

FIKSASI EMISI KARBON DIOKSIDA DENGAN KULTIVASI MIKROALGA MENGGUNAKAN NUTRISI DARI AIR LIMBAH INDUSTRI SUSU

EMISSION OF CARBON DIOXIDE FIXATION BY MICROALGAE CULTIVATION USING DAIRY MILK WASTEWATER AS NUTRIENTS

Adi Mulyanto dan Titin Handayani

Balai Teknologi Lingkungan, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi,
Gedung 820 PUSPIPTEK Serpong, Tangerang – Indonesia
e-mail: htitin2557@gmail.com

diajukan: 27/11/2014, direvisi: 02/03/2015, disetujui: 06/04/2015

Abstract

The study of carbon dioxide fixation by microalgae using dairy milk wastewater has been implemented. Microalgae *Chlorella vulgaris* used is that of green algae are able for biological waste water treatment. Microalgae cultivated in bioreactors raceway-type ponds. *C. vulgaris* can be grow non the waste water by addition of CO₂ emission from boiler with the approximate concentration of 5.5% volume. Nutrients derived from waste water decreased until day 10, especially phosphorus was no longer qualified for the growth of microalgae. Because of that the addition of phosphorus through NPK amounting to 35mg/L was done on day 10. CO₂ input affects the pH value. Feeding of 4.5L CO₂/min raised the pH up to 7. The efficiency of CO₂ absorbed by microalgae *C. vulgaris* reached 96% with CO₂ feeding in average of 0.2g/L/day and produced biomass at the end of the observation as much as 0.4mg/L.

Keywords: Raceway ponds, dairy industry, microalgae, the fixation of carbon dioxide, wastewater, nutrients.

Abstrak

Penelitian fiksasi karbon dioksida dengan mikroalga ini menggunakan air limbah industri susu. Mikroalga yang digunakan adalah *Chlorella vulgaris* yaitu ganggang hijau yang mampu mengolah limbah secara biologis. Mikroalga dibudidayakan di dalam bioreaktor bentuk kolam tipe *raceway*. *C. vulgaris* dapat tumbuh pada air limbah industri susu dengan pemberian emisi CO₂ sekitar 5,5%. Unsur kimia air limbah mengalami penurunan hingga pada hari ke 10, terutama fosfor tidak memenuhi syarat lagi untuk pertumbuhan mikroalga. Penambahan NPK 35 mg/L ke dalam nutrient pada hari ke 10 dilakukan untuk mengatasi defisiensi fosfor. Pemberian debit 4,5 L CO₂/menit meningkatkan pH hingga 7. Efisiensi penyerapan CO₂ oleh mikroalga *C. vulgaris* mencapai 96% dengan pemberian CO₂ rata-rata 0,2 g/L/hari dan menghasilkan biomasa pada akhir pengamatan sebanyak 0,4 mg/L.

Kata kunci: Kolam kultur *Raceway*, industri susu, mikroalga, fiksasi karbon dioksida, air limbah, nutrisi.

PENDAHULUAN

Pemanasan global merupakan fenomena peningkatan temperatur global dari tahun ke tahun karena terjadinya efek rumah kaca yang disebabkan oleh meningkatnya emisi gas-gas seperti karbondioksida (CO₂), metana (CH₄), dinitrooksida (N₂O) dan CFC, sehingga energi matahari terperangkap dalam atmosfer bumi (Schneider 1989).

Meningkatnya jumlah emisi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer disebabkan oleh kegiatan manusia di berbagai sektor, antara

lain energi. Penggunaan bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batubara dan gas alam dalam berbagai kegiatan, misalnya pada pembangkitan listrik, transportasi dan industri, akan memicu bertambahnya jumlah emisi GRK di atmosfer. Walaupun sama-sama menghasilkan emisi GRK, namun emisi yang dihasilkan dari penggunaan ketiga jenis bahan bakar fosil tersebut berbeda. Untuk menghasilkan energi sebesar 1 kWh, pembangkit listrik yang menggunakan batubara mengeluarkan emisi sekitar 940 gr CO₂, sedangkan Pembangkit listrik yang menggunakan

minyak bumi dan gas alam, mengeluarkan emisi masing-masing sekitar 798 dan 581 gram CO₂(Meiviana, 2004).

Seiring dengan meningkatnya konsentrasi CO₂ antropogenik di atmosfer, berbagai upaya rekayasa telah dilakukan untuk menangkap dan memendam CO₂ atmosferik melalui teknologi *carbon capture and storage* (CCS) dari sumber emisi. Salah satu teknologi CCS yang dapat diterapkan adalah biofiksasi, yaitu menangkap dan menyimpan CO₂ atmosferik dengan meningkatkan volume dan kualitas fotosintesis melalui bioreaktor mikroalga (Negoro, et al. 1993, Hamasaki, et al. 1994).

Mikroalga adalah tanaman air yang dapat digunakan untuk menyerap emisi CO₂ dan kandungan minyaknya tinggi (Borowitzka, 1998). Kultur mikroalga untuk fiksasi CO₂ dapat diperoleh dari air limbah yang diperkaya dengan nutrisi seperti nitrogen dan fosfor. Penambahan pupuk NPK dengan dosis yang tepat untuk pertumbuhan mikroalga tidak membahayakan lingkungan perairan (Yun et al., 1997).

Biofiksasi CO₂ dengan mikroalga didasarkan pada penggunaan energi matahari melalui fotosintesis (Steenblok, 2000). Penelitian ini menggunakan mikroalga untuk penyerapan emisi CO₂ industri merupakan langkah penanggulangan dampak pencemaran udara yang diakibatkan oleh aktivitas industri.

Dalam studi ini, air limbah industri dialirkan ke dalam kolam untuk kultur mikroalga, sehingga pendekatan ini ditujukan untuk fiksasi CO₂ dari gas buang dan pemanfaatan air limbah industri untuk nutrisi mikroalga *Chlorella* sp yang dibudidayakan pada bioreaktor kolam kultur jenis *raceway*.

Emisi CO₂ untuk kultivasi mikroalga dilaporkan sangat berpotensi menggunakan sistem bioreaktor bentuk kolam (Stepan et al., 2002) tetapi belum pernah dilakukan di Indonesia. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan memanfaatkan CO₂ untuk kultur mikroalga *Chlorella* sp menggunakan sistem kolam jenis *raceway*. Limbah industri pengolahan susu digunakan untuk memperkaya nutrisi.

METODE

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Industri pengolahan susu cair (PT Indolakto) Cicurug Sukabumi pada tahun 2012. Industri susu cair PT Indolakto, Sukabumi menggunakan 3 ketel kukus yang berbahan bakar *heavy oil*. Bahan bakar ini harus disimpan pada temperatur sekitar 38°C dan pada saat akan dipompa harus dipanaskan lebih lanjut antara suhu 66-121°C. Masing-masing ketel kukus berkapasitas 5 ton uap per jam. Dalam pengoperasiannya setiap hari, PT. Indolakto menggunakan 2 ketel kukus, sementara yang satu ada dalam posisi *stand by*. Tekanan operasi dari boiler mencapai 8 bar. Suhu pada gas buang mencapai 230°C. Gas buang dikeluarkan melalui cerobong (menara) setinggi kurang lebih 10 meter.

Untuk penelitian pemanfaatan CO₂ dari cerobong ketel kukus yang dilakukan di PT. Indolakto, Cicurug, Sukabumi, tidak dilakukan proses desulfurisasi. Hal itu disebabkan karena PT. Indolakto menggunakan gas dari Perusahaan Gas Negara.

Air limbah yang digunakan untuk nutrisi diambil pada kolam IPAL terakhir dari PT Indolakto. Analisis sampel unsur kimia nutrisi yaitu N, P dan K dari air limbah dilakukan di Laboratorium Kimia dan Laboratorium Ekotoksikologi Balai Teknologi Lingkungan-BPPT, gedung 412, Puspiptek, Serpong.

Strain Mikroalga

Strain mikroalga *Chlorella vulgaris* yang telah dikultivasi dalam medium Benneck diaklimatisasi dan dikultivasi pada kolam menggunakan medium yang mengandung pupuk NPK 35 mg/L. Kepadatan awal sekitar 300.000 sel/ml, dihitung menggunakan *haemocytometer*.

Kolam Kultur *raceway*

Kolam kultur *raceway* adalah kolam yang diberi perlengkapan pedal/baling-baling untuk proses pengadukan,

penggerak elektromotor, pipa pemasukan gas CO₂, pipa pemasukan air tawar, dan nutrisi. Kolam kultur mikroalga terbuat dari bahan *stainless steel* dengan volume 1.000 L. Kedalaman air di dalam kolam 20 cm. Kolam dilengkapi dengan tutup transparan yang terbuat dari mika untuk memperkecil resiko kontaminasi terhadap kultur mikroalga. Air yang digunakan adalah air tawar.

Kultivasi Mikroalga

Kultivasi mikroalga dilakukan di dalam kantong plastik berukuran 20L yang dilengkapi dengan aerasi. Media yang digunakan untuk perbanyak mikroalga adalah air hasil mikrofiltrasi yang sudah diberi pupuk NPK dengan kadar 35 mg/L. Dosis NPK ini berdasarkan hasil penelitian sebelumnya (Handayani et al., 2014). Setelah berumur antara 3-4 minggu, kelimpahan kultur dapat mencapai sekitar 6×10^6 sel/ml media. Pada tingkat kepadatan tersebut mikroalga dapat dipindahkan ke kolam kultur volume 1000 L.

Kolam kultur diisi dengan 950 L air yang sudah disaring menggunakan proses ultrafiltrasi untuk meminimisasi terjadinya kontaminasi terhadap kultur mikroalga. Ke dalam kolam dimasukkan 50 L kultur yang telah diaklimatisasi. Setelah 3 minggu masa kultur, mikroalga mulai diperlakukan dengan pemberian emisi CO₂ pada kolam kultur volume 1000 L.

Pencatuan Emisi CO₂ ke dalam Kolam Kultur

Pencatuan CO₂ ke dalam kolam diperlukan persediaan CO₂ yang ditempatkan di dalam *gas holder* terbuat dari plastik. Konsentrasi CO₂ di dalam kantong plastik adalah 6%. Untuk menghisap gas CO₂, digunakan kompresor. Kadar CO₂ nya dengan alat portable multi gas detektor merk Riken type RX-515..

Pemantauan Operasional Kolam Kultur

Pengambilan contoh dari kolam kultur yang dilengkapi dengan pipa dilakukan 3 kali, yaitu pada pukul 09.00, 12.00, dan 15.00 WIB. Parameter yang diukur ialah

konsentrasi gas oksigen dan CO₂. Pengukuran CO₂ dengan portable multi gas detektor merk Riken type RX-515.

Pengukuran suhu di sekitar kolam kultur dilakukan setiap hari pukul 9.00 dan 15.00 WIB. Intensitas cahaya diukur setiap hari pukul 09.00 dan 15.00 WIB menggunakan alat Light Meter model LX-101A.

Pertumbuhan mikroalga sebagai hasil respon terhadap emisi CO₂ diamati dengan penghitungan secara mikroskopis setiap hari dari jumlah sel per milimeter dengan *haemocytometer*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pencatuan CO₂

Suhu emisi dari ketel kukus mempunyai suhu yang tinggi, yaitu sekitar 210°C, sehingga perlu dilakukan penurunan suhu hingga sesuai untuk pertumbuhan mikroalga. Gas tersebut ditampung dalam kantong gas untuk dilakukan pengukuran kualitas gas yaitu berapa konsentrasi emisi CO₂. Apabila sudah diketahui kualitas emisi gas maka dengan menggunakan sebuah aerator, gas dialirkan ke dalam penampung gas yang siap untuk dimasukkan ke dalam kolam kultur.

Sistem kolam kultur yang dilengkapi dengan alat penukar panas menunjukkan kemampuan dalam menurunkan suhu gas buang hingga mencapai suhu yang dapat diadaptasi oleh mikroalga (Kraus and Bejan 2003).

Sistem pengaliran gas dari penampung ke dalam kolam kultur diatur menggunakan pengatur waktu. Sebuah aerator digunakan untuk mengalirkan gas ke dalam kolam. Proses pengadukan kolam dan pemasukan gas ke dalam kolam dilakukan bersamaan dan diatur oleh sebuah pengatur waktu, sehingga aliran gas akan mengalami kontak dengan media kultur dalam waktu yang lebih lama.

Analisis Kandungan Air Limbah

Air limbah yang digunakan untuk nutrisi diambil pada kolam IPAL terakhir dari PT Indolakto. Nitrat, fosfat, dan kalium diperlukan sebagai nutrisi pertumbuhan

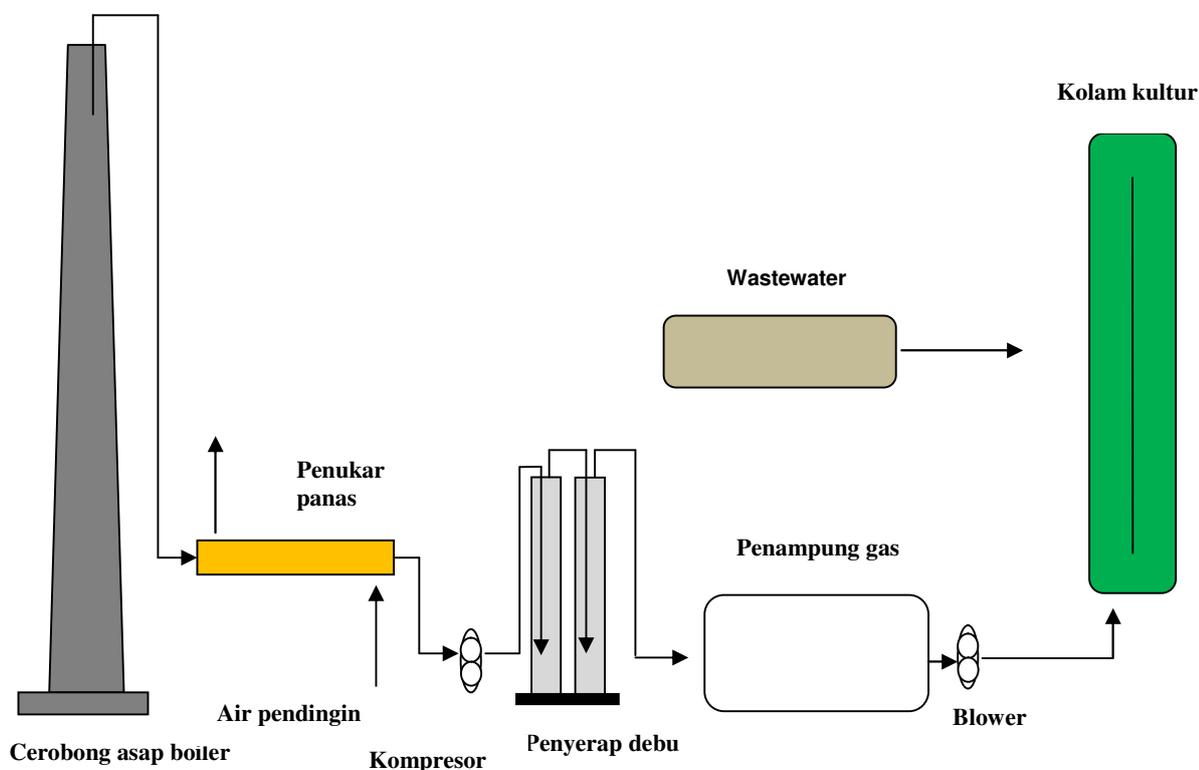
mikroalga. Karena setelah kultivasi kandungan bahan kimia dalam air limbah turun (Tabel 1), maka ke dalam media pertumbuhan ditambahkan pupuk NPK 35 mg/L yang dilakukan secara kontinyu tiap 10 hari.

Penurunan kandungan kimia yang berguna untuk nutrisi mikroalga, terutama nilai nitrat, fosfat dan kalium terjadi karena dimanfaatkan sebagai nutrisi pertumbuhan mikroalga. Untuk mempertahankan pertumbuhan mikroalga, ditambahkan pupuk NPK sebanyak 35 mg/l. Penambahan

NPK sebanyak 35 mg/l setiap 10 hari secara kontinyu.

Analisis Fiksasi CO₂ oleh Mikroalga

Konsentrasi CO₂ yang masuk ke dalam kolam rata-rata 5,5 % vol. Pemasukkan gas dilakukan bertahap yaitu 6,7 L/menit pada periode I dan 4,5 L/menit pada periode II. Kondisi gas masuk ke dalam kolam dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 1. Rangkaian penelitian di PT. Indolakto.

Kolam Kultur berukuran 1000 L (5 x 1 x 0,5) m³ dan penampung gas berukuran 1000 L.

Tabel 1. Sifat fisik dan kimia air limbah industri susu sebelum dan setelah digunakan untuk media mikroalga

Parameter	Sebelum (ppm)	Setelah 10 hari (ppm)	Penurunan (%)
Clorida	97,093	30,86	68
Nitrat	1,914	0,431	77
Fosfat	49,174	9,245	81
Kalium	13,4	2,256	83
Sulfat	11,250	4,213	62
COD	45,4	7,1	84
BOD	37,6	6,2	83
pH	7,5	6	0,2

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *Chlorella vulgaris* tumbuh dengan pemberian konsentrasi CO₂ 5,5% dan dihasilkan biomasa maksimum 0,06 mg/L. Yun et al (1997) melaporkan bahwa *Chlorella vulgaris* tumbuh baik pada konsentrasi emisi CO₂ 5% dan kemudian terhambat pada konsentrasi CO₂ 15%. Selanjutnya dilaporkan bahwa peningkatan konsentrasi CO₂ secara bertahap, maka diperoleh hasil bahwa *C vulgaris* toleran hingga konsentrasi CO₂ 30%. Percobaan peningkatan CO₂ hingga 30% sangat penting karena konsentrasi emisi CO₂ yang keluar dari cerobong asap dapat mencapai lebih dari 30% (Yun, et al. 1996).

Mikroalga *C. vulgaris* mampu menyerap CO₂ dengan konsentrasi 15-50% (Jennifer and Meyrick, 1979). Handayani et al. (2014) melaporkan bahwa mikroalga *Euglena* sp. mampu menyerap emisi CO₂ dari industri susu sebesar 98,8%.

Pertumbuhan Mikroalga

Hasil pengamatan mikroalga *Chlorella vulgaris* pada awalnya menunjukkan respon pertumbuhan yang baik dengan warna kehijauan. Setelah hari ke -10 warna hijau berubah menjadi kekuningan yang biasanya disebabkan oleh kekurangan unsur fosfat. Hasil analisis kandungan nutrisi pada media menunjukkan kekurangan unsur fosfat karena terjadi penurunan hingga 81% pada hari ke-10 (Tabel 1).

Setelah dilakukan penambahan unsur fosfat yang terkandung pada pupuk NPK (16:16:16) sebanyak 35 mg/l, warna mikroalga berubah hijau segar dan tampak mulai terjadi pertumbuhan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa lingkungan kolam kultur telah mendukung pertumbuhan mikroalga.

Grafik pertumbuhan mikroalga pada periode I dan II disajikan pada Gambar 2 dan 3. *Chlorella* adalah mikroorganisme fotosintetik yang mengubah energi cahaya menjadi senyawa karbon untuk pertumbuhannya (Hirata et al., 1996). Syarat utama dalam proses penyerapan CO₂ oleh mikroalga adalah menumbuhkan mikroalga dengan baik melalui pemberian

nutrisi, sehingga terjadi proses fotosintesis dimana cahaya dan CO₂ sangat berperan. Dengan demikian nutrisi dan CO₂ adalah faktor pembatas dalam pertumbuhan mikroalga. Kedua faktor tersebut telah terpenuhi dalam proses penelitian ini, maka mikroalga mampu tumbuh dengan baik.

Hubungan Debit CO₂ dan pH dengan Pertumbuhan Mikroalga

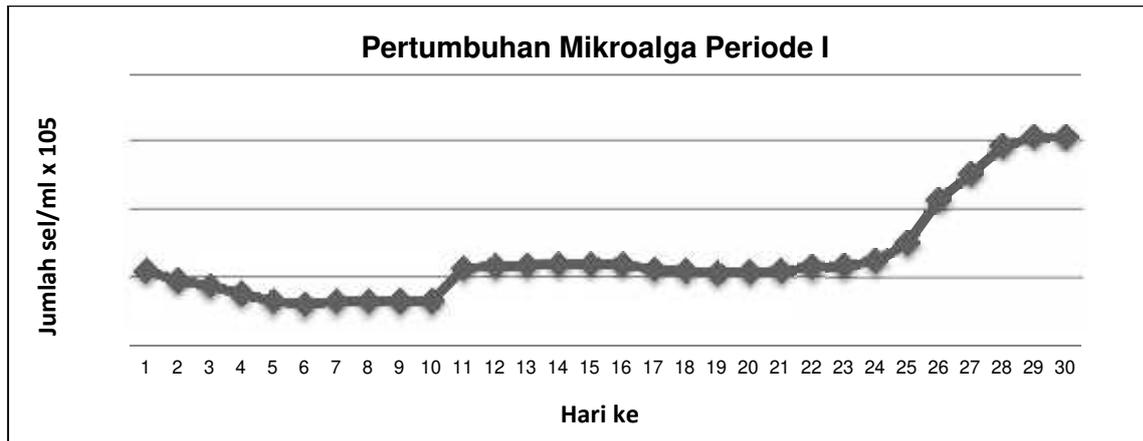
pH air limbah industri susu sekitar 5 meningkat hingga 5,5 pada periode I dan menjadi 7 pada periode II. Pada periode I air limbah bersifat asam disebabkan oleh pengisian CO₂ dengan debit 6,7 L/menit. Pengurangan debit CO₂ meningkatkan pH dan jumlah sel mikroalga (Gambar 4). Selama proses terjadi penurunan pH yang disebabkan oleh meningkatnya penyerapan fosfor oleh mikroalga karena aktifitas fotosintesis dan respirasi. Penyerapan fosfor dipengaruhi oleh faktor lingkungan yaitu pH, suhu dan intensitas cahaya.

Mikroalga *Chlorella* sp adalah jenis mikroalga yang dapat tumbuh pada media air limbah. Pada penelitian ini kerapatan *C. vulgaris* maksimum 151,3 x 10⁵ sel/ml dengan berat kering 0,15 g/L pada periode I, sedangkan kerapatan *C. vulgaris* maksimum pada periode II sebesar 889,2 x 10⁵ sel/ml dengan berat kering 0,86 g/L. Kerapatan sel mikroalga *Chlorella* sp. pada air limbah industri karet dan kelapa sawit mencapai maksimum 198,49 x 10⁵ dengan berat kering 0,61 mg/l pada pertumbuhan hari ke 10 (Phang and Ong, 1988).

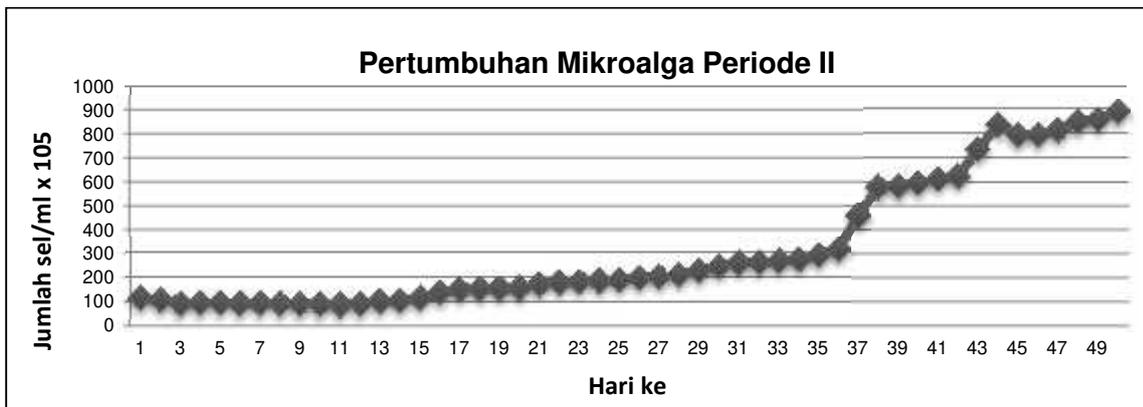
Kerapatan maksimum mikroalga *Chlorella vulgaris* pada air limbah pabrik gula adalah 159 x 10⁵ sel/ml (Singa, 2001). Kepadatan sel *C. vulgaris* pada penelitian ini melebihi hasil yang dilaporkan oleh Phang and Ong (1988) dan Singa (2001). Hal ini disebabkan adanya penambahan CO₂ selama proses pertumbuhan mikroalga. Sebab CO₂ adalah merupakan faktor pembatas pertumbuhan mikroalga (Borowitzka, 1998).

Tabel 2. Kapasitas rata-rata penyerapan CO₂ oleh mikroalga.

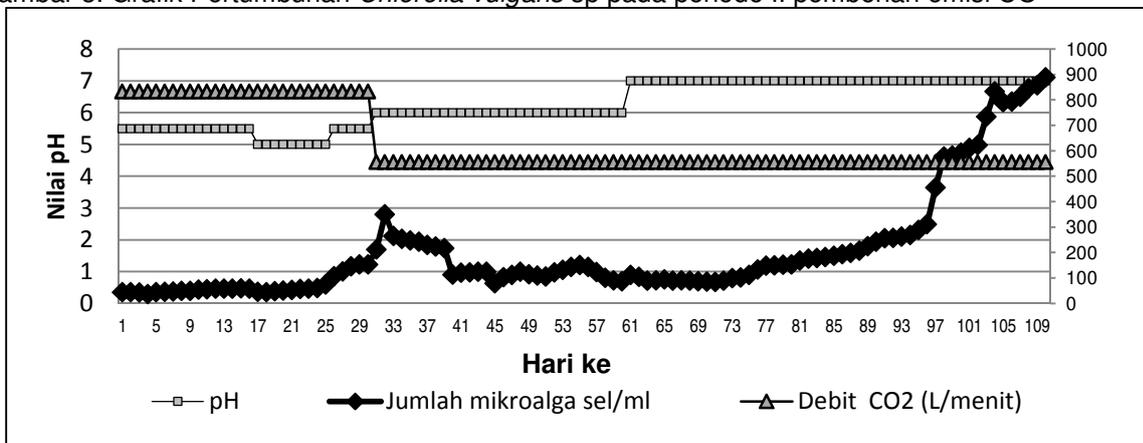
Periode	Debit (L/menit)	Masukan CO ₂	Keluaran CO ₂	Serapan CO ₂				Biomasa maksimum (mg/L)
		CO ₂ (% vol)	CO ₂ (% vol)	CO ₂ (% vol)	Liter/hr	g/L/hari	Efisiensi (%)	
I	6,7	5,5	0,4	5	160,4	0,3	91	0,15
II	4,5	5,5	0,2	5,2	107,6	0,2	96	0,86



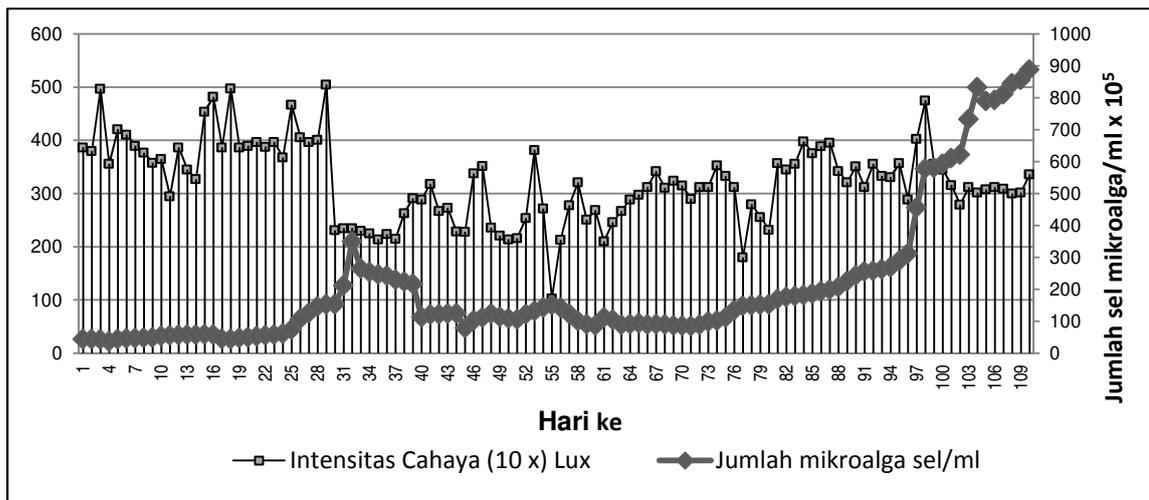
Gambar 2. Grafik Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* sp pada periode I pemberian emisi CO₂



Gambar 3. Grafik Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* sp pada periode II pemberian emisi CO



Gambar 4. Pengaruh debit CO₂ terhadap nilai pH dan pertumbuhan mikroalga.



Gambar 5. Pengaruh intensitas cahaya (lux) terhadap pertumbuhan mikroalga ($\times 10^5$ sel/ml).

Suhu

Suhu pada kolam kultur berkisar antara 27,5 – 30°C tidak berpengaruh dalam pertumbuhan mikroalga, karena masih didalam ambang batas pertumbuhan mikroalga yaitu 20-35°C (Borowitzka, 1998).

Intensitas cahaya mempengaruhi suhu di sekitar kolam kultur. Intensitas cahaya pada pukul 09.00 sekitar 20.000 lux dan baik untuk pertumbuhan mikroalga (Gambar 5). Penelitian menunjukkan pertumbuhan mikroalga pada kolam kultur tertutup dengan intensitas cahaya maksimum 50.000 lux menghasilkan kerapatan sel mikroalga hingga $889,2 \times 10^5$ sel/ml. Penyerapan CO_2 terendah oleh mikroalga yaitu 89,7% pada saat cuaca mendung dan sampai tertinggi 96,2% pada saat cerah.

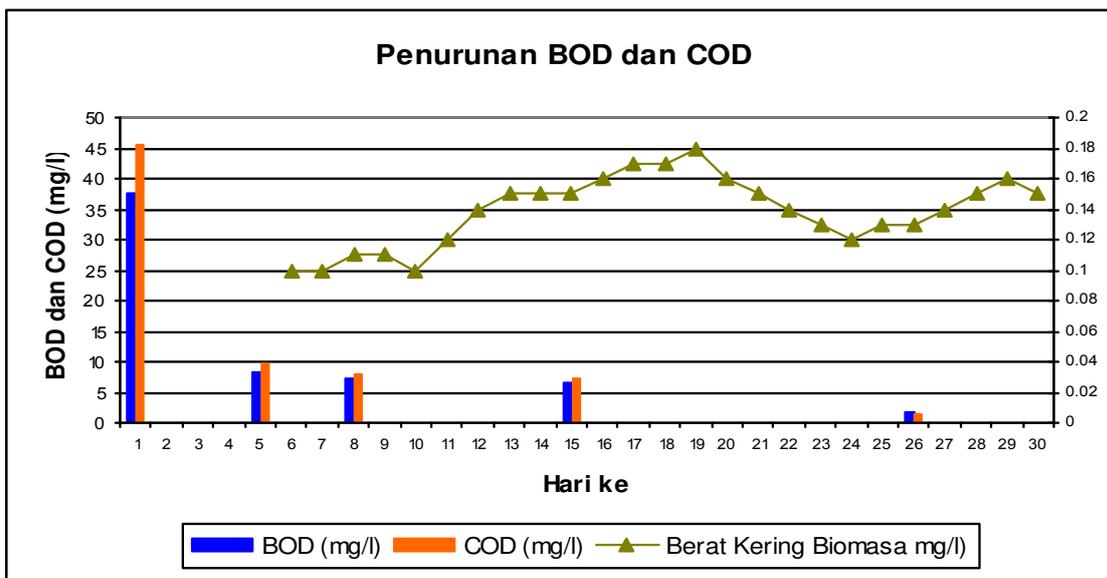
Peningkatan Konsentrasi CO_2

Dinamika penyerapan CO_2 tidak menunjukkan penurunan dengan meningkatnya pemberian CO_2 dan pertumbuhan mikroalga cenderung meningkat (Gambar 4). Mikroalga *Euglena* sp. mampu menyerap CO_2 dengan konsentrasi 15-20% (Jennifer and Meyrick, 1979; Anonim, 2010). Dalam penelitian ini,

konsentrasi CO_2 yang digunakan 6,71%. Berdasarkan penelitian Jennifer and Meyrick (1979) dan; Anonim (2010), maka masih ada kemungkinan pemberian konsentrasi CO_2 ditingkatkan hingga 20%. Dalam komposisi emisi gas industri susu selain CO_2 terkandung juga gas CO dengan konsentrasi lebih dari 1000 ppm, akan tetapi pemberian komposisi gas tersebut tidak menunjukkan gangguan terhadap pertumbuhan mikroalga.

Analisis COD (*Chemical Oxygen Demand*) dan BOD (*Biological Oxygen Demand*).

COD air limbah sebesar 45,4 mg/l dan BOD 37,6 mg/l yang masih di ambang batas sehingga tidak membahayakan lagi bagi lingkungan perairan (PP, 2001). Pertumbuhan mikroalga nilai COD dan BOD tersebut terlalu tinggi, maka sebelum diberi mikroalga, air limbah dibiarkan terbuka berada dalam kolam kultur hingga nilai COD dan BOD tersebut turun mencapai 10 mg/l. Air limbah dengan COD dibawah 10 mg/l baik cukup baik untuk pertumbuhan mikroalga (Handayani et al., 2014). Hal ini dibuktikan dengan kemampuan pertumbuhan mikroalga (Gambar 2 dan 3).



Gambar 6. Penurunan BOD dan COD selama kultur mikroalga.

Penelitian ini menunjukkan setelah kultur mikroalga selama 10 hari, COD turun menjadi 7,3 mg/l (83,9%) dan BOD menjadi 6,4 mg/l (82,95). Hasil penurunan COD dan BOD selama kultur mikroalga disajikan pada Gambar 6. Mikroalga mampu menurunkan COD 70-80% dan BOD 80-90% (Aziz, 1992; Chinnasamy, 2009).

Mikroalga *C. vulgaris* merupakan mikroalga kosmopolit yang sebagian besar hidup di lingkungan akuatik baik perairan tawar, laut maupun payau yang banyak mengandung nutrisi, juga ditemukan di tanah dan di tempat lembab. Sel *C. vulgaris* memiliki tingkat reproduksi yang tinggi, setiap sel *C. vulgaris* mampu berkembang menjadi 10.000 sel dalam waktu 24 jam (Sanchez et al., 1999). Air limbah adalah perairan yang mengandung nutrisi pertumbuhan mikroalga (Aziz, 1992).

Budidaya *Chlorella vulgaris* dengan tektik kultur bergantung pada kesesuaian antara jenis mikroalga yang dibudidayakan dan beberapa faktor lingkungan, salah satu hal yang perlu diperhatikan adalah faktor pengadukan agar metabolisme sel mikroalga tidak mengganggu (Dianursanti et al., 2009).

Pemanfaatan kultur mikroalga pada industri untuk penyerapan emisi CO₂ perlu dilakukan kontrol dalam fotobioreaktor. Upaya pemanfaatan alga sebagai *carbon sink* membutuhkan pengetahuan tentang jenis-jenis yang cocok dan kondisi

lingkungan yang optimum untuk mendorong pertumbuhan yang maksimum (Jennifer et al., 1979; Anonim, 2010).

KESIMPULAN

Chlorella vulgaris dapat tumbuh pada air limbah industri susu dengan pemberian emisi CO₂ 5,5% dengan penambahan NPK. Debit CO₂ mempengaruhi nilai pH dan pemberian debit 4,5 L/menit dapat menaikkan pH hingga 7. Efisiensi penyerapan CO₂ oleh mikroalga *C. vulgaris* dapat mencapai 96% dengan pemberian CO₂ rata-rata sebesar 0,2 g/L/hari dan menghasilkan biomasa pada akhir pengamatan sebanyak 0,5mg/L.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2001. Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 Tanggal 14 Desember.
- Anonim. 2010. CO₂-Absorbing Microalga Cultivated Using Power Plant Exhaust Gas. <http://japans.org/en/pages/029515>. (15 November 2010).
- Aziz, M A. 1992. Feasibility of Wastewater Treatment Using the Activated-algae Process. *Biosource Technology* 40:205-208.
- Borowitzka, M A. 1998. *Culturing Microalgae in Outdoor Ponds*. Algae

- Research Group School of Biological Sciences & Biotechnology. Murdoch University. Australia.
- Chinnasamy, S, Ramakrishnan, B, Bhatnager, A and Das, K C. 2009. Biomass Production Potential of a Wastewater Algal *Chlorella vulgaris* ARC 1 under Elevated Levels of CO₂ and Temperature. *Int. J. Mol. Sci.* 10:518-532.
- Dianursanti, Nuzulliany R, Wijanarko A dan Nasikin M. 2009. Peningkatan Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* melalui perlakuan teknik pemerangkapan sel dalam aliran sirkulasi media kultur. *Pros. Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia – SNTKI. Bandung, 19-20 Oktober 2009.*
- Hamasaki, A., Shioji, N., Ikuta, Y., Hukuda, Y., Makita, T., Hirayama, K., Matutaki, H., Tukamota, T., and Sasaki, S. 1994. Carbon Dioxide Fixation by Microalgal Photosynthesis Using Actual Flue Gas. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 39/40:799-809.
- Handayani, T, Mulyanto, A dan Sopiah, N. 2014. Penyerapan Emisi Gas Buang CO₂ Oleh Mikroalga *Euglena* sp. Dengan Bioreaktor Kolam Kultur. *J. Ecolab* 8(1):1-52.
- Hirata, S., Hayashitani, M. and Tone, S. (1996). Characterization of *Chlorella* cell Cultures in Batch and Continuous Operations under a Photoautotrophics Condition. *Jurnal of Chemical Engineering of Japan* 31(4):953-959.
- Jennifer, G.P and Meyrick, J.P.1979. Heterotrophic Carbon Dioxide Fixation Products of *Euglena*. *Plant Physiol.* (1980) 65:566-568.
- Kraus, and Bejan. 2003. *Heat Transfer Handbook.* USA: John Wiley and Sons.
- Meiviana. 2004 Faktor Lingkungan. <http://aatunhalu.wordpress.com> (24 November 2010).
- 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. Pittsburgh.
- Negoro, M., Hamasaki, A., Ikuta, Y., Makita, T., Hirayama, K. and Suzuki, S. 1993. Carbon Dioxide Fixation by Microalgae Photosynthesis Using Actual Flue Gas Discharged From Boiler. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 39/40:643-653.
- Phang, S M. and Ong, K C. 1988. Algal Biomass Production in Digested Palm Oil Mill Effluent. *Biol. Wastes* 25:177-191.
- Sanchez Miron A, Contreras Gomez A, Garcia Camacho F, Molina Grima E, Chisti Y. 1999. Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae. *J Biotechnol* 70:231-247.
- Schneider, S H. 1989. The Greenhouse Effect: Science and Policy. *Science,* 243:771-781.
- Singa, S K. 2001. Evaluation of press mud and sugarcane mill effluent as culture media for the growth of *Chlorella vulgaris*. M S Thesis Dept of Aquaculture, BAU, Mymensingh.
- Steenblok. 2000. Heterotrophic Carbon Dioxide Fixation Products of *Euglena*. *Plant Physiol.* (1980) 65:566-568.
- Stepan, D J., Shockey, R E, Moe, T A., and Dorn, R. 2002. Carbon Dioxide Sequestering Using Microalgal Systems. Final Report. US Departement of Energy. National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh.
- Yun, Y.S., Park, J.M. and Yang, J. W. 1996. Enhancement of CO₂ Tolerance of *Chlorella vulgaris* by Gradual increase of CO₂ concentration. *J. Chem. Tech. Biotechnol. Tech.,* 10:713-716.
- Yun, Y.S., Park, J.M., Lee, C I. and Yang, J. W. 1997. Carbon Dioxide Fixation by Algal Cultivation Using Wastewater Nutrients. *J. Chem. Techn. Biotechnol. Tech.,* 10:713-716.

Halaman sengaja dikosongkan