawa organik dalam limbah. Karbondioksida hasil metabolisme bakteri akan digunakan oleh mikroalga untuk proses fotosintesis.

Efektivitas kolam HROP terutama ditentukan oleh intensitas cahaya yang mempengaruhi proses fotosintesis mikroalga. Oswald (1988) melaporkan bahwa di kolam terbuka, lebih dari 90% total energi matahari dirubah menjadi energi panas, dan hanya kurang dari 10% yang dirubah menjadi energi kimia. Fontes (1987) dalam Larsdotter (2006) juga melaporkan bahwa efisiensi perubahan energi matahari menjadi energi kimia hanya 2%. Intensitas cahaya hanya dapat menembus air pada kedalaman terbatas dan dipengaruhi oleh kualitas limbah cair. Oswald (1988) juga mengatakan bahwa produktivitas mikroalga di kolam terbuka dengan sinar matahari yang terbatas berkorelasi dengan kedalaman kolam. Umumnya kedalaman 15-50 cm direkomendasikan.

Strategi yang dilakukan agar proses fotosintesis dapat berlangsung pada semua bagian kolam adalah dengan pencampuran secara terus-menerus (*mixing*). Oksigen, karbondioksida, dan nutrisi juga dapat terdistribusi secara merata di dalam kolam jika tercampur secara merata dengan kecepatan tertentu. Intensitas cahaya berpengaruh pada pertumbuhan alga pada kolam dengan kedalaman 70 cm dan kecepatan 20 cm/detik (Londa, 2003). Kolam di mana alga tumbuh paling tinggi akan berdampak positif terhadap penurunan beban limbah. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa mikroalga dapat tumbuh pada berbagai jenis air limbah seperti limbah domestik (Zulkifli, 1994; Mulyadi, 1999), limbah cair argoindustri (Arylyza, 2003), limbah budidaya ikan (Panggabean dan Sutomo, 2002), dan limbah Rumah Pemotongan Hewan (RPH) (Londa, 2003).

Abeliovich (1986) mengatakan bahwa pertumbuhan mikroalga dan reduksi limbah dalam kolam oksidasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti: konstruksi kolam, radiasi cahaya matahari, dan beban limbah.

2.8.1 Konstruksi kolam

Terdapat dua parameter penting yang harus diperhatikan dengan teliti dalam dimensi kolam berkaitan dengan efisiensi Kolam Oksidasi, yaitu kedalaman dan laju alir air. Kedalaman air berhubungan dengan ketersediaan oksigen dan kualitas limbah cair.

Kedalaman <1 m akan menyebabkan munculnya tumbuhan seperti alga dengan cepat, dan kedalaman >1,5 m menyebabkan fungsi kolam lebih bersifat anaerobik daripada aerobik (Mara, 1984).

Oswald (1988) menghasilkan sebuah rumus tentang hubungan antara radiasi matahari, kedalaman, konsentrasi alga dan waktu tinggal (*detention time*) pada kolam HROP, yaitu:

$$hC_c = FSA\theta \quad (2.15)$$

Di mana:

- H = nilai kalor pembakaran alga ± 5.5 (Cal/mg)
- C_c = konsentrasi alga setara dengan nilai BOD (mg/l)
- F = efisiensi fotosintesis sebesar 2.5% dari S
- S = intensitas cahaya (Cal/cm².hari)
- A = luas permukaan kolam (cm²)
- θ = waktu tinggal (hari)

Distribusi nutrisi dan oksigen harus tercampur secara merata agar dapat dicapai peningkatan kestabilan dalam kolam. Karena itu, laju air dibutuhkan untuk pencampuran dalam proses aerasi. Pencampuran yang konsisten pada kolam merupakan parameter penting untuk menghasilkan biomassa mikroalga yang tinggi (Yan Li *et al.*, 2006). Tujuan pencampuran antara lain adalah agar semua sel mikroalga dapat kontak dengan nutrisi, CO₂, dan cahaya untuk pertumbuhan yang optimum, mencegah sel mikroalga tenggelam pada dasar kolam. Jika banyak sel yang tenggelam pada dasar kolam menyebabkan kerusakan sel dan akan terdekomposisi secara anaerobik. Erickson & Lee (1986) mengemukakan bahwa produktivitas sel alga 70% lebih besar dibandingkan perlakuan pencampuran lengkap terhadap kolam dengan tanpa pencampuran.

Menurut Oswald (1988), pencampuran dengan *paddle wheel* dapat mengeliminasi kerugian karena nilai pH dan DO. Nilai pH tidak pernah lebih dari 9,5 pada siang hari,

dan nilai DO tidak pernah kurang dari 2 mg/l pada malam hari. Kecepatan aliran karena pencampuran yang dibutuhkan untuk menciptakan kondisi optimal dalam kolam oksidasi, berada pada range 5 cm/det sampai 30 cm/det. Ditinjau dari segi ekonomi, kecepatan 5 cm/det dianggap terlalu lambat, dan pada 30 cm/det terlalu cepat, karena hasilnya tidak banyak bermanfaat.

Terdapat hubungan antara konsentrasi oksigen, laju fotosintesis, dan pH. Laju fotosintesis yang tinggi mengakibatkan konsentrasi oksigen juga meningkat, sehingga pH juga tinggi. Kombinasi ini berpotensi membahayakan pertumbuhan alga karena kemungkinan kerusakan *photooxidative* pada peralatan fotosintesis dan kerusakan fungsi vital lain dalam sel alga. Untuk mengatasi hal tersebut, maka pencampuran yang tepat dapat mengontrol transfer oksigen dari medium jenuh ke atmosfer, seperti transfer oksigen untuk respirasi alga dan bakteri di bawah 'Zone Photic'. Pencampuran yang tepat juga penting untuk suplai oksigen pada malam hari dan laju pencampuran minimal memiliki batas disesuaikan dengan kondisi.

Hasil penelitian di Meze-Perancis (Moersidik, 1992) pada Kolam HROP dengan kedalaman 30 cm, dan waktu detensi 8 hari, dan pada musim panas dengan intensitas maksimum 700 Cal/cm.hari, mencapai nilai klorofil-a sebesar 5,7 mg/l. Pertumbuhan alga berpengaruh pada efektivitas kolam dalam mendegradasi cemaran limbah. Penelitian pengolahan limbah domestik yang dilakukan di Palembang dengan menggunakan kolam HROP, nilai klorofil-a tertinggi sebesar 7 mg/l, dicapai pada kedalaman 50 cm, waktu detensi 4 hari, dan debit aliran limbah 52 ml/menit (Zulkifli, 1994).

2.8.2 Beban limbah

Unsur-unsur yang terdapat dalam sel-sel mikroba terdiri dari unsur C, N, dan P dengan perbandingan sekitar 100:10:1. Perbandingan unsur-unsur C, N, dan P dibutuhkan untuk aktivitas pertumbuhan dan dalam kondisi memadai. Namun demikian pada kenyataannya, perbandingan antara C dan N serta C dan P sekitar 25:1 dan 20:1. Persyaratan komposisi limbah untuk sistem pengolahan limbah secara biologis adalah

dengan perbandingan BOD:N:P = 100:5:1. Komposisi tersebut membantu penguraian bahan organik dengan cepat.

Nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroalga untuk pertumbuhannya diperoleh dari air limbah cair walaupun jumlahnya sedikit. Untuk memperoleh nutrisi, alga harus bersaing dengan bakteri, tetapi hanya sampai 50% karbon yang diasimilasi oleh alga dalam kolam oksidasi, sehingga alga dalam kolam oksidasi mampu tumbuh efisien secara heterotrofik. Nutrisi yang penting bagi alga dalam kolam oksidasi adalah yang bersifat heterotrof. Jadi selain nutrisi anorganik (N, P), alga juga membutuhkan nutrisi organik.

Larsdotter (1988) merangkum faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga di dalam kolam oksidasi arus deras dalam Tabel 2.3 di bawah ini.

Tabel 2.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroalga Dalam Kolam Oksidasi Arus Deras

Faktor Lingkungan	Parameter
Faktor Abiotik	Sinar matahari (kualitas, kuantitas)
Faktor Fisik dan Kimia	Temperatur
	Konsentrasi Nutrien
	O ₂ , CO ₂
	pH
	Salinitas
	Bahan Kimia Toksik
Faktor Biotik	Patogen (bakteri, jamur, virus)
	Predator oleh Zooplankton
	Kompetisi antar spesies mikroalga
	Mixing
	<i>Dilution Rate</i>
Faktor Operasional	Kedalaman
	Penambahan Bikarbonat
	Frekuensi Pemanenan

Sumber: Larsdotter, 1988

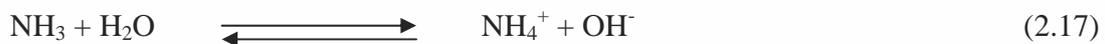
2.9 Pengaruh Amonia (NH₃) dalam Limbah Cair Domestik Terhadap Produktivitas Mikroalga

Di perairan, nitrogen terdapat dalam bentuk anorganik dan organik. Nitrogen anorganik terdiri dari amonia (NH₃), nitrit (NO₂), nitrat (NO₃) dan molekul N₂ dalam bentuk gas. Nitrogen organik berupa asam amino, protein dan urea. Sumber amonia di perairan adalah pemecahan nitrogen organik (protein dan urea) dan nitrogen anorganik yang terdapat di dalam tanah dan air, yang berasal dari dekomposisi bahan organik (tumbuhan dan biota akuatik yang telah mati) oleh mikroba dan jamur. Persamaan reaksi (2.16) menunjukkan proses amonifikasi.



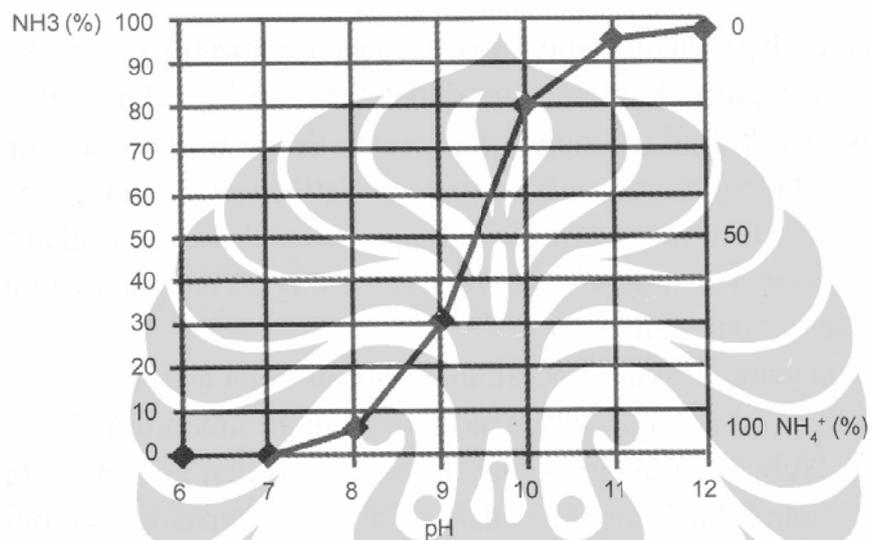
Di perairan, ketersediaan amonia, nitrit dan nitrat merupakan rangkaian nutrisi yang tidak dapat dipisahkan. Dari ketiga bentuk tersebut, nitrit merupakan bentuk sementara dari proses oksidasi antara amonia dan nitrat dan sebaliknya, baik dalam proses oksidasi amonia menjadi nitrit maupun reduksi dari nitrat menjadi nitrit (APHA, 1989).

Di perairan alami, pada suhu dan tekanan normal amonia berada dalam bentuk gas dan membentuk kesetimbangan dengan gas amonium. Kesetimbangan ini bergantung pada konsentrasi nutrisi, suhu, dan pH. Kesetimbangan antara gas amonia dan amonium ditunjukkan dalam persamaan reaksi (2.17).



Kesetimbangan amonia nitrogen akan bergeser ke kiri ketika pH air di atas 7,0. Pada pH antara 7-8 terjadi peningkatan konsentrasi amonia bebas sebanyak 10 kali. Pada pH 9, 20-40% dari amonia nitrogen berada dalam bentuk NH₃ dan pada pH di atas 10, lebih dari 80-90% amonia nitrogen berada dalam bentuk NH₃ (Rump dan Krist, 1992 dalam Effendi, 2003). Gambar 2.5 di bawah ini menunjukkan hubungan antara persentase kadar amonia dan amonium yang dipengaruhi oleh pH.

Amonia yang terukur di perairan berupa amonia total (NH_3 dan NH_4^+). Amonia bebas tidak dapat terionisasi, sedangkan amonium (NH_4^+) dapat terionisasi. Persentase amonia bebas meningkat dengan meningkatnya nilai pH dan suhu perairan. Pada pH 7 atau kurang, sebagian besar amonia akan mengalami ionisasi. Sedangkan pada pH lebih besar dari 7, amonia tak terionisasi yang bersifat toksik terdapat dalam jumlah yang lebih banyak (Novotny dan Olem, 1994 *dalam* Effendi, 2003).



Gambar 2.5. Persentase Kadar Amonia dan Amonium yang Dipengaruhi Oleh pH (Rump dan Krist, 1992 *dalam* Effendi, 2003)

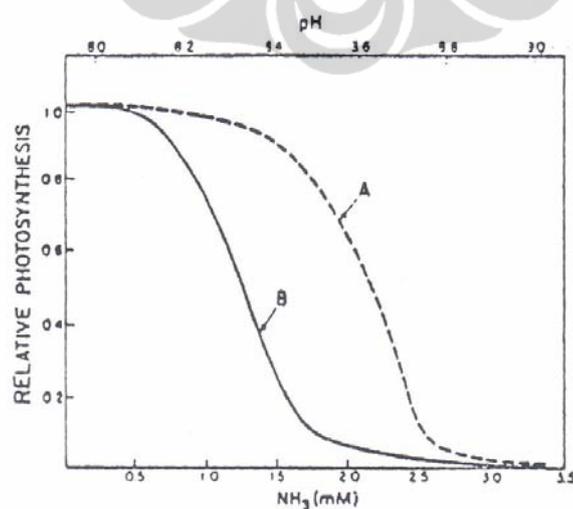
Amonia bebas (NH_3) yang tidak terionisasi bersifat toksik terhadap organisme akuatik. Toksisitas amonia terhadap organisme akuatik akan meningkat jika terjadi penurunan kadar oksigen terlarut, pH, dan suhu. Kadar amonia pada perairan alami biasanya kurang dari 0,1 mg/l (McNeely *et al.*, 1979 *dalam* Effendi, 2003). Sebaiknya kadar amonia bebas yang tidak terionisasi (NH_3) pada perairan tawar tidak lebih dari 0,02 mg/l. Kadar amonia yang tinggi dapat merupakan indikasi adanya pencemaran bahan organik yang berasal dari limbah domestik, industri, dan limpasan (*run-off*) pupuk pertanian. Kadar amonia yang tinggi juga dapat ditemukan pada dasar danau yang mengalami kondisi tanpa oksigen (*anoxic*) (Effendi, 2003).

Amonia dapat mengendap pada pada dasar perairan karena terserap ke dalam bahan-bahan tersuspensi dan koloid. Amonia di perairan dapat menghilang melalui proses volatilisasi karena tekanan parsial amonia dalam larutan meningkat dengan semakin meningkatnya pH. Hilangnya amonia ke atmosfer juga dapat meningkat dengan meningkatnya kecepatan angin dan suhu (Effendi, 2003).

Sumber nitrogen yang dapat dimanfaatkan secara langsung oleh tumbuhan akuatik adalah nitrat (NO_3^-), amonium (NH_4), dan gas nitrogen (N_2). Pada kultur alga, keberadaan amonia dalam jumlah tertentu akan menguntungkan karena nitrogen akan lebih mudah diserap oleh mikroalga dalam bentuk amonia sehingga amonia adalah sumber nitrogen yang disukai alga. Nitrat tidak akan dikonsumsi oleh mikroalga sampai konsentrasi amonia di dalam limbah cair habis. Nilai pH menurun bersamaan dengan penurunan konsentrasi amonia diikuti dengan peningkatan konsentrasi nitrat (Yun, *et al.*, 1997). Alga akan mengkonsumsi amonia dengan cepat jika dibandingkan konsumsi alga terhadap nitrat (Cole dan Sheath, 1990). Persamaan reaksi antara mikrolga dengan NH_3 dapat dilihat pada persamaan di bawah ini:



Pengaruh pH dan Nitrogen dalam Fotosintesis dapat diperlihatkan pada Gambar 2.6



Gambar 2.6. Pengaruh pH dan Nitrogen dalam Fotosintesis (Moersidik, 1988)

Keterangan:

- A: Peningkatan pH pada konsentrasi nitrogen total sebesar 5 mM
B: Peningkatan konsentrasi amonia bebas, NH_3^- (dihitung pada beberapa percobaan dengan nilai Nitrogen Total dan pH yang berbeda).

Percobaan yang dilakukan oleh Azov (1987) seperti pada Gambar 2.6 memperlihatkan bahwa pada konsentrasi nitrogen total (NH_4^+ dan NH_3) sebesar 5 mM, terjadi dampak yang besar pada pH dalam alga karena penyerapan karbon berkurang hingga 90% untuk nilai pH antara 8,2 sampai 8,7. Gambar 2.6 di atas juga memperlihatkan bahwa ketika konsentrasi NH_3 telah dihitung pada tiap nilai pH, tak ada pengaruh lain yang menentukan konsentrasi relatif senyawa NH_3 dalam medium.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh A. Abeliovich dan Y. Azof (1975) menyatakan bahwa jika konsentrasi amonia dalam kolam HROP melebihi 2 mM, fotosintesis bergantung pada pH limbah yang masuk kolam HROP dan kapasitas tenaga penahannya. Pada konsentrasi amonia tinggi, pH tinggi (>8), dan beban BOD rendah mengakibatkan waktu detensi yang panjang. Sedangkan pada pH rendah ($<7,5$), dan konsentrasi amonia yang rendah, memungkinkan sebuah operasi kolam oksidasi yang stabil dengan waktu detensi yang pendek.

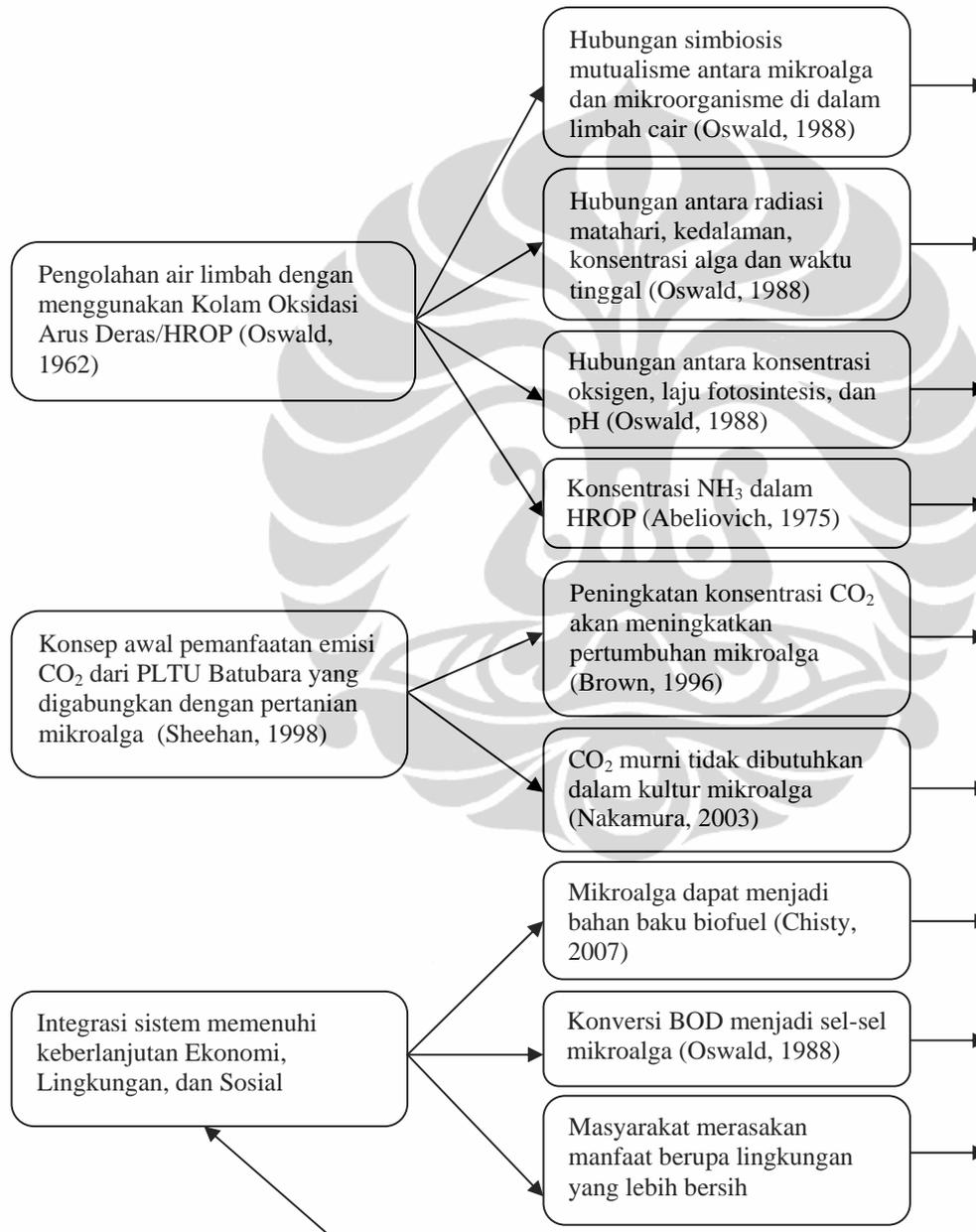
Air limbah domestik biasanya mengandung kadar amonia yang tinggi. Kebanyakan nitrogen dalam air limbah domestik berasal dari urin dan awalnya berada dalam bentuk urea (70-90% dari total nitrogen-TN). Urea akan terhidrolisis menjadi amonia nitrogen oleh enzim urease yang secara alami terdapat di urin (Silva *et al.*, 1995; Craggs, 2005). Total nitrogen pada air limbah 60% berada dalam bentuk amonia nitrogen (Barness dan Bills, 1983; Craggs, 2005). Hasil penelitian yang dilakukan oleh Setiyono (2005) pada limbah cair domestik dari berbagai sumber menunjukkan kandungan amonia maksimum mencapai 158,73 mg/l dan konsentrasi pada jumlah minimum mencapai 10,79 mg/l. Sumber air limbah domestik adalah seluruh buangan air yang berasal dari seluruh kegiatan pemukiman, rumah makan, perkantoran,

Universitas Indonesia

perniagaan, apartemen, dan asrama yang meliputi limbah buangan kamar mandi, toilet, dapur, dan air bekas pencucian pakaian (Setiyono, 2005).

2.10 Kerangka Teori

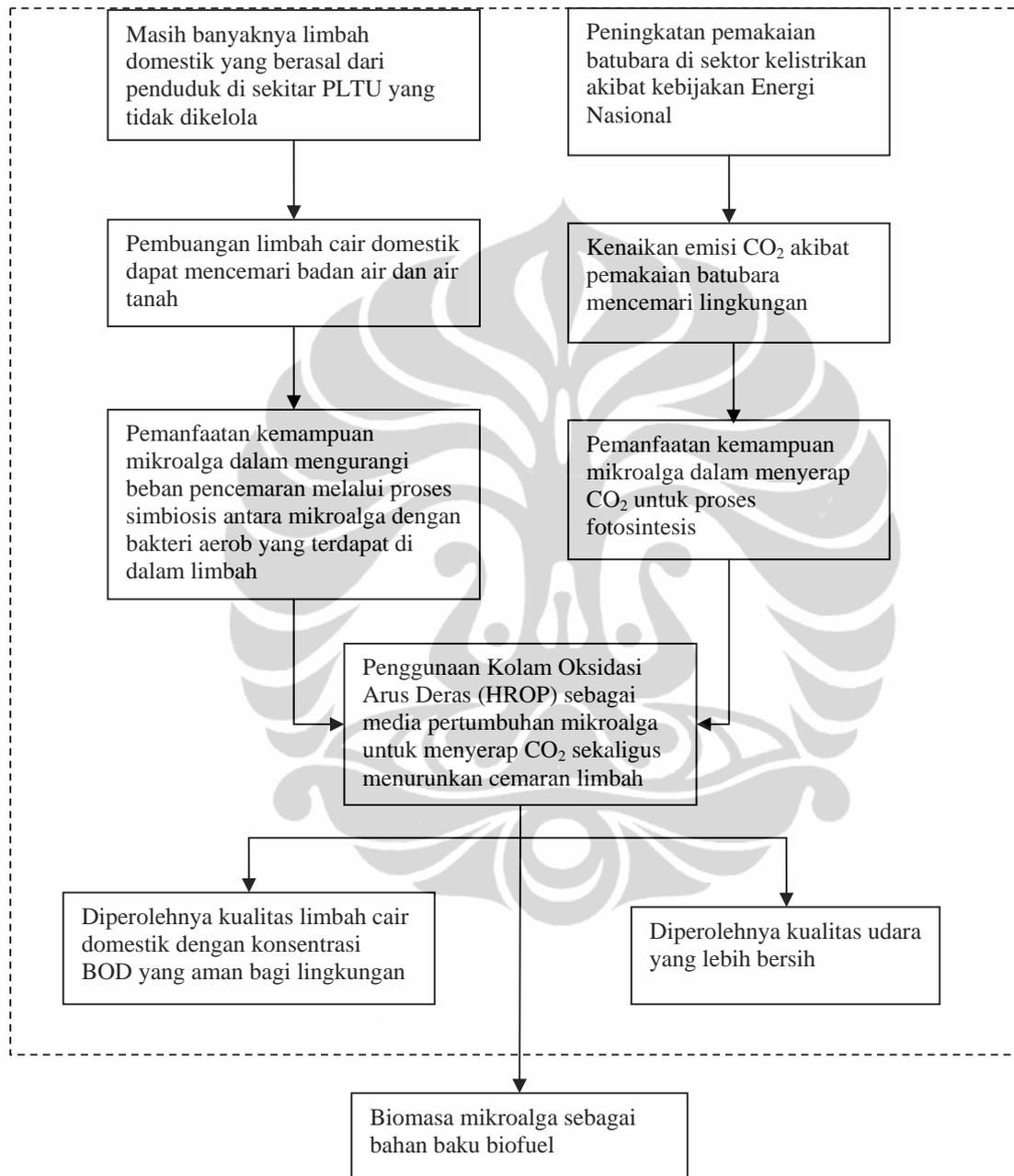
Berdasarkan teori-teori yang sudah dijelaskan di atas, maka dapat digambarkan dalam sebuah kerangka teori pada Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7. Kerangka Teori

2.11 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir dalam penelitian ini dapat diperlihatkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Kerangka Berpikir

Berdasarkan Gambar 2.8 di atas terlihat bahwa ada 2 (dua) permasalahan yang menjadi latar belakang penelitian ini. Yang pertama adalah kenaikan emisi CO₂ yang berasal dari sektor kelistrikan akibat pemakaian batubara dan yang kedua adalah limbah cair domestik khususnya limbah *septic tank* yang dapat mencemari air tanah. Diperlukan suatu upaya untuk mengurangi emisi CO₂, salah satunya adalah dengan memanfaatkan emisi CO₂ tersebut untuk pertumbuhan mikroalga. Penelitian ini mengintegrasikan pemanfaatan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan pengolahan limbah cair domestik. Kedua proses tersebut diintegrasikan karena kemampuan mikroalga dalam menyerap emisi CO₂ dari PLTU Batubara untuk proses fotosintesis dan kemampuannya untuk mengurangi beban pencemaran melalui proses simbiosis antara mikroalga dengan bakteri yang terdapat pada air limbah. Nutrisi yang dibutuhkan mikroalga untuk tumbuh dan berkembang biak diperolehnya dari limbah cair domestik yang dimasukkan ke dalam Kolam HROP. Proses simbiosis yang terjadi antara mikroalga dengan bakteri aerob adalah bahwa oksigen yang dihasilkan oleh mikroalga melalui proses fotosintesis dimanfaatkan oleh bakteri aerob untuk mengoksidasi senyawa organik dalam limbah. Karbondioksida hasil metabolisme bakteri akan digunakan oleh mikroalga untuk proses fotosintesis.

Dalam penelitian ini spesies mikroalga yang dipilih yaitu *Chlorella vulgaris*. Jenis mikroalga ini berdasarkan penelitian sebelumnya memiliki sifat-sifat mengandung *lipid* yang konstan dan tinggi, pertumbuhan kontinyu, efisiensi fotosintesis tinggi, produktivitas biomassa yang konstan dan tinggi, dapat bertahan pada perbedaan musim dan perubahan temperatur, mudah untuk dipanen dan diekstraksi lemaknya. Mikroalga jenis ini juga spesies yang tahan terhadap penyakit, dapat hidup di air limbah, mudah pemeliharaannya, mempunyai toleransi yang tinggi terhadap CO₂ dan memiliki potensi yang besar sebagai bahan baku biofuel. Selain itu, Indonesia mempunyai koleksi spesies tersebut yang berasal dari perairan Indonesia dan telah dibudidayakan.

Faktor-faktor lingkungan lainnya yang sangat mempengaruhi produktivitas mikroalga adalah ketersediaan sinar matahari, pH, dan suhu. Selain itu kebutuhan unsur

anorganik yang berasal dari nitrogen dapat diperoleh dari kandungan amonia yang terdapat di dalam air limbah. Kandungan amonia dapat menjadi faktor pembatas dan faktor penghambat pertumbuhan mikroalga. Gas buang dari PLTU Batubara tidak saja mengandung CO₂ tetapi juga gas lainnya seperti SO₂ dan NO_x, namun dari hasil penelitian sebelumnya pada batasan tertentu tidak mempengaruhi produktivitas mikroalga.

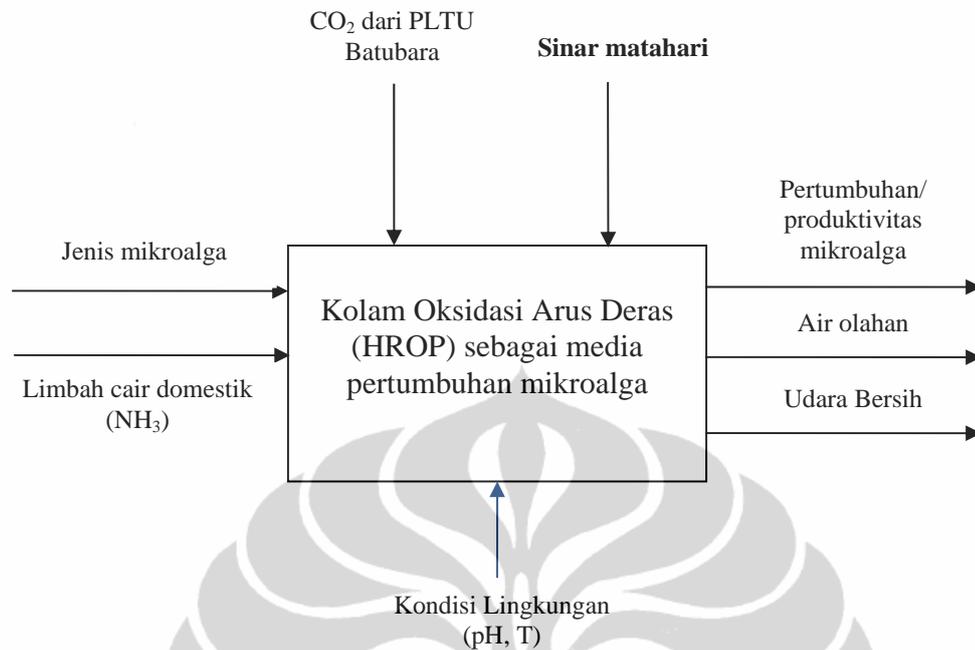
Dengan tambahan gas CO₂ yang diperoleh dari PLTU Batubara dan nutrisi yang diperoleh dari limbah cair domestik, serta kelimpahan sinar matahari, diharapkan produktivitas mikroalga akan lebih baik. Dari hasil penelitian ini diharapkan memperoleh kualitas udara yang lebih baik dan kualitas air olahan yang sudah aman terhadap lingkungan.

Berdasarkan penjelasan di atas, maka dalam penelitian ini terdapat beberapa variabel yang akan diukur, yaitu :

- 1) Variabel bebas yaitu, emisi gas CO₂, intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, oksigen terlarut, dan konsentrasi amonia (NH₃) dalam limbah cair domestik, dan.
- 2) Variable terikat, yaitu :
 - i. Kualitas *effluent* HROP dengan indikator BOD.
 - ii. Produktivitas mikroalga dengan indikator kerapatan sel.

2.12 Kerangka Konsep

Dari variabel-variabel yang dihasilkan dari kerangka berpikir di atas, maka didapat hubungan antar variabel, yaitu sebagai berikut:



Gambar 2.9. Kerangka Konsep

2.13 Hipotesis

Berdasarkan uraian di atas, maka hipotesis yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Peningkatan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dapat menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga.
2. Penurunan konsentrasi amonia (NH₃) dapat menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga.
3. Peningkatan *pertumbuhan* mikroalga dapat menyebabkan peningkatan kualitas limbah cair domestik (penurunan nilai BOD).

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif. Metode penelitiannya adalah dengan melakukan metode eksperimen.

Lingkup kegiatan penelitian mencakup kegiatan di lapangan. Kegiatan lapangan meliputi kegiatan eksperimen untuk kultivasi mikroalga dengan memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara yang diintegrasikan dengan pengolahan limbah domestik melalui Kolam HROP dalam skala pilot. Penelitian ini merupakan bagian dari unit kegiatan yang dilakukan oleh Mahasiswa S3 Angkatan 7A Program Studi Ilmu Lingkungan Universitas Indonesia (Faridha) dan dilakukan di dalam sistem yang sama. Dari hasil eksperimen ini akan diperoleh data mengenai pertumbuhan mikroalga, intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, oksigen terlarut, konsentrasi amonia dari limbah domestik, dan kualitas air olahan (BOD). Pemeriksaan parameter sebelum dan sesudah perlakuan dilakukan di laboratorium. Keberhasilan eksperimen sangat ditentukan oleh pemilihan lokasi penelitian karena kebutuhan nutrisi untuk tumbuh dan berkembang biaknya mikroalga sangat tergantung pada faktor-faktor lingkungan di lokasi penelitian.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di lokasi PLTU Bukit Asam, Tanjung Enim, Kabupaten Muara Enim, Propinsi Sumatera Selatan. Pemeriksaan parameter dilakukan di laboratorium PLTU Bukit Asam Tanjung Enim, Laboratorium Lingkungan BLH (Badan Lingkungan Hidup) Pemerintah Kabupaten Muara Enim, dan LIPI-Oceanografi Jakarta. Waktu penelitian berlangsung selama 2 (dua) bulan yaitu dari bulan Nopember 2010 sampai dengan Januari 2011.

3.3 Sampel Penelitian

3.3.1 Bibit mikroalga

Jenis mikroalga yang digunakan adalah *Chlorella vulgaris* yang berasal dari perairan Indonesia dan telah dikultur oleh LIPI-Oceanografi. Bibit mikroalga yang digunakan dalam penelitian diperbanyak di lokasi penelitian sampai mencapai volume yang diinginkan, yaitu 10% dari volume campuran air limbah dan mikroalga (volume campuran = 309,6 Liter) dan kerapatan selnya telah mencapai 1 juta sel/ml.

3.3.2 Limbah cair domestik

Limbah cair yang digunakan adalah limbah *septic tank* yang berasal dari pemukiman warga di Kota Muara Enim. Mobil penguras *septic tank* milik Pemerintah Kabupaten Muara Enim digunakan untuk mengambil limbah cair, yang kemudian disimpan dalam drum (tangki air). Limbah cair tersebut kemudian dianalisis untuk mengetahui karakteristik limbah dengan mengacu pada standar pengujian air limbah seperti BOD, COD, pH, suhu, DO, konsentrasi NH_3 , NO_3^- , NO_2^- , Pospat, dan TSS. Sebelum diolah pada Kolam HROP, limbah cair domestik disaring dengan menggunakan saringan santan untuk menghilangkan kotoran-kotoran yang bersifat padatan. Jika limbah cair domestik memiliki konsentrasi BOD lebih besar daripada 500-600 mg/l, maka akan mendapatkan perlakuan secara anaerob dengan cara didiamkan pada tangki air sampai limbah tersebut siap untuk diolah pada Kolam HROP (BOD < 500-600 mg/l). Selain untuk mengurangi beban BOD, perlakuan secara anaerob juga berfungsi untuk mengurangi bakteri patogen.

3.3.3 Gas buang PLTU Batubara

Gas buang diambil dari salah satu lubang tempat monitoring gas buang PLTU (*stack*). Cara pengambilan dengan menggunakan blower yang kemudian dialirkan ke dalam Kolam HROP dengan metode difusi. Sebelum dialirkan dilakukan pengujian terhadap karakteristik gas buang dan analisis terhadap konsentrasi gas buang (parameter CO_2 , SO_2 , NO_x , dan debu).

3.4 Variabel Penelitian

Variabel yang dapat ditentukan dalam penelitian ini meliputi:

- 1) Variabel bebas yaitu, emisi gas CO₂, intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, oksigen terlarut, dan konsentrasi amonia (NH₃) dalam limbah cair domestik;
- 2) Variabel terikat, yaitu:
 - i. Kualitas *effluent* HROP dengan indikator BOD.
 - ii. Pertumbuhan mikroalga dengan indikator kerapatan sel.

Definisi Operasional dari variabel penelitian di atas dapat dilihat pada Tabel 3.1 di bawah ini.

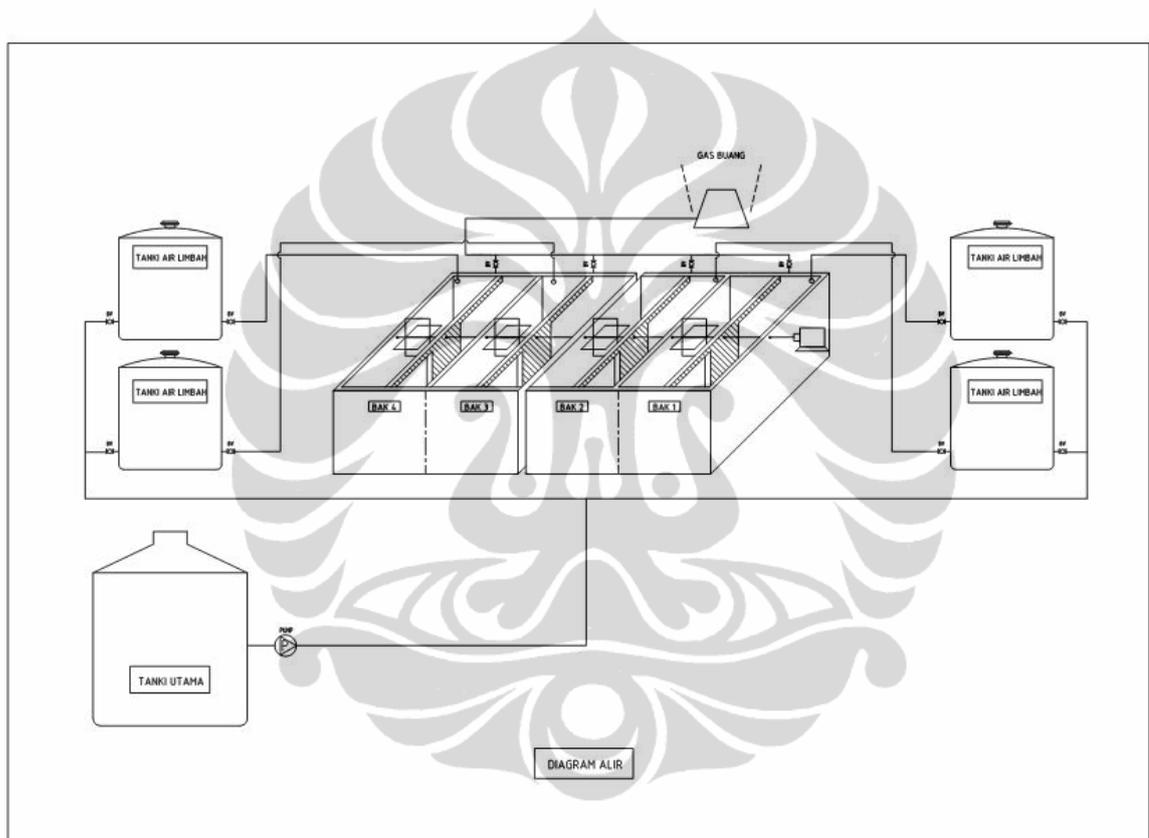
Tabel 3.1. Definisi Operasional dari Variabel Penelitian

No	Variabel	Definisi Operasional	Satuan Unit	Sifat Data
1.	Laju alir emisi gas CO ₂	Laju alir emisi gas buang dari hasil pembakaran batubara di PLTU Batubara Suralaya yang mengandung CO ₂ dan beberapa komponen gas lainnya seperti NO _x , SO ₂ , dan debu/partikulat.	Liter/menit	Primer
2.	Intensitas cahaya matahari	Banyaknya radiasi cahaya matahari yang menembus Kolam HROP dan dimanfaatkan oleh mikroalga untuk fotosintesis.	klux	Primer
3.	Konsentrasi amonia	Banyaknya jumlah amonia dalam satuan volume limbah cair domestik.	mg/l	Primer
4.	Pertumbuhan mikroalga	Bertambah banyaknya jumlah sel, dan kepadatan sel digunakan sebagai parameter untuk mengetahui pertumbuhan mikroalga.	sel/ml	Primer
5.	Nilai BOD	Salah satu cara mengukur tingkat pencemaran dengan cara mengukur senyawa organik <i>biodegradable</i> yang dinyatakan dalam banyaknya Oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk mengoksidasi bahan atau senyawa organik di dalam air.	mg/l	Primer

3.5 Spesifikasi Peralatan

3.5.1 Spesifikasi Peralatan Pendukung Percobaan

Percobaan yang dilakukan tidak hanya membutuhkan bak kultivasi mikroalga, tetapi juga dilengkapi dengan alat pendukung lainnya seperti: tangki penampung limbah, blower, difuser, *paddle wheel*, dan motor penggerak *paddle wheel*. Rangkaian peralatan percobaan dalam suatu sistem percobaan dapat dilihat pada Gambar 3.1 di bawah ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Percobaan (Faridha)

Spesifikasi peralatan beserta fungsinya dapat dilihat pada Tabel 3.2 di bawah ini.

Tabel 3.2. Spesifikasi Peralatan

No	Peralatan	Spesifikasi	Fungsi
1.	Bak	Bahan : Kayu dilapisi resin Dimensi : 1,2 m x 0,6 m x 0,6 m Jumlah : 4 buah	Tempat kultivasi mikroalga
2.	<i>Paddle Wheel</i>	Bahan : <i>Stainles steel</i> Panjang daun : 60 cm Lebar daun : 20 cm Lembar daun : 8 buah Jumlah : 4 buah	Untuk pencampuran, dengan tujuan: - Tidak terjadi endapan mikroalga, - Menghomogenkan campuran air limbah, mikroalga, dan gas CO ₂ yang dialirkan ke bak.
3.	Motor	Voltase : 220 watt Kapasitas : - Daya : 700 watt (start) 450 watt (kontinu)	Dilengkapi dengan pengaturan kecepatan putaran. Fungsinya: untuk menggerakkan <i>paddle wheel</i> sehingga dapat mensirkulasikan air limbah.
4.	Tangki Utama	Bahan : Plastik Volume : 1000 liter Jumlah : 1 buah	Sebagai cadangan air limbah untuk percobaan dan menjaga agar air limbah yang digunakan komposisinya relatif sama.
5.	Tangki air	Bahan : Plastik Volume : 500 liter Jumlah : 4 buah	Sebagai tangki pengumpulan air limbah secara kontinu dan menjaga laju alir agar konstan.
6.	Pompa air	Jenis : Sentrifugal Kapasitas : - Daya : 450 watt Voltase : 220 watt	Mensirkulasikan air limbah dari tangki utama ke tangki umpan air limbah dan menjaga agar ketinggian air limbah pada tangki umpan tetap konstan.
7.	Blower	Jenis : <i>Root blower</i> Kapasitas : 1,26 m ³ /menit Daya : 3 PK Tekanan : 2,95 kPa	Mengisap gas buang dari cerobong dan dialirkan ke bak percobaan.
8.	Difuser	Bahan : PVC Panjang : 0,3 cm Diameter : ½ inchi Jumlah lubang : 10 buah Diameter lubang : 5 mm	Meningkatkan luas permukaan kontak antara gas buang dan air limbah agar gas CO ₂ dapat terabsorpsi dengan baik.

Sumber: Faridha

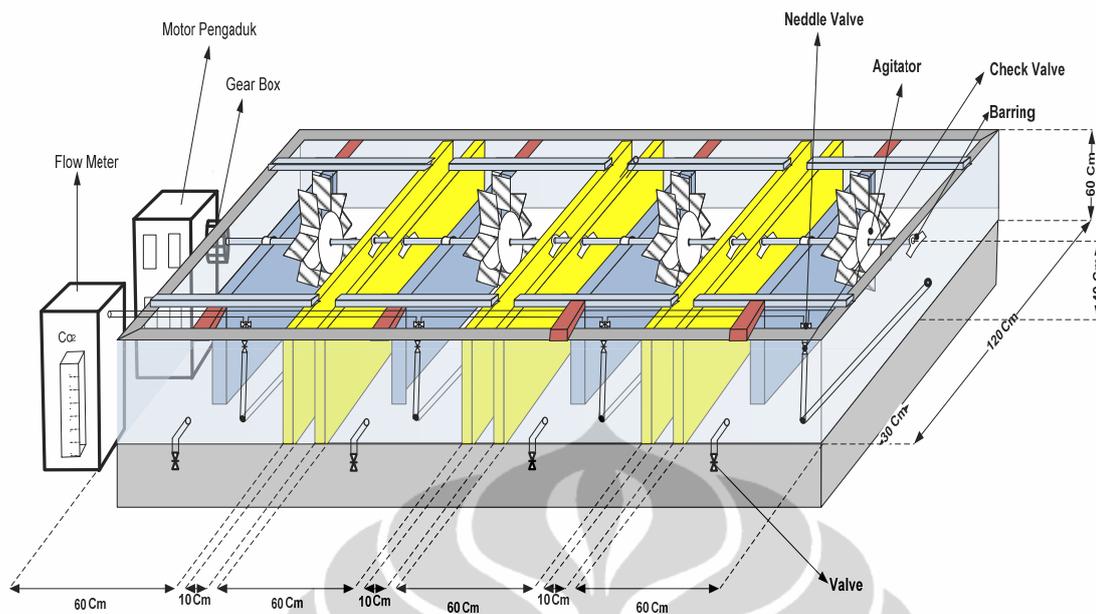
3.5.2 Spesifikasi Kolam HROP

Kolam yang digunakan mengikuti desain Moersidik (1987) yang telah dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan penelitian. Spesifikasi bak dapat dilihat pada Tabel 3.3 di bawah ini.

Tabel 3.3. Spesifikasi Kolam HROP

No.	Parameter	Dimensi
1.	Jenis/Tipe Bak	HROP (Bak Oksidasi Arus Deras)
	- Banyaknya kolam	4 buah
	- Kedalaman kolam	0,6 m
	- Lebar bak	0.6 m
	- Panjang bak	1.2 m
	- Volume campuran limbah cair + mikroalga	1,2 m x 0,6 m x 0,43 m = 309,6 liter
	- Volume mikroalga	10% dari volume campuran = 30,96 liter
2.	Pencampuran	
	- Metode pencampuran	<i>Paddle wheel</i> (kincir)
	- Kecepatan pencampuran	20 cm/detik
3.	Limbah Cair	
	- Waktu tinggal limbah cair	4 hari
	- Debit limbah cair	54 ml/menit
4.	Metode Suplai Emisi CO₂	Difusi

Desain Kolam HROP dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini.



Gambar 3.2. Desain Bak Kultivasi Mikroalga

3.6 Skema Rancangan Penelitian

Perlakuan terhadap mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* menggunakan 3 (tiga) variasi laju alir gas buang CO₂, yaitu:

$v_1 = 1$ liter/menit

$v_2 = 2$ liter/menit

$v_3 = 3$ liter/menit.

Percobaan yang dilakukan pada masing-masing Kolam HROP adalah sebagai berikut:

Bak 1 : Air limbah cair domestik + mikroalga, tanpa gas buang CO₂ (kontrol)

Bak 2 : Air limbah cair domestik + mikroalga, dengan laju alir 1 liter/menit

Bak 3 : Air limbah cair domestik + mikroalga, dengan laju alir 2 liter/menit

Bak 4 : Air limbah cair domestik + mikroalga, dengan laju alir 3 liter/menit

Ketiga variasi laju alir gas buang CO₂ tersebut menggunakan sampel limbah cair domestik yang sama. Skema rancangan penelitian yang digunakan terhadap sampel penelitian terdapat pada Tabel 3.4 di bawah ini.

Universitas Indonesia

Tabel 3.4. Skema Rancangan Penelitian

WAKTU	PERLAKUAN			
	Bak 1	Bak 2	Bak 3	Bak 4
T0				
T1				
T2				
.....				
T17				

Keterangan:

T = Waktu pengamatan pada 0 hari sampai 17 hari.

3.7 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian meliputi 2 tahapan, yaitu: tahapan penelitian observasional dan tahapan penelitian eksperimental.

3.7.1 Tahapan penelitian observasional

Tahap ini meliputi pengambilan sampel limbah cair domestik untuk mengetahui karakteristik limbah. Beberapa parameter limbah cair yang akan dianalisis adalah: BOD, COD, pH, suhu, DO, konsentrasi NH_3 , NO_3^- , NO_2^- , Pospat, dan TSS. Pengujian karakteristik juga dilakukan terhadap emisi gas buang CO_2 untuk menganalisis konsentrasi gas buang yang meliputi parameter CO_2 , SO_2 , NO_2 , dan debu. Sedangkan untuk bibit mikroalga dilakukan pemantauan terhadap kerapatan selnya sampai mencapai kerapatan sel 1 juta sel/ml sebelum dituang ke dalam Kolam HROP.

3.7.2 Tahapan penelitian eksperimental

Dari hasil pemeriksaan karakteristik limbah cair domestik untuk parameter BOD, jika konsentrasinya lebih besar daripada 500-600 mg/l, maka diberikan perlakuan awal melalui bak anaerob, yaitu limbah ditampung sementara dalam tangki air (drum) untuk menurunkan BOD hingga di bawah 500-600 mg/l. Setelah itu

Universitas Indonesia

dilakukan tahap pertama dalam percobaan yaitu proses *seeding* atau memperbanyak inokulum mikroalga, yang kemudian dilanjutkan dengan percobaan dengan variasi yang telah ditetapkan.

a. Pengembangbiakan (*Seeding*)

Proses pengembangbiakan dilakukan untuk menumbuhkan mikroalga dengan menggunakan media PHM hingga mencapai volume yang diinginkan yaitu sebesar 10% dari volume campuran (limbah cair domestik dan mikroalga).

b. Pengadaptasian (Aklimatisasi)

Aklimatisasi adalah pengadaptasian mikroorganisme terhadap air limbah domestik yang akan diolah. Proses aklimatisasi dilakukan dengan menambahkan limbah cair secara bertahap ke dalam Kolam HROP yang telah berisi mikroalga sampai pada volume yang diinginkan. Proses aklimatisasi dilakukan selama 4 (empat) hari dengan tahapan sebagai berikut:

- H-1 : Mikroalga (10% dari volume total = 30,65 liter) dimasukkan ke dalam kolam HROP. Kemudian 25% volume limbah ditambahkan ke dalam kolam HROP dengan pengenceran 25% (17,415 liter limbah + 52,245 liter air). *Paddle wheel* dinyalakan dengan kecepatan 20 cm/detik agar limbah cair dapat terdistribusi secara merata dan mikroalga tidak mengendap.
- H-2 : Limbah dengan volume 25% ditambahkan ke dalam kolam HROP dengan pengenceran 50% (34,83 liter limbah + 34,83 liter air).
- H-3 : Limbah dengan volume 25% ditambahkan ke dalam kolam HROP dengan pengenceran 75% (52,245 liter limbah + 17,415 liter air).
- H-4 : Limbah dengan volume 25% ditambahkan ke dalam kolam HROP tanpa pengenceran (100% limbah = 69,66 liter limbah).

Parameter yang diperiksa selama proses aklimatisasi adalah: kerapatan sel, temperatur, pH, DO, intensitas cahaya matahari, dan konsentrasi NH_3 . Tujuan dari

pengenceran limbah adalah untuk pengendalian konsentrasi NH_3 agar mikroalga dapat beradaptasi dengan limbah cair domestik.

c. Proses pengolahan (*feeding*)

- 1) Peralatan untuk percobaan telah dirangkai dalam suatu sistem percobaan, yang terdiri dari drum penampung air limbah, bak utama, bak penampung air limbah dari *outlet*, *blower*, dan *difuser*.
- 2) Proses pengolahan dilakukan dalam sistem yang kontinu, di mana debit air limbah yang masuk sama dengan debit air hasil olahan, yaitu 54 ml/menit. Pencampuran menggunakan *paddle wheel*, dan gas CO_2 dialirkan melalui proses difusi. Pada percobaan ini diberikan beberapa variasi dari laju alir gas buang CO_2 .

Proses percobaan untuk tahap *feeding* langsung dilakukan pada saat proses aklimatisasi mencapai hari ke-4 (empat) atau untuk tahap *feeding* adalah hari ke-0 (nol). Tahapan percobaan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

H-0 : Gas buang dialirkan secara terus menerus ke dalam bak 2, 3, dan 4 yang sudah menjalani proses aklimatisasi. Bak 1 sebagai kontrol tidak mendapatkan aliran gas buang. *Paddle wheel* tetap diaktifkan dengan kecepatan 20 cm/detik agar limbah cair dapat terdistribusi dengan merata. Valve *inlet* dan *outlet* diatur agar pada proses kontinu, limbah cair yang masuk sama dengan air hasil olahan yang keluar yaitu 54 ml/menit.

H-0, Air limbah yang masuk (*inlet*) diperiksa setiap hari untuk parameter:
 H-1, temperatur, pH, DO, dan konsentrasi NH_3 . Sedangkan parameter air
 H-2, hasil olahan (*outlet*) yang diperiksa setiap hari adalah: temperatur, pH,
 dst. : DO, intensitas cahaya matahari, konsentrasi NH_3 , dan kerapatan sel.

H-17 : Air hasil olahan dari masing-masing bak diperiksa untuk parameter: temperatur, pH, DO, intensitas cahaya matahari, konsentrasi NH_3 , kerapatan sel, dan BOD. Kualitas limbah cair yang masuk pada H-0

(nol) dibandingkan dengan kualitas air hasil olahan pada H-17 (tujuh belas) untuk parameter BOD.

3.8 Metode Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini sebagian besar adalah berupa data primer. Data primer adalah data yang diperoleh secara langsung dari pengukuran sampel hasil eksperimen dan hasil perhitungan.

Pemeriksaan kualitas limbah cair domestik, kualitas air hasil olahan, pemeriksaan pertumbuhan mikroalga, maupun pemeriksaan kualitas emisi CO₂ dari PLTU Batubara berupa pengujian parameter dan metodenya disajikan pada Tabel 3.5. Metode analisis limbah cair dan air hasil olahan yang digunakan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI).

Tabel 3.5. Parameter Penelitian dan Metode Analisis

No	Parameter	Metode Analisis	Keterangan
A. Pemeriksaan Kualitas Limbah Cair dan Air Hasil Olahan			
1.	pH	pH meter	SNI 06-6989.11.2004
2.	Suhu	Pemuaian	Elektrometri
3.	DO	DO meter	SNI 6989.14-2004
4.	COD	Refluks Tertutup secara Spektrofotometri	SNI 06-6989.2.2004
5.	BOD	Tetrimetric Winkler	SNI 6989.72-2009
6.	Konsentrasi NH ₃	Spektrofotometri	-
7.	TSS	Gravimetri	SNI 06-6989.3.2004
B. Pemeriksaan Pertumbuhan Mikroalga			
1.	Intensitas cahaya matahari	Flux meter	-
2.	Kerapatan Sel	Hemacytometri	-
C. Pemeriksaan Kualitas emisi CO₂ dari PLTU Batubara			
1.	Konsentrasi CO ₂	Orsat	-

3.9. Analisis Data

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini sebagian besar adalah data primer. Jenis mikroalga yang digunakan yaitu *Chlorella vulgaris* yang telah dikultur sebelumnya di Laboratorium LIPI-Oceanografi. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya merupakan jenis mikroalga yang tahan terhadap penyakit, tingkat produktivitas yang tinggi, mudah pemeliharaannya, dapat hidup pada media air limbah, dan dapat hidup pada kondisi nutrien yang terbatas. Data primer diperoleh langsung di lapangan berdasarkan pengukuran sampel eksperimen seperti pH, temperatur, DO, emisi gas CO₂, intensitas cahaya matahari, konsentrasi amonia, nilai BOD, dan kerapatan sel. Analisis yang digunakan untuk mengkaji kontribusi faktor-faktor lingkungan seperti intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, oksigen terlarut, laju alir emisi CO₂, dan konsentrasi amonia pada Kolam HROP adalah Analisis Regresi Linier dan Uji Korelasi Pearson, yang bertujuan untuk menguji pengaruh intensitas cahaya, pH, suhu, DO, laju alir emisi CO₂, dan konsentrasi amonia dalam limbah cair terhadap pertumbuhan mikroalga pada Kolam HROP. Metode yang digunakan untuk menjawab pertanyaan dari tujuan penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6. Metode untuk Menjawab Tujuan Penelitian

No	Tujuan Penelitian	Metode Pengumpulan Data	Metode Analisis
1	Menganalisis pengaruh faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga dengan memanfaatkan emisi CO ₂ dari PLTU Batubara dan limbah cair domestik yang terintegrasi.	Eksperimen	Analisis Regresi Linier dan Uji Korelasi Pearson
2	Menganalisis pengaruh laju alir emisi CO ₂ terhadap pertumbuhan mikroalga pada Kolam HROP.	Eksperimen	Analisis Regresi Linier dan Uji Korelasi Pearson
3	Menganalisis pengaruh NH ₃ terhadap pertumbuhan mikroalga.	Eksperimen	Analisis Regresi Linier dan Uji Korelasi Pearson
4	Mengetahui efisiensi penurunan BOD oleh mikroalga.	Eksperimen	Perhitungan
5	Mengetahui penerapan hasil percobaan pada skala lapangan	Eksperimen	Perhitungan



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Lokasi Penelitian

4.1.1 Deskripsi perusahaan

PLTU Bukit Asam terletak di Desa Lingga, Kecamatan Tanjung Enim, Kabupaten Muara Enim, Propinsi Sumatera Selatan, yaitu di tepi jalan raya lintas Sumatera yang menghubungkan Kota Muara Enim dengan Kota Tanjung Enim, sekitar 10 km dari Ibukota Kabupaten Muara Enim dan 3 km dari Kota Kecamatan Tanjung Enim. Tenaga listrik yang dihasilkan dari PLTU ini adalah sebesar 260 MW dengan perincian 4 x 65 MW yang berdiri di atas lahan seluas \pm 133 ha dan mempekerjakan tenaga kerja sebanyak 192 karyawan tetap dan 283 karyawan kontrak (*outsourcing*).

Tujuan pemerintah ketika membangun PLTU ini adalah sebagai salah satu upaya untuk melakukan diversifikasi energi. Sesuai dengan Kebijakan Nasional di bidang energi, maka untuk memenuhi kebutuhan energi di dalam negeri telah dimanfaatkan berbagai macam energi, yaitu tenaga air, minyak bumi, gas, batubara dan panas bumi. Karena minyak bumi merupakan sumber penghasil devisa terpenting saat ini, jumlahnya semakin terbatas, maka dalam kebijakan nasional di bidang energi perlu adanya diversifikasi. PLTU ini dibangun untuk memenuhi kebutuhan energi bagi masyarakat di daerah Sumatera Selatan pada khususnya dan Pulau Jawa pada umumnya, dan diharapkan pula dapat mendorong kegiatan ekonomi, industri, serta kegiatan lainnya.

Batubara yang menjadi bahan bakar PLTU ini berasal dari PTBA (Perusahaan Tambang Bukit Asam) Tanjung Enim, Sumatera Selatan dengan pemakaian batubara sebesar 1.050.000 ton/tahun/unit. Untuk mengurangi dampak pencemaran udara dibuat cerobong setinggi 110 m dengan diameter atas adalah 4,42 m dan diameter bawah adalah 6,87 m. Pemantauan terhadap kualitas udara emisi dan

ambien dilakukan setiap 3 (tiga) bulan sekali oleh pihak luar yaitu Balai Hiperkes & Keselamatan Kerja Propinsi Sumatera Selatan. Periode pemantauan sesuai dengan yang tertulis di dalam Rencana Pemantauan Lingkungan (RPL).

Sistem pendingin menggunakan sistem tertutup (*Closed Cycle*), di mana air murni (*demineral water*) dipompakan melalui kondensor untuk mengisi air pada drum ketel. Setelah air dirubah menjadi uap yang kering di dalam *superheater* lalu digunakan untuk memutar sudut-sudut turbin, uap bekas diembunkan di dalam kondensor dan ditampung pada *condensor hot well* lalu diuraikan ke *cooling water* dan setelah dingin lalu dipompakan kembali untuk mengisi air drum ketel, demikian berputar secara siklus. Sehingga dapat dikatakan bahwa PLTU Bukit Asam menggunakan prinsip 2R, yaitu *reuse* dan *recycle*

4.1.2 Kondisi Lingkungan Perusahaan

Lokasi PLTU terletak di tepi jalan raya yang menghubungkan Kabupaten Muara Enim dan Kecamatan Tanjung Enim. Lokasi PLTU juga dilewati oleh Sungai Enim. Desa-desa yang berbatasan dengan PLTU yaitu, Desa Lingga I dan Desa Karang Raja. Tidak ada perusahaan/pabrik yang berbatasan langsung dengan PLTU. Hanya ada pabrik karet yang jaraknya sekitar 2 km dari PLTU. Perusahaan Tambang Bukit Asam letaknya sekitar 3 km dari PLTU. Pengiriman batubara dilakukan dengan menggunakan ban berjalan (*conveyor*). Karena letaknya yang agak jauh dari desa, maka hampir tidak ada masalah yang berkaitan dengan masyarakat sekitar. Selain itu penggunaan prinsip 2R dalam sistem pendingin mengakibatkan tidak ada air buangan yang dibuang ke badan air terdekat, yaitu Sungai Enim. Namun pemantauan tetap dilakukan terhadap kualitas air dan hidrologi dengan melakukan pemantauan secara rutin setiap 3 (tiga) bulan sekali di 6 (enam) titik yaitu dengan mengambil contoh air Sungai Enim, air tanah, dan limbah cair.

Isu utama dari berdirinya PLTU adalah pencemaran udara akibat abu terbang batubara dan kebisingan. Penggunaan batubara sebagai bahan bakar PLTU mengakibatkan udara di lingkungan sekitar PLTU sangat berdebu. Pemantauan dan

pengukuran terhadap kualitas udara ambien dan kebisingan dilakukan secara rutin setiap 3 bulan sekali oleh tenaga luar yaitu Balai Hiperkes & Keselamatan Kerja Propinsi Sumatera Selatan. Lokasi titik sampling sesuai dengan dokumen RPL dilakukan di 6 (enam) lokasi dengan titik lokasi sampling terjauh berada di Komplek Perumahan PLN Blok Puncak II \pm 1500 m dari sumber dampak arah tenggara dan Desa Lingga II \pm 1000 m dari sumber dampak arah tenggara. Hasil pengukuran terhadap parameter debu, SO₂, NO₂, CO, hidrokarbon, dan kebisingan, selalu memenuhi baku mutu berdasarkan Keputusan Gubernur Sumatera Selatan nomor 17 Tahun 2005 tentang Baku Mutu Udara Ambien dan Baku Mutu Tingkat Kebisingan maupun Peraturan Pemerintah nomor 41 Tahun 1999 tentang Baku Mutu Udara Ambien (lampiran 3). Pemantauan dan pengukuran juga dilakukan terhadap kualitas udara emisi dari cerobong. Pengujian emisi untuk parameter SO₂, NO₂, dan partikel debu dilakukan oleh Balai Hiperkes & Keselamatan Kerja Propinsi Sumatera Selatan. Hasil pengukuran untuk parameter-parameter tersebut semuanya memenuhi baku mutu berdasarkan Keputusan Gubernur Sumatera Selatan nomor 15 Tahun 2005 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak dan Ambang Batas Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor maupun Peraturan Pemerintah nomor 21 Tahun 2008 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak (Tabel 4.1). Sedangkan untuk parameter CO₂, O₂, dan CO dilakukan oleh Laboratorium Kimia milik PLTU Bukit Asam dengan menggunakan alat Orsat (lampiran 3). Konsentrasi CO₂ yang terukur selama ini berkisar antara 13-15% Volume.

4.1.3 Dampak Sosial, Ekonomi, dan Budaya dari Berdirinya PLTU

Berdirinya PLTU Bukit Asam memberikan manfaat sosial ekonomi berupa terbukanya lapangan pekerjaan bagi masyarakat sekitar. Namun hal itu juga mengakibatkan mengalirnya tenaga kerja dari luar daerah. Sehingga masyarakat di sekitar PLTU berkesempatan untuk kontak dengan kebudayaan lain. Diperlukan waktu untuk dapat menerima kebudayaan lain sehingga didapatkan cara-cara adaptasi yang dilakukan masyarakat karena adanya perubahan sosial budaya.

Keberadaan PLTU juga dapat memberikan tambahan pendapatan bagi daerah Kabupaten Muara Enim melalui pajak yang dibayarkan oleh perusahaan. Sehingga masyarakat sekitar Muara Enim dapat menikmati hasil pembangunan melalui pajak yang dibayarkan oleh PLTU Batubara. Perekonomian masyarakat di Kota Kabupaten Muara Enim dan Kota Tanjung Enim khususnya menjadi lebih meningkat dengan bermunculannya hotel-hotel, warung dan restoran, biro perjalanan antar kota (travel), maupun pertokoan untuk memenuhi kebutuhan masyarakat.

Namun keberadaan PLTU juga dapat mengakibatkan dampak ketidakpuasan sosial jika tenaga kerja lokal yang terserap tidak sebanding dengan jumlah pengangguran. Saat ini PLTU lebih banyak menggunakan tenaga dari luar (*outsourcing*) daripada tenaga tetap. Diperlukan upaya terus-menerus dari PLTU untuk melakukan pendekatan terhadap masyarakat melalui bantuan-bantuan yang diberikan perusahaan.

4.2 Keterbatasan Penelitian

Kegiatan penelitian yang dilakukan di lapangan menjadi salah satu kendala yang tidak dapat dihindari. Lokasi penelitian yang berada di wilayah PLTU mengakibatkan udara di sekitar lokasi penelitian sangat berdebu akibat abu terbang batubara. Bak kultivasi mikroalga menjadi keruh karena masuknya abu terbang batubara yang sangat halus. Kegiatan penelitian juga sangat bergantung dengan operasional PLTU. Jika kegiatan PLTU berhenti, maka pemanfaatan emisi CO₂ dari cerobong udara tidak dapat dilakukan. Hal ini sangat mengganggu jalannya penelitian. Lokasi penelitian yang agak terpencil ± 200 km jaraknya dari ibukota propinsi, mengakibatkan keterbatasan alat-alat penunjang penelitian. Jika terjadi masalah dengan bak kultivasi ataupun dengan pompa penghisap emisi CO₂, maka perbaikan harus dilakukan oleh teknisi yang didatangkan dari Jakarta atau Bandung.

Kegiatan penelitian juga sangat ditunjang oleh sistem operasional seperti perputaran *paddle wheel*, pompa hisap CO₂, dan *blower*. Salah satu *paddle wheel* berhenti, maka akan mengganggu pertumbuhan mikroalga karena suplai oksigen yang berkurang

(DO turun). Lingkungan sekitar penelitian yang sangat berdebu membuat debu-debu masuk ke dalam *blower*. Jika debu yang masuk sudah terlalu banyak, maka *blower* menjadi berhenti beroperasi. Jika *blower* berhenti, maka suplai CO₂ menjadi terhenti, hal ini dapat mempengaruhi pH air dalam bak. Blower yang sudah menunjukkan tanda-tanda macet, jika dipaksakan beroperasi terus akan mengakibatkan kerja pompa penghisap CO₂ menjadi berat bahkan terbakar. Hal ini pernah dialami oleh peneliti.

Bak kultivasi mikroalga yang terbuat dari bahan kayu, membuat bak menjadi rawan kebocoran. Pada awal penelitian pernah terjadi kebocoran sehingga penelitian ditunda sambil menunggu perbaikan bak.

4.3 Tahapan Penelitian Observasional

4.3.1 Kerapatan sel bibit mikroalga

Mikroalga yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *Chlorella vulgaris*. Mikroalga jenis ini berbentuk bulat atau bulat telur, berwarna hijau karena kandungan pigmen didominasi oleh klorofil. Gerakannya jika dilihat oleh mikroskop sangat lambat. Kultur murni diperoleh dari LIPI Oseanografi dalam jumlah 12 liter dengan kerapatan sel ± 1 juta sel/ml.

Mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* dipilih karena banyak terdapat di perairan Indonesia, termasuk spesies yang tahan terhadap penyakit, mempunyai tingkat produktivitas yang tinggi dan tidak toksik, mudah pemeliharaannya dan mampu bertahan dengan kondisi nutrien yang terbatas, memiliki toleransi terhadap CO₂ dengan konsentrasi maksimum sebesar 40%, dan memiliki kandungan minyak yang tinggi yaitu sebesar 28-32 % *dry wt* sehingga berpotensi untuk dijadikan biofuel. Selain itu mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* berdasarkan penelitian sebelumnya terbukti dapat hidup dan berkembang biak dalam limbah cair domestik.

4.3.2 Karakteristik emisi gas buang dari PLTU Batubara

Pemeriksaan emisi gas dari cerobong PLTU dilakukan secara berkala setiap 3 (tiga) bulan oleh Balai Hiperkes dan Keselamatan Kerja Propinsi Sumatera Selatan. Data yang diperoleh dari hasil pemeriksaan terakhir pada Bulan Desember 2010 terdapat pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1. Data Hasil Pemantauan dan Pengukuran Kualitas Emisi Periode Bulan Desember 2010

No	Parameter	Satuan	Baku Mutu Emisi Sumber Tak Bergerak*	Hasil Pengukuran	Batas Toleransi yang dapat mengganggu Pertumbuhan Mikroalga
1	SO ₂	mg/m ³	750	198,67	400.000**
2	NO ₂	mg/m ³	850	314,07	240.000***
3	Total Partikel	mg/m ³	150	93,6	200.000**
4	Opasitas	%	20	15	

Sumber: Sistem Manajemen Mutu no. formulir: FR-PT-SBAM-42-03 Bagian K2 & Lingkungan PLTU Bukit Asam

Keterangan:

* Berdasarkan Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 15 Tahun 2005 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak dan Ambang Batas Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor

** Matsumoto (1997)

*** Brown (1996)

Pengukuran yang dilakukan oleh Laboratorium Kimia PLTU setiap bulan menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ yang terukur berkisar antara 13-15% volume (lampiran 3). Sedangkan gas CO tidak pernah terdeteksi oleh alat Orsat. Hal ini dibuktikan dengan pengukuran yang dilakukan sendiri oleh peneliti dengan menggunakan alat Orsat seperti pada Tabel 4.2 di bawah ini.

Universitas Indonesia

Tabel 4.2. Hasil Pengukuran Emisi Gas CO₂ dari Cerobong PLTU Batubara

No	Waktu Pengamatan	Hasil Pengukuran gas CO ₂	Satuan	Baku Mutu Emisi Sumber Tak Bergerak *	Keterangan
1	5 Januari 2011	14,25	%	-	
2	13 Januari 2011	13,00	%	-	

Keterangan:

* Berdasarkan Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 15 Tahun 2005 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak dan Ambang Batas Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor

Dari hasil pemantauan dan pengukuran yang dilakukan terhadap parameter-parameter SO₂, NO₂, CO₂, maupun total partikel menunjukkan bahwa semua konsentrasi gas berada di bawah baku mutu yang dipersyaratkan yaitu Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 15 Tahun 2005. CO₂ murni tidak dibutuhkan dalam kultur mikroalga. Keberadaan SO₂, NO₂ dan total partikel dapat efektif digunakan sebagai nutrisi bagi mikroalga (Nakamura, 2003). Pada penelitian ini, pH media tidak dikontrol agar tetap terjaga. pH media dibiarkan pada kondisi alami.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Matsumoto (1997) menunjukkan bahwa apabila konsentrasi SO₂ mencapai 400 ppm menyebabkan pH media menjadi lebih rendah sehingga mempengaruhi produksi mikroalga. Pada penelitian ini, konsentrasi SO₂ hanya sebesar 198,67 mg/m³ (0,199 ppm), sangat jauh dari batasan konsentrasi yang dapat mempengaruhi pH media sehingga mengganggu produktivitas mikroalga. Keberadaan NO₂ juga dapat mempengaruhi pH media tetapi dalam tingkat yang lebih kecil dibandingkan SO₂. Mikroalga mempunyai toleransi untuk dapat tumbuh di dalam media yang mengandung 240 ppm NO_x, dengan pH yang tetap terjaga (Brown, 1996). Pada penelitian kali ini, konsentrasi NO₂ adalah sebesar 314,07 mg/m³ (0,314 ppm), sehingga sangat jauh dari batasan konsentrasi yang dapat menyebabkan pH media terganggu sehingga mempengaruhi produktivitas mikroalga.

Universitas Indonesia

Produktivitas mikroalga akan terganggu pertumbuhannya apabila konsentrasi total partikel dan debu mencapai 200.000 mg/m^3 (Matsumoto & Coworkers, 1997). Pada penelitian ini, konsentrasi total partikel adalah sebesar $93,6 \text{ mg/m}^3$, sangat jauh dari batas toleransi sehingga keberadaan total partikel tidak mengganggu produktivitas mikroalga.

Gas CO_2 adalah gas utama yang menjadi sumber karbon bagi pertumbuhan mikroalga. Karena gas CO_2 adalah syarat utama terselenggaranya proses fotosintesis pada mikroalga jenis autotrof selain sinar matahari. Gas CO_2 dapat menjadi faktor pembatas produktivitas mikroalga. Pada penelitian ini konsentrasi CO_2 yang dimanfaatkan dari emisi gas buang PLTU Batubara adalah sebesar 13-15%, ini adalah 360-417 kali lebih besar dari CO_2 normal yang berada di udara (0,036%). Peningkatan konsentrasi CO_2 diharapkan akan memberikan respon yang lebih baik pada mikroalga dan akan meningkatkan pertumbuhan mikroalga.

4.3.3 Karakteristik limbah cair domestik

Limbah cair domestik yang digunakan berasal dari *septic tank* warga di pemukiman jalan Pramuka III Muara Enim, Propinsi Sumatera Selatan. Pengambilan air limbah dengan menggunakan mobil tinja milik Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Kabupaten Muara Enim. Air limbah *septic tank* kemudian dimasukkan ke dalam tangki penampung limbah. Sebelum Tahap Aklimatisasi dimulai, dilakukan pemeriksaan terhadap karakteristik air limbah yang dapat dilihat pada Tabel 4.3 di bawah ini.

Tabel 4.3. Karakteristik Awal Limbah *Septic Tank*

No	Parameter	Satuan	Baku Mutu Limbah Domestik*	Hasil Uji	Keterangan
I. Fisika					
1	TSS	mg/l	100	213,00	SNI 06-6989.3.2004
2	Temperatur	°C	-	29,45	Elektrometri
II. Kimia					
3	pH	-	6-9	7,45	SNI 06-6989.11.2004
4	COD	mg/l	-	317,313	SNI 06-6989.2.2004
5	BOD ₅	mg/l	50	138,974	Ik. No. 05/LME/2009
6	DO _o	mg/l	-	1,655	SNI.6989.14-2004
7	NH ₃	mg/l	-	49,3	Spektrometri
8	Nitrat	mg/l	-	0,21	Spektrometri
9	Nitrit	mg/l	-	0,0096	Spektrometri
10	Phospat	mg/l	-	12,24	Spektrometri

Keterangan:

- * Berdasarkan Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 18 Tahun 2005 tentang Baku Mutu Limbah Cair (BMLC) bagi Kegiatan Industri, Hotel, Rumah Sakit, Domestik, dan Pertambangan Batubara

Berdasarkan hasil pemeriksaan karakteristik awal limbah cair diperoleh data bahwa parameter TSS dan BOD sebesar 213 mg/l dan 138,974 mg/l berada di luar batas baku mutu yang dipersyaratkan dalam Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 18 Tahun 2005. Nilai BOD ini menjadi ukuran dari tercemar atau tidaknya suatu perairan. Nilai BOD menjadi gambaran kadar bahan organik, yaitu jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroba aerob untuk mengoksidasi bahan organik menjadi karbondioksida dan air. Konsentrasi BOD sebesar 213 mg/l (< 500 mg/l) menyebabkan air limbah cair tidak membutuhkan pengolahan limbah awal secara anaerob. Nilai TSS juga menunjukkan kualitas air secara fisika yang menggambarkan banyaknya bahan-bahan tersuspensi (diameter > 1 µm) yang terdiri atas lumpur dan pasir halus serta jasad-jasad renik, yang terutama disebabkan oleh kikisan tanah atau erosi tanah yang terbawa ke badan air.

Konsentrasi amonia yang terukur adalah 49,3 mg/l, konsentrasi ini adalah konsentrasi amonia total (NH_3 dan NH_4^+). Konsentrasi amonia total ini dipengaruhi oleh pH dan suhu. Pada pH 7 atau kurang, sebagian besar amonia akan mengalami ionisasi atau amonia berada dalam bentuk amonium (NH_4^+). Sebaliknya pada $\text{pH} > 7$, amonia tak terionisasi (NH_3) yang bersifat toksik terdapat dalam jumlah yang lebih banyak. pH dan temperatur limbah yang terukur adalah 7,45 dan $29,45^\circ\text{C}$. Berdasarkan Tabel yang dibuat oleh Boyd (1988) dalam Effendi (2003), persentase amonia bebas (NH_3) terhadap amonia total adalah sebesar $\pm 1,73\text{-}2,00\%$. Berarti sebagian besar amonia (98-98,27%) berada dalam bentuk amonium (NH_4^+). Amonium (NH_4^+) adalah sumber nitrogen yang dapat dimanfaatkan secara langsung oleh tumbuhan mikroalga. Selain dari NH_4^+ , nitrat juga dapat dimanfaatkan secara langsung oleh mikroalga. Sumber nitrogen yang lain adalah nitrit, tetapi kurang disukai mikroalga karena nitrit mudah teroksidasi menjadi nitrat, maka konsentrasinya juga kecil yaitu sebesar 0,0096 mg/l. Sedangkan nitrat mudah tereduksi menjadi nitrit sehingga konsentrasinya pun kecil, yaitu 0,21 mg/l. Nitrat tidak akan dikonsumsi oleh mikroalga sampai konsentrasi amonia di dalam limbah cair habis.

Konsentrasi NH_3 sebesar 49,3 mg/l cukup tinggi bagi mikroalga sebagai sumber nitrogen. Hal ini berarti sel-sel mikroalga mempunyai tingkat fotosintesis dan respirasi yang tinggi pula. Sumber nitrogen dalam air limbah *septic tank* berasal dari urin dan hasil metabolisme manusia. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh A. Abeliovich dan Y. Azov (1976) menunjukkan bahwa konsentrasi amonia di atas 2,0 mM (34 mg/l) dan pada pH di atas 8,0 dapat menghambat pertumbuhan dan laju fotosintesis dari mikroalga jenis *Scenedesmus obliquus*, spesies yang dominan di dalam Kolam HROP. Berdasarkan hasil pemeriksaan karakteristik limbah cair menunjukkan bahwa konsentrasi NH_3 berada di atas 34 mg/l (> 2 mM) yaitu sebesar 49,3 mg/l, konsentrasi sebesar ini dapat mengganggu pertumbuhan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris*. Oleh sebab itu, diperlukan Tahap Aklimatisasi sebelum Tahap Pengolahan (*feeding*) agar mikroalga dapat beradaptasi dengan baik dalam media limbah cair *septic tank* sehingga dapat tumbuh dan berkembang biak dengan baik.

Selain nitrogen, unsur hara anorganik utama yang dibutuhkan oleh mikroalga adalah dari unsur Pospor. Hasil pemeriksaan karakteristik limbah cair menunjukkan bahwa kandungan pospor dalam bentuk fosfat adalah 12,24 mg/l. Konsentrasi fosfat sebesar ini cukup bagi mikroalga untuk tumbuh dan berkembang biak.

Tabel 4.4 di bawah ini adalah karakteristik limbah *septic tank* yang digunakan pada penelitian sebelumnya dan sama-sama menggunakan kemampuan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* dalam mengolah limbahnya.

Tabel 4.4 Karakteristik Limbah *Septic Tank* pada Penelitian Sebelumnya

No	Parameter	Satuan	Penelitian ini	Sreesai dan Pakpain (2007)	Fitri (2010)
			Hasil Penelitian		
1.	pH	-	7,45	7,5-7,7	6,6
2.	NH ₃ /TKN*	mg/l	49,3	128-240	128
3.	Fosfat/TP*	mg/l	12,24	8,9-28,3	126
4.	COD	mg/l	317,31	262-1.260	449,4

Keterangan:

- * Penelitian Sreesai dan Pakpain (2007) menggunakan metode total Kjeldahl method dan ascorbic acid method untuk mengukur kandungan nitrogen dan pospor.

Penelitian yang dilakukan oleh Sreesai dan Pakpain (2007) menggunakan limbah *septic tank* yang berasal dari Kota Bangkok, Thailand. Sedangkan yang dilakukan oleh Fitri (2010) menggunakan limbah *septic tank* yang berasal dari Gedung C Asrama Mahasiswa Universitas Indonesia, Jakarta. Semua parameter pada limbah *septic tank* yang digunakan pada penelitian sebelumnya menunjukkan nilai yang lebih besar daripada limbah *septic tank* yang digunakan pada percobaan ini. Hal ini dimungkinkan karena sumber limbah *septic tank* pada penelitian sebelumnya menggunakan limbah yang berasal dari kota besar (Ibu kota negara), sedangkan pada penelitian ini menggunakan limbah yang berasal dari kota kecil (Ibu kota kabupaten) di Propinsi Sumatera Selatan. Seperti diketahui makanan penduduk di kota besar jauh lebih bervariasi dibandingkan penduduk di kota kecil. Makanan akan sangat

mempengaruhi karakteristik limbah *septic tank*-nya, sehingga kandungan nitrogen dan pospornya menjadi jauh lebih tinggi.

4.4 Tahapan Penelitian Eksperimental

4.4.1 Perbanyak sel mikroalga (*seeding*)

Bibit mikroalga yang dibawa dari LIPI Oseanografi sebesar 12 liter belum cukup untuk melakukan pengolahan limbah melalui kolam oksidasi. Mikroalga diperbanyak di lapangan sehingga jumlahnya cukup untuk proses pertumbuhan mikroalga di dalam Kolam HROP yaitu:

$$\begin{aligned} \text{Volume mikroalga} &= 10\% \text{ dari volume campuran mikroalga dan limbah cair domestik} \\ &= 10\% \times 1,2 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} \times 0,43 \text{ m} \\ &= 10\% \times 0,3096 \text{ m}^3 \\ &= 30,96 \text{ liter} \end{aligned}$$

Untuk 4 (empat) Kolam HROP dibutuhkan mikroalga sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Volume total mikroalga} &= 4 \times 30,96 \text{ liter} \\ &= 123,84 \text{ liter} \end{aligned}$$

Kerapatan sel sebelum mikroalga dimasukkan ke dalam Kolam HROP adalah ± 1 juta sel/ml. Kerapatan sel sebesar 1 juta sel/ml diharapkan mampu beradaptasi dengan baik pada limbah cair domestik sehingga didapatkan laju pertumbuhan mikroalga yang cukup tinggi. Penelitian yang dilakukan oleh Hirata *et al.* (1981) dan Sutomo (2005) menunjukkan bahwa kerapatan sel awal inokulum mikroalga akan mempengaruhi kerapatan sel maksimal yang dicapai. Sehingga pada penelitian ini, kerapatan sel awal inokulum menjadi hal yang harus diperhatikan agar mikroalga dapat tumbuh dan berkembang biak.

4.4.2 Aklimatisasi (Pengadaptasian)

Tahap aklimatisasi dilakukan karena mikroalga tidak akan tahan menggunakan media limbah cair *septic tank* yang mengandung konsentrasi NH_3 sebesar 49,3 mg/l. Tujuan

dari tahap aklimatisasi adalah pengadaptasian mikroalga terhadap media limbah cair domestik yang akan diolah. Proses aklimatisasi dilakukan dengan menambahkan limbah cair secara bertahap ke dalam Kolam HROP yang telah berisi mikroalga sampai pada volume yang diinginkan. Berdasarkan penelitian skala laboratorium yang dilakukan oleh Fitri (2010), amonia yang rendah akan memberikan pertumbuhan mikroalga yang paling baik, maka dalam pengolahan limbah melalui kolam HROP, limbah yang masuk ke dalam kolam HROP kadar amonia awalnya harus dijaga agar tidak terlalu tinggi. Agar nutrisi yang ada di dalam limbah cair dan oksigen dapat tercampur secara merata (homogen), maka *paddle wheel* diputar dengan kecepatan 20 cm/detik. Pemutaran *paddle wheel* juga bertujuan agar tidak terjadi penggumpalan mikroalga. Tahapan aklimatisasi dilakukan selama 4 (empat) hari. Penentuan waktu aklimatisasi selama 4 (empat) hari ditentukan berdasarkan penelitian Sreesai dan Pakpain (2007) di mana konsentrasi biomasa maksimum diperoleh pada hari ke-4 (empat) dengan konsentrasi sebesar 390 mg/l. Hasil dari pemeriksaan terhadap parameter pH, temperatur, DO, intensitas cahaya matahari, kerapatan sel, dan konsentrasi NH₃ dapat dilihat pada Tabel 4.5 - Tabel 4.7

Tabel 4.5 Hasil Pemeriksaan Parameter Fisik dan Kimia Tahap Aklimatisasi

No	Tanggal	Intensitas Cahaya Matahari (klux)	Temperatur				pH				DO			
			°C								mg/l			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	31/12/10	9.450	30.70	30.65	30.40	30.20	7.72	7.70	7.73	7.58	4.64	4.69	4.80	4.80
2	1/1/2011	27.585	27.95	27.80	27.80	27.80	7.80	7.75	7.85	7.83	4.70	5.07	5.28	5.71
3	2/1/2011	27.600	26.11	26.00	26.50	26.10	8.04	8.05	8.04	7.99	5.48	6.03	5.32	5.53
4	3/1/2011	40.450	27.90	27.55	28.05	27.75	8.04	8.04	8.06	7.84	5.30	5.08	5.17	2.94
5	4/1/2011	24.150	28.75	28.50	29.00	29.10	8.19	7.65	7.20	7.13	5.08	4.29	4.61	3.12

Tabel 4.6 Hasil Pemeriksaan Konsentrasi NH₃

No	Tanggal	Waktu	Lokasi	Konsentrasi NH ₃ (mg/l)			
				Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4
1	31/12/10	15.00	Di dlm Bak	18.2	28.3	20.9	21
2	1/1/2011	14.00	Di dlm Bak	12.5	18.7	18.8	21.1
3	2/1/2011	14.00	Di dlm Bak	24.8	29.2	28.7	29.5
4	3/1/2011	14.00	Di dlm Bak	35.75	37.25	51.5	44
5	4/1/2011	14.00	Di dlm Bak	33.5	34.6	37.4	41.8

Tabel 4.7 Hasil Pemeriksaan Kerapatan Sel Tahap Aklimatisasi

No	Tanggal	Kontrol		Laju Alir CO ₂ 1 liter/menit		Laju Alir CO ₂ 2 liter/menit		Laju Alir CO ₂ 3 liter/menit	
		Kerapat- an Sel (sel/ml)	Laju Pertum- buhan (k)	Kerapat- an Sel (sel/ml)	Laju Pertum- buhan (k)	Kerapat- an Sel (sel/ml)	Laju Pertum- buhan (k)	Kerapat- an Sel (sel/ml)	Laju Pertum- buhan (k)
1	31/12/10	218750	-	341250	-	285000	-	227500	-
2	1/1/2011	1372500	2.65	1405000	2.04	1255000	2.14	1203750	2.40
3	2/1/2011	925000	-0.57	1018750	-0.46	742500	-0.76	861250	-0.48
4	3/1/2011	498750	-0.89	682500	-0.58	528750	-0.49	525000	-0.71
5	4/1/2011	527500	0.08	575000	-0.25	426250	-0.31	470000	-0.16

Berdasarkan Tabel 4.5 terlihat bahwa intensitas cahaya matahari sebesar 9,45 – 40,45 klux sangat cukup untuk berlangsungnya fotosintesis. Dengan intensitas cahaya sebesar itu diharapkan dapat menembus hingga dasar bak (kedalaman bak 43 cm). Sehingga proses fotosintesis tidak hanya berlangsung pada lapisan-lapisan teratas bak, tetapi hingga dasar bak. Intensitas cahaya yang tinggi akan mempercepat pertumbuhan mikroalga. Tetapi sampai pada intensitas tertentu penambahan cahaya tidak lagi dapat meningkatkan laju pertumbuhan (Mustahal, 1995). Suhu keempat bak berada pada kisaran 26-30° C, kisaran suhu ini sesuai dengan suhu optimum untuk pertumbuhan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* (Isnansetyo & Kurniastuty, 1995). pH keempat bak berkisar antara 7-8, kisaran pH ini disukai oleh biota akuatik seperti alga, dan menurut Round (1993), kisaran pH 7-8 baik untuk proses pengkulturan mikroalga di dalam laboratorium. Sedangkan nilai DO berada pada

kisaran 4-5 mg/l, kecuali pada Bak 4 hari ke-3 (tiga) dan hari ke-4 (empat), nilai DO turun menjadi ± 3 mg/l. Hal ini disebabkan oleh pengaruh *paddle wheel* yang sempat terhenti beberapa saat sehingga gangguan operasional tersebut langsung mempengaruhi nilai pH pada media dalam Bak 4. Hal ini sesuai dengan pernyataan Larsdotter (2006) yang menyatakan bahwa faktor operasional seperti berfungsinya *paddle wheel* akan mempengaruhi pertumbuhan mikroalga.

Hasil pengukuran konsentrasi NH_3 seperti yang tercantum pada Tabel 4.6 menunjukkan bahwa pada tahap aklimatisasi ini NH_3 sebagai sumber nitrogen belum dimanfaatkan secara maksimal oleh mikroalga untuk tumbuh dan berkembang biak. Konsentrasi NH_3 terus meningkat setiap harinya pada setiap bak karena pada tahap ini penambahan volume limbah dilakukan secara bertahap dengan konsentrasi NH_3 yang semakin meningkat.

Kondisi-kondisi ideal dari hasil pemeriksaan parameter fisik dan kimia, ternyata tidak didukung oleh laju pertumbuhan dari mikroalga. Berdasarkan Tabel 4.7 terlihat bahwa mikroalga belum menunjukkan laju pertumbuhan yang menggembirakan. Hal ini disebabkan mikroalga masih dalam tahap pengadaptasian terhadap media limbah cair *septic tank*. Pada hari ke-1 (satu), pada saat limbah yang dituangkan dengan konsentrasi $\text{NH}_3 \pm 12$ mg/l (pengenceran 25% limbah), mikroalga langsung menunjukkan laju pertumbuhan yang positif untuk keempat bak. Mikroalga masih dapat beradaptasi dengan baik karena volume campuran limbah dan mikroalga masih kecil. Tetapi begitu volumenya ditambah dengan konsentrasi NH_3 sebesar 24 mg/l (pengenceran 50% limbah), laju pertumbuhan untuk keempat bak langsung menunjukkan penurunan. Hal ini dapat disebabkan karena pada kondisi campuran mikroalga dan limbah cair dengan konsentrasi NH_3 sebesar 24 mg/l, mikroalga belum dapat beradaptasi dengan baik, tetapi hari berikutnya (hari ke-3) sudah langsung ditambahkan limbah cair dengan konsentrasi yang lebih tinggi (pengenceran limbah 75% = konsentrasi NH_3 sebesar 36 mg/l). Begitu pula yang terjadi pada hari ke-4 (empat) di mana limbah yang dimasukkan adalah 100% limbah, pertumbuhan mikroalga semakin menurun. Penambahan limbah cair dengan konsentrasi NH_3 yang semakin tinggi dalam waktu yang singkat (setiap konsentrasi

NH₃ tertentu hanya diberi waktu adaptasi 1 hari) membuat mikroalga sulit untuk tumbuh dan berkembang biak pada limbah cair domestik.

Volume limbah cair yang terus ditambahkan ke dalam Kolam HROP yang sudah terisi mikroalga dengan volume 30,96 mg/l juga mempengaruhi pertumbuhan mikroalga. Fabregas *et al.* (1986) dalam Sutomo (2005) mengatakan bahwa pada volume air pemeliharaan yang lebih besar akan menghasilkan kepadatan maksimum yang lebih rendah. Hal ini disebabkan karena pada volume air pemeliharaan yang lebih besar menyebabkan berkurangnya penetrasi dan intensitas cahaya matahari terhalang oleh bayangannya sendiri (*self shading*), sehingga proses fotosintesis terganggu. Pernyataan Fabregas sesuai dengan percobaan pada tahap aklimatisasi ini, di mana laju pertumbuhan mikroalga terhambat begitu volume limbah cair terus ditambahkan ke dalam kolam percobaan. Karena itu agar proses fotosintesis tidak terganggu, maka seharusnya pada percobaan ini diberi waktu yang lebih lama bagi mikroalga untuk beradaptasi pada setiap penambahan volume limbah.

Pada tahap aklimatisasi ini, mikroalga belum menggunakan nutrisi yang terdapat di dalam limbah cair *septic tank* sehingga laju pertumbuhannya negatif. Penambahan konsentrasi NH₃ yang dilakukan secara bertahap bersamaan dengan penambahan volume limbah, menyebabkan mikroalga belum sempat untuk tumbuh dan berkembang biak.

4.4.3 Proses Pengolahan (*Feeding*)

Proses pengolahan (*feeding*) mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* dalam media limbah cair *septic tank* dengan memanfaatkan emisi CO₂ dilakukan pada saat tahap aklimatisasi selesai dilakukan. Pada tahap ini diharapkan mikroalga dapat tumbuh dan berkembang biak dengan baik karena sudah melalui proses adaptasi. Tahapan ini dimulai dengan mengalirkan emisi gas CO₂ ke dalam bak dengan kecepatan aliran yang berbeda-beda, yaitu 1 liter/menit (Bak 2), 2 liter/menit (Bak 3), dan 3 liter/menit (Bak 4), Bak 1 sebagai kontrol tidak dialiri gas CO₂. Metode suplai CO₂

Universitas Indonesia

adalah dengan cara difusi. Gas CO₂ dialirkan selama 12 jam percobaan yaitu dari pukul 6 pagi sampai pukul 6 sore. Hal ini dilakukan karena gas CO₂ yang dibutuhkan oleh mikroalga untuk proses fotosintesis hanya dibutuhkan selama matahari bersinar di siang hari, paling lama 12 jam. Percobaan dilakukan secara kontinu di mana aliran limbah yang masuk sama dengan air hasil olahan yang keluar yaitu dengan debit sebesar 54 ml/menit. *Paddle wheel* dibiarkan terus berputar agar nutrisi dan oksigen dapat tercampur secara merata dan tidak terjadi penggumpalan mikroalga.

Pemeriksaan karakteristik limbah cair *septic tank* dilakukan lagi sebelum proses pengolahan dimulai. Pemeriksaan ini dimaksudkan karena limbah cair sudah berada di dalam tangki penampung limbah selama 4 (empat) hari, sehingga kemungkinan besar karakteristik limbah sudah berubah karena adanya proses dekomposisi. Hasil pemeriksaan terhadap limbah cair terdapat pada Tabel 4.8 di bawah ini.

Tabel 4.8 Karakteristik Limbah Cair *Septic Tank* Sebelum Proses Pengolahan

No	Parameter	Satuan	Baku Mutu Limbah Domestik*	Hasil Uji	Keterangan
I. Fisika					
1	TSS	mg/l	100	89,00	SNI 06-6989.3.2004
2	Temperatur	°C	-	28,1	Elektrometri
II. Kimia					
3	pH	-	6-9	7,72	SNI 06-6989.11.2004
4	COD	mg/l	-	830,396	SNI 06-6989.2.2004
5	BOD ₅	mg/l	50	269,64	Ik. No. 05/LME/2009
6	DO ₀	mg/l	-	3,905	SNI.6989.14-2004
7	NH ₃	mg/l	-	47,7	Spektrometri
8	Nitrat	mg/l	-	4,72	Spektrometri
9	Nitrit	mg/l	-	1,0618	Spektrometri
10	Phospat	mg/l	-	17,42	Spektrometri

Keterangan:

- * Berdasarkan Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 18 Tahun 2005 tentang Baku Mutu Limbah Cair (BMLC) bagi Kegiatan Industri, Hotel, Rumah Sakit, Domestik, dan Pertambangan Batubara

Berdasarkan hasil pemeriksaan karakteristik limbah cair terlihat bahwa parameter COD dan BOD mengalami kenaikan menjadi sebesar 830,396 mg/l dan 269,64 mg/l dari sebelumnya 317,313 mg/l dan 138,974 mg/l. Hal ini dapat disebabkan karena selama masa aklimatisasi limbah cair yang tersimpan di dalam tangki penampung air limbah semakin tercemar karena pengaruh suhu dan keberadaan plankton. Terjadi penurunan suhu dari pemeriksaan sebelum proses aklimatisasi berlangsung ($T = 29,45^{\circ}\text{C}$) hingga pada saat limbah cair akan digunakan untuk proses pengolahan ($T = 28,1^{\circ}\text{C}$). Terdapat korelasi antara nilai BOD dengan suhu dan densitas plankton (Boyd, 1988 dalam Effendi, 2003). Hal ini sesuai dengan hasil percobaan di mana terjadi penurunan suhu yang menyebabkan peningkatan parameter COD dan BOD pada limbah cair *septic tank*. Sedangkan parameter TSS mengalami penurunan menjadi 89,00 mg/l sehingga sudah memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan. Penurunan parameter TSS dapat disebabkan karena bahan-bahan yang tersuspensi (diameter $>1 \mu\text{m}$) berupa lumpur, pasir halus, maupun jasad-jasad renik sudah mengendap di dasar tangki penampung air limbah selama proses aklimatisasi berlangsung (4 hari).

Konsentrasi NH_3 mengalami sedikit penurunan dari 49,3 mg/l menjadi 47,7 pada saat sebelum proses pengolahan. Hal ini dapat disebabkan karena terjadi proses volatilisasi NH_3 dalam tangki penampung limbah sehingga konsentrasi NH_3 sedikit berkurang. Volatilisasi juga dapat disebabkan karena adanya peningkatan pH. Berdasarkan Tabel 4.3 dan 4.8 terlihat adanya peningkatan pH limbah cair dari 7,45 menjadi 7,72. Adanya peningkatan pH menyebabkan persentase amonia bebas terhadap amonia total juga meningkat. Pada pH 7,72 dan temperatur $28,1^{\circ}\text{C}$, persentase amonia bebas adalah 2,72-4,24% (Boyd, 1988 dalam Effendi, 2003).

Pemeriksaan parameter fisik dan kimia maupun kerapatan sel dilakukan setiap hari untuk parameter: pH, temperatur, DO, intensitas cahaya matahari, kerapatan sel, dan konsentrasi NH_3 . Sedangkan parameter BOD diperiksa untuk mengetahui kualitas limbah cair yang dilakukan pada waktu awal dan akhir pengamatan. Data yang diperoleh dari hasil pengamatan proses *feeding* inilah yang dijadikan data untuk menjawab tujuan penelitian.

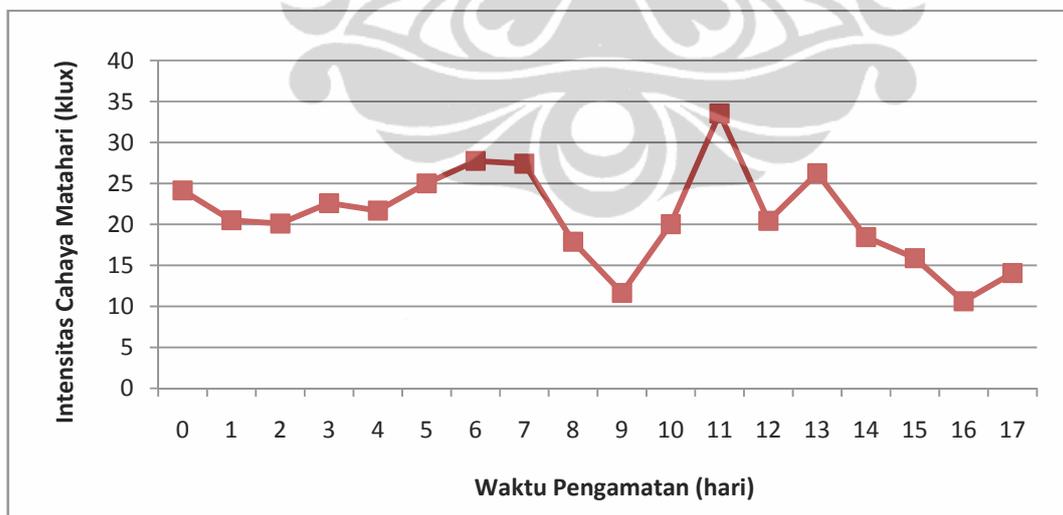
Universitas Indonesia

4.5 Pengaruh Faktor-Faktor Lingkungan (Intensitas cahaya matahari, Temperatur, pH, dan Oksigen terlarut) pada Pertumbuhan Mikroalga Jenis *Chlorella vulgaris* dengan Memanfaatkan Emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan Limbah Cair Domestik yang Terintegrasi

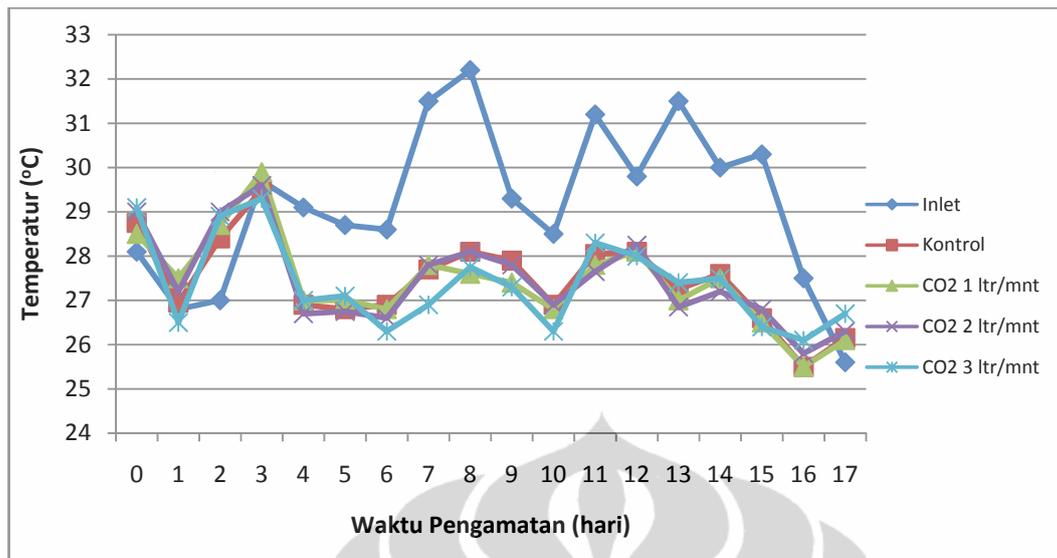
Pertumbuhan mikroalga dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan, di antaranya adalah intensitas cahaya matahari, karbondioksida, suhu, pH, dan konsentrasi zat anorganik seperti nitrogen. Hasil fotosintesis mikroalga berupa oksigen memerlukan pengamatan terhadap oksigen terlarut (DO) di dalam Kolam HROP. Karena itu untuk mengetahui pertumbuhan mikroalga, dilakukan pengamatan selama 17 (tujuh belas) hari terhadap faktor lingkungan fisik dan kimia seperti pada Gambar 4.1 sampai Gambar 4.4.

4.5.1 Intensitas cahaya matahari dan temperatur

Pengamatan terhadap intensitas cahaya matahari dan temperatur selama 17 (tujuh belas) hari dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan 4.2 di bawah ini.



Gambar 4.1 Grafik Intensitas Cahaya Matahari Selama Masa Pengamatan



Gambar 4.2 Grafik Temperatur Air Selama Masa Pengamatan

Tabel 4.9 Nilai Maksimum, Minimum, dan Rata-rata dari Faktor-Faktor Lingkungan Fisik

Parameter	Nilai	Inlet	Variasi Percobaan			
			Kontrol	Laju Alir CO ₂ 1 liter/menit	Laju Alir CO ₂ 2 liter/menit	Laju Alir CO ₂ 3 liter/menit
Intensitas Cahaya Matahari (klux)	Max	33,54	33,54	33,54	33,54	33,54
	Min	10,62	10,62	10,62	10,62	10,62
	Rata2	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00
Temperatur (°C)	Max	32,2	29,5	29,9	29,6	29,3
	Min	25,6	25,5	25,5	25,8	26,1
	Rata2	29,19	27,45	27,42	27,5	27,38

Berdasarkan Gambar 4.1 dan Tabel 4.9 terlihat bahwa intensitas cahaya matahari maksimum terjadi pada hari ke-11 (sebelas) yaitu sebesar 33,54 klux dan intensitas cahaya minimum terjadi pada hari ke-16 (enam belas) yaitu sebesar 10,62 klux. Pada saat intensitas cahaya maksimum, temperatur air untuk keempat bak berkisar antara 27,65 °C - 28,30°C. Sedangkan pada saat intensitas cahaya minimum, temperatur air

berkisar antara 25,5 °C - 26,1 °C. Nilai temperatur air maksimum tidak diperoleh tepat pada saat intensitas cahaya matahari maksimum, sedangkan nilai temperatur air minimum diperoleh tepat pada saat intensitas cahaya matahari minimum untuk keempat bak. Hal ini dapat disebabkan nilai intensitas cahaya matahari yang terukur adalah nilai rata-rata sepanjang hari, sedangkan nilai temperatur air yang terukur adalah temperatur air pada saat pengukuran kerapatan sel dilakukan yaitu pada pukul 2 (dua) siang.

Intensitas cahaya matahari dan temperatur merupakan faktor yang menguntungkan dalam perkembangan mikroalga. Peranan suhu terhadap proses fotosintesis adalah pada laju reaksi metabolis pada zat-zat mineral yang bertransformasi menjadi zat organik.

Intensitas cahaya matahari sebesar 10,62-33,54 klux sangat cukup untuk berlangsungnya fotosintesis. Hal ini sesuai dengan pernyataan Borowitzka (1988) yaitu, penggunaan sinar matahari dibatasi oleh kenyataan bahwa sel-sel mikroalga tidak dapat memanfaatkan sinar matahari pada intensitas yang terlalu tinggi. Proses fotosintesis dari *Chlorella* menjadi jenuh pada iluminasi yang rendah, yaitu berkisar antara 4-30 klux, bergantung pada *strain*. Jadi, intensitas sinar matahari yang lebih tinggi dari 30 klux tidak akan dimanfaatkan oleh *Chlorella* untuk melakukan proses fotosintesis. Hal ini berarti intensitas cahaya matahari dapat menjadi faktor pembatas pertumbuhan mikroalga. Pada percobaan ini, intensitas cahaya matahari masih dalam batas toleransi. Karena percobaan ini berlangsung di luar ruangan, maka sinar matahari tidak dapat diatur bersinar terus selama 24 jam, matahari bersinar paling lama 12 jam dengan intensitas cahaya yang berfluktuasi. Karena itulah aktivitas fotosintesis lebih sedikit pada waktu sore hari daripada pagi hari. Hasilnya adalah populasi pada pagi hari memiliki lebih banyak sel muda, sel aktif fotosintesis, sedangkan populasi sore memiliki sel yang lebih matang, sel yang kurang aktif berfotosintesis. Dengan adanya *paddle wheel* yang berputar terus-menerus, diharapkan proses fotosintesis tidak hanya berlangsung di lapisan atas permukaan bak, tetapi mikroalga yang berada di dasar bak pun dapat berfotosintesis. Karena itu, faktor kedalaman bak menjadi faktor yang sangat mempengaruhi keberhasilan proses pertumbuhan mikroalga. Pertumbuhan alga

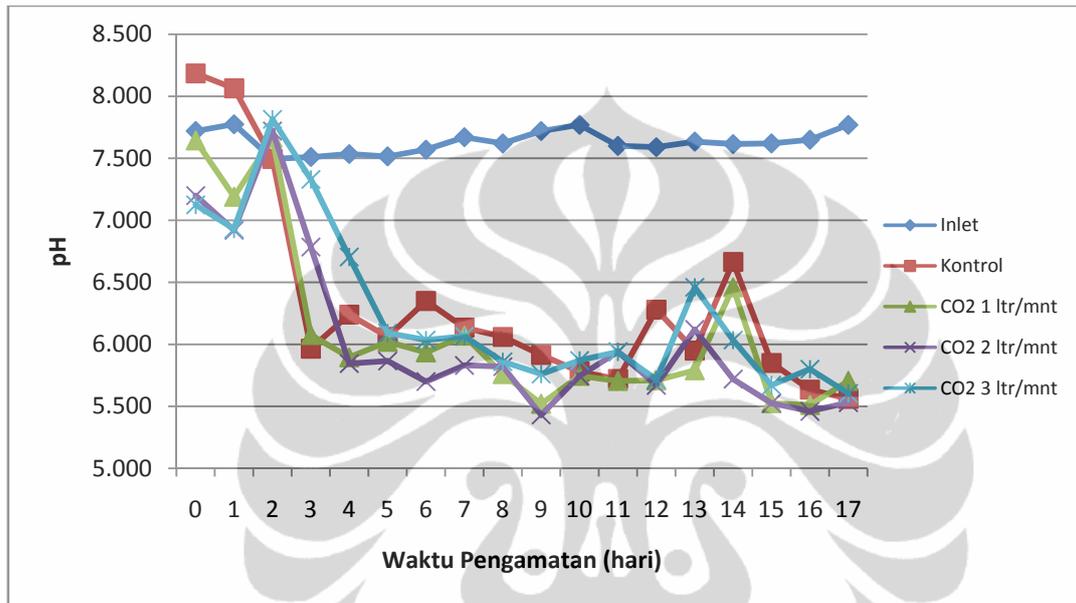
pada kolam yang lebih dalam (100 cm) tidak terlalu baik dibandingkan dengan kolam yang lebih dangkal (40-70 cm).

Berdasarkan Gambar 4.2 dan Tabel 4.9 terlihat bahwa terjadi fluktuasi suhu pada keempat bak yang berada pada kisaran 26-30°C. Kisaran suhu tersebut sesuai dengan batasan suhu optimum untuk pertumbuhan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* menurut Isnansetyo & Kurniastuty (1995) juga sesuai dengan kisaran suhu optimal pertumbuhan mikroalga di dalam Kolam HROP menurut Oswald (1968) yaitu sebesar 15-30°C. Sedangkan untuk inlet, kisaran suhu berkisar antara 25-32°C, lebih tinggi sedikit daripada di outlet. Terjadi peningkatan suhu untuk keempat bak dibandingkan ketika proses aklimatisasi berlangsung, walaupun hanya sedikit. Peningkatan suhu ini dapat menjadi awal yang baik bagi berlangsungnya proses fotosintesis yang menjadi awal kehidupan dari mikroalga. Peningkatan suhu ini berpengaruh terhadap peningkatan kecepatan proses dalam sel mikroalga, di mana setelah 3 (tiga) hari masa pengamatan mulai terlihat peningkatan pertumbuhan mikroalga.

Berdasarkan Tabel 4.9 terlihat bahwa temperatur air maksimum di dalam keempat bak berkisar antara 29-30°C, sedangkan temperatur air minimum keempat bak berkisar antara 27,4-27,5°C. Setelah hari pengamatan ke-3 (tiga), temperatur air di dalam bak sedikit menurun yaitu antara 25,5-28°C dibandingkan pada awal pengamatan (3 hari pertama) yaitu sebesar 26,5-30°C. Penurunan temperatur ini diikuti dengan pertumbuhan mikroalga yang semakin meningkat pada saat hari ke-4 (empat) masa pengamatan. Peningkatan pertumbuhan mikroalga ini menandakan bahwa proses fotosintesis mulai berjalan karena mikroalga mulai dapat beradaptasi dengan baik dalam limbah cair *septic tank*. Suhu sangat berpengaruh pada cepat dan lambatnya pertumbuhan dan reproduksi. Seharusnya salah satu indikator proses fotosintesis mulai berlangsung dengan baik adalah adanya peningkatan suhu. Tetapi dalam percobaan ini ada sedikit penurunan suhu setelah 3 (tiga) hari masa pengamatan, di mana pada hari ke-4 (empat) pertumbuhan mikroalga semakin menunjukkan peningkatan kerapatan sel yang signifikan. Walaupun terjadi penurunan suhu, tetapi suhu yang terukur masih dalam batas toleransi pertumbuhan optimal mikroalga, yaitu sebesar 20-30°C.

4.5.2 pH

Kadar asam (pH) dapat menjadi indikator yang baik bagi proses fotosintesis. Berlangsungnya proses fotosintesis ditandai dengan adanya peningkatan pH. Pengamatan terhadap faktor lingkungan kimia yaitu pH selama 17 (tujuh belas) hari masa pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik pH Selama Masa Pengamatan

Tabel 4.10 Nilai Maksimum, Minimum, dan Rata-rata dari pH

Parameter	Nilai	Inlet	Variasi Percobaan			
			Kontrol	Laju Alir CO ₂ 1 liter/menit	Laju Alir CO ₂ 2 liter/menit	Laju Alir CO ₂ 3 liter/menit
pH	Max	7,78	8,19	7,67	7,67	7,82
	Min	7,50	5,56	5,51	5,51	5,61
	Rata2	7,63	6,38	6,16	6,16	6,31

Fluktuasi pH terjadi pada inlet dan keempat bak seperti yang terlihat pada Gambar 4.4. pH inlet berada pada kisaran 7,5-7,8, sedangkan pH keempat bak berada pada kisaran 5,5-8,2. Pada awal pengamatan (H-0 sampai dengan H-3) pH keempat bak masih

berkisar antara 7-8, tetapi pH air semakin menurun (pH 5,5-6,5) dengan bertambahnya waktu pengamatan. Hal ini disebabkan emisi gas CO₂ yang dialirkan ke dalam Bak 2, 3, dan 4 langsung membuat pH air menjadi menurun. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan emisi CO₂ memberikan efek samping berupa penurunan pH. Kadar asam maksimum (pH = 8,19) maupun pH rata-rata Bak 1 (pH = 6,38) yang tidak dialiri emisi gas CO₂ sedikit lebih tinggi daripada bak lainnya. Gas CO₂ yang terlarut di dalam bak membentuk asam karbonat (H₂CO₃) sehingga air menjadi bersifat lebih asam (pH menurun) karena adanya kandungan ion H⁺. Keberadaan CO₂ dalam air terdapat dalam bentuk asam karbonat (H₂CO₃). Menurut kesetimbangan antara konsentrasi CO₂ dengan pH, pada pH antara 4-6 CO₂ berada dalam bentuk H₂CO₃ (Willoughby, 1978 *dalam* Effendi, 2003). Jadi dalam percobaan ini konsentrasi CO₂ yang terlarut di dalam air berada dalam bentuk H₂CO₃ karena pH berada pada kisaran 5,5-6,5 setelah 3 (tiga) hari masa pengamatan.

Terdapat hubungan antara laju fotosintesis, pH dan kelarutan oksigen. Menurut teori, proses fotosintesis dari mikroalga akan mengambil sumber karbon yang berasal dari CO₂ yang terlarut dari dalam air dan ion bikarbonat. Sehingga proses fotosintesis yang berlangsung akan ditandai dengan meningkatnya pH karena mikroalga akan mengambil CO₂ yang terlarut di dalam air. Tetapi pada percobaan kali ini justru pH air semakin menurun setelah 3 (tiga) hari masa pengamatan dengan pH berkisar antara 5,5-6,5. Penurunan pH ini diikuti dengan pertumbuhan mikroalga yang semakin menunjukkan peningkatan kerapatan sel yang signifikan. Penambahan emisi CO₂ dari PLTU Batubara memang membuat pH air dalam bak menjadi menurun, akan tetapi proses fotosintesis akan mengambil CO₂ terlarut di dalam bak sehingga pH menjadi meningkat. Seharusnya pH air di dalam bak menjadi normal (pH 7-8) karena adanya kedua proses di atas.

Menurut Cole (1988) *dalam* Effendi (2003), karbondioksida yang masuk ke badan air hanya sekitar 1% karbondioksida bereaksi dengan air membentuk asam karbonat. Sehingga wajar jika emisi CO₂ dari PLTU Batubara yang memiliki konsentrasi sebesar 13-15% volume udara tersebut hanya sedikit sekali yang dimanfaatkan oleh mikroalga

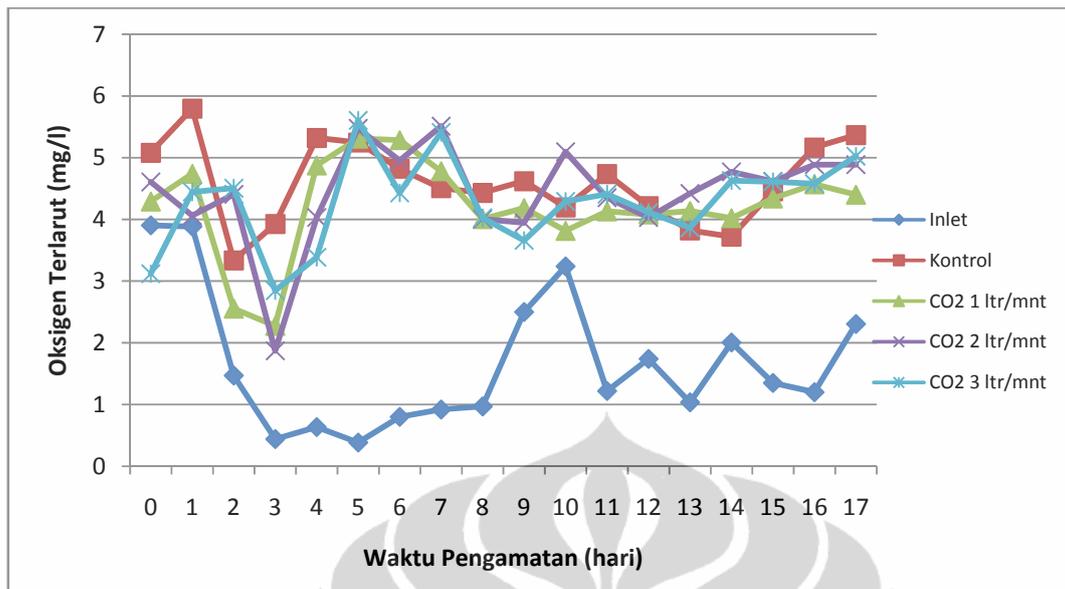
untuk melakukan fotosintesis. Sehingga pengaruhnya terhadap pH air-pun sedikit sekali.

Penurunan pH setelah 3 (tiga) hari masa pengamatan bukan hanya berlaku pada Bak 2, 3, dan 4 yang dialiri oleh emisi CO₂ dari PLTU Batubara, tetapi hal ini juga berlaku pada Bak 1 (kontrol) yang tidak dialiri oleh emisi CO₂, pH air pada Bak 1 juga sedikit asam (5,56-6,67). Hal ini menjelaskan bahwa penurunan pH yang utama bukan disebabkan oleh adanya penambahan emisi CO₂ dari PLTU Batubara. Menurut peneliti, hal ini dapat disebabkan lingkungan udara ambien di sekitar lokasi penelitian yang sangat berdebu oleh abu terbang batubara membuat pH air di dalam bak menjadi asam (pH = 5,5-6,5). Kandungan abu terbang batubara banyak mengandung sulfur sehingga apabila masuk dan bereaksi dengan air, dapat membuat pH air menjadi asam. Bertambahnya waktu pengamatan membuat abu terbang batubara yang masuk ke dalam bak semakin banyak sehingga berpengaruh terhadap pH air. Sulfur yang berada dalam abu terbang tersebut berada dalam bentuk SO_x sehingga dapat mempengaruhi pH media. Produktivitas mikroalga tidak akan menurun asal pH dipertahankan pada kondisi optimum pertumbuhan mikroalga (pH = 6,5-7,5). Pada percobaan ini, pH media dibiarkan pada kondisi alami. pH air di dalam bak tidak menurun hingga di bawah 4 sehingga tidak mengganggu produktivitas mikroalga.

Percobaan ini tidak sesuai dengan pH optimum pertumbuhan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* sebesar 6,5-7,5 (Borowitzka, 1988). Walaupun pH air berkisar antara 5,5-6,5 tetapi mikroalga justru menunjukkan pertumbuhan yang semakin baik. Hal ini menunjukkan bahwa *Chlorella vulgaris* masih dapat tumbuh dan berkembang biak pada kondisi lingkungan yang asam (pH = 5,5-6,5).

4.5.3 Oksigen terlarut (DO)

Kinerja dari kolam HROP dapat diukur dari keberadaan oksigen terlarut dalam air, sehingga keberadaannya menjadi bagian yang sangat penting. Pengamatan terhadap oksigen terlarut selama masa pengamatan 17 (tujuh belas) hari dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Tabel 4.11.



Gambar 4.4 Grafik Oksigen Terlarut (DO) Selama Waktu Pengamatan

Tabel 4.11 Nilai Maksimum, Minimum, dan Rata-rata dari Oksigen Terlarut (DO)

Parameter	Nilai	Inlet	Variasi Percobaan			
			Kontrol	Laju Alir CO ₂ 1 liter/menit	Laju Alir CO ₂ 2 liter/menit	Laju Alir CO ₂ 3 liter/menit
DO (mg/l)	Max	3,91	5,80	5,31	5,51	5,61
	Min	0,39	3,34	2,28	1,87	2,85
	Rata2	1,71	4,59	4,17	4,36	4,27

Berdasarkan Gambar 4.4 dan Tabel 4.11 terlihat bahwa terjadi fluktuasi kadar oksigen pada inlet dan keempat bak. Fluktuasi ini tergantung pada proses pencampuran (*mixing*) dan pergerakan (*turbulence*) massa air, aktivitas fotosintesis, respirasi makhluk hidup, mineralisasi zat-zat organik, oksidasi kimia zat-zat reduktif, nitrifikasi, dan limbah yang masuk ke badan air (Berthet, 1979 dalam Moersidik 1988; Effendi, 2003). Kadar oksigen terlarut pada keempat bak lebih tinggi daripada inlet (limbah yang masuk). DO minimum pada inlet adalah 0,385 mg/l dan maksimum adalah 3,905 mg/l. Pada saat inlet mencapai DO maksimum, maka DO pada keempat bak juga cukup tinggi, yaitu berkisar antara 3,12-5,08 mg/l. DO maksimum pada inlet terjadi di

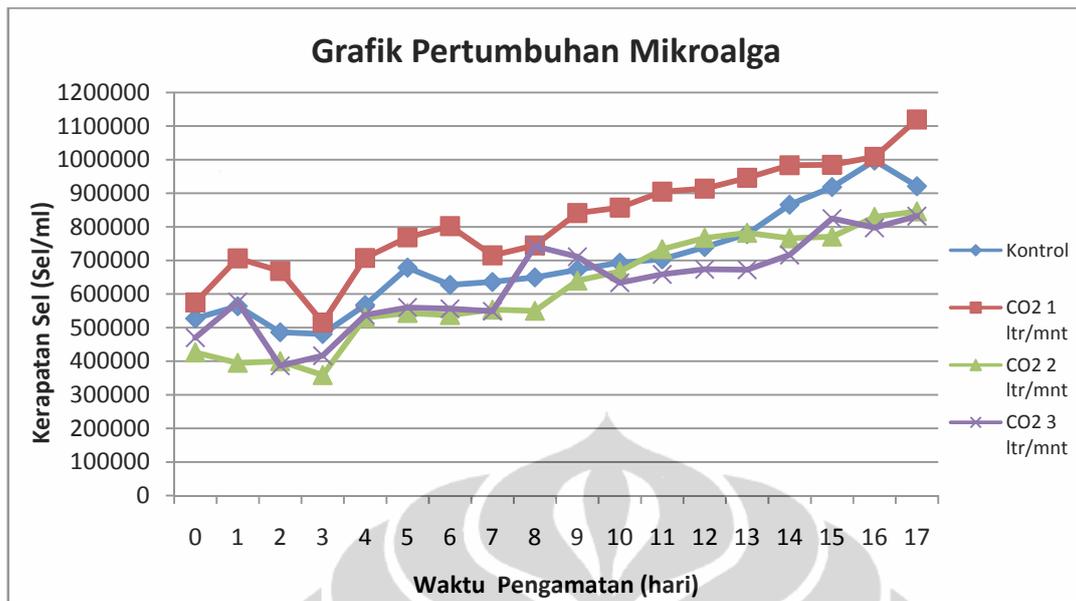
awal masa pengamatan karena kondisi limbah yang berada di dalam tangki penampung limbah masih bersifat aerob. Bertambahnya masa pengamatan menyebabkan limbah yang ditampung di dalam tangki semakin anaerob, sehingga kadar oksigen semakin menurun. Peningkatan oksigen terlarut pada hari ke-10 (sepuluh) pada inlet disebabkan tangki penampung limbah mendapatkan suplai limbah cair dari tangki penampung limbah utama.

Adanya *paddle wheel* yang terus berputar membuat kadar oksigen di dalam keempat bak tetap terjaga sepanjang masa pengamatan (17 hari). Kadar oksigen terlarut rata-rata dari keempat bak adalah 4,17-4,59 mg/l, lebih tinggi daripada oksigen terlarut rata-rata pada inlet yaitu sebesar 1,71 mg/l. Dari keempat bak, DO minimum adalah 1,87 mg/l (Bak 3, H-3) dan DO maksimum adalah 5,795 mg/l (Bak 1, H-1). Kelarutan oksigen ini sangat dipengaruhi oleh operasional *paddle wheel*. Jika *paddle wheel* tidak berputar secara sempurna, maka kelarutan oksigen langsung turun.

Setelah 3 (tiga) hari masa pengamatan, terjadi peningkatan DO di dalam keempat bak. Hal ini menandakan terjadinya proses fotosintesis oleh mikroalga di dalam bak yang menghasilkan oksigen. Oksigen ini akan digunakan oleh mikroorganisme untuk mendegradasi materi organik yang ada di dalam air limbah. Peningkatan kadar oksigen terlarut di dalam air juga dapat disebabkan oleh proses respirasi dari mikroorganisme yang terdapat di dalam air limbah.

4.5.4 Pertumbuhan Mikroalga

Pertumbuhan mikroalga selain dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungan seperti intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan Oksigen terlarut, juga sangat dipengaruhi oleh karbondioksida sebagai sumber karbon. Karbondioksida dibutuhkan oleh mikroalga untuk melakukan fotosintesis. Penambahan gas CO₂ dari PLTU Batubara dimaksudkan untuk meningkatkan laju fotosintesis. Pertumbuhan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* yang ditandai dengan kerapatan sel pada Kolam HROP dengan variasi laju alir emisi CO₂ dapat dilihat pada Gambar 4.5 di bawah ini.



Gambar 4.5 Grafik Pertumbuhan Mikroalga Selama Waktu Pengamatan

Berdasarkan Gambar 4.5 terlihat bahwa pertumbuhan mikroalga yang ditandai dengan bertambah banyaknya jumlah sel (kerapatan sel) mengikuti pola pertumbuhan yang sama untuk setiap variasi laju alir emisi CO₂. Pertumbuhan mikroalga belum menunjukkan peningkatan yang signifikan pada awal pengamatan (H-0 sampai dengan H-3), dan setelah hari ke-3 (tiga) kerapatan sel untuk keempat bak terus menunjukkan peningkatan hingga hari ke-17 (tujuh belas). Pada awal pengamatan (H-0), kerapatan sel untuk Bak 1 (kontrol), Bak 2 (laju alir CO₂ 1 liter/menit), Bak 3 (laju alir CO₂ 2 liter/menit), dan Bak 4 (laju alir CO₂ 3 liter/menit) adalah sebesar 527.500 sel/ml, 575.500 sel/ml, 426.250 sel/ml, dan 470.000 sel/ml. Sedangkan pada hari pengamatan ke-17 (tujuh belas), kerapatan sel untuk Bak 1, Bak 2, Bak 3, dan Bak 4 adalah 921.250 sel/ml, 1.120.000 sel/ml, 846.250 sel/ml, dan 832.500 sel/ml.

Pada awal pengamatan (H-0 sampai H-3) mikroalga masih memerlukan masa adaptasi dengan limbah cair *septic tank*. Dari keempat bak, diperlukan masa adaptasi yang relatif sama yaitu 3 (tiga) hari. Walaupun sebelum proses pengolahan dimulai, sudah dilakukan Tahap Aklimatisasi selama 4 (empat) hari. Ternyata waktu tersebut belum cukup bagi mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* untuk tumbuh dan berkembang biak. Pada masa adaptasi, nutrisi yang terdapat di dalam limbah cair belum sepenuhnya

dimanfaatkan oleh mikroalga untuk tumbuh dan berkembang biak. Sehingga proses fotosintesis belum berlangsung dengan baik dan belum terjadi hubungan simbiosis antara mikroalga dan mikroorganisme yang terdapat di dalam limbah cair.

Peningkatan jumlah sel baru dimulai secara signifikan pada hari ke-4 (empat) pengamatan. Hal ini juga ditandai dengan kelarutan oksigen yang meningkat pada keempat bak yang berarti proses fotosintesis pada mikroalga mulai berlangsung dengan baik setelah hari ke-3 (tiga) pengamatan. Pada awal pengamatan, Bak 2 menunjukkan kerapatan sel awal yang tertinggi (575.500 sel/ml), dan pada akhir pengamatan pun menunjukkan hasil yang terbaik (1.120.000 sel/ml). Ini berarti Bak 2 cepat beradaptasi dengan baik dalam media limbah cair *septic tank*, sehingga menunjukkan laju pertumbuhan yang paling cepat.

Penambahan laju alir menjadi 2 liter/menit pada Bak 3, dan 3 liter/menit pada Bak 4, tidak membuat kerapatan sel menjadi lebih baik daripada tanpa dialiri emisi CO₂ (Bak 1, kontrol). Hal ini dapat disebabkan karena mikroalga sudah cukup mendapatkan CO₂ yang dibutuhkan untuk melakukan proses fotosintesis, sehingga penambahan laju alir tidak memberikan manfaat bagi peningkatan proses fotosintesis. Penambahan laju alir emisi gas CO₂ (> 1 liter/menit) membuat mikroalga semakin jenuh dalam menerima konsentrasi gas emisi CO₂. Sehingga laju alir emisi gas CO₂ juga menjadi faktor pembatas pertumbuhan sel mikroalga selain konsentrasi gas CO₂. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Negoro, *et al* (1993), di mana laju alir yang digunakan untuk menangkap emisi CO₂ dari PLTU adalah sebesar 1 liter/menit.

Konsentrasi emisi gas CO₂ yang dimasukkan ke dalam bak adalah berkisar antara 13-15% volume. Konsentrasi CO₂ sebesar 13-15% volume selalu dipertahankan oleh PLTU agar terjadi pembakaran yang sempurna di dalam *boiler*, selain untuk menjaga kualitas emisi gas buang. Penelitian yang dilakukan oleh Chrismadha *et al.* (2006) terhadap pertumbuhan mikroalga *strain* air tawar jenis *Chlorella vulgaris*, dengan tambahan CO₂ sebesar 0,05%, 2%, 5% dan 10%, kepadatan sel tertinggi diperoleh pada perlakuan dengan 5% CO₂ (102 juta sel/ml). Hal ini menunjukkan bahwa

mikroalga hanya membutuhkan tambahan CO₂ pada konsentrasi tertentu. Percobaan yang dilakukan oleh Chrismadha *et al.* (2006) sesuai dengan hasil percobaan kali ini, di mana penambahan laju alir emisi CO₂ menjadi 2 liter/menit dan 3 liter/menit tidak membuat pertumbuhan mikroalga semakin baik. Hal ini menunjukkan bahwa mikroalga adalah tanaman yang efisien dalam menangkap dan memanfaatkan energi matahari dan CO₂ untuk keperluan fotosintesis.

Untuk mengetahui secara jelas laju pertumbuhan relatif dari masing-masing variasi laju alir emisi CO₂, dapat dilihat pada Tabel 4.12 di bawah ini.

Tabel 4.12 Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* dan Laju Pertumbuhan Relatif (k)

No	Tanggal	Kontrol		Laju Alir CO ₂ 1 liter/menit		Laju Alir CO ₂ 2 liter/menit		Laju Alir CO ₂ 3 liter/menit	
		Kerapat-an Sel (sel/ml)	Laju Pertum-buhan (k)	Kerapat-an Sel (sel/ml)	Laju Pertum-buhan (k)	Kerapat-an Sel (sel/ml)	Laju Pertum-buhan (k)	Kerapat-an Sel (sel/ml)	Laju Pertum-buhan (k)
1	4/1/2011	527500	-	575000	-	426250	-	470000	-
2	5/1/2011	563750	0.10	706250	0.30	395000	-0.11	576250	0.29
3	6/1/2011	486250	-0.21	668750	-0.08	400000	0.02	386250	-0.58
4	7/1/2011	1410000	1.54	590000	-0.18	372500	-0.10	1175000	1.60
5	8/1/2011	567500	-1.31	707500	0.26	530000	0.51	537500	-1.13
6	9/1/2011	678750	0.26	768750	0.12	543750	0.04	560000	0.06
7	10/1/2011	627500	-0.11	802500	0.06	537500	-0.02	556250	-0.01
8	11/1/2011	636250	0.02	715000	-0.17	553750	0.04	548750	-0.02
9	12/1/2011	650000	0.03	745000	0.06	550000	-0.01	742500	0.44
10	13/1/2011	672500	0.05	841250	0.18	640000	0.22	711250	-0.06
11	14/1/2011	693750	0.04	857500	0.03	667500	0.06	633750	-0.17
12	15/1/2011	703750	0.02	905000	0.08	733750	0.14	658750	0.06
13	16/1/2011	740000	0.07	913750	0.01	767500	0.06	673750	0.03
14	17/1/2011	778750	0.07	946250	0.05	782500	0.03	672500	0.00
15	18/1/2011	866250	0.15	983750	0.06	766250	-0.03	716250	0.09
16	19/1/2011	918750	0.08	985000	0.00	771250	0.01	825000	0.20
17	20/1/2011	997500	0.12	1008750	0.03	830000	0.11	797500	-0.05
18	21/1/2011	921250	-0.11	1120000	0.15	846250	0.03	832500	0.06

Tabel 4.13 Nilai Maksimum, Minimum, dan Rata-Rata dari laju Pertumbuhan Relatif

Parameter	Nilai	Variasi Percobaan			
		Kontrol	Laju Alir CO ₂ 1 liter/menit	Laju Alir CO ₂ 2 liter/menit	Laju Alir CO ₂ 3 liter/menit
Laju Pertumbuhan (k)	Max	1,535	0,296	0,509	1,604
	Min	-1,312	-0,181	-0,110	-1,128
	Rata2	0,047	0,057	0,058	0,049

Berdasarkan Tabel 4.12 di atas terlihat bahwa kerapatan sel maksimum pada Bak 1 terjadi pada hari pengamatan ke-16 (enam belas) yaitu sebesar 997.500 sel/ml ($k = 0,12$). Pada hari ke-16 (enam belas) faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga di dalam Bak 1 adalah intensitas cahaya matahari sebesar 10,62 klux, temperatur air sebesar 25,5°C, pH sebesar 5,6, dan kelarutan oksigen sebesar 5,26 mg/l. Kelarutan oksigen sebesar itu (5,26 mg/l) cukup menandakan bahwa mikroalga dalam Bak 1 cukup baik dalam melakukan proses fotosintesis walaupun pada percobaan ini pH air tidak cukup tinggi ($pH = 5,6$). Seperti diketahui proses fotosintesis ditandai dengan adanya peningkatan pH air akibat pemakaian CO₂ terlarut dari dalam air limbah. Hal ini mungkin saja disebabkan kandungan CO₂ terlarut di dalam air cukup besar akibat respirasi dari mikroorganisme di dalam air limbah. Pada hari pengamatan ke-17 (tujuh belas), Bak 1 menunjukkan kinerja yang kurang baik dengan kerapatan sel yang menurun dan laju pertumbuhan relatif yang negatif. Hal ini dapat disebabkan karena mikroalga yang terdapat di dalam Bak 1 telah sulit untuk tumbuh dan berkembang biak lagi pada kondisi kerapatan sel yang sudah tinggi, walaupun penambahan nutrisi terus dilakukan.

Pada Bak 2, kerapatan sel maksimum terjadi pada hari pengamatan ke-17 (tujuh belas) yaitu sebesar 1.120.000 ($k = 0,15$). Pada hari ke-17 (tujuh belas) faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga di dalam Bak 2 adalah intensitas cahaya matahari sebesar 14,06 klux, temperatur air sebesar 26,1°C, pH sebesar 5,7, dan kelarutan oksigen sebesar 4,4 mg/l. Nutrisi yang terus ditambahkan ke

dalam Bak 2 mampu membuat mikroalga terus tumbuh dan berkembang biak. Penambahan emisi gas CO₂ dengan laju alir 1 liter/menit cukup baik dalam membantu mikroalga untuk berfotosintesis. Hasil fotosintesis berupa oksigen ditandai dengan kelarutan oksigen di dalam air sebesar 4,4 mg/l. Penambahan emisi gas CO₂ ini juga membuat kandungan CO₂ yang terlarut di dalam air semakin banyak sehingga pH air menjadi asam (pH=5,7). Penambahan emisi gas CO₂ terbukti membuat kinerja mikroalga pada Bak 2 lebih baik daripada yang tanpa tambahan emisi gas CO₂.

Pada Bak 3, kerapatan sel maksimum terjadi pada hari pengamatan ke-17 (tujuh belas) yaitu sebesar 846.250 sel/ml ($k = 0,03$). Hal ini menunjukkan bahwa mikroalga masih mampu untuk terus tumbuh dan berkembang biak dengan penambahan nutrisi dan dalam kondisi kerapatan sel tinggi. Pada hari ke-17 (tujuh belas) faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga di dalam Bak 3 adalah intensitas cahaya matahari sebesar 14,06 klux, temperatur air sebesar 26,3°C, pH air sebesar 5,5, dan kelarutan oksigen sebesar 3,58 mg/l. Penambahan emisi gas CO₂ dengan laju alir 2 liter/menit ternyata tidak membuat kinerja Bak 3 lebih baik daripada Bak 1 yang tanpa penambahan aliran gas CO₂. Hal ini dapat disebabkan mikroalga sudah cukup dalam memanfaatkan gas CO₂ dalam waktu tertentu, sehingga penambahan laju alir akan membuat mikroalga jenuh terhadap konsentrasi CO₂.

Hal yang sama terjadi pada kinerja yang ditunjukkan oleh Bak 4, penambahan laju alir menjadi sebesar 3 liter/menit tidak membuat kinerjanya lebih baik dibandingkan tanpa tambahan gas CO₂ (Bak 1). Kerapatan sel maksimum terjadi pada hari pengamatan ke-17 (tujuh belas) yaitu sebesar 832.500 sel/ml ($k = 0,06$). Hal ini juga disebabkan mikroalga sudah jenuh untuk menerima tambahan emisi gas CO₂ pada waktu tertentu. Pada hari ke-17 (tujuh belas) faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga di dalam Bak 4 adalah intensitas cahaya matahari sebesar 14,06 klux, temperatur air sebesar 26,7°C, pH air sebesar 5,6, dan kelarutan oksigen sebesar 5,03 mg/l.

Berdasarkan Tabel 4.13 terlihat bahwa laju pertumbuhan rata-rata terbesar diperoleh Bak 3 dengan laju pertumbuhan rata-rata sebesar 0,058; laju pertumbuhan maksimal sebesar 0,509; dan laju pertumbuhan minimum sebesar -0,110. Tetapi laju pertumbuhan terbaik pada Bak 3 tidak diikuti dengan hasil kerapatan selnya, karena kerapatan sel terbaik pada akhir masa pengamatan diperoleh Bak 2 (kerapatan sel = 1.120.000 sel/ml). Bak 2 mempunyai laju pertumbuhan rata-rata, laju pertumbuhan maksimum, dan laju pertumbuhan minimum sebesar 0,057; 0,296; dan -0,0181. Hal ini disebabkan karena pada awal masa pengamatan (H-0), Bak 2 sudah menunjukkan kerapatan sel yang lebih besar (575.000 sel/ml) dibandingkan Bak 3 (426.250 sel/ml), sehingga dengan laju pertumbuhan yang lebih kecil menghasilkan kerapatan sel yang lebih besar pada akhir masa pengamatan (H-17). Hal ini menunjukkan bahwa Bak 2 lebih cepat beradaptasi dibandingkan bak lainnya dan lebih cepat dalam mengambil nutrisi dari limbah cair *septic tank*.

4.5.5 Hubungan antara intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan Oksigen terlarut, dengan pertumbuhan mikroalga

A. Hubungan antar faktor-faktor lingkungan (intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan oksigen terlarut)

Untuk mengetahui adanya korelasi antara faktor-faktor lingkungan seperti intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan oksigen terlarut dengan pertumbuhan mikroalga, maka dilakukan uji Korelasi Pearson. Pengujian dilakukan terhadap data-data dari Bak 2, yaitu bak yang dialiri emisi CO₂ dengan laju alir 1 liter/menit. Hasil dari Uji Korelasi Pearson dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Uji Korelasi Pearson terhadap Faktor-Faktor Lingkungan

Kekuatan Korelasi (r)	Intensitas cahaya matahari	Temperatur	pH	DO
Intensitas cahaya matahari	-	0,365	0,182	0,121
Temperatur	0,365	-	0,528 **	- 0,669 **
pH	0,182	0,528 **	-	- 0,289
DO	0,121	- 0,669 **	- 0,289	-

Keterangan:

** signifikan atau ada korelasi antara 2 variabel uji

Berdasarkan Tabel 4.14 terlihat bahwa terdapat korelasi yang signifikan antara temperatur dan pH juga korelasi antara temperatur dan oksigen terlarut sebesar 0,528 dan -0,669. Nilai korelasi yang ditunjukkan oleh hubungan temperatur dan pH ($r = 0,528$) menunjukkan kekuatan korelasi yang sifatnya sedang. Nilai r yang positif menunjukkan bahwa kenaikan nilai temperatur dapat menyebabkan kenaikan nilai pH atau penurunan nilai temperatur akan menyebabkan penurunan nilai pH. Sedangkan kekuatan korelasi yang ditunjukkan oleh hubungan antara temperatur dan oksigen terlarut ($r = -0,669$) menunjukkan sifat yang kuat. Nilai r yang negatif menunjukkan bahwa kenaikan nilai temperatur dapat menyebabkan penurunan nilai pH atau penurunan nilai temperatur dapat menyebabkan kenaikan nilai pH.

Berdasarkan hasil uji korelasi antara temperatur dan sinar matahari, menunjukkan bahwa hubungan antara kedua parameter tersebut tidak signifikan. Hal ini dibuktikan dengan kekuatan korelasi yang lemah ($r = 0,365$). Begitu pula nilai korelasi yang ditunjukkan oleh hubungan antara intensitas cahaya matahari dan pH, tidak adanya signifikansi ditunjukkan dengan kekuatan korelasi yang sangat lemah ($r = 0,182$). Dari kedua korelasi tersebut menunjukkan bahwa jika hasil Uji Korelasi Pearson tidak signifikan, maka nilai korelasi (r) yang diberikan akan lemah atau sangat lemah.

B. Hubungan antara faktor-faktor lingkungan (intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan oksigen terlarut) dengan pertumbuhan mikroalga

Pertumbuhan mikroalga dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungan seperti intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan oksigen terlarut. Untuk mengetahui besarnya pengaruh dari masing-masing faktor lingkungan tersebut terhadap pertumbuhan mikroalga, maka dilakukan Uji Korelasi Pearson untuk mengetahui kekuatan hubungan linier dan nilai variabel bebas akibat hubungan linier dengan variabel terikatnya. Hasil dari Uji Korelasi Pearson dapat dilihat pada Tabel 4.15 di bawah ini.

Tabel 4.15 Uji Korelasi Pearson Antara Faktor-Faktor Lingkungan dengan Pertumbuhan Mikroalga

	Kerapatan Sel		
	α	r	r^2
Intensitas Cahaya	0.141	- 0.361	13.03%
Temperatur	0.000*	- 0.760	57.76%
pH	0.009*	- 0.598	35.76%
DO	0.225	0.301	9.06%

Keterangan:

- * = signifikan atau ada korelasi antara 2 variabel uji
- α = signifikansi
- r = korelasi
- r^2 = koefisien determinasi

Pengujian terhadap ada atau tidak adanya signifikansi (α) dilakukan sebelum uji korelasi. Nilai $\alpha < 0,05$ menunjukkan adanya korelasi yang bermakna antara dua variabel yang diuji. Berdasarkan Tabel 4.14 di atas, hubungan linier yang ada signifikansinya terjadi antara temperatur dengan kerapatan sel, juga hubungan linier antara pH dengan kerapatan sel. Dari hasil uji korelasi pada hubungan keduanya membuktikan bahwa nilai korelasinya bersifat kuat ($r = -0,761$) dan sedang ($r = -0,598$). Sedangkan pada hubungan linier antara intensitas cahaya matahari dengan kerapatan sel dan oksigen terlarut dengan kerapatan sel, menunjukkan nilai $\alpha > 0,05$ yang berarti tidak ada korelasi yang bermakna antara dua variabel yang diuji tersebut.

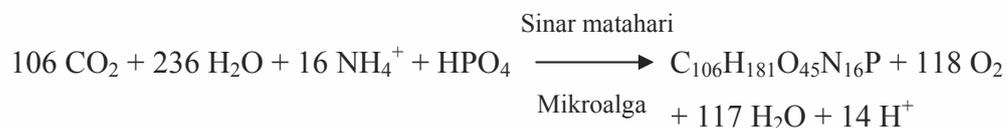
Walaupun dilakukan Uji Korelasi Pearson terhadap hubungan linier keduanya, tetapi hasilnya menunjukkan nilai korelasi yang sifatnya lemah ($r = -0,361$ dan $r = 0,301$).

Berdasarkan Tabel 4.15 di atas terlihat bahwa hampir semua korelasi antara faktor-faktor lingkungan dengan kerapatan sel menunjukkan hubungan korelasi yang negatif, kecuali pada hubungan antara oksigen terlarut dan kerapatan sel menunjukkan korelasi yang positif. Hal ini menunjukkan bahwa setiap kenaikan intensitas cahaya matahari, kenaikan temperatur, dan kenaikan pH akan menyebabkan penurunan kerapatan sel mikroalga, begitu pula sebaliknya. Sedangkan setiap kenaikan kadar oksigen terlarut akan menyebabkan peningkatan kerapatan sel juga. Nilai korelasi antara intensitas cahaya matahari dan kerapatan sel adalah sebesar $-0,361$ yang menunjukkan korelasi yang sifatnya lemah. Nilai korelasi antara temperatur dan kerapatan sel adalah $-0,760$, yang menunjukkan korelasi yang sifatnya kuat. Sedangkan nilai korelasi antara pH dan kerapatan sel sebesar $-0,598$ menunjukkan korelasi yang sifatnya sedang. Nilai korelasi antara oksigen terlarut dan kerapatan sel menunjukkan korelasi yang sifatnya lemah dengan nilai korelasi sebesar $0,301$.

Setelah nilai korelasi antara faktor-faktor lingkungan dengan pertumbuhan mikroalga diketahui, maka dapat diketahui koefisien determinasi (r^2) dari hubungan linier tersebut. Berdasarkan Tabel 4.14 di atas, koefisien determinasi antara intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan oksigen terlarut terhadap kerapatan sel adalah sebesar 13,03%, 57,76%, 35,76%, dan 9,06%. Artinya adalah bahwa setiap perubahan pada intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan oksigen terlarut memberikan pengaruh sebesar 13,03%, 57,76%, 35,76%, dan 9,06% terhadap pertumbuhan mikroalga yang dinyatakan dalam kerapatan sel. Hasil koefisien determinasi menunjukkan bahwa faktor lingkungan yang paling memberikan pengaruh terhadap pertumbuhan mikroalga adalah temperatur sebesar 57,76%.

Berdasarkan persamaan 2.2 mengenai proses oksidasi dan fotosintesis sudah dijelaskan bahwa terdapat hubungan antara suhu, cahaya matahari, pertumbuhan

mikroalga serta produk oksigen sebagai hasilnya. Produksi ini diikuti dengan peningkatan pH berdasarkan persamaan berikut (Moersidik, 1988):



Rumus mikroalga yang terbentuk adalah $\text{C}_{106}\text{H}_{181}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}$. Mikroalga baru yang terbentuk berasal dari N, P, dan C anorganik dalam bentuk CO_2 . Proses fotosintesis menggunakan CO_2 yang terlarut di dalam air dan tambahan emisi CO_2 dari gas buang PLTU Batubara. Penggunaan CO_2 terlarut menyebabkan kadar CO_2 yang terlarut di dalam air menjadi berkurang sehingga terjadi peningkatan pH. Sebaliknya, oksidasi mikroorganisme menggunakan O_2 untuk menghasilkan CO_2 . Selain itu adanya tambahan CO_2 dari gas buang PLTU Batubara menyebabkan penurunan kadar asam (pH turun). Oleh karena itu, produksi CO_2 yang mengikuti pemakaian CO_2 ditentukan dari sistem Kolam HROP yang bekerja.

Reaksi fotosintesis berhasil karena adanya reaksi cahaya yang dimotori oleh cahaya matahari yang mengubah energi cahaya menjadi energi kimia untuk digunakan dalam reaksi metabolis tersebut. Akan tetapi kurang dari 10% energi panas matahari yang dirubah menjadi energi kimia (Fontes, 1987 dalam Larsdotter, 2003), artinya sangat kecil sekali. Pernyataan Fontes (1987) sesuai dengan hasil percobaan kali ini, di mana korelasi antara intensitas cahaya matahari dengan kerapatan sel menghasilkan korelasi yang sifatnya lemah dan arahnya negatif, yaitu sebesar -0,361. Percobaan ini juga tidak membatasi pancaran sinar matahari, percobaan dibiarkan pada kondisi alam. Hasilnya selama percobaan menghasilkan intensitas cahaya matahari sebesar 10,62-33,54 klux. Kisaran nilai tersebut masih dalam batasan optimal pertumbuhan mikroalga yaitu sebesar 4-30 klux. Intensitas cahaya matahari yang lebih tinggi dari 30 klux tidak akan dimanfaatkan oleh mikroalga jenis *Chlorella* untuk melakukan fotosintesis, hal ini disebabkan sel-sel mikroalga tidak dapat memanfaatkan sinar matahari pada intensitas yang terlalu tinggi. Sehingga pada percobaan kali ini,

walaupun menghasilkan korelasi yang negatif antara intensitas cahaya matahari dengan kerapatan sel, tetapi selama masih dalam batas toleransi, maka penurunan intensitas cahaya matahari tetap dapat meningkatkan pertumbuhan mikroalga.

Berdasarkan Tabel 4.15 terlihat bahwa temperatur mempunyai korelasi negatif terhadap pertumbuhan mikroalga ($r = -0,760$). Persamaan 2.2 menunjukkan bahwa temperatur mempunyai peranan yang penting dalam proses fotosintesis. Awal kehidupan dari mikroalga dimulai dari proses fotosintesis. Pengaruhnya yang utama adalah pada laju reaksi metabolis pada zat-zat mineral yang bertransformasi menjadi zat organik. Jadi seharusnya peningkatan temperatur akan mempercepat proses fotosintesis. Pada percobaan kali ini dan dibuktikan dengan hasil statistik, ternyata terjadi sedikit penurunan suhu yang diikuti dengan peningkatan kerapatan sel setelah hari pengamatan ke-3 (tiga). Hal ini dapat disebabkan pengaruh pH air limbah dalam percobaan kali ini. Berdasarkan Tabel 4.14 di atas, terdapat korelasi positif antara faktor temperatur dan pH air limbah sebesar 0,528, yang berarti korelasinya bersifat sedang. Percobaan ini memvariasikan laju alir emisi CO₂ dari PLTU Batubara, jadi faktor lingkungan yang paling terpengaruh oleh adanya penambahan CO₂ adalah turunnya pH. Sehingga akibat penurunan pH yang terjadi setelah hari pengamatan ke-3 (tiga), menyebabkan temperatur air limbah pun sedikit menurun, yang menandai adanya peningkatan pertumbuhan mikroalga. Walaupun terjadi penurunan temperatur (25,5-28°C), tetapi temperatur pada percobaan ini masih dalam batas toleransi suhu optimal berlangsungnya reaksi biokimia dalam pengolahan limbah menggunakan kolam HROP, yaitu sebesar 15-30°C (Oswald, 1968).

Proses fotosintesis ditandai dengan adanya peningkatan pH. Hal ini disebabkan karena penggunaan CO₂ terlarut di dalam air limbah untuk proses fotosintesis. Berdasarkan Tabel 4.15 di atas terlihat bahwa terdapat korelasi yang negatif antara pH dengan kerapatan sel sebesar -0,598. Pada percobaan kali ini, pertumbuhan mikroalga ditandai oleh adanya penurunan pH (pH = 5,5-6,5) yang terjadi setelah hari pengamatan ke-3 (tiga). Kenyataan ini tidak sesuai dengan teori di atas. Kondisi asam pada media pertumbuhan mikroalga dapat disebabkan oleh faktor lingkungan berupa: kelarutan

CO₂ di dalam air limbah, kandungan SO₂ maupun NO₂ di dalam air limbah. Kandungan SO₂ (198,67 mg/m³) maupun NO₂ (314,07 mg/m³) yang berasal dari emisi gas buang terbukti masih dalam batas yang tidak mengganggu pertumbuhan mikroalga walaupun akan mempengaruhi pH media menjadi lebih asam. Tetapi jika melihat pH pada Bak 1 yang tidak dialiri oleh emisi gas CO₂, media pertumbuhannya juga memiliki pH asam antara 5,5-6,7 setelah 3 (tiga) hari masa pengamatan. Hal ini lah yang membuat peneliti mengambil kesimpulan bahwa kondisi pH asam pada media pertumbuhan keempat bak lebih banyak disebabkan oleh faktor lingkungan luar, yaitu kondisi udara di sekitar penelitian yang sangat berdebu karena abu terbang batubara. Seperti diketahui abu terbang batubara juga banyak mengandung unsur sulfur yang dapat mempengaruhi keasaman media pertumbuhan mikroalga. Walaupun pH cenderung menurun setelah hari pengamatan ke-3 (tiga) tetapi pertumbuhan mikroalga memperlihatkan peningkatan kerapatan sel. Hal ini membuktikan bahwa mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* dapat hidup dan berkembang biak pada kondisi asam (pH = 5,5-6,5).

Berdasarkan persamaan reaksi 2.2 di atas juga terlihat bahwa proses fotosintesis menghasilkan produk berupa oksigen. Sehingga semakin meningkat laju fotosintesis, maka oksigen yang dihasilkannya pun akan semakin banyak. Hal ini sesuai dengan hasil percobaan, di mana korelasi antara oksigen terlarut dengan kerapatan sel menghasilkan korelasi positif sebesar 0,301. Kekuatan korelasi yang lemah dapat disebabkan karena oksigen terlarut yang berada di dalam media pertumbuhan mikroalga bukan hanya berasal dari proses fotosintesis, tetapi juga dapat berasal dari proses pencampuran (*mixing*) dan pergerakan (*turbulence*) massa air. Namun percobaan kali ini berhasil membuktikan bahwa peningkatan pertumbuhan mikroalga ditandai dengan peningkatan kadar oksigen terlarut (3,4-5,5 mg/l) setelah hari pengamatan ke-3 (tiga).

Berdasarkan Gambar 4.1 - 4.5 dapat dilihat kembali hubungan antara intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan oksigen terlarut (DO) terhadap pertumbuhan mikroalga. Setelah 3 (tiga) hari masa pengamatan, pada keempat bak terlihat bahwa temperatur air

sedikit menurun ($T = 25,5-28^{\circ}\text{C}$), pH menurun ($\text{pH} = 5,5-6,5$), dan oksigen terlarut meningkat ($\text{DO} = 3,4-5,5 \text{ mg/l}$). Kenyataan di lapangan ini sesuai dengan hasil perhitungan Uji Korelasi Pearson berupa korelasi negatif antara intensitas cahaya matahari, temperatur, dan pH terhadap kerapatan sel yaitu sebesar $-0,361$; $-0,760$; dan $-0,598$. Sedangkan hasil uji korelasi antara oksigen terlarut terhadap kerapatan sel menghasilkan korelasi positif sebesar $0,301$.

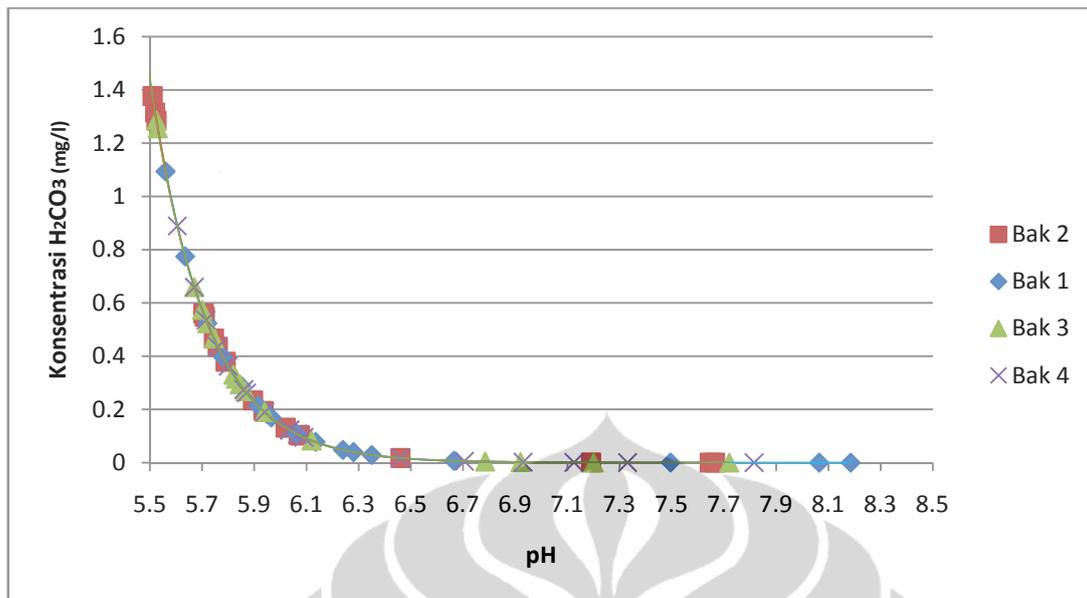
Penghitungan koefisien determinasi menghasilkan kesimpulan bahwa intensitas cahaya matahari memberikan pengaruh sebesar $13,03\%$, temperatur memberikan pengaruh sebesar $57,76\%$, pH memberikan pengaruh sebesar $35,76\%$, dan oksigen terlarut memberikan pengaruh sebesar $9,06\%$ terhadap pertumbuhan mikroalga. Dengan melihat faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga pada media limbah cair *septic tank* dapat disimpulkan bahwa proses fotosintesis baru dimulai pada hari ke-4 (empat) pengamatan.

4.6 Pengaruh Laju Alir Emisi CO_2 terhadap Pertumbuhan Mikroalga

Kondisi lingkungan yang paling terpengaruh oleh adanya penambahan CO_2 dengan cara memanfaatkan emisi gas buang dari PLTU Batubara adalah turunnya pH. Hal ini disebabkan gas CO_2 yang terlarut dalam air akan membentuk H_2CO_3 sehingga menghasilkan ion H^+ . Pada percobaan kali ini, laju alir emisi CO_2 divariasikan menjadi 4 variasi, yaitu:

- Bak 1, kontrol, tanpa tambahan emisi CO_2
- Bak 2, dengan laju alir emisi CO_2 sebesar 1 liter/menit
- Bak 3, dengan laju alir emisi CO_2 sebesar 2 liter/menit
- Bak 4, dengan laju alir emisi CO_2 sebesar 3 liter/menit

Dengan mengasumsikan nilai $K_{\text{H}} = 0,031 \text{ mol/l.atm}$ dan $K_1 = 4,3 \times 10^{-7} \text{ mol/l}$, maka berdasarkan persamaan 2.18 didapat nilai konsentrasi H_2CO_3 berdasarkan nilai pH selama 17 (tujuh belas) hari masa pengamatan seperti pada Gambar 4.6 di bawah ini.



Gambar 4.6 Konsentrasi H_2CO_3 Berdasarkan Nilai pH

Berdasarkan Gambar 4.6 terlihat bahwa hampir tidak ada perbedaan konsentrasi H_2CO_3 antara Bak 1, Bak 2, Bak 3, dan Bak 4. Hal ini menunjukkan bahwa emisi CO_2 dari PLTU Batubara dengan konsentrasi 13-15% volume, yang dimasukkan ke dalam Kolam HROP dengan variasi laju alir, setelah gas CO_2 tersebut bereaksi dengan air ternyata menghasilkan konsentrasi H_2CO_3 yang hampir sama untuk semua bak. Begitu pula Bak 1 yang tidak dialiri emisi CO_2 , konsentrasi H_2CO_3 di dalam Kolam HROP-nya pun hampir sama dengan bak lainnya yang dialiri emisi CO_2 . Hal ini dimungkinkan karena konsentrasi CO_2 dalam air akan selalu mencari kesetimbangan dengan konsentrasi CO_2 dalam atmosfer sesuai dengan Hukum Henry.

Pola yang ditunjukkan oleh grafik menunjukkan pola eksponensial di mana semakin tinggi nilai pH, maka konsentrasi H_2CO_3 -nya semakin kecil. Pada 3 (tiga) hari pertama masa pengamatan, pH keempat bak berkisar antara 7-8, konsentrasi H_2CO_3 yang ditunjukkan oleh keempat bak adalah berkisar antara $6,15 \times 10^{-6} - 1,99 \times 10^{-3}$ mg/l. Sedangkan setelah hari pengamatan ke-3 (tiga), pH keempat bak mengalami sedikit penurunan (pH = 5,5-6,5), konsentrasi H_2CO_3 yang ditunjukkan berkisar antara 0,00674 – 1,99 mg/l. Hal ini berarti terjadi peningkatan CO_2 terlarut di dalam media pertumbuhan mikroalga setelah 3 (tiga) hari masa pengamatan yang ditunjukkan pula

dengan peningkatan pertumbuhan mikroalga. Karbondioksida yang terlarut inilah yang digunakan oleh mikroalga untuk melakukan proses fotosintesis.

Pada percobaan ini, emisi CO₂ yang berasal dari PLTU Batubara diinjeksikan ke dalam media pertumbuhan mikroalga dengan cara difusi. Cara ini dimaksudkan untuk memperluas permukaan kontak antara emisi gas dan air limbah agar gas CO₂ dapat terabsorpsi dengan baik. Suplai CO₂ adalah salah satu proses yang sulit di dalam kultivasi mikroalga. Karena gas CO₂ membutuhkan waktu untuk benar-benar terabsorpsi dengan baik di dalam media pertumbuhan mikroalga. Jika waktu tinggal di dalam kolam kurang, maka gas CO₂ akan hilang ke atmosfer. Selain dari pada itu, suplai CO₂ dapat mengakibatkan pH media pertumbuhan mikroalga menjadi lebih asam (pH turun), di mana pH rendah dapat merusak sel-sel mikroalga. Sehingga pengaturan laju alir menjadi hal yang sangat penting dalam proses kultivasi mikroalga dengan suplai CO₂ ini.

Dengan melihat hasil perhitungan konsentrasi H₂CO₃ di atas, maka perbedaan hasil pertumbuhan mikroalga untuk masing-masing variasi lebih banyak disebabkan oleh faktor-faktor lingkungan yang lain. Faktor-faktor lingkungan seperti intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan oksigen terlarut, yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga pada setiap bak juga hanya berbeda sedikit antara variasi laju alir emisi CO₂ yang satu dengan dengan variasi laju alir emisi CO₂ lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa pertumbuhan mikroalga lebih banyak dipengaruhi oleh kecepatan proses adaptasi dengan limbah cair *septic tank* dan kecepatan mikroalga dalam mengambil nutrisi dari limbah cair *septic tank*. Untuk lebih meyakinkan hasil percobaan, maka dilakukan uji statistik untuk mengetahui pengaruh laju alir emisi CO₂ terhadap pertumbuhan mikroalga pada masing-masing variasi laju alir.

Uji Korelasi Pearson antara Laju Alir Emisi CO₂ yang dinyatakan dalam konsentrasi H₂CO₃ terhadap pertumbuhan mikroalga dapat dilihat pada Tabel 4.16 di bawah ini

Tabel 4.16 Uji Korelasi Pearson Antara Konsentrasi H_2CO_3 pada Masing-Masing Variasi Laju Alir Emisi CO_2 dengan Pertumbuhan Mikroalga

	Kerapatan Sel		
	α	r	r^2
[H_2CO_3] Bak 1	0,003*	0,652	42,51%
[H_2CO_3] Bak 2	0,012*	0,579	33,52%
[H_2CO_3] Bak 3	0,006*	0,621	38,56%
[H_2CO_3] Bak 4	0,001*	0,726	52,71%

Keterangan:

- * = signifikan atau ada korelasi antara 2 variabel uji
- α = signifikansi
- r = korelasi
- r^2 = koefisien determinasi

Berdasarkan Tabel 4.16 di atas terlihat bahwa nilai α untuk masing-masing variasi laju alir menunjukkan adanya signifikansi ($\alpha < 0,05$). Kekuatan korelasi antara konsentrasi H_2CO_3 pada masing-masing variasi juga menunjukkan arah korelasi yang positif. Nilai korelasi pada Bak 1, Bak 2, Bak 3, dan Bak 4 adalah 0,652; 0,579; 0,621; dan 0,726. Sifat korelasi menunjukkan hubungan yang kuat antara konsentrasi H_2CO_3 dengan pertumbuhan mikroalga, kecuali Bak 2 yang menunjukkan sifat korelasi yang sedang. Koefisien determinasi yang merupakan hasil kuadrat dari nilai korelasi menghasilkan nilai untuk Bak 1, Bak 2, Bak 3, dan Bak 4 yaitu 42,51%; 33,52%; 38,56%; dan 52,71%. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi H_2CO_3 pada Bak 1, Bak 2, Bak 3, dan Bak 4 memberikan pengaruh sebesar 42,51%; 33,52%; 38,56%; dan 52,71% terhadap pertumbuhan mikroalga.

Karbondioksida yang terlarut dalam air dapat dilihat pada persamaan 2.3 dan 2.4 di bawah ini.



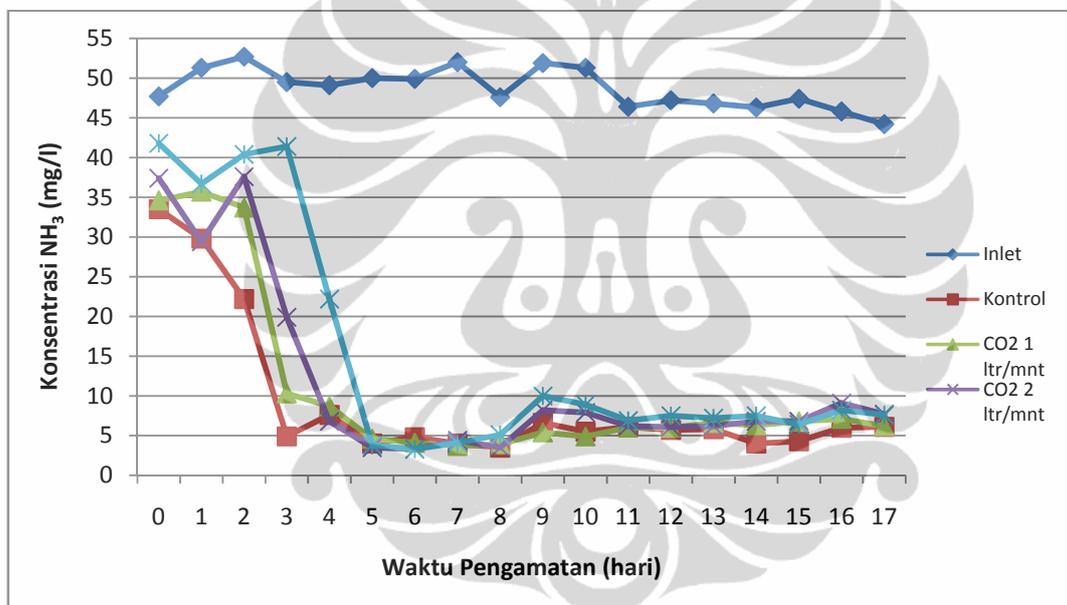
Karbon dioksida yang terlarut dalam air akan selalu membentuk kesetimbangan dengan karbon dioksida yang berada di atmosfer. Sumber karbon yang disukai mikroalga adalah dalam bentuk CO_2 . Kelarutan CO_2 di dalam air tergantung pada pH media. Pada percobaan kali ini pH media pertumbuhan mikroalga berkisar antara 5,5-6,5, berarti karbon dioksida yang berada di dalam perairan dapat berbentuk CO_2 bebas, ion H_2CO_3 , dan ion HCO_3^- . Konsentrasi ion karbon yang dapat dihitung pada percobaan ini adalah ion karbonat (H_2CO_3). Menurut persamaan reaksi 2.3, ion H_2CO_3 sebanding dengan banyaknya ion CO_2 . Proses fotosintesis akan mengambil CO_2 yang terlarut di dalam air limbah, sehingga media pertumbuhan mikroalga akan kekurangan CO_2 terlarut. Teori ini sesuai dengan hasil percobaan yang ditunjukkan oleh nilai statistika, di mana nilai koefisien determinasi Bak 2 adalah paling kecil ($r^2 = 33,52\%$). Hal ini menunjukkan bahwa CO_2 terlarut yang terdapat di dalam Bak 2 lebih banyak yang digunakan oleh mikroalga untuk melakukan fotosintesis, sehingga Bak 2 lebih kekurangan CO_2 terlarut. Hal ini sesuai dengan hasil percobaan di mana Bak 2, dengan laju alir emisi CO_2 sebesar 1 liter/menit menghasilkan pertumbuhan mikroalga tertinggi dengan nilai kerapatan sel pada akhir masa pengamatan sebesar 1.120.000 sel/ml.

4.7 Pengaruh NH_3 Terhadap Pertumbuhan Mikroalga

4.7.1 Konsentrasi NH_3 selama masa pengamatan

Sumber nitrogen yang terdapat di dalam limbah cair *septic tank* digunakan oleh mikroalga sebagai sumber nutrisi yang dibutuhkan untuk tumbuh dan berkembang biak. Meskipun ditemukan dalam jumlah yang melimpah di atmosfer (78%), akan tetapi nitrogen tidak dapat dimanfaatkan langsung oleh makhluk hidup termasuk mikroalga (Dugan, 1972 dalam Effendi, 2003). Nitrogen harus mengalami fiksasi terlebih dahulu menjadi NH_3 , NH_4^+ , dan NO_3^- . Sumber nitrogen yang lebih disukai mikroalga berada dalam bentuk amonium (NH_4^+) dan nitrat (NO_3^-). Tetapi nitrat tidak akan dikonsumsi oleh mikroalga sampai konsentrasi amonia dalam limbah cair habis (Yun, *et al*, 1997). Karena itulah mikroalga akan mengkonsumsi amonia lebih cepat dibandingkan konsumsi mikroalga terhadap nitrat.

Kandungan amonia yang terkandung di dalam limbah cair *septic tank* yang digunakan adalah sebesar 47,7 mg/l (lihat Tabel 4.8). Hasil penelitian yang dilakukan oleh A. Abeliovich dan Y. Azof (1975) menunjukkan bahwa konsentrasi $\text{NH}_3 > 2 \text{ mM}$ ($> 34 \text{ mg/l}$) akan mengganggu laju fotosintesis mikroalga di dalam kolam HROP. Hal inilah yang menjadi alasan kenapa konsentrasi NH_3 sangat penting untuk selalu diamati. Karena selain sebagai sumber nutrisi, konsentrasi NH_3 juga dapat menjadi faktor pembatas pertumbuhan mikroalga. Amonia yang terukur di perairan adalah amonia total (NH_3 dan NH_4^+). Untuk mengetahui proses *feeding* amonia oleh mikroalga, maka pengukuran konsentrasi amonia dilakukan setiap hari pada setiap bak. Hasil pengamatan terhadap konsentrasi amonia dapat dilihat pada Gambar 4.7 di bawah ini.



Gambar 4.7 Konsentrasi NH_3 selama Masa Pengamatan

Berdasarkan Gambar 4.7 terlihat bahwa konsentrasi NH_3 pada inlet (air limbah) relatif konstan pada konsentrasi antara 44-52 mg/l. Konsentrasi yang relatif konstan ini disebabkan karena pH limbah tidak banyak mengalami perubahan (pH antara 7,5-7,8) selama masa pengamatan. Seperti diketahui bahwa persentase NH_3 bebas akan meningkat dengan meningkatnya pH. Amonia di perairan juga dapat menghilang melalui proses volatilisasi karena tekanan parsial amonia dalam larutan meningkat dengan semakin meningkatnya pH. Hilangnya amonia ke atmosfer juga dapat

meningkat dengan meningkatnya kecepatan angin dan suhu (Effendi, 2003). Dari hasil pengamatan terhadap temperatur limbah selama percobaan juga menunjukkan temperatur limbah relatif konstan pada 27-32°C.

Pola penurunan konsentrasi NH_3 pada keempat bak menunjukkan pola yang sama seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.6. Pada awal percobaan (H-0) konsentrasi NH_3 untuk Bak 1, Bak 2, Bak 3, dan Bak 4 adalah 33,5 mg/l, 34,6 mg/l, 37,4 mg/l, dan 41,8 mg/l. Pada hari ke-0 (nol) hingga hari ke-3 (tiga) pengamatan konsentrasi NH_3 belum menunjukkan penurunan yang signifikan. Hal ini selaras dengan kinerja yang ditunjukkan oleh pertumbuhan mikroalga melalui kerapatan selnya yang belum menunjukkan peningkatan yang signifikan karena masih dalam masa adaptasi. Proses pengambilan nutrisi NH_3 dari limbah cair oleh mikroalga belum optimal pada 4 (empat) hari pertama percobaan. Setelah hari pengamatan ke-3 (tiga), barulah terjadi penurunan konsentrasi NH_3 yang signifikan untuk keempat bak. Hal ini berarti proses *feeding* telah berlangsung dengan baik untuk pertumbuhan mikroalga.

Pada Bak 1, konsentrasi NH_3 minimum terjadi pada hari ke-8 (delapan) pengamatan yaitu sebesar 3,5 mg/l. Pada hari ke-8 (delapan) pengamatan ini kerapatan sel dari mikroalga adalah sebesar 650.000 sel/ml, pH 6,06, temperatur air 28,1°C, dan kelarutan oksigen 4,43 mg/l. Pada pH sebesar 6,06, NH_3 total berada dalam bentuk NH_4^+ yang mudah terionisasi. Setelah hari ke-8 (delapan), konsentrasi NH_3 mengalami sedikit peningkatan, hingga pada akhir masa percobaan diperoleh hasil konsentrasi NH_3 sebesar 6,10 mg/l.

Pada Bak 2, konsentrasi minimum terjadi pada hari ke-7 (tujuh) pengamatan yaitu sebesar 3,7 mg/l. Pada kondisi konsentrasi NH_3 minimum ini kerapatan sel dari mikroalga adalah sebesar 715.000 sel/ml, pH 6,07, temperatur air 27,8°C, dan kelarutan oksigen 4,78 mg/l. Pada pH sebesar 6,07, NH_3 total juga berada dalam bentuk NH_4^+ yang mudah terionisasi. Konsentrasi NH_3 mengalami sedikit peningkatan setelah hari ke-7 (tujuh), hingga pada akhir masa percobaan diperoleh konsentrasi NH_3 sebesar 6,20 mg/l.

Universitas Indonesia

Pada Bak 3, konsentrasi NH_3 minimum terjadi pada hari ke-6 (enam) pengamatan yaitu sebesar 3,3 mg/l. Pada kondisi konsentrasi NH_3 minimum ini kerapatan sel dari mikroalga adalah sebesar 537.500 sel/ml, pH 5,70, temperatur air 26,6°C, dan kelarutan oksigen 4,96 mg/l. Pada pH sebesar 5,70, NH_3 total berada dalam bentuk NH_4^+ yang mudah terionisasi. Setelah hari ke-6 (enam), konsentrasi NH_3 mengalami sedikit peningkatan, hingga pada akhir masa percobaan diperoleh hasil konsentrasi NH_3 sebesar 7,70 mg/l.

Pada Bak 4, konsentrasi NH_3 minimum terjadi pada hari ke-6 (enam) pengamatan yaitu sebesar 3,3 mg/l. Pada kondisi konsentrasi NH_3 minimum ini kerapatan sel dari mikroalga adalah sebesar 556.250 sel/ml, pH 6,04, temperatur air 26,3°C, dan kelarutan oksigen 4,43 mg/l. Pada pH sebesar 6,04, NH_3 total berada dalam bentuk NH_4^+ yang mudah terionisasi. Konsentrasi NH_3 mengalami sedikit peningkatan setelah hari ke-6 (enam), hingga pada akhir masa percobaan diperoleh konsentrasi NH_3 sebesar 7,60 mg/l.

Berdasarkan penjelasan di atas terlihat bahwa pada konsentrasi NH_3 minimum, kerapatan sel tertinggi terdapat pada Bak 2 yaitu sebesar 715.000 sel/ml. Hal ini menunjukkan bahwa proses *feeding* terjadi paling cepat pada Bak 2. Penurunan nitrogen pada Bak 3 dan Bak 4 menghasilkan konsentrasi yang lebih kecil (3,3 mg/l) dibandingkan dengan Bak 1 (3,5 mg/l). Namun kinerja yang ditunjukkan oleh mikroalga pada Bak 1 menghasilkan kerapatan sel yang lebih baik dibandingkan Bak 3 dan Bak 4. Penurunan NH_3 bukan hanya disebabkan oleh proses *feeding* oleh mikroalga, tetapi dapat juga disebabkan oleh proses biologis NH_3 yaitu oksidasi NH_3 menjadi nitrit maupun nitrat.

Penurunan nilai konsentrasi NH_3 bukan hanya disebabkan oleh berlangsungnya proses biologis, tetapi juga karena proses pencampuran secara terus menerus, absorpsi, dan sedimentasi. Proses sedimentasi terjadi karena NH_3 mudah terserap ke dalam bahan-bahan tersuspensi dan koloid. Amonia juga mudah menghilang ke atmosfer melalui proses volatilisasi karena meningkatnya pH. Tetapi proses volatilisasi dapat diabaikan

karena pH air dalam keempat bak ($\text{pH} = 5,5-8,0$) tidak mengalami peningkatan yang berarti. Selain itu, hilangnya amonia ke atmosfer juga dapat meningkat dengan meningkatnya kecepatan angin dan suhu. Tetapi alasan ini juga dapat diabaikan karena lingkungan sekitar penelitian tidak pernah mengalami peningkatan kecepatan angin yang berarti dan temperatur air pada keempat bak pun selalu berada pada kisaran $26-28^{\circ}\text{C}$. Dari hasil pemantauan dan pengukuran udara ambien dan kebisingan yang dilakukan oleh Balai Hiperkes & Keselamatan Kerja Propinsi Sumatera Selatan pada Bulan Desember 2010 menunjukkan bahwa kecepatan angin sekitar tempat penelitian berkisar antara 0,5-2,8 (Lampiran 3).

Kondisi di mana konsentrasi NH_3 sedikit mengalami kenaikan setelah mencapai konsentrasi NH_3 minimum dapat disebabkan oleh karena kerapatan sel mikroalga sudah cukup padat sehingga pertumbuhan mikroalga juga semakin lambat. Akibatnya, pemakaian nutrisi berupa NH_3 dari limbah cair agak sedikit berkurang. Pertumbuhan mikroalga secara kontinu ini pada akhirnya akan mengalami masa stationer, yaitu masa di mana penambahan nutrisi dari limbah cair tidak lagi akan membuat mikroalga semakin padat dan bertambah banyak. Untuk menjaga produktivitas mikroalga, maka diperlukan pemanenan pada waktu kerapatan sel mikroalga mencapai puncak pertumbuhan.

4.7.2 Efisiensi penurunan konsentrasi NH_3

Pada akhir masa pengamatan (H-17) efisiensi penurunan NH_3 pada keempat bak dapat dilihat pada Tabel 4.17 di bawah ini.

Tabel 4.17 Efisiensi Penurunan NH_3 pada Keempat Bak

	Kontrol	Laju Alir CO_2 1 liter/menit	Laju Alir CO_2 2 liter/menit	Laju Alir CO_2 3 liter/menit
Konsentrasi NH_3 awal (H-0)	33,5	34,6	37,4	41,8
Konsentrasi NH_3 maksimum	33,5	35,7	37,4	41,8
Konsentrasi NH_3 minimum	3,5	3,7	3,3	3,3
Konsentrasi NH_3 Akhir (H-17)	6.1	6.2	7.7	7.6
% Penurunan Konsentrasi NH_3	81.79	82.08	79.41	81.82

Universitas Indonesia

Berdasarkan Tabel 4.17 di atas terlihat bahwa efisiensi penurunan NH_3 pada akhir masa pengamatan (H-17) yang terbaik dicapai oleh Bak 2 dengan efisiensi penurunan sebesar 82,08%. Amonia yang terdapat di dalam limbah cair digunakan oleh Bak 2 untuk meningkatkan pertumbuhan selnya. Hal ini sesuai dengan kerapatan sel yang ditunjukkan oleh Bak 2 pada akhir pengamatan, di mana Bak 2 menunjukkan kinerja terbaik dengan kerapatan sel yang dicapai sebesar 1.120.000 sel/ml. Proses fotosintesis yang berlangsung pada mikroalga di dalam Bak 2 berhasil mereduksi amonia menjadi biomassa mikroalga. Jadi dapat disimpulkan bahwa proses *feeding* terjadi paling cepat pada Bak 2. Penelitian yang dilakukan oleh Zulkifli (1995) terhadap limbah cair domestik berhasil mereduksi $\text{NH}_3\text{-N}$ sebesar 95,1%. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Sreesai dan Pakpain (2007) dan Fitri (2010) terhadap limbah *septic tank* berhasil mereduksi kandungan nitrogen sebesar 62% dan 65,9%. Efisiensi penurunan NH_3 pada percobaan ini tidak lebih baik daripada penelitian yang dilakukan oleh Zulkifli (1995), namun lebih baik daripada penelitian yang dilakukan Sreesai dan Pakpain (2007), juga Fitri (2010).

4.7.3 Hubungan antara konsentrasi NH_3 dengan pertumbuhan mikroalga

Untuk mengetahui hubungan antara konsentrasi NH_3 selama percobaan terhadap pertumbuhan mikroalga, maka dilakukan Uji Korelasi Pearson terhadap kedua variabel tersebut. Hasil dari Uji Korelasi Pearson dapat dilihat pada Tabel 4.18 di bawah ini.

Tabel 4.18 Uji Korelasi Pearson Antara konsentrasi NH_3 dengan Pertumbuhan Mikroalga

	Kerapatan Sel		
	α	r	r^2
Konsentrasi NH_3	0.033*	- 0.505	25.50%

Keterangan:

* = signifikan atau ada korelasi antara 2 variabel uji

α = signifikansi

r = korelasi

r^2 = koefisien determinasi

Berdasarkan Tabel 4.18 di atas terlihat bahwa terdapat signifikansi antara variabel konsentrasi NH_3 dan kerapatan sel ($\alpha < 0,05$). Kekuatan korelasinya bersifat sedang dengan nilai sebesar -0,505 dan arah korelasi negatif. Hal ini berarti penurunan konsentrasi NH_3 akan menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga ataupun sebaliknya. Hasil statistik ini mendukung hasil percobaan di mana penurunan konsentrasi NH_3 menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga. Hasil koefisien determinasi sebesar 25,50% menjelaskan bahwa perubahan konsentrasi NH_3 sebesar 25,50% akan memberikan pengaruh terhadap peningkatan pertumbuhan mikroalga.

Berdasarkan persamaan 2.2 terlihat bahwa sumber nitrogen dalam bentuk NH_4^+ digunakan oleh mikroalga untuk pembentukan mikroalga baru ($\text{C}_{106}\text{H}_{181}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}$) dalam proses fotosintesis. Sehingga penurunan konsentrasi NH_3 ini disebabkan karena NH_3 digunakan oleh mikroalga sebagai sumber nutrisi untuk tumbuh dan berkembang biak.

4.8 Efisiensi Penurunan BOD oleh Mikroalga

Pengolahan limbah dengan menggunakan Kolam Oksidasi Arus Deras (HROP) merupakan pengolahan limbah secara aerob yang mencapai efisiensi penurunan limbah karena terjadi hubungan simbiosis antara mikroalga dan bakteri yang terdapat di dalam limbah cair. Hasil fotosintesis mikroalga berupa oksigen digunakan oleh mikroorganisme untuk mendegradasi materi-materi organik yang terdapat di dalam limbah cair *septic tank*. Parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas limbah cair adalah dengan menggunakan parameter BOD. Efisiensi penurunan parameter BOD dapat dilihat pada Tabel 4.19 di bawah ini.

Tabel 4.19 Efisiensi Penurunan Beban Limbah Cair *Septic Tank*

	Baku Mutu *	Kontrol	Laju Alir CO ₂ 1 liter/menit	Laju Alir CO ₂ 2 liter/menit	Laju Alir CO ₂ 3 liter/menit
Temperatur pada H-0	-	28,75	28,50	29,00	29,10
Temperatur pada H-17	-	26,15	26,10	26,30	26,70
DO pada H-0 (mg/l)	-	5,08	4,29	4,61	3,12
DO pada H-17 (mg/l)	-	5,36	4,40	4,89	5,03
BOD Awal Limbah (mg/l)	50	269.64	269.64	269.64	269.64
BOD Pengolahan (mg/l)	50	221.766	142.266	211.366	236.966
Efisiensi Penurunan BOD	50	17.755	47.239	21.612	12.118

Keterangan:

- * Berdasarkan Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 18 Tahun 2005 tentang Baku Mutu Limbah Cair (BMLC) bagi Kegiatan Industri, Hotel, Rumah Sakit, Domestik, dan Pertambangan Batubara

Berdasarkan Tabel 4.19 di atas terlihat bahwa nilai BOD dari hasil pengolahan limbah pada akhir pengamatan (H-17), masih menunjukkan nilai yang tinggi dan berada di atas baku mutu limbah cair. Hal ini dapat disebabkan karena air hasil olahan masih mengandung banyak mikroalga, sehingga nilai parameter yang terukur pun sangat dipengaruhi oleh keberadaan mikroalga. Nilai BOD perairan dipengaruhi oleh suhu, densitas plankton, keberadaan mikroba, serta jenis dan kandungan bahan organik (Effendi, 2003). Keberadaan mikroalga pada waktu pengukuran BOD sangat sulit untuk dipisahkan. Temperatur pada awal pengamatan (H-0) sedikit lebih tinggi daripada pada akhir pengamatan (H-17), sedangkan kadar oksigen terlarut pada H-0 lebih rendah daripada H-17. Hal ini sesuai dengan penjelasan sebelumnya yang mengatakan bahwa variabel temperatur mempunyai korelasi negatif terhadap kadar oksigen terlarut sebesar -0,669. Sehingga penurunan temperatur tersebut menyebabkan peningkatan kadar oksigen terlarut. Peningkatan kadar oksigen terlarut menandakan terjadinya proses fotosintesis. Oksigen yang dihasilkan oleh proses fotosintesis ini yang akan digunakan oleh mikroorganisme untuk mendekomposisi materi organik yang ada di dalam limbah cair. Sehingga terjadi sinergisme antara mikroalga dan mikroorganisme di dalam limbah cair.

Aktivitas mikroorganisme juga memerlukan suhu optimum untuk melakukan proses dekomposisi, biasanya terjadi pada kondisi udara yang hangat. Kecepatan dekomposisi meningkat pada kisaran suhu 5°C- 35°C. Pada kisaran suhu ini, setiap peningkatan suhu sebesar 10°C akan meningkatkan proses dekomposisi dan konsumsi oksigen menjadi dua kali lipat, sehingga menurunkan kandungan oksigen terlarut di perairan (Effendi, 2003). Hal ini sesuai juga dengan pernyataan Gloyna (1966) dalam Moersidik (1988), bahwa ketika suhu berada di bawah 5°C, aktivitas biologis aerobis menjadi lambat dan ketika suhu di atas 35°C, proses fotosintesis tertahan. Hal ini menyebabkan penurunan kelarutan oksigen (DO turun). Pada percobaan kali ini media pertumbuhan mikroalga berada pada suhu optimum yaitu sebesar 25,5-28°C. Sehingga mikroorganisme yang terdapat di dalam air limbah dapat melakukan proses dekomposisi dengan baik.

Berdasarkan hasil pengamatan terlihat bahwa Bak 2 (laju alir CO₂ 1 liter/menit) dengan kerapatan sel tertinggi (1.120.000 sel/ml) mempunyai nilai BOD yang paling kecil pada akhir pengamatan. Penurunan nilai BOD ini disebabkan nutrisi pada limbah cair domestik terkonversi menjadi sel-sel mikroalga baru. Hal ini juga menandakan bahwa laju fotosintesis pada Bak 2 lebih tinggi daripada bak lainnya. Terdapat hubungan antara laju fotosintesis dengan kadar oksigen terlarut. Semakin tinggi laju fotosintesis, maka oksigen yang dihasilkan semakin banyak. Dari hasil pemeriksaan kadar oksigen terlarut di dalam bak, menunjukkan bahwa pada akhir masa pengamatan (H-17) kadar oksigen terlarut Bak 2 sebesar 4,40 mg/l, lebih kecil dibandingkan Bak 1 (5,37 mg/l), Bak 3 (4,89 mg/l), dan Bak 4 (5,03 mg/l). Hal ini menandakan bahwa mikroorganisme di dalam Bak 2 lebih banyak menggunakan oksigen terlarut dari dalam bak sehingga kadar oksigennya di dalam media pertumbuhannya menjadi paling rendah. Oksigen terlarut ini digunakan oleh mikroorganisme untuk mendegradasi materi organik dalam limbah cairnya sehingga nilai BOD pada Bak 2 menjadi paling kecil pada akhir pengamatan. Semakin meningkat kemampuan mikroorganisme dalam mendegradasi cemaran limbah, maka semakin banyak pula CO₂ yang dihasilkan oleh mikroorganisme yang akan digunakan oleh mikroalga untuk berfotosintesis. Sebaliknya, efisiensi penurunan BOD untuk Bak 2 menjadi paling tinggi yaitu sebesar

47,239%. Hal ini menunjukkan bahwa kolam di mana mikroalga tumbuh paling tinggi berdampak positif terhadap penurunan beban limbah cair *septic tank*.

Kinerja terhadap kualitas limbah cair yang ditunjukkan oleh Bak 2 juga menjelaskan bahwa terjadi sinergisme antara mikroorganisme dan mikroalga selama proses degradasi materi organik. Hasil fotosintesis dari mikroalga berupa oksigen digunakan oleh mikroorganisme di dalam Bak 2 untuk mendegradasi materi organik di dalam limbah cair *septic tank*. Sedangkan hasil respirasi dari mikroorganisme berupa karbondioksida digunakan oleh mikroalga untuk melakukan fotosintesis, begitu seterusnya. Sehingga gas CO₂ yang diperlukan untuk membantu proses fotosintesis didapat bukan hanya dari emisi gas buang dari PLTU Batubara tetapi juga dari hasil respirasi mikroorganisme yang terdapat di dalam limbah cair *septic tank*.

Percobaan yang dilakukan oleh Londa (2003) selama 1 bulan terhadap limbah cair industri rumah potong hewan menghasilkan efisiensi penurunan BOD sebesar 84% pada kolam dengan kedalaman 70 cm dan kecepatan *paddle wheel* 20 cm/detik. Sedangkan percobaan yang dilakukan oleh Zulkifli (1995) untuk menurunkan cemaran limbah cair domestik berhasil menurunkan BOD sebesar 99,6% dengan kolam berukuran 2x1x0,30 m³ dioperasikan secara kontinu dengan debit 52 ml/menit secara konstan dengan lamanya waktu pengamatan adalah 3 bulan. Efisiensi penurunan BOD yang dihasilkan dari percobaan ini belum menunjukkan hasil yang menggembirakan (efisiensi penurunan BOD = 47,239%). Hal ini dapat disebabkan karena kondisi lapangan yang berada di lokasi PLTU sangat berdebu akibat abu terbang batubara.

Kondisi berdebu ini sangat mempengaruhi kekeruhan kolam percobaan akibat banyaknya abu terbang batubara yang masuk ke dalam kolam percobaan. Selain itu, kondisi tersebut juga mengakibatkan pH air di dalam bak menjadi asam (pH = 5,5-6,5). Walaupun kedalaman kolam sudah rendah (43 cm), tetapi kondisi perairan yang keruh dapat menghalangi masuknya sinar matahari untuk membantu proses fotosintesis. Hal ini berarti dengan kerapatan sel mikroalga sebesar 1.120.000 sel/ml (Bak 2) belum dapat menurunkan BOD hingga di bawah baku mutu yang dipersyaratkan hingga akhir masa pengamatan (17 hari). Diperlukan waktu yang lebih

lama lagi untuk dapat menurunkan cemaran limbah cair *septic tank* pada kondisi lapangan yang sangat berdebu. Warna yang ditunjukkan oleh kolam pun belum menunjukkan dominasi warna hijau karena kekeruhan yang tinggi. Ini berarti pada 17 (tujuh belas) hari masa pengamatan, biomassa mikroalga belum dapat dipanen.

Walaupun belum menghasilkan efisiensi penurunan BOD yang tinggi ($> 80\%$), namun percobaan ini berhasil menunjukkan bahwa kolam dengan pertumbuhan mikroalga tertinggi (kerapatan sel = 1.120.000 sel/ml) berhasil menurunkan cemaran limbah yang terbaik (efisiensi penurunan BOD = 47,239%). Hal ini ditunjukkan oleh kinerja Bak 2, yaitu bak yang dialiri tambahan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dengan laju alir sebesar 1 liter/menit.

4.9 Penerapan Hasil Percobaan pada Skala Lapangan

Pemanfaatan emisi CO₂ dari PLTU Batubara untuk pengolahan limbah cair domestik dengan menggunakan kolam HROP tidak akan memberikan manfaat bagi masyarakat jika berhenti sampai dengan skala pilot saja. Diperlukan perhitungan skala lapangan agar masyarakat benar-benar dapat merasakan manfaatnya. Karena penelitian ini memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara, maka penerapannya pada skala lapangan harus memperhatikan jarak antara lokasi pengolahan limbah cair domestik dengan PLTU Batubara. Berdasarkan Peraturan Pemerintah nomor 26 Tahun 2008 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Nasional, maka daratan sepanjang tepian sungai besar tidak bertanggung di luar kawasan permukiman harus memiliki lebar paling sedikit 100 (seratus) m dari tepi sungai (pasal 56 ayat (2)b.). Peneliti berencana menerapkan hasil percobaan ini pada Kompleks Perumahan PLN yang berada pada jarak 1,5 km dari PLTU Bukit Asam. Sehingga rencana penerapan akan berada pada jarak yang aman sesuai peraturan dan berada pada jarak yang paling efisien di antara PLTU Batubara dan Kompleks Perumahan PLN.

Dalam pembuatan skala lapangan, maka faktor ekonomis harus menjadi pertimbangan agar biaya operasional dan biaya perawatannya menjadi lebih murah. Kolam kultivasi terbuka (*open pond*) relatif lebih ekonomis, mudah untuk dibersihkan, dan dapat

memproduksi biomassa mikroalga yang baik. Faktor lingkungan menjadi hal yang harus diperhatikan dalam mendesain suatu kolam kultivasi terbuka. Syarat-syarat lingkungan yang harus dipenuhi tergantung jenis mikroalga yang akan digunakan. Mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* harus memenuhi syarat-syarat lingkungan antara lain, intensitas cahaya matahari yang cukup (4-30 klux), temperatur yang optimum (25-30°C), pH optimum (6,5-7,5), dan suplai oksigen secara terus-menerus. Dua parameter penting dalam menentukan dimensi kolam terkait dengan efisiensi kolam HROP adalah kedalaman dan laju alir. Pencampuran yang konsisten pada kolam merupakan parameter penting untuk menghasilkan biomassa mikroalga yang tinggi (Yan li *et al*, 2006). Proses pencampuran dimaksudkan agar mikroalga, oksigen dan nutrisinya dapat tercampur secara merata (homogen). Selain itu pencampuran juga dapat menjaga agar mikroalga tidak mengendap pada dasar kolam.

Kultivasi mikroalga yang diintegrasikan dengan pengolahan limbah cair domestik juga harus memperhatikan beban limbah. Kondisi nutrien yang dinyatakan dengan konsentrasi BOD/COD dan konsentrasi Nitrogen maupun Fosfor harus selalu diperhatikan agar tidak menjadi toksik bagi pertumbuhan mikroalga. Hasil penelitian pada skala pilot membuktikan bahwa mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* dapat hidup pada media limbah cair domestik yang akan digunakan. Selain itu mikroalga jenis tersebut juga tahan terhadap kondisi lingkungan yang asam.

4.9.1 Dimensi Kolam HROP pada skala lapangan

Dalam mendesain suatu Kolam HROP sebagai media pertumbuhan mikroalga, maka diasumsikan banyaknya air limbah domestik adalah 200 liter/orang/hari (Metcalf & Eddy, 1991). Peneliti berencana untuk menerapkan pengolahan limbah cair domestik ini secara komunal di dalam Kompleks Perumahan PLN yang memiliki Kepala Keluarga sebanyak 350 KK. Jika setiap kepala keluarga rata-rata memiliki anggota keluarga inti sebanyak 4 orang, maka jumlah orang yang harus dilayani adalah sebanyak 1400 orang. Jika waktu tinggal limbah diasumsikan selama 4 hari (Metcalf & Eddy, 1991), maka volume kolam HROP (V) adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Volume Kolam HROP} &= 200 \text{ l/orang/hari} \times 1400 \text{ orang} \times 4 \text{ hari} \\
 &= 1.120.000 \text{ liter} \\
 &= 1.120 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Jika kedalaman kolam (d) yang digunakan adalah 40 cm (berdasarkan hasil percobaan), maka luas Kolam HROP (A) yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Luas Kolam HROP} &= \frac{V}{d} \\
 \text{Luas Kolam HROP} &= \frac{1.120 \text{ m}^3}{0,4 \text{ m}} \\
 &= 2800 \text{ m}^2 \\
 &= 0,28 \text{ Ha}
 \end{aligned}$$

Untuk menghitung panjang kolam, maka dengan mempertimbangkan ketersediaan *paddle wheel* di pasaran, maka diasumsikan lebar kolam (w) adalah 6 m. Maka dari luas kolam HROP dapat dihitung panjang kolam HROP (L), yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Panjang Kolam HROP} &= \frac{A}{w} \\
 &= \frac{2800 \text{ m}^2}{6 \text{ m}} \\
 &= 466,67 \text{ m} \\
 &\sim 467 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Luas kolam yang didesain dalam penelitian ini jauh lebih kecil dibandingkan desain menurut Borowitzka (2005) yaitu sebesar 1 Ha sampai 20 Ha dengan rata-rata kedalaman 20-30 cm. Kedalaman yang dibuat peneliti sebesar 40 cm karena kolam HROP diaplikasikan pada daerah beriklim tropis dengan intensitas cahaya matahari sepanjang tahun yang cukup tinggi. Faktor ekonomis juga menjadi pertimbangan dalam pemilihan kedalaman, semakin tinggi kedalamannya, maka luas area yang dibutuhkan untuk kolam HROP menjadi semakin kecil, sehingga kebutuhan lahan

lebih sedikit. Selain itu kedalaman 40 cm masih dalam batasan di mana mikroalga masih dapat tumbuh dan berkembang biak dengan baik.

Desain Kolam HROP dapat menggunakan jenis kolam *Raceway*, sesuai dengan desain dari Oswald sehingga kebutuhan lahan menjadi ekonomis.

4.9.2 Konsentrasi Mikroalga

Menurut Oswald (1988), untuk memperkirakan konsentrasi alga (C_c) yang dihasilkan dari pengolahan limbah domestik pada kolam HROP, diperoleh dari rumus di bawah ini:

$$hC_c = FS\theta \times 1000/d$$

Di mana:

h = nilai kalor pembakaran alga $\pm 5,5$ (Cal/mg)

C_c = konsentrasi alga setara dengan nilai BOD (mg/l)

F = efisiensi fotosintesis sebesar 2,5% dari S

S = intensitas cahaya = 667 (cal/cm².hari)

d = kedalaman kolam = 40 (cm)

θ = waktu tinggal = 4 (hari)

$$C_c = \frac{FS\theta \times 1000}{hd}$$

$$C_c = \frac{0,025 \times 667 \times 4 \times 1000}{5,5 \times 40}$$

$$C_c = 303,18 \text{ mg/l}$$

Jadi konsentrasi mikroalga dengan waktu detensi selama 4 hari akan menghasilkan konsentrasi mikroalga sebesar 303,18 mg/l. Nilai konsentrasi mikroalga sebesar 303,18 mg/l setara dengan nilai BOD. Artinya dengan waktu detensi selama 4 hari, nilai BOD yang akan terkonversi menjadi sel-sel mikroalga baru adalah sebesar 303,18 mg/l.

4.9.3 Tenaga yang dibutuhkan untuk proses pencampuran

Untuk menghitung tenaga (P) yang dibutuhkan untuk menggerakkan *paddle wheel* adalah dengan menggunakan rumus di bawah ini:

$$P = QW\Delta d/e$$

$$Q = wdv$$

Di mana:

P = tenaga (kW)

w = lebar kolam = 6 m

d = kedalaman kolam = 40 cm

Δd = $\frac{1}{2} d = 20$ cm

v = kecepatan aliran = 15 cm/detik

W = berat jenis air pada suhu 15°C = 1000 kg/m³

e = efisiensi *paddle wheel* = 0,5

$$P = 6 \times 0,4 \times 0,15 \times 1000 \times 0,2 / (102 \times 0,5)$$

$$= 1,41 \text{ kWh}$$

Jika kolam HROP beroperasi selama 24 jam, maka tenaga yang dibutuhkan adalah:

$$P = 1,41 \text{ kWh} \times 24 \text{ jam/hari}$$

$$= 33,88 \text{ kW/hari}$$

Tenaga sebesar 33,88 kW/hari adalah untuk proses pencampuran dengan luas kolam sebesar 0,28 Ha. Jadi, setiap hektar kolam memerlukan tenaga *paddle wheel* sebesar:

$$P = 33,88 \text{ kW.hari}^{-1}/0,28 \text{ Ha}$$

$$P = 121 \text{ kW/Ha. Hari}$$

Jadi, tenaga yang dibutuhkan oleh *paddle wheel* untuk proses pencampuran Kolam HROP untuk setiap hektar luasnya adalah sebesar 121 kW/Ha.hari

4.9.4 Produktivitas mikroalga

Rumus yang digunakan untuk menghitung produktivitas mikroalga adalah sebagai berikut:

$$P_r = kdC_c/\theta$$

Di mana:

P_r = Produktivitas ($\text{g}/\text{m}^2/\text{hari}$)

k = konstanta = 0,01

d = kedalaman kolam = 40 cm

C_c = konsentrasi mikroalga = 303,18 mg/l

θ = waktu tinggal = 4 hari

$$P_r = 0,01 \times 40 \times 303,18/4$$

$$P_r = 30,318 \text{ gram}/\text{m}^2/\text{hari}$$

Jadi, produktivitas mikroalga yang dihasilkan adalah 30,318 $\text{gram}/\text{m}^2/\text{hari}$. Dalam setahun produktivitas mikroalga yang dihasilkan untuk setiap hektar luasnya adalah:

$$\begin{aligned} P_r &= 30,318 \text{ gram}/\text{m}^2/\text{hari} \times 10^{-6} \text{ ton}/\text{gram} \times 365 \text{ hari}/\text{tahun} \times 10.000 \text{ m}^2/\text{Ha} \\ &= 110,66 \text{ ton}/\text{Ha}/\text{tahun} \end{aligned}$$

Jadi, dalam waktu setahun biomassa mikroalga yang dapat dihasilkan dari Kolam HROP tersebut adalah sebesar 110,66 ton/Ha/tahun.

4.9.5 Suplai gas CO₂ dari emisi gas buang PLTU Batubara

Penelitian ini memanfaatkan emisi gas CO₂ dari PLTU Batubara untuk pertumbuhan mikroalga. Sudah dijelaskan sebelumnya bahwa peneliti berencana menerapkan penelitian ini pada Kompleks PLN yang letaknya tidak jauh dari PLTU Batubara. Emisi CO₂ Batubara diinjeksikan ke dalam bak kultivasi mikroalga dengan cara difusi. Laju alir emisi CO₂ yang digunakan adalah 1 liter/menit sesuai dengan hasil percobaan.

Emisi gas buang PLTU Batubara Bukit Asam mengandung 13-15% konsentrasi CO₂. Pemakaian batubara sebagai bahan baku PLTU Bukit Asam adalah sebesar 1.050.000 ton/tahun/unit. Jika hasil pembakaran batubara menghasilkan 13% gas CO₂, maka gas CO₂ yang dihasilkan PLTU selama setahun adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Gas CO}_2 \text{ yang dihasilkan} &= 0,13 \times 1.050.000 \text{ ton/tahun/unit} \\ &= 136.500 \text{ ton/tahun/unit}\end{aligned}$$

Penelitian yang dilakukan oleh ECOFYS-GBEP-FAO (2009) menyebutkan bahwa berdasarkan komposisi kimia rata-rata biomassa mikroalga, untuk menghasilkan 1 ton biomassa diperlukan 1,8 ton CO₂. Jadi, berdasarkan produktivitas mikroalga yang dapat dihasilkan oleh Kolam HROP, banyaknya gas CO₂ yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Jumlah Gas CO}_2 \text{ yang dibutuhkan biomassa Mikroalga,} \\ &= 110,66 \text{ ton/Ha/tahun} \times 0,28 \text{ Ha} \times 1,8 \text{ ton CO}_2 \\ &= 55,77 \text{ ton CO}_2/\text{tahun}\end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, maka gas CO₂ yang dapat dihasilkan dari PLTU Batubara jauh lebih besar daripada jumlah gas CO₂ yang dibutuhkan oleh biomassa mikroalga. Sehingga kelebihan gas CO₂ tersebut masih dapat dimanfaatkan untuk keperluan yang lain.

4.9.6 Manfaat ekonomi, lingkungan, dan sosial

A. Manfaat Ekonomi

Perhitungan secara ekonomi mengenai penerapan pengolahan limbah cair domestik dengan cara memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara pada penelitian ini hanya dilakukan secara makro. Berdasarkan produktivitas yang dihasilkan oleh mikroalga selama setahun, maka dapat diperkirakan berapa keuntungan yang dapat diperoleh dari hasil penjualan biomassa dari jenis *Chlorella vulgaris* tersebut.

Biaya yang harus dikeluarkan dalam penerapan teknologi ini meliputi biaya kapital maupun biaya produksi. Biaya kapital meliputi biaya lahan, biaya pembangunan (*site*), biaya untuk pembelian kultur mikroalga, dan biaya untuk pembelian alat-alat pemanenan. Sedangkan yang masuk ke dalam biaya produksi meliputi upah pekerja, biaya listrik, biaya pemanenan dan biaya perawatan. Berdasarkan hasil perhitungan terhadap tenaga yang dibutuhkan oleh *paddle wheel* untuk proses pencampuran di atas, dapat diperkirakan berapa banyaknya biaya listrik yang harus dikeluarkan setiap bulannya berdasarkan harga rata-rata listrik per-kWh-nya.

Saat ini, investasi kultivasi mikroalga sebagai bahan baku biofuel bukan merupakan investasi yang menguntungkan. Akan tetapi, ada banyak manfaat lingkungan yang dapat diperoleh dari investasi pengolahan limbah cair domestik dengan memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara untuk pertumbuhan mikroalga. Karena kandungan minyaknya yang tinggi, mikroalga berpotensi menggantikan bahan bakar fosil yang makin lama makin habis. Selain itu manfaat biomassa mikroalga juga dapat dijadikan pakan ternak, bahan kosmetik, dan produksi metan melalui proses anaerob. Metan yang dihasilkan dapat dirubah menjadi energi listrik. Metan yang terbentuk berasal dari material pada dasar kolam yang mengalami fermentasi. Tiap miligram metan yang dilepaskan ke atmosfer dapat menurunkan BOD sebanyak 4 mg (Oswald, 1960). Jika pemanfaatan gas metan sebagai sumber energi listrik dapat berjalan optimal, maka dapat mengurangi biaya listrik.

Konsep mengintegrasikan pemanfaatan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dengan pengolahan limbah cair domestik juga merupakan suatu *close loop system*. Emisi CO₂ dari PLTU Batubara digunakan untuk meningkatkan laju fotosintesis mikroalga. Peningkatan pertumbuhan mikroalga akan menyebabkan peningkatan hubungan simbiosis antara mikroalga dan mikroorganisme sehingga diperoleh kualitas air hasil olahan yang lebih baik. Air hasil olahan dapat dimanfaatkan kembali untuk keperluan pertanian, ataupun keperluan PLTU. Hal ini dapat menghemat biaya karena berkurangnya kebutuhan air. Sedangkan biomassa mikroalga dapat digunakan sebagai

bahan baku biofuel sehingga dapat memenuhi kebutuhan bahan bakar di PLTU maupun digunakan masyarakat sebagai pengganti bahan bakar minyak.

B. Manfaat Lingkungan

Manfaat lingkungan yang paling dirasakan oleh masyarakat adalah terkonversinya limbah cair domestik menjadi sel-sel mikroalga. Masyarakat menjadi tidak khawatir jika limbah *septic tank*-nya akan mencemari sumber air tanah. Selain itu, pemanfaatan emisi CO₂ dari PLTU Batubara untuk pertumbuhan mikroalga dapat mengurangi konsentrasi gas CO₂ di udara ambien yang berasal dari kegiatan PLTU sehingga kualitas udara menjadi lebih bersih. Meskipun gas CO₂ bukan merupakan gas yang bersifat toksik dan belum diatur oleh pemerintah dalam baku mutu udara emisi dari sumber tak bergerak, akan tetapi gas CO₂ dapat menyebabkan pemanasan global yang berakibat pada perubahan iklim. Sehingga kegiatan ini dapat diusulkan dalam program CDM (*Clean Development Mechanism*).

Prinsip keberlanjutan lingkungan yang paling menonjol pada penelitian ini adalah bahwa biomassa mikroalga adalah tanaman yang sangat potensial sebagai bahan baku biofuel. Pemakaian bahan bakar fosil dapat dikurangi dengan adanya penemuan sumber energi lain. Apalagi jika penemuan sumber energi baru tersebut termasuk dalam kategori sumber daya alam yang dapat diperbaharui (*renewable*). Bahan bakar fosil makin lama makin habis, sedangkan biomassa mikroalga dapat terus dikembangbiakkan sehingga tidak akan habis oleh waktu.

Kegiatan ini juga sangat menunjang program pemerintah yaitu Kebijakan Energi Nasional yang dituangkan dalam Peraturan Presiden No 5 Tahun 2006 yang diterbitkan dengan pertimbangan untuk menjamin keamanan pasokan energi dalam negeri dan untuk mendukung pembangunan yang berkelanjutan. Dalam kebijakan itu disebutkan bahwa pemakaian energi baru terbarukan ditingkatkan dari 0.2% menjadi 17%. Dari 17% tersebut, 5%-nya adalah untuk bahan bakar nabati (*biofuel*).

C. Manfaat Sosial

Masyarakat akan merasakan manfaat dari kultivasi mikroalga dalam kolam HROP jika dilakukan secara tepat guna. Artinya teknologi dapat digunakan dan dirawat secara bersama-sama oleh masyarakat. Penerapan suatu teknologi pengolahan limbah cair domestik pada suatu masyarakat harus memperhatikan hal-hal sebagai berikut:

1. Keterlibatan masyarakat harus dimulai sejak tahap awal perencanaan pembangunan. Harus dilakukan sosialisasi sejak awal tentang manfaat yang dapat diperoleh dari penerapan pengolahan limbah cair domestik tersebut sehingga masyarakat mengerti dan tidak timbul adanya penolakan dari masyarakat.
2. Masyarakat harus diikutsertakan dalam perawatan sistem tersebut. Agar masyarakat mau terlibat dalam perawatan sistem, maka terlebih dahulu harus dibangun rasa memiliki terhadap sistem. Keterlibatan masyarakat sejak tahap awal perencanaan salah tujuannya adalah agar timbul rasa memiliki terhadap teknologi yang akan diterapkan.
3. Harus dijelaskan kepada masyarakat bahwa selain banyak manfaat yang dapat diperoleh dari teknologi pengolahan limbah cair domestik juga terdapat kewajiban yang harus dilaksanakan oleh masyarakat yaitu iuran bulanan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat dibuat kesimpulan untuk menjawab tujuan khusus, yaitu sebagai berikut:

1. Pengaruh faktor-faktor lingkungan (intensitas cahaya matahari, temperatur, pH, dan oksigen terlarut) terhadap pertumbuhan mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* dengan memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dan limbah cair domestik yang terintegrasi adalah sebagai berikut:
 - a. Penurunan intensitas cahaya matahari menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga. Kekuatan korelasi antar 2 (dua) variabel tersebut bersifat lemah dengan nilai -0,361. Pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap pertumbuhan mikroalga adalah sebesar 13,03%.
 - b. Penurunan temperatur menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga. Kekuatan korelasi antar 2 (dua) variabel tersebut bersifat kuat dengan nilai -0,760. Pengaruh temperatur terhadap pertumbuhan mikroalga adalah sebesar 57,76%.
 - c. Penurunan pH menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga. Kekuatan korelasi antar 2 (dua) variabel tersebut bersifat sedang dengan nilai -0,598. Pengaruh pH terhadap pertumbuhan mikroalga adalah sebesar 35,76%.
 - d. Peningkatan oksigen terlarut menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga. Kekuatan korelasi antar 2 (dua) variabel tersebut bersifat lemah dengan nilai 0,301. Pengaruh oksigen terlarut terhadap pertumbuhan mikroalga adalah sebesar 9,06%.

Pertumbuhan mikroalga baru dimulai pada hari pengamatan ke-4 (empat). Faktor yang memberikan pengaruh paling besar terhadap pertumbuhan mikroalga adalah temperatur sebesar 57,76%.

2. Pengaruh laju alir emisi CO₂ dari PLTU Batubara terhadap pertumbuhan mikroalga pada Kolam HROP adalah sebagai berikut:
 - a. Pada Bak Kontrol, tanpa tambahan emisi CO₂ : korelasi antara kedua variabel bersifat kuat dengan nilai 0,652. Pengaruh [H₂CO₃] pada bak kontrol terhadap pertumbuhan mikroalga adalah sebesar 42,51%. Kerapatan sel pada akhir masa pengamatan adalah 921.250 sel/ml
 - b. Pada Bak 2, laju alir emisi CO₂ 1 liter/menit: korelasi antara kedua variabel bersifat sedang dengan nilai 0,579. Pengaruh [H₂CO₃] pada Bak 2 terhadap pertumbuhan mikroalga adalah sebesar 33,52%. Kerapatan sel pada akhir masa pengamatan adalah 1.120.000 sel/ml.
 - c. Pada Bak 3, laju alir emisi CO₂ 2 liter/menit: korelasi antara kedua variabel bersifat kuat dengan nilai 0,621. Pengaruh [H₂CO₃] pada Bak 3 terhadap pertumbuhan mikroalga adalah sebesar 38,56%. Kerapatan sel pada akhir masa pengamatan adalah 846.250 sel/ml
 - d. Pada Bak 4, laju alir emisi CO₂ 3 liter/menit: korelasi antara kedua variabel bersifat kuat dengan nilai 0,726. Pengaruh [H₂CO₃] pada Bak 4 terhadap pertumbuhan mikroalga adalah sebesar 52,71%. Kerapatan sel pada akhir masa pengamatan adalah 832.500 sel/ml.

Bak 2 dengan laju alir emisi CO₂ sebesar 1 liter/menit memberikan pertumbuhan mikroalga terbaik pada akhir masa pengamatan dengan kerapatan sel sebesar 1.120.000 sel/ml dan pengaruh sebesar 33,52% terhadap pertumbuhannya. Penambahan laju alir emisi gas CO₂ lebih besar dari 1 liter/menit tidak membuat kinerja sistem menjadi lebih baik.

3. Pengaruh NH₃ terhadap pertumbuhan mikroalga adalah penurunan konsentrasi NH₃ menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga. Kekuatan korelasi antar 2 (dua) variabel bersifat sedang dengan nilai -0,505. Konsentrasi NH₃ memberikan pengaruh sebesar 25,50% terhadap pertumbuhan mikroalga. Efisiensi penurunan konsentrasi NH₃ terbaik diperoleh oleh Bak 2, yaitu bak

dengan laju alir emisi CO₂ sebesar 1 liter/menit sebesar 82,08%. Kolam di mana tumbuh mikroalga paling tinggi berdampak positif terhadap penurunan NH₃.

4. Efisiensi penurunan BOD oleh mikroalga adalah 47,239%. Efisiensi terbaik ini ditunjukkan oleh Bak 2, yaitu bak dengan laju alir emisi CO₂ sebesar 1 liter/menit. Kolam di mana mikroalga tumbuh paling tinggi (kerapatan sel = 1.120.000 sel/ml) mempunyai efisiensi penurunan BOD terbaik (47,239%).
5. Penerapan hasil penelitian pada skala lapangan adalah bahwa hasil penelitian diterapkan untuk mengolah limbah cair domestik secara komunal pada suatu masyarakat yang terdiri dari 350 KK sehingga menghasilkan dimensi Kolam HROP sebesar 467 m (panjang) x 6 m (lebar) x 0,4 m (kedalaman). Produktivitas mikroalga yang dihasilkan selama setahun dari ukuran Kolam HROP tersebut adalah sebesar 110,66 ton/Ha/tahun. Gas CO₂ yang berasal dari PLTU Batubara dapat memberikan suplai sebesar 136.500 ton/tahun/unit.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan pengalaman yang diperoleh oleh peneliti selama proses percobaan berlangsung, maka ada beberapa hal yang dapat dijadikan saran, yaitu sebagai berikut:

1. Kegiatan pemanfaatan emisi CO₂ dari PLTU Batubara untuk pertumbuhan mikroalga yang diintegrasikan dengan pengolahan limbah cair domestik dapat diusulkan sebagai program CDM (*Clean Development Mechanism*).
2. Emisi gas CO₂ dari kegiatan PLTU Batubara dapat diusulkan untuk dimasukkan sebagai salah satu gas emisi dari sumber tak bergerak yang diatur baku mutunya karena pengaruhnya terhadap pemanasan global yang dapat berakibat pada perubahan iklim.
3. Percobaan yang dilakukan peneliti menggunakan biakan murni mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* dengan kerapatan sel awal 1 juta sel/ml. Agar diperoleh pertumbuhan mikroalga yang lebih baik pada akhir masa pengamatan, sebaiknya digunakan biakan murni awal dengan kerapatan sel yang lebih tinggi.

Universitas Indonesia

Pertumbuhan yang lebih cepat akan mempengaruhi kualitas limbah cair yang lebih baik pula.

4. Faktor lingkungan berupa abu terbang batubara yang banyak terdapat di lokasi penelitian sangat mempengaruhi kekeruhan kolam percobaan. Perlu penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh abu terbang batubara pada pertumbuhan mikroalga.



DAFTAR REFERENSI

- Abeliovich, A., Y. Azof. 1975. *Toxicity of Ammonia to Algae in Sewage Oxidation Ponds*. Applied and Environmental Microbiology , June 1976, p. 801-806. Human Environmental Sciences Laboratory, Hebrew University, Jerusalem. Israel
- Abeliovich, A. 1986. *Algae in wastewater oxidation ponds*. In: Richmond, A (ed). *Handbook of Microalgae Mass Culture*. CRC Press, Boca Raton. 331-338.
- Arlyza, I.S. 2003. *Isolasi dan karakterisasi fikosianin dari mikroalga spirulina platensis yang ditumbuhkan dalam media limbah lateks pekat*. Tesis Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Benemann, J.R., and W.J. Oswald. 1996. *System and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO₂ to biomass*. University of California Berkeley.
- Borowitzka, M.A., L.J. Borowitzka. 1988. *Micro-algal biotechnology*. School of Environmental and Life Sciences, Murdoch University. Cambridge University Press. Australia
- Borowitzka, M.A. 1998. *Culturing microalgae in outdoor ponds*. Algae Research Group, School Of Biological Sciences & Biotechnology, Murdoch University. Australia
- Brown, L.M. 1996. *Biodiesel from microalgae: Complementary in a fuel development strategy*. National Renewable Energy Laboratory.
- Chang, E., S. Shyng Yang. 2002. *some characteristics of microalgae isolated in Taiwan for biofixation of Carbon Dioxide*. Bot. bull. Acad. Sin. (2003) 44: 43-52. Department of Agricultural Chemistry National Taiwan University, Taipei. Taiwan.
- Chisti, Y. 2007. *Biodiesel from microalgae*, Elsevier, Biotechnology Advances 25 (2007) 294-306.
- Chrimadha,T., Y. Mardiah, dan D. Hadiansyah. 2006. *Respon fitoplankton terhadap peningkatan konsentrasi karbon dioksida udara*. Limnotek XIII(1):1-8.

- Craggs, D. 2005. *Nutrient*. Ed. Andy N. Shilton. Pond Treatment Technology. London: IWA Publishing.
- Edward, M. 2008. *End biowar I and Engineer sustainable food and biofuels*. Greenmasterminds.org.
- Effendi, H. 2003. *Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*. Kanisius, Yogyakarta
- Fitri, K. 2010. *Peran Chlorella vulgaris dalam Pengelolaan Lingkungan (Kajian Penggunaannya untuk menurunkan nitrogen amonia air limbah domestik dan potensinya sebagai bahan minyak biodiesel*. Tesis Program Studi Ilmu Lingkungan, Program Pasca Sarjana, Universitas Indonesia, Jakarta.
- Fogg, G. E. 1975. *Algae culture and phytoplankton ecology*. 2nd Edition. The University of Wisconsin Press. Madison, Wisconsin.
- Garcia, W.U., R.U. Garcia. 1985. *Prawn Farming: Made simple with fertile*. 1983 National Science & Technology Authority Invention Awardees. 1st Edition, January 1985. Manila.
- Garcia, J., M. Hernandez-Marine, dan R. Mujeriego. 2001. *Analysis of key variables controlling phosphorus removal in high rate oxidation ponds with clarifiers*. Universitat Politecnica de Catalunya, c/ Gran Capita s/n, 08034 Barcelona.
- Gonzalez, L. E., R. O. Canizares, & S. Baena. 1996. *Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a Colombian agroindustrial wastewater by the microalgae Chlorella vulgaris and scenedesmus dimorphus*. Bioresources Technology 60 (1997) 259-262. Elsevier Science Limitec. Great Britain.
- Graham, L.E., L.W. Wilcox. 2000. *Algae*. Prentice-Hall, Inc. University of Wisconsin. USA.
- Grobbelaar, J.U. 1986. *Algal nutrition - Mineral nutrition*. In: Richmond, A (ed). *Handbook of Microalgae Mass Culture*. CRC Press, Boca Raton. 331-338.
- Hamouri, B.E. 2008. *Rethinking natural, extensive systems for tertiary treatment purposes: The high-rate algae pond as example*. Department of Water Environment and Infrastructures, Institute Agronomique et Veterinaire Hassan II (IAV), Rabat, Morocco.
- Harmelen, T.V., O. Hans. 2006. *Microalgae biofixation process: Applications and potensial contribution to greenhouse gas mitigation options*. TNO.

- Hirata, S., M. Hayashitani, M. Taya, and S. Tone. 1996. *Carbon Dioxide fixation in batch culture of Chlorella sp. Using a photobioreactor with a sunlight-collection device*. Journal of Fermentation and Bioengineering.
- Isnansetyo, A. & Kurniastuty. 1995. *Teknik kultur phytoplankton & zooplankton: Pakan alami untuk pembenihan organisme laut*. Penerbit Kanisius, Yogyakarta.
- Koukouzas, N., P. Klimantos, P. Stogiannis, E. Kakaras. 2006. *CO₂ Capture and storage in Greece: A case study from Komotini NGCC Power Plant*. Termal Science; Vol. 10 (2006), No. 3, pp. 71-80. Greece.
- Krisanti, M. 2003. *Peran zeolit sebagai substrat dan penyedia unsur hara bagi mikroalga*. Tesis Program Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.
- Larsdotter, K. 2006. *Wastewater Treatment with Microalgae-A Literature Review*. Vatten 62:31-38. Albanova University Center, 10691 Stockholm. Sweden.
- Li, Y, M. Horsman, B. Wang, N. Wu, C. Q. Lan. 2008. *Effect of nitrogen sources on cell growth and lipid accumulation of green alga Neochloris oleoabundans*. Appl Microbial Biotechnol (2008) 81:629-636.
- Londa, T.J. 2003. *Pengaruh intensitas cahaya terhadap pertumbuhan alga pada kolam oksidasi arus deras*. Jurnal Lingkungan Pembangunan 23 (4):261-272. Pusat Studi Lingkungan Perguruan Tinggi Seluruh Indonesia.
- Manahan, S.E., 1994. *Environmental Chemistry* (6 Ed). Boca Raton: Lewis Publisher.
- Mara, D. 2003. *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. London: Earthscan Publisher
- Matsumoto, H.A., N.Hamasaki, Y. Sioji, Ikuta. 1997. *Influence of CO₂, SO₂, and NO in flue gas on microalgae productivity*. Jurnal Chemical Engineering. Japan.
- Metcalf & Eddy. 1991. *Wastewater engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. Third Edition. McGraw-Hill International Editions. New York.
- Moersidik, S.S. 1988. *Suive de l'evolution des parameters physico-chimiques et de la chlorophylle dans des pilotes de lagunage a haut rendement de differentes tailles et de differentes profondeurs*. Tesis Laboratoire d'accueil: laboratoire et d'Hygiene Faculte de Pharmacie de Montpellier. Perancis.
- Mulyadi, A. 1999. *Pertumbuhan dan daya serap nutrisi dari mikroalga dunaliella tertiolecta yang dipelihara pada limbah domestik*. Jurnal Natur Indonesia II (1): 65-68 (1999). Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Riau.

- Muslimin L.W. 1995. *Mikrobiologi lingkungan*. Universitas Hasanuddin dan Proyek Pengembangan Pusat Studi Lingkungan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
- Mustahal, dkk. 1995. *Teknologi pakan bagi usaha perikanan budidaya*. Prosiding seminar: 01/Pros/03/95. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perikanan Balai Penelitian Perikanan Budidaya Pantai Sub Balai Penelitian Perikanan Budidaya Pantai, Bojonegoro Serang.
- Nakamura, T, M. Olaizola, S.M. Masutani. 2003. *Recovery and sequestration of CO₂ from stationary combustion system by photosynthesis of microalgae*. Quarterly Technical Progress Report #9, US Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.
- Negoro, M., A. Hamasaki, Y. Ikuta, T. Makita, K. Hirayam, S. Suzuki. S. 1993. *Carbon Dioxide Fixation by Microalgae Photosynthesis Using Actual Flue Gas Discharge from a Boiler*. Applied Biochemistry and Biotechnology Vol. 39/40 (1993), The Humana Press Inc.
- Nybakken, J.W. 1993. *Marine biology: an ecological approach*. 3rd Edition. Harper Collins College Publishers, New York.
- Nontji, A. 1984. *Biomassa dan produktivitas fitoplankton di perairan Teluk Jakarta serta kaitannya dengan faktor-faktor lingkungan*. Tesis Fakultas Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor.
- Nontji, A. 2008. *Plankton Laut*. LIPI Press, Jakarta.
- Ono, E., Cuello, J.L. 1995. *Selection of optimal microalgae species for CO₂ sequestration*". The University of Arizona Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Tucson, AZ 85721. USA.
- Oswald, W.J. 1985. *Potential for treatment of agricultural drain water with microalgae-bacterial systems*. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Mid-Pacific Region, California. USA.
- Panggabean, L.M.G., R. Hartono, V. Simbolon, S. Sitorus. 2007. *Pengaruh injeksi karbon dioksida terhadap pertumbuhan Chlorella sp. dan Nannochloropsis oculata* Pusat Penelitian Oseanografi-LIPI. Universitas Negeri Sultan Ageng Tirtayasa, Jurusan Teknik Kimia, Jakarta.
- Pusdatin. 2006. *Buku pegangan statistik ekonomi energi Indonesia*. DESDM
- Raymont, J.E.G. 1980. *Plankton and productivity in the oceans*. Pergamon Press, Oxford.

- Reynolds, C.S. 1990. *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Richmond, A. 2007. *Handbook of microalgae culture: Biotechnology and applied phycology*. Blackwell Publishing. UK.
- Rostini, I. 2007. *Kultur fitoplankton (Chlorella sp. Dan Tetraselmis chuii) pada skala laboratorium*. Karya ilmiah Universitas Pajajaran Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Jatinangor.
- Round, F.E. 1973. *The biology of algae*. 2nd Edition. Edward Arnold, Ltd, New York.
- Salisbury, Frank B. and Cleon W. Ross. 1995. *Fisiologi tumbuhan* (jilid 1 dan 2). Penerbit ITB, Bandung.
- Samiaji, T., 2004. *Emisi CO₂ dari penggunaan energi*. Pusat Pemanfaatan Sains Atmosfer & Iklim, Lembaga Penerbangan & Antariksa Nasional (LAPAN), Bandung.
- Schulz, T. 2006. *The economics of micro-algae production and processing into biodiesel*. Department of Agriculture and Food Western Australia.
- Sheehan J, T.Dunahay, J. Benemann, P. Roessler. 1998. *A look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic species program-biodiesel from algae*. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Setiyono, R. Kartikasari, M.R. Djuwita, dan M. Mardalina. 2005. *Pedoman penanggulangan limbah cair domestik dan tinja*. Kementerian Negara Lingkungan Hidup.
- Sreesai, S dan P. Pakpain. 2007. *Nutrient Recycling by Chlorella vulgaris from Septage Effluent of The Bangkok City Thailand*. Science Asia 33: (2007):293-209.
- Stepan, D.J., R.E. Shockey, T. A. Moe, dan R. Dorn. 2002. *Subtask 2.3. – Carbon Dioxide Sequestering Using Microalgal System*. Final Report prepared for AAD Document Control, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, Pittsburg. USA.
- Suantika, G dan D. Hendrawan. 2008. *Efektivitas teknik kultur menggunakan sistem kultur statis, semi kontinyu, & kontinyu terhadap produktivitas dan kualitas kultur Spirulina sp*". Jurnal Matematika & Sains, Juni 2009, vol. 14 No 2. Kelompok Keilmuan Ekologi & Biosistemika, Sekolah Ilmu & Teknologi Hayati, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Sugiharto. 1987. *Dasar-dasar pengelolaan air limbah*. UI Press, Jakarta.

- Sumitro, S. 2002. *Pemanfaatan batubara dalam pembangunan ketenagalistrikan dan implikasi lingkungannya*. Jurnal Kimia Lingkungan, Vol. 3, No. 2, 2002, Jakarta.
- Suriawiria, U. 1993. *Mikrobiologi air dan dasar-dasar pengolahan buangan secara biologis*. Penerbit Alumni, Bandung.
- Sutomo. 2005. *Kultur tiga jenis mikroalga (Tetraselmis sp., Chlorella sp., dan Chaetoceros gracilis) dan pengaruh kepadatan awal terhadap pertumbuhan c. gracilis di laboratorium*. Oseanologi dan Limnologi di Indonesia 2005 No. 37: 43-58, Jakarta.
- Thomson, D.V. Niekerk. 2006. *Utilization of Carbon Dioxide from coal-fired power plant for the production of value-added products*. Submitted in partial fulfillment of The Requirements for The Design Engineering of Energy and Geo-Environmental System Course (EGEE 580).
- Uju & Wahyuni, M., 2007. *Pengembangan marine biodiesel dari mikroalga sebagai sumber energi alternatif potensial masa depan*. Artikel, tgl publikasi: 20 Juli 2007, jam 05.00:30.
- Web id.wikipedia.org/wiki/siklus_karbon, 6 Nopember 2009, pukul 23.55 WIB.
- Wijanarko, A. 2006. *Peningkatan produksi biomassa Chlorella vulgaris Buitenzorg dan fiksasi CO₂ dalam kolom gelembung seri dengan pengaturan pencahayaan*. Disertasi Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Yan Li, M. Brandie, A.R. Mohan, V. Rodriguez-Santiago, D. Thomson dan D.V. Niekerk. 2006. *Utilization of Carbon Dioxide From Coal-Fired Power Plant For The Production Of Value-Added Products*. Submitted in partial fulfillment of The Requirements for The Design Engineering of Energy and Geo-Environmental System Course (EGEE 580).
- Yun, Y.S., S.B. Lee, J.M. Park, C.I. Lee, J.W. Yang. 1997. *Carbon Dioxide fixation by algae cultivation using wastewater nutrients*. J. Chem. Tech. Biotechnol. 1997, 69 451-455. Department of Chemical Engineering, School of Environmental Engineering, Pohang University of Science and Technology. Korea.
- Zulkifli, H. 1995. *Kolam oksidasi berproduksi tinggi: salah satu alternatif pengolahan limbah cair domestik*. Jurnal Lingkungan Pembangunan 15(1):46-57. Pusat Studi Lingkungan Perguruan Tinggi Seluruh Indonesia.
- Zulkifli, H. 1997. *Biologi lingkungan*. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.



Universitas Indonesia

LAMPIRAN 1

DOKUMENTASI PENELITIAN



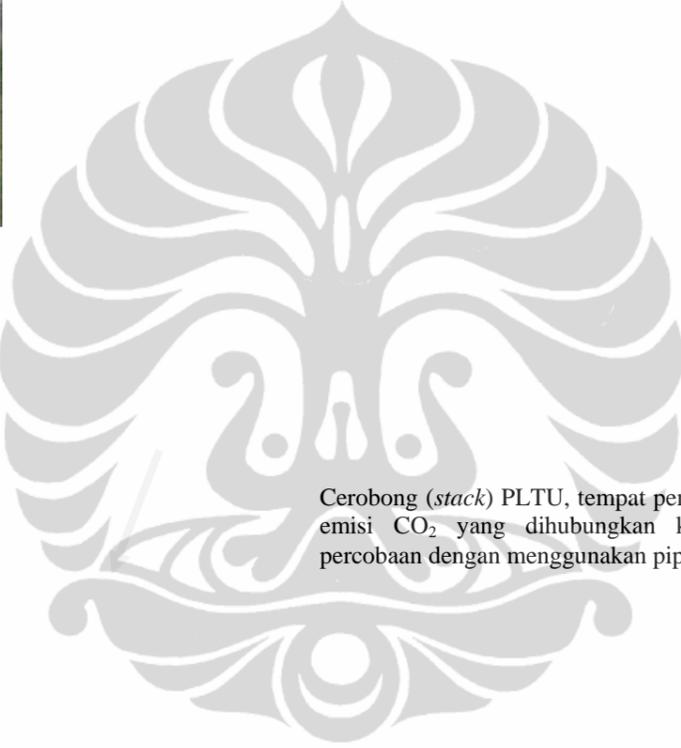
Tempat Penelitian, PLTU Bukit Asam,
Kecamatan Tanjung Enim, Kabupaten Muara
Enim, Propinsi Sumatera Selatan



Rangkaian peralatan penelitian dalam suatu
sistem percobaan



Cerobong (*stack*) PLTU, tempat pengambilan
emisi CO₂ yang dihubungkan ke kolam
percobaan dengan menggunakan pipa





Pompa dan blower untuk menghisap emisi CO₂ dari cerobong PLTU



Pipa pembuangan gas sisa emisi CO₂ yang tidak masuk ke dalam kolam percobaan



Bak HROP yang dilengkapi dengan *paddle wheel*

Universitas Indonesia



Salah satu *septic tank* milik warga di perumahan Kota Muara Enim yang dijadikan sampel limbah cair domestik



Sampel air hasil olahan setelah dimasukkan larutan Nessler. Warnanya bening kekuning-kuningan, menandakan kandungan NH_3 -nya sudah sangat kecil



Sampel air limbah setelah dimasukkan larutan Nessler. Warnanya kuning pekat, menandakan kandungan NH_3 -nya masih tinggi.

Universitas Indonesia



Mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* yang sudah diperbanyak dalam wadah dan telah memiliki kerapatan sel 1 juta sel/ml sebelum dituang ke dalam kolam percobaan



Warna campuran mikroalga dalam air limbah *septic tank* pada hari pertama proses pengolahan (*feeding*). Warna masih agak kekuningan karena masih didominasi warna limbah cair *septic tank*



Warna air hasil olahan pada akhir masa pengamatan (H-17). Warna sedikit lebih hijau.

Universitas Indonesia



Universitas Indonesia

LAMPIRAN 2

PROSEDUR PENELITIAN DAN HASIL PENELITIAN

A. Prosedur Pemeriksaan Kerapatan Sel dengan Metode Hemacytometer

1. Hemacytometer dibersihkan dan dikeringkan terlebih dahulu dengan kertas tissue.
2. Gelas penutupnya dipasang.
3. Phytoplankton yang akan dihitung kepadatannya ditetaskan dengan menggunakan pipet tetes pada bagian parit yang melintang hingga penuh.
4. Penetesan harus hati-hati agar tidak terjadi gelembung udara di bawah gelas penutup. Untuk phytoplankton-phytoplankton yang bergerak aktif seperti *Tetraselmis* sebelum ditetaskan pada hemocytometer, phytoplankton tersebut dimatikan terlebih dahulu dengan menambah beberapa tetes lugol atau formalin.
5. Hemocytometer selanjutnya diamati di bawah mikroskop dengan perbesaran 100 atau 400 kali dan dicari bidang yang berkotak-kotak dengan sisi 1 mm. Terdapat 2 (dua) kotak yang terdiri dari Kotak Besar (KB) dan Kotak Kecil (KK).
6. Kepadatan phytoplankton dihitung dengan cara menghitung phytoplankton yang terdapat pada Kotak Besar atau Kotak Kecil. Jika kepadatannya masih rendah, maka yang dihitung adalah jumlah phytoplankton yang terdapat di dalam Kotak Besar. jika kepadatannya tinggi, maka yang dihitung adalah jumlah phytoplankton yang terdapat di dalam Kotak Kecil. Jika jumlah phytoplankton yang didapat adalah N, maka:

$$\text{Kepadatan phytoplankton dalam KB} = \frac{N}{8} \times 10^4 \text{ sel/ml}$$

$$\text{Kepadatan phytoplankton dalam KK} = \frac{N \times 5}{2} \times 10^4 \text{ sel/ml}$$

B. Perhitungan Konstanta Pertumbuhan (k)

Laju pertumbuhan setiap hari menggunakan rumus Hoogenhout & Ames (1965) in T. Oh-Hama and Miyachi (1988), yaitu sebagai berikut:

$$k = 3,32 \log_2 \frac{N_2}{N_1} \times \frac{1}{t}$$

Di mana,

- k = laju pertumbuhan (/hari)
 N₂ = jumlah sel pada periode t
 N₁ = jumlah sel pada awal periode
 t = waktu periode 1 hari

C. Cara memperbanyak Kultur Mikroalga

1. Siapkan air aqua galon sesuai kebutuhan, tergantung volume kultur mikroalga yang ingin diperbanyak,
2. Siapkan media PHM,
3. Perbanyak kultur mikroalga dengan perbandingan sebagai berikut:

Air Aqua : Media PHM : Kultur Mikroalga
1 Liter : 4 ml : 10% dari air aqua

Media PHM yang digunakan untuk 1 liter air terdiri dari komposisi seperti pada tabel di bawah ini.

KNO ₃	1,0 g
K ₂ HPO ₄	0,2 g
MgSO ₄ . 7H ₂ O	0,2 g
CaSO ₄ (<i>saturated solution</i>)	20 ml
Na-Acetate	0,1 g (<i>optional</i>)
Na ₂ SiO ₃ . 9H ₂ O	0,05 g (<i>optional-for diatoms</i>)
Fe <i>solution</i>	10 ml
<i>Trace-element solution</i>	10 ml

Sumber: Borowitzka, 1988

D. Tabel Persentase (%) Amonia Bebas (NH₃) terhadap Amonia Total

pH	Suhu (°C)			
	26	28	30	32
7,0	0,60	0,70	0,81	0,95
7,2	0,95	1,10	1,27	1,50
7,4	1,50	1,73	2,00	2,36
7,6	2,35	2,72	3,13	3,69
7,8	3,68	4,24	4,88	5,72
8,0	5,71	6,55	7,52	8,77
8,2	8,75	10,00	11,41	13,22
8,4	13,20	14,98	16,96	19,46
8,6	19,42	21,83	24,45	27,68
8,8	27,64	30,68	33,90	37,76
9,0	37,71	41,23	44,84	49,02
9,2	48,96	52,65	56,30	60,38
9,4	60,33	63,79	67,12	70,72
9,6	70,67	73,63	76,39	79,29
9,8	79,25	81,57	83,68	85,85
10,0	85,82	87,52	89,05	90,58
10,2	90,56	91,75	92,80	93,84

Sumber: Boyd, 1988 dalam Effendi 2003

E. Hasil Penelitian

E.1. Tabel Kerapatan Sel pada Tahap Aklimatisasi

No	Tanggal	Waktu	Jumlah Mikrolaga (N)	Pertumbuhan mikroalga (sel/ml)							
				1		2		3		4	
				Kotak Besar	Krpt Sel (Sel ml)	Kotak Besar	Krpt Sel (Sel ml)	Kotak Besar	Krpt Sel (Sel ml)	Kotak Besar	Krpt Sel (Sel ml)
1	31/12/10	15.00	1	92	218750	148	341250	114	285000	99	227500
			2	83		125		114		83	
2	1/1/2011	14.00	1	551	1372500	582	1405000	552	1255000	471	1203750
			2	547		542		452		492	
3	2/1/2011	14.00	1	362	925000	415	1018750	302	742500	342	861250
			2	378		400		292		347	
4	3/1/2011	14.00	1	202	498750	262	682500	221	528750	215	525000
			2	197		284		202		205	
5	4/1/2011	14.00	1	211	527500	210	575000	165	426250	184	470000
			2	211		250		176		192	

E.2. Tabel Kerapatan Sel pada Proses Pengolahan (*Feeding*)

No	Tanggal	Waktu	Pe	Pertumbuhan mikroalga (sel/ml)							
				1		2		3		4	
				Kotak Besar	Krpt Sel (Sel/ml)	Kotak Besar	Krpt Sel (Sel/ml)	Kotak Besar	Krpt Sel (Sel/ml)	Kotak Besar	Krpt Sel (Sel/ml)
1	4/1/2011	14.00	1	211	527500	210	575000	165	426250	184	470000
			2	211		250		176		192	
2	5/1/2011	14.00	1	233	563750	302	706250	158	395000	224	576250
			2	218		263		158		237	
3	6/1/2011	14.00	1	202	486250	265	668750	159	400000	159	386250
			2	187		270		161		150	
4	7/1/2011	14.00	1	192	481250	200	515000	150	358750	161	416250
			2	193		212		137		172	
5	8/1/2011	14.00	1	243	567500	310	707500	210	530000	220	537500
			2	211		256		214		210	
6	9/1/2011	14.00	1	277	678750	304	768750	230	543750	238	560000
			2	266		311		205		210	
7	10/1/2011	14.00	1	245	627500	315	802500	220	537500	245	556250
			2	257		327		210		200	
8	11/1/2011	14.00	1	262	636250	292	715000	230	553750	220	548750
			2	247		280		213		219	
9	12/1/2011	14.00	1	273	650000	279	745000	231	550000	295	742500
			2	247		317		209		299	
10	13/1/2011	14.00	1	282	672500	355	841250	257	640000	272	711250
			2	256		318		255		297	
11	14/1/2011	14.00	1	283	693750	359	857500	265	667500	256	633750
			2	272		327		269		251	
12	15/1/2011	14.00	1	293	703750	357	905000	277	733750	274	658750
			2	270		367		310		253	
13	16/1/2011	14.00	1	307	740000	370	913750	301	767500	252	673750
			2	285		361		313		287	
14	17/1/2011	14.00	1	319	778750	363	946250	319	782500	263	672500
			2	304		394		307		275	
15	18/1/2011	14.00	1	355	866250	408	983750	324	766250	279	716250
			2	338		379		289		294	
16	19/1/2011	14.00	1	357	918750	403	985000	310	771250	329	825000
			2	378		385		307		331	
17	20/1/2011	14.00	1	372	997500	380	1008750	324	830000	300	797500
			2	426		427		340		338	
18	21/1/2011	14.00	1	379	921250	436	1120000	322	846250	320	832500
			2	358		460		355		346	

E.3 Tabel Hasil Pemeriksaan Intensitas Cahaya Matahari pada Proses Pengolahan (*Feeding*)

No	Tanggal	Waktu	Pengulangan	Intensitas Cahaya Matahari (klux)		HASIL
				Pembacaan	Rata-Rata	
1	4/1/2011	14.00	1. Max	33.97	24.15	24.15
			2. Min	14.33		
2	5/1/2011	14.00	1. Max	26.35	20.50	20.50
			2. Min	14.65		
3	6/1/2011	14.00	1. Max	23.58	20.11	20.11
			2. Min	16.64		
4	7/1/2011	10.00	1. Max	39.42	33.29	22.60
			2. Min	27.15		
		14.00	1. Max	14.40	11.91	
			2. Min	9.41		
5	8/1/2011	14.00	1. Max	30.01	21.69	21.69
			2. Min	13.37		
6	9/1/2011	12.00	1. Max	52.20	35.95	25.01
			2. Min	19.70		
		14.00	1. Max	16.14	14.07	
			2. Min	11.99		
7	10/1/2011	12.00	1. Max	50.70	38.00	27.75
			2. Min	25.30		
		14.00	1. Max	26.52	17.50	
			2. Min	8.47		
8	11/1/2011	11.00	1. Max	35.24	24.12	27.41
			2. Min	13.00		
		14.00	1. Max	48.5	30.70	
			2. Min	12.9		
9	12/1/2011	10.30	1. Max	36.50	24.05	17.89
			2. Min	11.60		
		14.00	1. Max	12.92	11.74	
			2. Min	10.55		
10	13/1/2011	14.00	1. Max	12.21	11.64	
			2. Min	11.06		
11	14/1/2011	11.00	1. Max	37.25	28.65	20.03
			2. Min	20.05		
		14.00	1. Max	12.05	11.41	
			2. Min	10.77		
12	15/1/2011	11.00	1. Max	43.70	29.55	33.54
			2. Min	15.40		
		12.00	1. Max	55.30	42.50	

No	Tanggal	Waktu	Pengulangan	Intensitas Cahaya Matahari (klux)		HASIL
				Pembacaan	Rata-Rata	
			2. Min	29.70		
		14.00	1. Max 2. Min	34.72 22.41	28.57	
13	16/1/2011	10.30	1. Max 2. Min	37.25 20.46	28.86	20.44
		14.00	1. Max 2. Min	14.21 9.83	12.02	
14	17/1/2011	11.00	1. Max 2. Min	48.21 10.11	29.16	26.23
		12.00	1. Max 2. Min	55.77 20.33	38.05	
		14.00	1. Max 2. Min	15.21 7.76	11.49	
15	18/1/2011	11.00	1. Max 2. Min	34.38 16.42	25.40	18.46
		14.00	1. Max 2. Min	13.88 9.14	11.51	
16	19/1/2011	10.00	1. Max 2. Min	7.69 4.44	6.07	15.90
		11.00	1. Max 2. Min	31.14 24.20	27.67	
		14.00	1. Max 2. Min	15.82 12.09	13.96	
17	20/1/2011	11.30	1. Max 2. Min	18.62 7.88	13.25	10.62
		14.00	1. Max 2. Min	8.8 7.19	8.00	
18	21/1/2011	11.00	1. Max 2. Min	11.40 2.45	6.93	14.06
		14.00	1. Max 2. Min	23.98 18.42	21.20	

E.4 Tabel Hasil Pemeriksaan Temperatur, pH, dan Oksigen Terlarut pada Proses Pengolahan (*Feeding*)

No	Tanggal	Lokasi	Temperatur °C				pH				DO (mg/l)			
											mg/l			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	4/1/11	Inlet	28.1				7.72				3.905			
		Outlet	28.75	28.5	29.0	29.1	8.18	7.65	7.20	7.13	5.08	4.29	4.61	3.12
2	5/1/11	Inlet	26.8				7.77				3.885			
		Outlet	26.95	27.5	27.2	26.5	8.07	7.19	6.92	6.93	5.80	4.74	4.06	4.45
3	6/1/11	Inlet	27				7.48				1.470			
		Outlet	28.4	28.7	29	28.9	7.49	7.66	7.72	7.82	3.34	2.56	4.41	4.51
4	7/1/11	Inlet	29.7				7.51				0.440			
		Outlet	29.5	29.9	29.6	29.3	6.00	6.22	7.05	7.46	3.93	2.27	1.87	2.85
5	8/1/11	Inlet	29.1				7.52				0.635			
		Outlet	26.9	27.0	26.7	27.0	6.24	5.90	5.78	6.71	5.32	4.88	4.03	3.39
6	9/1/11	Inlet	28.7				7.51				0.385			
		Outlet	26.8	27.0	26.75	27.1	6.06	6.02	5.87	6.09	5.25	5.31	5.48	5.61
7	10/1/11	Inlet	28.6				7.56				0.800			
		Outlet	26.9	26.8	26.6	26.3	6.35	5.94	5.70	6.04	4.82	5.29	4.96	4.43
8	11/1/11	Inlet	31.5				7.68				0.920			
		Outlet	27.7	27.8	27.8	26.9	6.14	6.07	5.83	6.07	4.51	4.78	5.51	5.41
9	12/1/11	Inlet	32.2				7.6				0.965			
		Outlet	28.1	27.6	28.1	27.75	6.06	5.77	5.82	5.86	4.43	4.01	4.01	4.03
10	13/1/11	Inlet	29.3				7.72				2.500			
		Outlet	27.9	27.4	27.8	27.3	5.92	5.52	5.43	5.76	4.62	4.19	3.95	3.66
11	14/1/11	Inlet	28.5				7.78				3.240			
		Outlet	26.9	26.8	26.9	26.3	5.78	5.75	5.75	5.87	4.20	3.82	5.10	4.29
12	15/1/11	Inlet	31.2				7.64				1.220			
		Outlet	28.05	27.8	27.65	28.3	5.72	5.71	5.94	5.94	4.74	4.13	4.35	4.41
13	16/1/11	Inlet	29.8				7.60				1.740			
		Bak	28.1	28.1	28.25	28.0	6.28	5.71	5.67	5.72	4.22	4.08	4.03	4.12
14	17/1/11	Inlet	31.5				7.64				1.035			
		Bak	27.25	27.0	26.85	27.4	5.95	5.79	6.12	6.46	3.82	4.14	4.42	3.87
15	18/1/11	Inlet	30.0				7.63				2.005			
		Bak	27.6	27.5	27.2	27.5	6.67	6.47	5.72	6.04	3.72	4.02	4.78	4.63
16	19/1/11	Inlet	30.3				7.62				1.345			

No	Tanggal	Lokasi	Temperatur °C				pH				DO (mg/l)			
											mg/l			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
		Bak	26.6	26.5	26.8	26.4	5.85	5.52	5.53	5.67	4.46	4.34	4.62	4.61
17	20/1/11	Inlet	27.5				7.64				1.200			
		Bak	25.5	25.5	25.8	26.1	5.64	5.51	5.46	5.80	5.16	4.57	4.89	4.58
18	21/1/11	Inlet	25.6				7.74				2.305			
		Bak	26.15	26.1	26.3	26.7	5.56	5.71	5.53	5.61	5.37	4.40	4.89	5.03

E.5 Tabel Hasil Perhitungan Konsentrasi H_2CO_3 Berdasarkan Nilai pH Pada Masing-Masing Variasi Laju Alir

Bak 1

pH	$[H^+]$	P_{CO_2}	$[H_2CO_3]$ mol/l	$[H_2CO_3]$ mg/l
8.185	6.53131E-09	3.20015E-09	9.9205E-11	6.15068E-06
8.065	8.60994E-09	5.56122E-09	1.724E-10	1.06887E-05
7.495	3.1989E-08	7.67662E-08	2.3798E-09	0.000147545
5.965	1.08393E-06	8.81394E-05	2.7323E-06	0.169403834
6.240	5.7544E-07	2.4841E-05	7.7007E-07	0.047744487
6.060	8.70964E-07	5.69075E-05	1.7641E-06	0.109376302
6.350	4.46684E-07	1.49682E-05	4.6401E-07	0.028768898
6.135	7.32825E-07	4.02875E-05	1.2489E-06	0.077432492
6.060	8.70964E-07	5.69075E-05	1.7641E-06	0.109376302
5.915	1.21619E-06	0.000110961	3.4398E-06	0.213266791
5.780	1.65959E-06	0.000206619	6.4052E-06	0.397121348
5.720	1.90546E-06	0.000272377	8.4437E-06	0.523507893
6.280	5.24807E-07	2.06619E-05	6.4052E-07	0.039712135
5.950	1.12202E-06	9.4443E-05	2.9277E-06	0.181519478
6.665	2.16272E-07	3.50889E-06	1.0878E-07	0.006744088
5.850	1.41254E-06	0.000149682	4.6401E-06	0.287688985
5.635	2.31739E-06	0.000402875	1.2489E-05	0.774324916
5.560	2.75423E-06	0.000569075	1.7641E-05	1.093763015

Bak 2

pH	[H ⁺]	P CO ₂	[H ₂ CO ₃] mol/l	[H ₂ CO ₃] mg/l
7.645	2.26464E-08	3.84742E-08	1.1927E-09	7.39475E-05
7.190	6.45654E-08	3.1273E-07	9.6946E-09	0.000601067
7.665	2.16272E-08	3.50889E-08	1.0878E-09	6.74409E-05
6.075	8.41395E-07	5.31092E-05	1.6464E-06	0.102075904
5.895	1.2735E-06	0.000121666	3.7717E-06	0.233842386
6.020	9.54993E-07	6.84179E-05	2.121E-06	0.131499237
5.935	1.16145E-06	0.000101198	3.1371E-06	0.194501625
6.070	8.51138E-07	5.43463E-05	1.6847E-06	0.104453557
5.760	1.7378E-06	0.000226553	7.0231E-06	0.435434899
5.520	3.01995E-06	0.000684179	2.121E-05	1.314992373
5.745	1.79887E-06	0.000242756	7.5254E-06	0.466576901
5.705	1.97242E-06	0.000291857	9.0476E-06	0.560948814
5.710	1.94984E-06	0.000285213	8.8416E-06	0.54818006
5.790	1.62181E-06	0.000197319	6.1169E-06	0.379247943
6.460	3.46737E-07	9.01924E-06	2.796E-07	0.017334976
5.525	2.98538E-06	0.000668605	2.0727E-05	1.285059492
5.510	3.0903E-06	0.000716424	2.2209E-05	1.376966054
5.705	1.97242E-06	0.000291857	9.0476E-06	0.560948814

Bak 3

pH	[H ⁺]	P CO ₂	[H ₂ CO ₃] mol/l	[H ₂ CO ₃] mg/l
7.200	6.30957E-08	2.98655E-07	9.2583E-09	0.000574015
6.920	1.20226E-07	1.08435E-06	3.3615E-08	0.002084122
7.720	1.90546E-08	2.72377E-08	8.4437E-10	5.23508E-05
6.785	1.64059E-07	2.01916E-06	6.2594E-08	0.003880818
5.845	1.42889E-06	0.000153169	4.7482E-06	0.294390122
5.865	1.36458E-06	0.000139691	4.3304E-06	0.268486982
5.700	1.99526E-06	0.000298655	9.2583E-06	0.57401499
5.830	1.47911E-06	0.000164123	5.0878E-06	0.315444699
5.820	1.51356E-06	0.000171858	5.3276E-06	0.33031115
5.430	3.71535E-06	0.001035547	3.2102E-05	1.990321498
5.745	1.79887E-06	0.000242756	7.5254E-06	0.466576901
5.940	1.14815E-06	9.8894E-05	3.0657E-06	0.190074227
5.670	2.13796E-06	0.000342902	1.063E-05	0.65905739
6.120	7.58578E-07	4.31688E-05	1.3382E-06	0.08297041
5.720	1.90546E-06	0.000272377	8.4437E-06	0.523507893
5.525	2.98538E-06	0.000668605	2.0727E-05	1.285059492
5.460	3.46737E-06	0.000901924	2.796E-05	1.733497557
5.530	2.95121E-06	0.000653386	2.0255E-05	1.255807967

Bak 4

pH	[H ⁺]	P CO ₂	[H ₂ CO ₃] mol/l	[H ₂ CO ₃] mg/l
7.125	7.49894E-08	4.21861E-07	1.3078E-08	0.000810818
6.930	1.1749E-07	1.03555E-06	3.2102E-08	0.001990321
7.815	1.53109E-08	1.75861E-08	5.4517E-10	3.38005E-05
7.330	4.67735E-08	1.64123E-07	5.0878E-09	0.000315445
6.705	1.97242E-07	2.91857E-06	9.0476E-08	0.005609488
6.090	8.12831E-07	4.95644E-05	1.5365E-06	0.095262776
6.035	9.22571E-07	6.38513E-05	1.9794E-06	0.122722229
6.065	8.60994E-07	5.56122E-05	1.724E-06	0.106886593
5.860	1.38038E-06	0.000142945	4.4313E-06	0.274740848
5.760	1.7378E-06	0.000226553	7.0231E-06	0.435434899
5.870	1.34896E-06	0.000136512	4.2319E-06	0.262375473
5.940	1.14815E-06	9.8894E-05	3.0657E-06	0.190074227
5.715	1.92752E-06	0.000278721	8.6404E-06	0.535701958
6.460	3.46737E-07	9.01924E-06	2.796E-07	0.017334976
6.035	9.22571E-07	6.38513E-05	1.9794E-06	0.122722229
5.670	2.13796E-06	0.000342902	1.063E-05	0.65905739
5.800	1.58489E-06	0.000188439	5.8416E-06	0.362178974
5.605	2.48313E-06	0.000462562	1.4339E-05	0.889043956

E.6 Tabel Hasil Pemeriksaan Konsentrasi NH₃ Pada Proses Pengolahan (Feeding)

No	Tanggal	Waktu	Lokasi	Konsentrasi NH ₃ (mg/l)			
				Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4
1	4/1/2011	10.00	Inlet	47.7	47.7	47.7	47.7
		14.00	Outlet	33.5	34.6	37.4	41.8
2	5/1/2011	10.00	Inlet	51.3	51.3	51.3	51.3
		14.00	Outlet	29.80	35.7	29.4	36.7
3	6/1/2011	10.00	Inlet	52.7	52.7	52.7	52.7
		14.00	Outlet	22.2	33.7	37.6	40.4
4	7/1/2011	10.00	Inlet	49.5	49.5	49.5	49.5
		14.00	Outlet	4.9	10.3	19.9	41.4
5	8/1/2011	10.00	Inlet	49.1	49.1	49.1	49.1
		14.00	Outlet	7.6	8.7	6.8	22.2
6	9/1/2011	10.00	Inlet	50	50	50	50
		14.00	Outlet	4	4.6	3.5	3.8
7	10/1/2011	10.00	Inlet	49.90	49.90	49.90	49.90
		14.00	Outlet	4.8	4.1	3.3	3.3
8	11/1/2011	10.00	Inlet	52	52	52	52
		14.00	Outlet	4	3.7	4.4	4.1
9	12/1/2011	10.00	Inlet	47.6	47.6	47.6	47.6
		14.00	Outlet	3.5	3.9	3.5	5.1
10	13/1/2011	10.00	Inlet	51.9	51.9	51.9	51.9
		14.00	Outlet	6.6	5.4	8.2	10.00
11	14/1/2011	10.00	Inlet	51.3	51.3	51.3	51.3
		14.00	Outlet	5.50	4.9	7.9	8.90
12	15/1/2011	10.00	Inlet	46.4	46.4	46.4	46.4
		14.00	Outlet	6.1	6.00	6.2	6.90
13	16/1/2011	10.00	Inlet	47.2	47.2	47.2	47.2
		14.00	Outlet	5.7	6	6.1	7.50
14	17/1/2011	10.00	Inlet	46.8	46.8	46.8	46.8
		14.00	Outlet	5.80	6.6	6.20	7.20
15	18/1/2011	10.00	Inlet	46.3	46.3	46.3	46.3
		14.00	Outlet	4.00	6.3	6.80	7.50
16	19/1/2011	10.00	Inlet	47.4	47.4	47.4	47.4
		14.00	Outlet	4.30	6.8	6.80	6.40

No	Tanggal	Waktu	Lokasi	Konsentrasi NH ₃ (mg/l)			
				Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4
17	20/1/2011	10.00	Inlet	45.8	45.8	45.8	45.8
		14.00	Outlet	6.00	7.1	9.10	8.20
18	21/1/2011	10.00	Inlet	44.20	44.20	44.20	44.20
		14.00	Outlet	6.10	6.2	7.70	7.60

F. Uji Korelasi Pearson

Korelasi Pearson merupakan salah satu ukuran korelasi yang digunakan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan linier dari dua variabel. Dua variabel dikatakan berkorelasi apabila perubahan salah satu variabel disertai dengan perubahan variabel lainnya, baik dalam arah yang sama ataupun arah yang sebaliknya. Harus diingat bahwa *nilai koefisien korelasi yang kecil (tidak signifikan) bukan berarti kedua variabel tersebut tidak saling berhubungan*. Mungkin saja dua variabel mempunyai keeratan hubungan yang kuat namun nilai koefisien korelasinya mendekati nol, *misalnya pada kasus hubungan non linier*. Dengan demikian, **koefisien korelasi hanya mengukur kekuatan hubungan linier dan tidak pada hubungan non linier. Harus diingat pula bahwa adanya hubungan linier yang kuat di antara variabel tidak selalu berarti ada hubungan kausalitas, sebab-akibat.**

Sebelum melakukan uji korelasi, diperlukan uji distribusi. Jika distribusi data normal, maka selanjutnya digunakan uji parametrik. Sedangkan jika distribusi data tidak normal, kita harus menggunakan uji non parametrik. Uji distribusi data menggunakan Uji Kolmogorov Smirnov.

Uji Kolmogorov Smirnov merupakan pengujian normalitas yang banyak dipakai, terutama setelah adanya banyak program statistik yang beredar. Kelebihan dari uji ini adalah sederhana dan tidak menimbulkan perbedaan persepsi di antara satu pengamat dengan pengamat yang lain, yang sering terjadi pada uji normalitas dengan menggunakan grafik.

Tabel Uji distribusi data/normalitas Kolmogorov-Smirnov

		One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test			
		Intensitas_Cahaya	Suhu	pH	DO
N		18	18	18	18
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	21.0333	27.4333	6.1144	4.2094
	Std. Deviation	5.90869	1.01518	.68791	.78143
Most Extreme Differences	Absolute	.099	.110	.248	.228
	Positive	.092	.110	.248	.094
	Negative	-.099	-.100	-.190	-.228
Kolmogorov-Smirnov Z		.421	.465	1.052	.966
Asymp. Sig. (2-tailed)		.994	.982	.218	.308

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

Jadi, uji Kolmogorov Smirnov adalah uji beda antara data yang diuji normalitasnya dengan data normal baku. Seperti pada uji beda biasa, jika signifikansi di bawah 0,05 berarti terdapat perbedaan yang signifikan, dan jika signifikansi di atas 0,05 maka tidak terjadi perbedaan yang signifikan. Penerapan pada uji Kolmogorov Smirnov adalah bahwa jika signifikansi (lihat nilai Asymp, sig) di bawah 0,05 berarti data yang akan diuji mempunyai perbedaan yang signifikan dengan data normal baku, berarti data tersebut tidak normal. Lebih lanjut, jika signifikansi di atas 0,05 maka berarti tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara data yang akan diuji dengan data normal baku.

Dari hasil uji distribusi data di atas, menunjukkan bahwa data-data terdistribusi normal. Langkah selanjutnya adalah dengan melakukan uji korelasi. Tabel-tabel di bawah ini merupakan hasil uji korelasi antar parameter-parameter lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga.

Tabel 1. Korelasi Intensitas cahaya vs Suhu

		Correlations	
		Intensitas_Cahaya	Suhu
Intensitas_Cahaya	Pearson Correlation	1	0.365
	Sig. (2-tailed)		0.136
	N	18	18
Suhu	Pearson Correlation	0.365	1
	Sig. (2-tailed)	0.136	
	N	18	18

Tabel 2. Korelasi Intensitas cahaya vs pH

		Correlations	
		Intensitas_Cahaya	pH
Intensitas_Cahaya	Pearson Correlation	1	0.182
	Sig. (2-tailed)		0.470
	N	18	18
pH	Pearson Correlation	0.182	1
	Sig. (2-tailed)	0.470	
	N	18	18

Tabel 3. Korelasi Intensitas cahaya vs DO

		Correlations	
		Intensitas Cahaya	DO
Intensitas Cahaya	Pearson Correlation	1	0.121
	Sig. (2-tailed)		0.632
	N	18	18
DO	Pearson Correlation	0.121	1
	Sig. (2-tailed)	0.632	
	N	18	18

Tabel 4. Korelasi Suhu vs pH

		Suhu	pH
Suhu	Pearson Correlation	1	0.528*
	Sig. (2-tailed)		0.024
	N	18	18
pH	Pearson Correlation	0.528*	1
	Sig. (2-tailed)	0.024	
	N	18	18

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tabel 5. Korelasi Suhu vs DO

		Suhu	DO
Suhu	Pearson Correlation	1	-0.669**
	Sig. (2-tailed)		0.002
	N	18	18
DO	Pearson Correlation	-0.669**	1
	Sig. (2-tailed)	0.002	
	N	18	18

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Tabel 6. Korelasi pH vs DO

		pH	DO
pH	Pearson Correlation	1	-0.289
	Sig. (2-tailed)		0.245
	N	18	18
DO	Pearson Correlation	-0.289	1
	Sig. (2-tailed)	0.245	
	N	18	18

Tabel 7. Intensitas Cahaya vs Kerapatan Sel

Correlations

		Intensitas Cahaya	Kerapatan Sel
Intensitas Cahaya	Pearson Correlation	1	-.361
	Sig. (2-tailed)		.141
	N	18	18
Kerapatan Sel	Pearson Correlation	-.361	1
	Sig. (2-tailed)	.141	
	N	18	18

Tabel 8. Temperatur vs Kerapatan Sel

Correlations

		Kerapatan Sel	Suhu
Kerapatan Sel	Pearson Correlation	1	-.760**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	18	18
Suhu	Pearson Correlation	-.760**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	18	18

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Tabel 9. pH vs Kerapatan Sel

Correlations

		Kerapatan Sel	pH
Kerapatan Sel	Pearson Correlation	1	-.598**
	Sig. (2-tailed)		.009
	N	18	18
pH	Pearson Correlation	-.598**	1
	Sig. (2-tailed)	.009	
	N	18	18

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Tabel 10. DO vs Kerapatan Sel

		Correlations	
		DO	Kerapatan Sel
DO	Pearson Correlation	1	.301
	Sig. (2-tailed)		.225
	N	18	18
Kerapatan Sel	Pearson Correlation	.301	1
	Sig. (2-tailed)	.225	
	N	18	18

Tabel 11. Konsentrasi NH₃ vs Kerapatan Sel

		Correlations	
		Kerapatan Sel	Konsentrasi NH ₃
Kerapatan Sel	Pearson Correlation	1	-.505*
	Sig. (2-tailed)		.033
	N	18	18
Konsentrasi NH ₃	Pearson Correlation	-.505*	1
	Sig. (2-tailed)	.033	
	N	18	18

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tabel 12. H₂CO₃ Bak 2 vs Kerapatan sel

		Correlations	
		Kerapatan Sel	Konsentrasi H ₂ CO ₃ di Bak 2
Kerapatan Sel	Pearson Correlation	1	.579*
	Sig. (2-tailed)		.012
	N	18	18
Konsentrasi H ₂ CO ₃ di bak 2	Pearson Correlation	.579*	1
	Sig. (2-tailed)	.012	
	N	18	18

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tabel 13. H₂CO₃ Bak 1 vs Kerapatan sel

		Correlations	
		Kerapatan Sel	Konsentrasi H ₂ CO ₃ di Bak 1
Kerapatan Sel	Pearson Correlation	1	.652**
	Sig. (2-tailed)		.003
	N	18	18
Konsentrasi H ₂ CO ₃ di bak 1	Pearson Correlation	.652**	1
	Sig. (2-tailed)	.003	
	N	18	18

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Tabel 14. H₂CO₃ Bak 3 vs Kerapatan sel

		Correlations	
		Kerapatan Sel	Konsentrasi H ₂ CO ₃ di Bak 3
Kerapatan Sel	Pearson Correlation	1	.621**
	Sig. (2-tailed)		.006
	N	18	18
Konsentrasi H ₂ CO ₃ di bak 3	Pearson Correlation	.621**	1
	Sig. (2-tailed)	.006	
	N	18	18

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Tabel 15. H₂CO₃ Bak 4 vs Kerapatan sel

		Correlations	
		Kerapatan Sel	Konsentrasi H ₂ CO ₃ di bak 4
Kerapatan Sel	Pearson Correlation	1	.726**
	Sig. (2-tailed)		.001
	N	18	18
Konsentrasi H ₂ CO ₃ di bak 4	Pearson Correlation	.726**	1
	Sig. (2-tailed)	.001	
	N	18	18

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Nilai Signifikansi:

Jika Sig. $< 0,05$ = terdapat korelasi yang bermakna antara dua variabel yg diuji

Jika Sig. $> 0,05$ = tidak terdapat korelasi yg bermakna antara 2 variabel yg diuji

Nilai Korelasi (nilai r = kekuatan korelasi):

Nilai: 0 – 0,199 = sangat lemah

0,20 – 0,399 = lemah

0,40 – 0,599 = sedang

0,60 – 0,799 = kuat

0,80 – 1 = sangat kuat

Tanda positif (+) dan negatif (-) menunjukkan arah korelasi, yaitu sebagai berikut:

Jika negatif, berarti yg satu naik, yg satu turun.

Jika positif (+), berarti sama-sama naik atau sama-sama turun.

G. Koefisien Determinasi (r^2)

Selain koefisien korelasi, dalam teknik analisis korelasi linier, terdapat pula koefisien determinasi (ada yang menyebut koefisien penentu sampel). Koefisien determinasi dilambangkan dengan r^2 . Nilai ini menyatakan proporsi variasi keseluruhan dalam nilai variabel dependen yang dapat diterangkan atau diakibatkan oleh hubungan linier dengan nilai variabel independen, selain itu diterangkan oleh peubah yang lain (galat atau peubah lainnya). Misalkan nilai $r^2 = 96\%$, maka nilai variabel dependen yang dapat diterangkan oleh variabel independen adalah sebesar 96%, sedangkan 4% sisanya diterangkan oleh galat (error) atau pengaruh variabel yang lain.

Nilai dari koefisien determinasi adalah **kuadrat dari nilai koefisien korelasi**

Tabel 16. Koefisien Determinasi dari masing-masing parameter

	Kerapatan Sel		
	α	r	r^2
Intensitas Cahaya	0.141	- 0.361	13.03%
Suhu	0.000*	- 0.760	57.76%
Ph	0.009*	- 0.598	35.76%
DO	0.225	0.301	9.06%
Konsentrasi NH₃	0.033*	- 0.505	25.50%

Tabel 17. Koefisien Determinasi dari Variasi laju Alir

	Kerapatan Sel		
	α	r	r^2
[H₂CO₃] Bak 1	0.003*	0.652	42.51%
[H₂CO₃] Bak 2	0.012*	0.579	33.52%
[H₂CO₃] Bak 3	0.006*	0.621	38.56%
[H₂CO₃] Bak 4	0.001*	0.726	52.71%



Universitas Indonesia

LAMPIRAN 3

DATA SEKUNDER



Universitas Indonesia



PEMERINTAH PROVINSI SUMATERA SELATAN
DINAS TENAGA KERJA
BALAI HIPERKES DAN KESELAMATAN KERJA PROVINSI SUMATERA SELATAN
JL. JENDERAL A. YANI NO.108-16 ULU PALEMBANG 30265
TELP. (0711) 511607, FAX. (0711) 511607

FORMULIR DATA KUALITAS UDARA EMISI

Nomor : 742 /Lab/09/2010

1. Perusahaan / Lokasi : PT. PLN (Persero) PEMBANGKITAN SUMBAGSEL
: SEKTOR PEMBANGKITAN BUKIT ASAM
2. Tanggal Pengukuran : 10 DESEMBER 2010
3. Nomor Unit Pembangkit : 1. (Gabungan Duct I dan II)
4. Data Stack : Tinggi : 110 Meter
In Diameter : 4,78 Meter
5. Laju Alir : 58,64 m³ / dt
6. Data Hasil Pengukuran

No	Parameter	Satuan	Kadar	Baku Mutu Emisi (BME)
1	NO ₂	(mg/Nm ³)	314,07	850
2	SO ₂	(mg/Nm ³)	198,67	750
3	Partikel	(mg/Nm ³)	93,6	150
4	Opasitas	(%)	15	20

BME : Baku Mutu Emisi sesuai dengan Keputusan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 15 tahun 2005.

Palembang, 20 Desember 2010

Kepala Balai,



[Signature]
Ir. H. Akil Majid, MT
NIP. 195907171986031012

 PT. PLH (PERSERO) SEKTOR BUKIT ASAM	HASIL PERFORMANCE TEST LABORATORIUM PLTU SEKTOR BUKIT ASAM	Nomor : FR-PT-SBAM-32-34
		Revisi : 00
		Tanggal : 01 MARET 2010
		Halaman : 03

Nomor : 105 / LAB / XII / G / 2010
 Hari : Selasa
 Tanggal : 21 Desember 2010
 Unit : I (Satu)

NO.	JAM	CO ₂	O ₂	CO	SATUAN	BEBAN	KETERANGAN
						MW	
1.		16,00	5,00	-	% VOL		Gas CO tidak terdeteksi oleh alat Orsat O ₂ di recorder :
2.	10.30	16,00	4,50	-	% VOL	65,0	
3.		15,00	5,00	-	% VOL		
Rata - rata		15,67	4,83	-	% VOL		

NO.	JAM	CO ₂	O ₂	CO	SATUAN	BEBAN	KETERANGAN
						MW	
1.		15,00	5,00	-	% VOL		Gas CO tidak terdeteksi oleh alat Orsat O ₂ di recorder :
2.	10.45	16,00	5,50	-	% VOL	65,0	
3.		15,00	4,00	-	% VOL		
Rata - rata		15,33	4,83	-	% VOL		

NO.	JAM	CO ₂	O ₂	CO	SATUAN	BEBAN	KETERANGAN
						MW	
1.		15,00	5,00	-	% VOL		Gas CO tidak terdeteksi oleh alat Orsat O ₂ di recorder :
2.	11.00	16,00	5,50	-	% VOL	65,0	
3.		15,00	4,50	-	% VOL		
Rata - rata		15,33	5,00	-	% VOL		

LOKASI	CARBON TAK TERBAKAR		KETERANGAN
	FLY ASH	BOTTOM ASH	
Unit I	0,84	1,68	Range : < 5.0 %

DATA - DATA LAIN

Coal Flow : - Ton /Jam
 FOA : - Ton /Jam
 Combustion Air Flow : - Nm³ / H
 FOB : - Ton /Jam
 FOC : - Nm³ / H

Primary Air Pressure (Tidak ada data)

FOA : - Nm³ / H
 FOB : - Nm³ / H
 FOC : - Nm³ / H

Primary A

FOA : - Nm³ / H
 FOB : - Nm³ / H
 FOC : - Nm³ / H

Demikian laporan hasil analisa Performan Test ini dibuat dengan sebenarnya.
 Atas perhatiannya kami ucapkan terimakasih.

Mengetahui,

Tanjung Enim, 27 Desember 2010
 Dilaporkan Oleh,

AGUS WAHYUDIN
 SUPERVISOR KIMIA

DEDI HERMAWAN
 Koord. Kimia & Lab



PEMERINTAH PROVINSI SUMATERA SELATAN
DINAS TENAGA KERJA
 BALAI HIPERKES DAN KESELAMATAN KERJA PROVINSI SUMATERA SELATAN
 JL. JENDERAL A. YANI NO.108-16 ULU PALEMBANG 30265
 TELP. (0711) 511607, FAX. (0711) 511607

FORMULIR DATA KUALITAS UDARA AMBIENT

Nomor : 295 / Lab / 12 / 2010

1. Perusahaan / Lokasi : PT. PLN (Persero) PEMBANGKITAN SUMBAGSEL
 : SEKTOR PEMBANGKITAN BUKIT ASAM
2. Tanggal Pengukuran : 10 DAN 11 DESEMBER 2010
3. Data Hasil Pengukuran :

Titik Lokasi	Nama Lokasi	Tingkat Kebisingan (dBA)	Keterangan
1	Dalam Pagar ± 700 meter dari sumber arah Barat Daya	46	Dalam Pagar PLTU
2	Dalam Pagar ± 500 meter dari sumber arah Barat Daya	56	Dalam Pagar PLTU
3	Samping Stack dan Coal Storage (Sumber)	62	Dalam Pagar PLTU
4	Komplek PLTD Bukit Asam ± 700 meter Arah Tenggara	45	Dalam Pagar PLTU
5	Komplek Perumahan PLN Blok Puncak II ± 1.500 meter arah Tenggara	44	Pemukiman
6	Desa Lingga ± 1.000 meter arah Tenggara	43	Pemukiman

Baku Mutu Kebisingan 70 dBA untuk dalam Pagar PLTU

(Keputusan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 17 Tahun 2005) 55 DBA untuk Perumahan

Palembang, 20 Desember 2010

Kepala Balai,



SISTEM MANAJEMEN MUTU (SMT)	No. Formulir	FR-PT-SBAM-41-03
	Revisi	00
	Tanggal	01 Maret 2010
	Halaman	7

**DATA PEMANTAUAN DAN PENGUKURAN
UDARA AMBIENT & KEBISINGAN**

PERIODE : BULAN DESEMBER 2010

TITIK LOKASI	HASIL PENGUKURAN PARAMETER UTAMA						DATA PENDUKUNG CUACA *)				
	Kebisingan Rata-rata dBA	Debu $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	SO ₂ $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	NO ₂ $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	CO $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	Hidro- karbon $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	KEC. ANGIN	ARAH ANGIN DOMINAN	SUHU UDARA ° C	KELEM- BABAN %	KEADAAN CUACA
1	46	114	41	39	659	ttd	0,1 - 1,9	Barat Laut	20 - 34	41,9 - 65,2	Cerah
2	56	100	52	52	646	ttd	0,2 - 2,4	Timur	20 - 35	36,5 - 59,4	Cerah
3	62	118	46	54	755	ttd	0,5 - 2,8	Barat	23 - 34	36,5 - 57,1	Cerah
4	45	38	52	55	890	ttd	0,6 - 1,8	Utara	20 - 35	36,2 - 58,6	Cerah
5	44	42	47	39	632	ttd	0,2 - 1,6	Timur	20 - 28	40,9 - 50,2	Cerah
6	43	59	46	37	584	ttd	0,2 - 1,8	Barat	19 - 32	46,3 - 57,5	Cerah
	70 / 55	230	365	150	10000	160	← Baku Mutu Lingkungan (BML)				

Keterangan :

- Pengujian kualitas udara ambient dilakukan oleh Balai Hiperkes & Keselamatan Kerja Prop. Sumsel
- Baku mutu Udara Ambient dan Baku Tingkat Kebisingan sesuai Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 17 Tahun 2005
Baku mutu Kebisingan titik 1- 4 = 70 dB sedangkan titik 5 - 6 = 55 dB
- Lokasi titik sampling sesuai dengan dokumen RPL.
U-1 : Dalam pagar arah ±700 meter dari sumber dampak arah barat daya.
U-2 : Dalam pagar arah ±500 meter dari sumber dampak arah barat daya.
U-3 : Sampling stack dan coal storage (sumber dampak).
U-4 : Komplek PLTD Bukit Asam ± 700 meter dari sumber dampak arah tenggara.
U-5 : Komplek Perumahan PLN Blok Puncak II ± 1500 meter dari sumber dampak arah tenggara.
U-6 : Desa Lingga II ± 1000 meter dari sumber dampak arah tenggara.

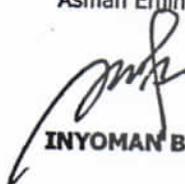
*) Data cuaca diukur pada saat analisa debu.

□ : Parameter yang melebihi baku mutu

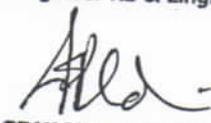
KESIMPULAN :

Kualitas udara ambient site PLTU Bukit Asam dan sekitarnya hasil pemantauan periode ini keseluruhan parameter memenuhi baku mutu Kep. Gubernur Sumsel No.17 Tahun 2005 maupun PP No.41 Tahun 1999.

Mengetahui,
Asman Enjiniring


INYOMAN BUDA

Tanjung Enim, 05 Januari 2011
Dibuat Oleh,
Asistant Engineer K2 & Lingkungan


ASRULUDIN MALIK

LAMPIRAN 4

HASIL PEMERIKSAAN LABORATORIUM



Universitas Indonesia



PEMERINTAH KABUPATEN MUARA ENIM
UPT LABORATORIUM LINGKUNGAN
BADAN LINGKUNGAN HIDUP

Jl. Cut Nyak Dien No. 39 Telp. (0734) 421774 Fax : (0734) 421996
MUARA ENIM

Kode Pos 31313

SURAT TANDA UJI!

Nomor : 162/STU-LME/2011

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Jenis Contoh : Air Limbah
No SPPC : 159/42/SPPC-LME/XII/2010
Kode Contoh : 23.30.XII.10
Nama Pelanggan : Sdr. Dewi Istianie
Jenis Industri/kegiatan : Penelitian
Petugas Pengambil Contoh : Sdr. Dewi Istianie
Tanggal Terima Contoh : 30 Desember 2010
Tanggal Analisa Contoh : 30 Desember 2010 – 7 Januari 2011

HASIL PENGUJIAN

NO	PARAMETER	SATUAN	BAKU MUTU LIMBAH DOMESTIK	HASIL UJI	KETERANGAN
				23.30.XII.10	
I	Fisika				
1.	TSS	mg/l	100	213,00	SNI 06-6989.3.2004
2.	Temperatur	°C	-	22,8	Elektrometri
II	Kimia				
3.	pH (Lab)	-	6 - 9	7,17	SNI 06-6989.11.2004
4.	COD	mg/l	-	317,313	SNI 06-6989.2.2004
5.	BOD ₅	mg/l	50	138,974	Ik. No. 05/LME/2009
6.	DO ₀	mg/l	-	1,655	SNI. 6989.14-2004
7.	Nitrat	mg/l	-	0,21	Spektrometri
8.	Nitrit	mg/l	-	0,0096	Spektrometri
9.	Phosfat	mg/l	-	12,24	Spektrometri

Keterangan :

23.30.XII.10 : Limbah Septic Tank

* Baku Mutu Limbah Cair untuk Air Limbah Domestik berdasarkan Peraturan Gubernur Sumsel No : 18 Tahun 2005

Muara Enim, 7 Januari 2011

KEPALA UPT LABORATORIUM LINGKUNGAN
BADAN LINGKUNGAN HIDUP
KABUPATEN MUARA ENIM



NATASHA S.Si
Penata Muda Tk. I
19800717 200501 2 006

Catatan :

- Surat Tanda Uji ini tidak boleh digandakan dan disebarluaskan tanpa persetujuan tertulis dari Laboratorium Uji, kecuali secara lengkap dan hanya berlaku untuk contoh tersebut diatas

Pemanfaatan emisi..., Dewi Istianie, Pascasarjana UI, 2011.



PEMERINTAH KABUPATEN MUARA ENIM
UPT LABORATORIUM LINGKUNGAN
BADAN LINGKUNGAN HIDUP

Jl. Cut Nyak Dien No. 39 Telp. (0734) 421774 Fax : (0734) 421996
MUARA ENIM

Kode Pos 31313

SURAT TANDA UJI

Nomor : 04/STU-LME/2011

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Jenis Contoh : Air Limbah
No SPPC : 04/42/SPPC-LME/2011
Kode Contoh : 04a.04.l.11
04b.04.l.11
04c.04.l.11
04d.04.l.11
04e.04.l.11
Nama Pelanggan : Sdr. Dewi Istianie
Jenis Industri/kegiatan : Penelitian
Petugas Pengambil Contoh : Sdr. Dewi Istianie
Tanggal Terima Contoh : 4 Januari 2011
Tanggal Analisa Contoh : 4 Januari - 12 Januari 2011

HASIL PENGUJIAN

NO	PARAMETER	SATUAN	BAKU MUTU LIMBAH DOMESTIK	HASIL UJI					KETERANGAN
				04a	04b	04c	04d	04e	
I	Fisika								
1.	TSS	mg/l	100	-	-	-	-	89,00	SNI 06-6989.3.2004
II	Kimia								
2.	COD	mg/l	-	550,725	610,497	478,34	819,428	830,396	SNI 06-6989.2.2004
3.	BOD ₅	mg/l	50	-	-	-	-	269,64	IK. No. 05/LME/2009
4.	Nitrat	mg/l	-	-	-	-	-	4,72	Spektrometri
5.	Nitrit	mg/l	-	-	-	-	-	1,0618	Spektrometri
6.	Phosfat	mg/l	-	-	-	-	-	17,42	Spektrometri

Keterangan :

1. 04a.04.l.11 : Limbah Septic Tank 1
2. 04b.04.l.11 : Limbah Septic Tank 2
3. 04c.04.l.11 : Limbah Septic Tank 3
4. 04d.04.l.11 : Limbah Septic Tank 4
5. 04e.04.l.11 : Limbah Septic Tank 5

* Baku Mutu Limbah Cair untuk Air Limbah Domestik berdasarkan Peraturan Gubernur Sumsel No : 18 Tahun 2005

Muara Enim, 12 Januari 2011



Catatan :

- Surat Tanda Uji ini tidak boleh digandakan dan disebarluaskan tanpa persetujuan tertulis dari Laboratorium Uji, kecuali secara lengkap dan hanya berlaku untuk contoh tersebut diatas.
- Pemanfaatan emisi..., Dewi Istiyane, Pascasarjana UI, 2011.