

Pengaruh Variasi Laju Alir Massa Karbondioksida Terhadap Produksi Mikroalga *Scenedesmus obliquus* pada Fotobioreaktor

Nico Halomoan¹, dan Astri R. Nugroho²

1. Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional (ITENAS), Bandung

2. Teknik Lingkungan, Universitas Trisakti, Jakarta

Email: nichalomoan@itenas.ac.id

ABSTRACT

The fixation of carbon dioxide (CO₂) by microalgae is seen as an economical and environmentally friendly way to reduce CO₂ emissions. Variations in the CO₂ mass flow rate were carried out to assess the effectiveness of CO₂ biofixation on the production of microalgae through microalgae Scenedesmus obliquus activity in bubble column photobioreactors through the mass transfer process. The amount of microalgae production is one of the common parameters that are often used to assess the performance of photobioreactors in addition to CO₂ removal efficiency. The microalgae growth rate was measured by measuring the concentration of biomass and cell density, concentration of CO₂ input, CO₂ output, dissolved CO₂ with acidity alkalinity test. The flow rate used is 2 L/min, 5 L/min and 8 L/min, concentrations of CO₂ (v/v) flowed into the photobioreactor of 2%, 5% and 10%. The results showed that variation of flow rate influenced growth rate and cell density of microalgae Scenedesmus obliquus.

Keywords: carbon dioxide, flow rate, photobioreactor, Scenedesmus obliquus

ABSTRAK

Fiksasi karbondioksida (CO₂) oleh mikroalga dipandang sebagai cara yang ekonomis dan ramah lingkungan untuk mengurangi emisi CO₂. Variasi laju alir massa CO₂ dilakukan untuk mengkaji efektivitas biofiksasi CO₂ terhadap produksi mikroalga melalui aktivitas mikroalga Scenedesmus obliquus dalam fotobioreaktor kolom gelembung dengan proses perpindahan massa. Jumlah produksi mikroalga merupakan salah satu parameter umum yang sering digunakan untuk menilai kinerja fotobioreaktor selain efisiensi penyisihan CO₂. Dalam mengkaji keterkaitan tersebut dilakukan pengukuran laju pertumbuhan mikroalga dengan mengukur kandungan konsentrasi biomassa dan kepadatan sel, diukur konsentrasi CO₂ input, CO₂ output, CO₂ terlarut dengan uji asidi alkalinitas. Laju alir yang digunakan adalah 2 liter/menit, 5 liter/menit dan 8 liter/menit, konsentrasi CO₂ (v/v) yang dialirkan ke dalam fotobioreaktor yakni 2%, 5% dan 10%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi laju alir mempengaruhi laju pertumbuhan dan kepadatan sel mikroalga Scenedesmus obliquus.

Kata kunci: karbon dioksida, laju alir, fotobioreaktor, Scenedesmus obliquus

1. PENDAHULUAN

Emisi dan pembakaran yang menghasilkan gas-gas ke atmosfer salah satunya karbondioksida (CO_2) telah dianggap sebagai penyumbang utama terhadap pemanasan global [1]. Salah satu cara yang ekonomis dan ramah lingkungan untuk mengurangi emisi CO_2 yakni dengan fiksasi CO_2 mikroalga yang juga dapat menghasilkan produksi biofuel dan lainnya [2]. Karbondioksida digunakan mikroalga sebagai sumber karbon terutama dalam proses fotosintesis. Karbondioksida melalui proses fotosintesis dengan bantuan sinar matahari diubah menjadi oksigen, sehingga sejumlah karbondioksida yang masuk dalam sistem akan berkurang ketika keluar dari sistem mikroalga [3].

Perpindahan CO_2 dari fase gas ke media berlangsung melalui beberapa tahapan yang harus dilalui, yakni difusi dari gas ke antarmuka gas-cairan, pergerakan melalui antarmuka gas-cairan, difusi zat terlarut melalui daerah cairan yang tidak tercampur dengan gelembung ke dalam daerah cairan yang tercampur dengan baik, perpindahan zat terlarut melalui daerah cairan ke daerah cairan kedua yang tidak tercampur di sekeliling sel, perpindahan melalui daerah cairan kedua yang tidak tercampur berhubungan dengan sel alga, perpindahan secara difusi ke dalam dinding selular dan perpindahan melewati dinding sel menuju sisi reaktif intraselular [4]. Agar gas CO_2 bisa bereaksi dengan baik maka dibutuhkan proses perpindahan massa yang baik. Hal ini ditandai dengan adanya koefisien perpindahan massa atau $k_{La}(\text{CO}_2)$.

Perpindahan CO_2 dari gas ke cairan tergantung pada banyak parameter. Tang *et al*, [5] menyatakan bahwa parameter fisik seperti laju alir, tekanan parsial CO_2 , diameter gelembung dapat memiliki pengaruh besar terhadap laju perpindahan. Diasumsikan bahwa terjadi pencampuran yang sempurna Dalam penggunaan fotobioreaktor kolom gelembung dan pH yang terukur dengan pH-meter sesuai dengan sebagian besar kultur media mikroalga. Untuk jenis mikroalga lain seperti *Chlamydomonas sp* [6] penelitian yang dilakukan mendapatkan produktivitas mikroalga turut dipengaruhi dengan waktu tinggal CO_2 dalam kultur dan konsentrasi gas CO_2 yang semakin tinggi dapat meningkatkan produksi biomassa selama *Carbon Anhydrase* pada mikroalga belum jenuh, tergantung dari jenis mikroalga, tetapi kecepatan laju alir turut menghambat transfer massa yang masuk ke dalam sel [7].

Pemilihan strain *Scenedesmus sp.* dilakukan karena berdasarkan penelitian [8] *Scenedesmus Sp.* lebih tepat untuk mengurangi CO_2 karena produktivitas biomassa yang tinggi dan kemampuan fiksasi carbon. Tujuan dari penelitian ini adalah mengukur pertumbuhan sel mikroalga. Diharapkan dari penelitian ini dapat mengkaji kaitan transfer massa CO_2 dalam penyerapan CO_2 terhadap pertumbuhan mikroalga terutama *Scenedesmus obliquus* dengan menggunakan fotobioreaktor kolom gelembung pada variasi laju alir.

2. METODOLOGI

2.1 Operasi Fotobioreaktor

Fotobioreaktor yang digunakan adalah tabung yang terbuat dari bahan kaca jenis kolom vertikal dengan sistem *batch* dan suplai udara yang diperkaya dengan CO_2 secara menerus. Reaktor ini memiliki tinggi 80 cm dan diameter dalam 15 cm dengan volume total sebesar 10 L dan volume efektif sebesar 8 L dan tinggi efektif 60 cm. Reaktor diletakkan di dalam *chamber* yang dilengkapi dengan sumber cahaya lampu Phillips Lifemax TLD 10W/54-765 pada keempat sisinya sebesar 4000 Lux.

Pengoperasian fotobioreaktor dilakukan selama 12 hari dengan mengalirkan udara yang diperkaya oleh CO_2 dari dasar fotobioreaktor ke dalam reaktor melewati *sparger* dengan diameter pori 100-160 μm .; Temperature harian dijaga pada 30°C; Penerangan lampu dilakukan dengan proporsi 16 jam

terang dan 8 jam gelap, dengan intensitas cahaya ± 4000 lux; Nilai konsentrasi CO_{2in} dan CO_{2out} diukur dengan menggunakan *Portable Combination Gas Detector* RIKEN Model RX-515. Nilai pH dicatat dengan pH-meter, dan mengukur CO_2 dan HCO_3^- terlarut dengan metode titrasi asam basa menentukan asiditas-alkalinitas. Biomassa kering dan densitas sel dihitung setiap hari.

2.2 Variasi penelitian

Variasi penelitian yang dilakukan adalah dengan mengatur variasi pada Laju alir udara sebesar 2 L/menit; 5 L/menit dan 8 L/menit dengan konsentrasi CO_2 untuk setiap laju alir adalah 2%, 5%, dan 10%.; dialirkan ke dalam fotobioreaktor yang telah diisi dengan kultur mikroalga *Scenedesmus obliquus*.

2.3 Kultur mikroalga

Kultur *Scenedesmus obliquus* disimpan dengan intensitas cahaya ± 2500 lux, fotoperiodisasi terang selama 24 jam, pH 6,5-7,5 dan pada suhu kamar. Pertambahan kepadatan sel dihitung setiap hari dengan menggunakan *haemocytometer*.

2.4 Pengukuran CO_2 terlarut dan HCO_3^- terlarut dengan uji Asiditas-Alkalinitas

Uji asiditas dan alkalinitas yang digunakan untuk menghitung CO_2 dan HCO_3^- terlarut. Sampel air yang diambil dari masing-masing reaktor sebanyak 100 ml dicek kandungan pH-nya. Jika nilai $pH > 4,33$ dan $pH < 8,33$, maka dilakukan uji asiditas, sementara jika $pH > 8,3$ dilakukan uji alkalinitas. Uji Asiditas yang dilakukan dengan melakukan titrasi dengan larutan NaOH 0,1 N sampai pH cairan naik mencapai 8,33, catat banyaknya larutan NaOH 0,1 N. Lalu turunkan pH mencapai 4,33 dengan menambahkan HCl 0,1 N, catat banyaknya larutan HCl yang digunakan. Data yang didapat adalah CO_2 total dan HCO_3^- terlarut, selanjutnya untuk data CO_2 terlarut perlu dikoreksi dengan mengurangi CO_2 total dengan CO_2 agresif, dengan menggunakan pendekatan melalui grafik Tillman

2.5 Pengukuran biomassa dengan metode gavimetri

Metode pengukuran biomassa dalam gram/liter biomassa menggunakan metode pengukuran solid secara Gavimetri. Yakni dengan menggunakan cawan-cawan yang telah bersih dipanaskan $600^\circ C$ selama 1 jam di dalam furnace, kemudian dimasukkan ke dalam desikator lalu ditimbang sampai konstan; Masukkan 100 ml contoh air (sedikit demi sedikit) ke dalam cawan penguap dan uapkan di atas water bath sampai kering.; Selanjutnya Cawan yang berisi sampel dimasukkan ke dalam oven $105^\circ C$ selama 1 jam; Dinginkan dalam desikator selama ± 30 menit, lalu timbang dengan neraca analitik; Panaskan dalam furnace $550^\circ C - 600^\circ C$ selama satu jam, lalu didinginkan dalam desikator kemudian timbang.

2.6 Menentukan tranfer massa CO_2

Data perpindahan massa karbondioksida dari fase gas ke fase cairan dapat dituliskan menggunakan Persamaan 1,2,3 dan 4[1].

$$N_a = k_L a (C^* - C_t) \quad (1)$$

persamaan $N_a = dc/dt$; sehingga dapat ditulis

$$dc/dt = k_L a (C^* - C_t) \quad (2)$$

apabila persamaan ini diintegrasikan menjadi:

$$\int_{C_0}^C \frac{dc}{(C^* - C_t)} = k_L a \int_{t_0}^t dt \quad (3)$$

lalu persamaan tersebut menjadi

$$\ln [(C^* - C_0)/(C^* - C_t)] = k_L a (t - t_0) \quad (4)$$

dimana N_a adalah laju transfer karbondioksida per unit waktu ($\text{gmol.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$), K_L adalah koefisien fase transfer massa (m.s^{-1}), a adalah luas area interfacial gas/liquid per unit volume dari fluida ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$), C_t adalah konsentrasi karbondioksida terlarut dalam larutan dan C^* disebut juga kelarutan karbondioksida adalah konsentrasi jenuh karbondioksida pada larutan (gmol.m^{-3}). Perbedaan konsentrasi (C^*-C_t) mengacu pada perpindahan massa memicu penggerak karbondioksida dari fase gas ke fase cair.

2.7 Menghitung kepadatan sel

Kepadatan sel mikroalga *Scenedesmus obliquus* dihitung setiap 24 jam sekali dengan metode *Neubauer Haemocytometer* di bawah mikroskop cahaya Olympus CX-21 dengan perbesaran 10x. Jumlah pasti sel mikroalga di dalam kultur penting untuk diketahui khususnya untuk mengetahui konsistensi kerapatan sel dalam media kultur. *Haemacytometer* pada dasarnya adalah sebuah lempengan kaca yang memiliki kamar hitung di bagian tengahnya dengan satu atau dua kisi-kisi yang sangat akurat. Metode yang digunakan untuk memudahkan menghitung jumlah sel dengan kerapatan tinggi. Area hitung adalah bagian tengah kisi *haemacytometer*. Data jumlah sel yang telah dihitung selanjutnya dimasukkan ke dalam persamaan untuk mendapatkan kerapatan sel N (sel/ml).

$$N = \frac{\text{jumlah sel}}{100} \times 10^6 \quad (5)$$

2.8 Menentukan efisiensi penyisihan CO_2

Efisiensi penyisihan CO_2 dihitung dengan menghitung konsentrasi CO_2 input dan output pada fotobioreaktor [1].

$$\text{Efisiensi reduksi } \text{CO}_2 (\%) = \frac{C_{in}-C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

dimana C_{in} dan C_{out} adalah konsentrasi CO_2 yang masuk ke dalam fotobioreaktor dan yang keluar dari fotobioreaktor (%).

2.8 Menghitung laju pertumbuhan sel

Laju pertumbuhan spesifik (hari^{-1}) dihitung dengan menggunakan persamaan [5]:

$$\mu = \frac{\ln(X_t/X_0)}{t_t - t_0} \quad (7)$$

dimana X_t dan X_0 adalah konsentrasi biomassa (g.L^{-1}) pada hari ke t_t dan t_0 .

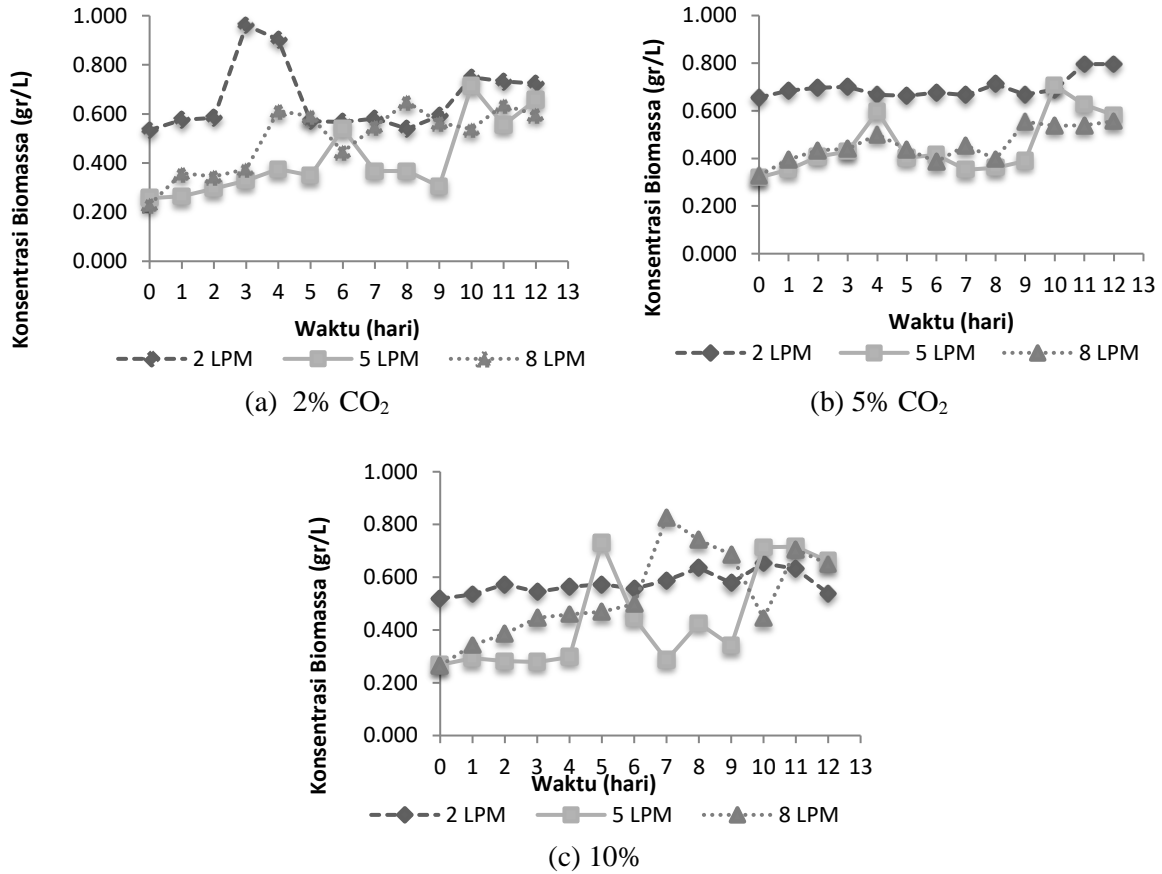
3. ISI

3.1 Pengaruh Laju Alir Terhadap Nilai Pertumbuhan Sel Mikroalga *Scenedesmus Obliquus*

Salah satu hal yang menandakan berjalannya penyisihan CO_2 oleh mikroalga dalam fotobioreaktor adalah pertumbuhan mikroalga. Adanya pertumbuhan mikroalga menandakan adanya penggunaan CO_2 untuk keberlangsungan aktivitas fotosintetik pada mikroalga yang besarnya dipengaruhi oleh transfer massa CO_2 ke dalam sel. Efisiensi penyisihan CO_2 atau fiksasi bergantung pada kondisi *physiological* mikroalga seperti potensi untuk pertumbuhan sel dan kemampuan metabolisme CO_2 .

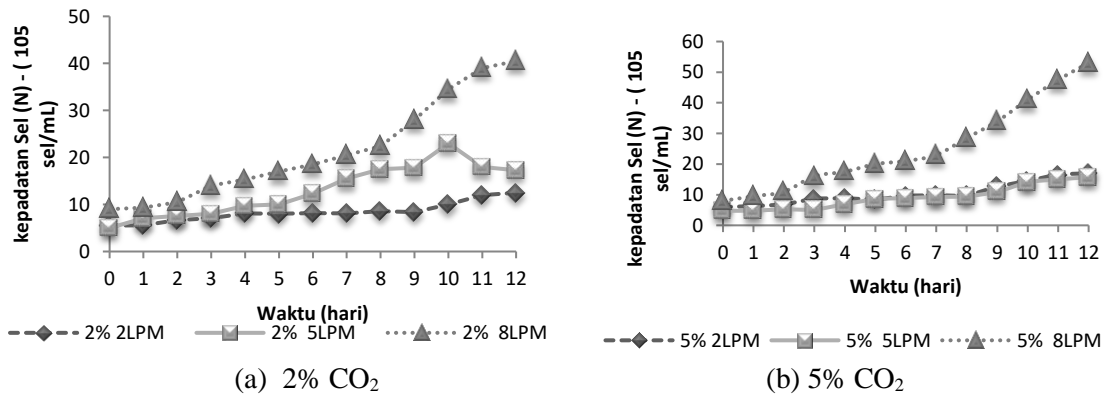
Pertumbuhan sel mikroalga *Scenedesmus obliquus* adalah parameter yang menunjukkan bahwa terjadi pertumbuhan yang dilakukan mikroalga pada fotobioreaktor, dimana hanya senyawa karbon yang berasal dari karbondioksida yang diinjeksikan yang menjadi substrat, selain media PHM yang jumlahnya akan terus berkurang seiring dengan pertumbuhan sel mikroalga. Perpindahan massa CO_2 ke dalam sel yang selanjutnya akan digunakan untuk keberlangsungan aktivitas fotosintetik pada mikroalga, salah satunya dengan melihat laju pertumbuhan mikroalga. **Gambar 1** merupakan grafik konsentrasi biomassa terhadap waktu pada persentase CO_2 yang dimasukan dalam fotobioreaktor untuk setiap laju alir. Pertumbuhan biomassa mikroalga memiliki kecenderungan untuk naik hingga

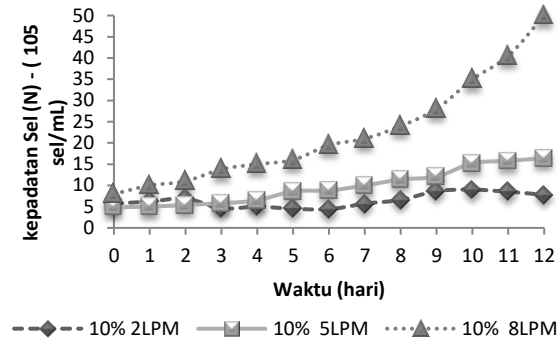
pada waktu tertentu, mencapai maksimal kemudian turun. Biomassa memiliki keterbatasan dalam melakukan fiksasi CO₂ dan menahan laju alir.



Gambar 1. Profil pertumbuhan biomassa *Scenedesmus obliquus* pada variasi laju alir dan konsentrasi CO₂

Sementara itu pada **Gambar 2**, ditunjukkan pertumbuhan sel dengan menggunakan parameter kepadatan sel yang dihitung menggunakan *hemacytometer*, namun kepadatan sel tersebut tidak selalu sebanding dengan berat kering sel. Kepadatan sel terbesar terjadi pada laju alir 8 Liter/menit, dan rata-rata terkecil pada laju alir 2 Liter/menit. Berdasarkan percobaan ini mikroalga bertumbuh pada fase eksponensial, Kepadatan sel dan berat organik sel turut dipengaruhi oleh kemampuan mikroalga dalam mentoleransi konsentrasi CO₂.

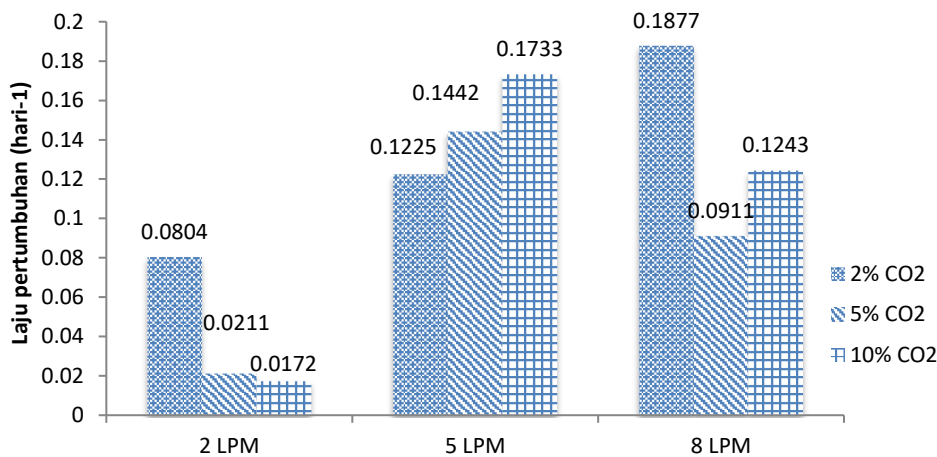




(c) 10%

Gambar 2. profil kepadatan sel *Scenedesmus obliquus* pada variasi laju alir dan konsentrasi CO₂

Laju pertumbuhan kandungan organik mikroalga dihitung dengan menggunakan data konsentrasi biomassa mikroalga pada saat terjadinya kenaikan pertumbuhan organik mikroalga atau pada fase eksponensial, pada Gambar 3, digambarkan mengenai lanju pertumbuhan biomassa mikroalga, dimana pada aliran 5 liter/menit terdapat kenaikan yang laju seiring kenaikan konsentrasi CO₂ yang dimasukkan, sementara pada laju alir yang lain pada konsentrasi yang lebih tinggi dari 2% CO₂ laju pertumbuhan lebih kecil, teradapat kombinasi kondisi yang baik pada laju alir 5 liter/menit.



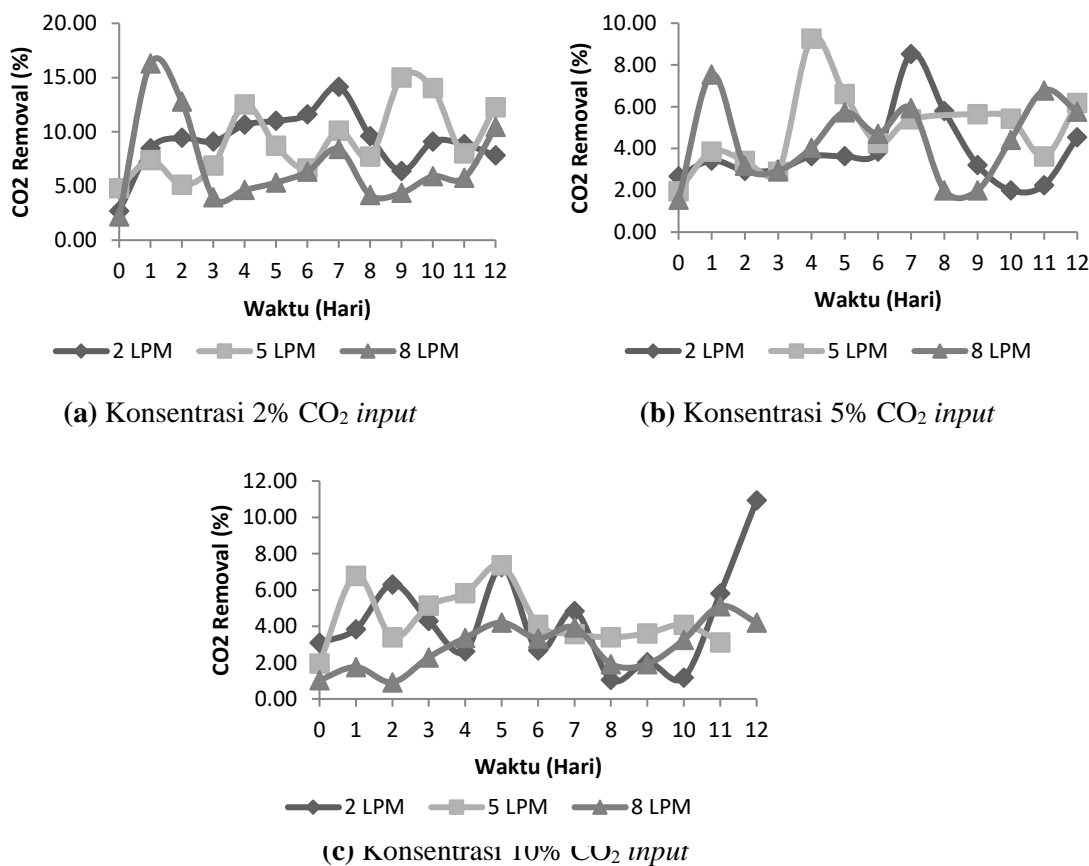
Gambar 3. Laju pertumbuhan biomassa mikroalga *Scenedesmus obliquus* (μ)

Pada penelitian ini dapat dinyatakan bahwa untuk setiap variasi laju dan konsentrasi CO₂, mikroalga masih mampu tumbuh dengan menggunakan karbon sebagai substrat.

3.2 Laju Alir Terhadap Efisiensi CO₂ Pada Fotobioreaktor

Penentuan kecepatan transfer karbondioksida sangat penting mengingat hubungan erat antara proses biologis dan fisika kimia dan konsentrasi CO₂ dalam larutan. Efisiensi CO₂ merupakan faktor penting yang menentukan apakah penelitian yang sedang dilakukan ini berjalan dengan baik dan melihat seberapa besar kemampuan dari mikroalga untuk mengikat CO₂. Gambar 4 menunjukkan profil efisiensi penyisihan pada setiap konsentraasi CO₂. Berdasarkan data yang ditampilkan dalam gambar 4, efisiensi penyisihan gas CO₂ (proporsi gas CO₂ mengalir melalui fotobioreaktor yang dimasukkan ke dalam biomassa mikroalga) untuk seluruh variasi rata-rata 5,53%, untuk rata-rata efisiensi tertinggi terdapat pada laju alir 5 liter/menit dan konsentrasi 2% CO₂, sementara untuk efisiensi terendah terdapat pada laju alir 8 liter/menit dan laju alir 10% CO₂ yakni 2,87%. Hasil ini, meskipun efisiensi

penyisihan maksimum dari setiap variasi berada di bawah 20%, tetapi sudah cukup untuk menumbuhkan mikroalga dalam fotobioreaktor dan mengurangi konsentrasi CO₂ yang dilepaskan.

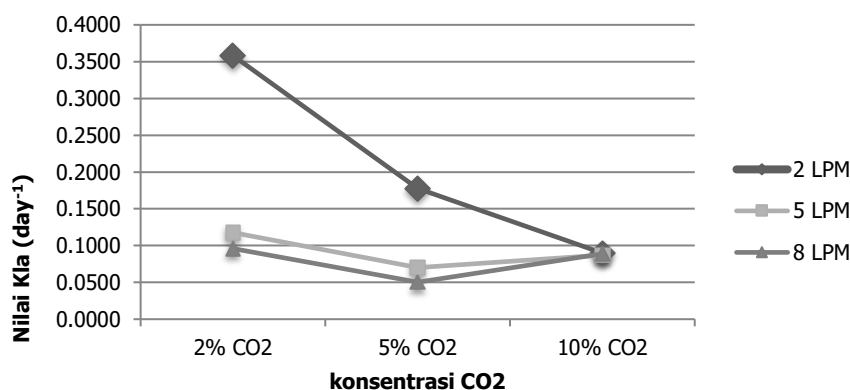


Gambar 4. Profil efisiensi penyisihan CO₂ pada variasi laju alir

Efisiensi penyisihan CO₂ akan mempengaruhi seberapa besar kemampuan mikroalga dalam mengikat karbon yang diinjeksikan ke dalam fotobioreaktor, karena dalam mekanisme skenario *Carbon Capture and Sequestration*, CO₂ yang terlarut akan digunakan untuk proses fotosintesis mikroalga dan mengkonversi CO₂ menjadi biomassa. Dari penelitian ini semakin besar konsentrasi CO₂ yang diinjeksikan dalam fotobioreaktor, maka semakin kecil efisiensi penyisihan CO₂ serta semakin besar laju alir gas dalam medium mikroalga maka semakin kecil efisiensi penyisihan CO₂, sebagai catatan berdasarkan penelitian [9] hal tersebut dibatasi oleh daya tahan mikroalga untuk tumbuh dalam konsentrasi CO₂ dan laju alir maksimum.

3.2 Kapasitas Transfer Massa CO₂ Terhadap Pertumbuhan Mikroalga *Scenedesmus Obliquus*

Kapasitas transfer massa karbondioksida pada fotobioreaktor ditentukan oleh koefisien transfer massa fase cair dan spesifik area yang tersedia untuk transfer massa. Proses transfer massa pada fotobioreaktor mikroalga ini mengikuti prinsip difusi, bergerak dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah. Pada **Gambar 5**, menggambarkan grafik nilai k_{La} dari setiap percobaan dengan melakukan perhitungan seperti pada persamaan 4. Reaktor dengan laju alir 2 liter/menit memiliki nilai k_{La} yang lebih besar dibandingkan dengan variasi yang lain.



Gambar 4. Grafik nilai k_{La} (day^{-1})

Koefisien transfer massa CO_2 atau $k_{La}(\text{CO}_2)$ secara umum dapat menggambarkan kondisi transfer massa yang terjadi di dalam reaktor. Untuk proses kultivasi mikroalga ini diperlukan nilai k_{La} yang optimal, nilai k_{La} yang tinggi menunjukkan proses transfer massa CO_2 yang lebih baik dalam kultur mikroalga. Nilai k_{La} untuk reaktor dengan laju alir 8 liter/menit pada setiap variasi konsentrasi memiliki nilai yang cenderung sama dan memiliki nilai lebih kecil diantara laju alir 2 liter/menit dan 5 liter/menit.

Fenomena transfer massa yang menyebabkan nilai $k_{La}(\text{CO}_2)$ yang terlalu besar sebaliknya dapat menyebabkan terjadinya *shear stress* pada mikroalga. Nilai $k_{La}(\text{CO}_2)$ pada variasi laju alir memiliki nilai tertinggi pada laju alir 2 Liter/menit. Dari percobaan ini didapat semakin kecil laju alir maka akan semakin kecil nilai koefisien transfer massa overall CO_2 , laju alir yang lebih besar akan menghasilkan gelembung yang besar dalam fotobioreaktor untuk satu fotobioreaktor yang sama, menurut penelitian [5] gelembung gas berukuran besar akan mengakibatkan waktu detensi gelembung di dalam kultur yang kecil sehingga waktu kontak antara mikroalga dan gas CO_2 juga kecil. Selain memberikan waktu kontak lebih lama, penggunaan gelembung gas berdiameter kecil dapat mengurangi jumlah kehilangan gas CO_2 yang keluar dari dalam reaktor.

Secara umum laju pertumbuhan biomassa mikroalga *Scenedesmus obliquus* ini untuk setiap kenaikan konsentrasi CO_2 memiliki kecenderungan semakin kecil pada laju alir selain 5 liter/menit, begitu juga dengan laju transfer massa dan efisiensi penyisihan CO_2 . Laju pertumbuhan mikroalga yang menurun pada laju alir yang semakin besar (dari 5 Liter/menit ke 8 liter/menit) dapat disebabkan oleh terjadinya *shear stress* pada fotobioreaktor yang merusak sel mikroalga. Rata-rata terjadi penurunan laju pertumbuhan di setiap kenaikan konsentrasi CO_2 yang menandakan ada batasan kemampuan mikroalga untuk mentoleransi konsentrasi CO_2 yang masuk ke dalam fotobioreaktor.

4. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, mikroalga *Scenedesmus obliquus* dikultivasi dalam fotobioreaktor kolom gelembung pada variasi laju alir 2 liter/menit, 5 liter/menit dan 8 liter/menit, CO_2 tersisih lebih baik pada laju alir rendah, tumbuh pada konsentrasi CO_2 yang berbeda yakni 2%, 5% dan 10%. Kondisi optimal pertumbuhan mikroalga terjadi pada efisiensi penyisihan CO_2 yang lebih besar dan laju transfer massa yang lebih optimum didapatkan pada fotobioreaktor dengan laju alir 5 liter/menit. Dari penelitian ini didapatkan mikroalga tetap tumbuh pada laju dan konsentrasi tinggi, hal ini dipengaruhi oleh laju transfer massa yang berkaitan dengan laju alir dan batasan kemampuan mikroalga dalam melakukan fiksasi CO_2 .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kazim, S. A. (2012). Experimental & Empirical Correlations for the Determination of the Overall Volumetric Mass Transfer Coefficients of Carbon Dioxide in Stirred Tank Bioreactors.
- [2] Jiang, Y., Zhang, W., Wang, J., Chen, Y., Shen, S., & Liu, T. (2013). Utilization of simulated flue gas for cultivation of *Scenedesmus dimorphus*. *Bioresource technology*, 128, 359-364.
- [3] Putt, R., Singh, M., Chinnasamy, S., & Das, K. (2011). An efficient system for carbonation of high-rate algae pond water to enhance CO₂ mass transfer. *Bioresource technology*, 102(3), 3240-3245.
- [4] Dianursanti, N. R., Wijanarko, A., & Nasikin, M. Peningkatan Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* melalui perlakuan teknik pemerangkapan sel dalam aliran sirkulasi media kultur.
- [5] Tang, D., Han, W., Li, P., Miao, X., & Zhong, J. (2011). CO₂ biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO₂ levels. *Bioresource technology*, 102(3), 3071-3076.
- [6] Rostika, R. N. (2015). Pengaruh Laju Alir dan Konsentrasi Gas CO₂ Terhadap Produksi Biomassa Oleh Mikroalga *Chlamydomonas* sp. *NEO TEKNIKA*, 1(1).
- [7] Rinanti, A. (2016). Biotechnology Carbon Capture and Storage by Microalgae to Enhance CO₂ Removal Efficiency in Closed-System Photobioreactor *Algae-Organisms for Imminent Biotechnology*: InTech.
- [8] Kumar, K., Dasgupta, C. N., Nayak, B., Lindblad, P., & Das, D. (2011). Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. *Bioresource technology*, 102(8), 4945-4953.
- [9] Hulatt, C. J., & Thomas, D. N. (2011). Productivity, carbon dioxide uptake and net energy return of microalgal bubble column photobioreactors. *Bioresource technology*, 102(10), 5775-5787.