

Pengembangan *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR) Sistem Semikontinu untuk Produksi Biomassa dan Kadar Lipid, serta Penyisihan Polutan Organik Konsentrasi Tinggi

Shinta Elystia^{1,2*}, David Andrio², Dewi Fitria², Aryo Sasmita², dan Rahmadini Setianingsih²

¹Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan, Pascasarjana, Universitas Riau

²Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Riau, e-mail: shintaelystia@lecturer.unri.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan energi sebagian besar masih berasal dari sumber energi tidak terbarukan yang jumlahnya semakin berkurang. Produksi *biofuel* dari mikroalga dapat menjadi salah satu energi alternatif dalam menghasilkan energi terbarukan. Kadar lipid dalam biomassa mikroalga dapat dikonversi menjadi bahan baku *biodiesel*. Teknologi *Rotary Alga Biofilm Reaktor* (RABR) salah satu teknologi kultivasi mikroalga dan pengolahan limbah. RABR adalah pengembangan dari *Rotating Biological Contactor*, RABR adalah sistem pengolahan biologi dengan sistem *attached growth* dan *suspended growth*. Limbah cair tahu mengandung senyawa organik konsentrasi tinggi yang dapat dimanfaatkan oleh mikroalga sebagai nutrisi pertumbuhan untuk memproduksi biomassa dan menghasilkan lipid. Pada penelitian ini dilakukan pengolahan limbah cair tahu oleh mikroalga *Chlorella* sp. menggunakan teknologi *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR) dengan metode penambahan nutrisi secara semikontinu melalui variasi periode pergantian air limbah setiap 3 hari, setiap 4 hari dan setiap 6 hari selama total 12 hari pengolahan, hal ini bertujuan untuk mengetahui jumlah produksi biomassa dan kadar lipid dalam sel mikroalga *Chlorella* sp. tersuspensi dan biofilm serta penyisihan COD limbah cair tahu. Hasil terbaik didapatkan pada variasi periode pergantian air limbah setiap 4 hari karena nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroalga terpenuhi dengan baik, selain itu juga diperoleh jumlah maksimum kepadatan sel tersuspensi dan biofilm di hari ke-12 yaitu $5,2 \times 10^6$ sel/ml dan $4,1 \times 10^6$ sel/ml, kadar lipid selama pengolahan sebesar 25-52% dan efisiensi penyisihan COD limbah cair tahu mencapai 90,24% dengan konsentrasi akhir COD adalah 64 mg/L.

Kata kunci: *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR), *Chlorella* sp., Pengolahan Semikontinu, Limbah Cair tahu, Lipid

ABSTRACT

Most of the energy used still comes from non-renewable energy sources, which are decreasing in number. Biofuel production from microalgae can be an alternative energy source for producing renewable energy. Lipid content in microalgae biomass can be converted into biodiesel feedstock. Rotary Algae Biofilm Reactor (RABR) technology is one of the technologies for microalgae cultivation and waste treatment. RABR is the development of the Rotating Biological Contactor. RABR is a biological treatment system with attached and suspended growth systems. Tofu liquid waste contains high concentrations of organic compounds that can be utilized by microalgae as growth nutrients to produce biomass and lipids. In this research, the processing of tofu liquid waste by microalgae *Chlorella* sp. using Rotary Algae Biofilm Reactor (RABR) technology with a semi-continuous nutrient addition method through varying periods of wastewater turnover every 3 days, every 4 days, and every 6 days for a total of 12 days of processing aims to determine the amount of biomass production and lipid levels in microalgae cells *Chlorella* sp. suspended and biofilm as well as the removal of COD from tofu liquid waste. The best results were obtained during the variation in the period of changing the wastewater every 4 days because the nutrients needed by the microalgae were met properly. Besides that, the maximum density of suspended cells and biofilm was obtained on the 12th day, namely $5,2 \times 10^6$ cells/ml and $4,1 \times 10^6$ cells/ml, lipid levels during processing were 25-52%, and the COD removal efficiency of tofu wastewater reached 90,24% with a final concentration of 64 mg/L.

Keywords: *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR), *Chlorella* sp., Semi Continuous Processing, Tofu Wastewater, Lipid

Citation: Elystia, S., David, A., Dewi, F., Aryo, S., dan Rahmadini, S. (2024). Pengembangan *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR) Sistem Semikontinu untuk Produksi Biomassa dan Kadar Lipid, serta Penyisihan Polutan Organik Konsentrasi Tinggi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 693-703, doi:10.14710/jil.22.3.693-703

1. PENDAHULUAN

Pemenuhan kebutuhan energi hingga saat ini sebagian besar masih berasal dari energi fosil. Energi fosil yang semakin terkikis akan memicu terjadinya krisis energi. Ketergantungan terhadap energi fosil yang relatif cukup tinggi dapat menimbulkan permasalahan diantaranya menipisnya cadangan energi fosil, emisi gas rumah kaca akibat pembakaran energi fosil dan kerusakan lingkungan, sehingga diperlukan adanya sumber daya energi alternatif yang dapat menggantikan penggunaan bahan bakar fosil (Cheah dkk, 2016).

Penggalan sumber energi alternatif yang bersih, ramah lingkungan, dan berkelanjutan perlu dilakukan. Salah satunya yang berasal dari energi baru dan terbarukan (EBT). Energi Generasi Tiga Berbasis Mikrob Fotosintetik dan Mikroalga Mendukung Solusi Krisis Energi Ramah Lingkungan. Biofuel generasi pertama yang paling populer adalah biodiesel, minyak nabati, biogas, bioalkohol, dan syngas. Biofuel generasi kedua meliputi biomassa lignoselulosa atau tanaman. Melihat adanya kendala yang dihadapi dalam penggunaan bahan baku generasi pertama dan kedua, maka dikembangkan bahan baku ketiga yaitu mikroalga. Pengembangan mikroalga sebagai bahan baku terbarukan dalam pembuatan biodiesel didasarkan pada kemampuan mikroalga untuk melakukan fotosintesis dengan efisiensi yang sangat tinggi dalam menghasilkan biomassa dan laju pertumbuhan yang sangat cepat dibandingkan tumbuhan lainnya. Mikroalga merupakan mikroorganisme yang dapat menjadi sumber energi terbarukan karena adanya mekanisme yang mengubah energi matahari menjadi energi kimia melalui fiksasi CO₂ dalam menghasilkan biomassa (Mata dkk, 2010). Mikroalga mampu menghasilkan kadar lipid lebih dari 50% (dalam biomassa kering) yang dapat dikonversi menjadi bahan baku *biofuel* (Hossain dkk, 2008), dan memproduksi energi 20-100 kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan tumbuhan tingkat tinggi lainnya (Chisti, 2007).

Rotary Algae Biofilm Reactor salah satu reactor untuk memperbanyak mikroalga. RABR merupakan jenis fotobioreaktor dengan desain berbasis *rotating biological contactor* (RBC) untuk menumbuhkan mikroorganisme fototrofik yaitu mikroalga pada serangkaian media berbentuk *disk* yang berputar dalam keadaan tercelup sebagian di dalam air limbah sehingga terbentuk lapisan biofilm yang melekat pada permukaan media tersebut (Blanken dkk, 2014). RABR dengan sistem biakan melekat (*fixed film*) dan tersuspensi (*suspended growth*) yang telah diidentifikasi sebagai alternatif bioreaktor dalam produksi biomassa mikroalga dan mengolah air limbah industri (Kiran dkk, 2017).

Pengolahan air limbah oleh mikroalga dapat dilakukan menggunakan *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR). Pemilihan teknologi ini didasarkan karena proses pertumbuhan mikroalga berbasis tersuspensi dan biofilm yang dapat meningkatkan produksi biomassa 50 kali lebih besar dibandingkan tumbuhan

lainnya, serta pengoperasian sistem biofilm dan pemanenan mikroalga yang lebih mudah (Zhang, 2017).

Mikroalga *Chlorella* sp. merupakan salah satu mikroalga yang banyak dimanfaatkan dalam pengolahan limbah cair. *Chlorella* sp. memiliki kelebihan yakni kemampuan untuk dapat tumbuh dan beradaptasi pada medium atau lingkungan tercemar, menunjukkan tingkat pertumbuhan yang cepat dan mengasimilasi nutrisi secara efisien pada air limbah (Amenorfenyo dkk, 2019). *Chlorella* sp. mampu mereduksi COD dan ammonia sebesar 74% dan 72% (Chaudhary dkk, 2018). Mikroalga dapat mengubah CO₂ menjadi karbohidrat, lemak dan protein yang jauh lebih efisien dibanding dengan tanaman darat (Lestano dkk, 2018). Mikroalga mampu menghasilkan lipid yang cukup tinggi ($\pm 65\%$ dalam berat kering atau setara 75 mg/l) untuk dikonversi menjadi biodiesel (Udayan dkk, 2022). Selain itu, mikroalga juga mengandung karbohidrat yang cukup tinggi (sekitar 20-50% berat kering atau setara dengan 55 mg/l) yang dapat pula dikonversi menjadi bioetanol (Guerrero, 2010).

Persoalan yang dihadapi saat ini dalam pembuatan *biodiesel* dari mikroalga yaitu belum optimalnya biomassa yang dihasilkan. Oleh karena itu, untuk mendapatkan jumlah biomassa yang tinggi dengan kandungan lipid optimum perlu dilakukan proses kultivasi. Pada penelitian ini akan dilakukan kultivasi *chorella sp* memanfaatkan medium dari limbah cair dengan kandungan organik tinggi yaitu dari limbah cair tahu. Limbah cair tahu memiliki kadar COD berkisar 5.000-8.500 mg/l, BOD sebesar 3.000-6.000 mg/l, ammonia 23,3-23,5 mg/l dengan pH 5-6 (Asril dkk, 2019). Limbah organik dapat dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi untuk pertumbuhan mikroalga (El-Naggar dkk, 2022).

Proses kultur mikroalga dapat dilakukan dengan berbagai metode, seperti metode *batch*, kontinu dan semi kontinu. Masing-masing sistem dan metode kultur bisa dikombinasikan sesuai dengan target yang ingin dicapai. Ruiz-Martin, dkk (2010) menyatakan bahwa sistem alga semi kontinu mencapai efisiensi penyisihan yang lebih tinggi daripada kultur *batch*. Sistem semi kontinu menerapkan prinsip pergantian air limbah secara periodik. Hal ini dilakukan sebagai penambahan nutrisi untuk mempertahankan fase pertumbuhan alga dan menghindari kekeruhan akibat peningkatan kerapatan sel dan biomassa pada fase eksponensial yang dapat menghambat penetrasi cahaya masuk ke dalam reaktor (Elystia dkk, 2021).

Proses pergantian sebagian kultur dengan *fresh* medium air limbah secara periodik selama proses pengolahan memiliki peranan penting bagi mikroalga karena limbah yang ditambahkan ke dalam reaktor sebagai sumber nutrisi untuk pertumbuhan mikroalga, sehingga para peneliti lebih merekomendasikan sistem kultur mikroalga secara semikontinu dibandingkan dengan proses *batch* karena merupakan metode yang lebih layak terutama untuk budidaya skala besar, dan mampu mencapai

efisiensi penyisihan yang lebih tinggi daripada kultur *batch* (Ruiz dkk, 2010).

Sistem semikontinu menerapkan prinsip pergantian sebagian kultur dengan *fresh* medium air limbah secara periodik. Hal ini dilakukan sebagai penambahan nutrisi untuk mempertahankan fase pertumbuhan mikroalga, menghindari kekeruhan dan kematian akibat peningkatan produksi biomassa selama fase eksponensial yang menyebabkan penurunan penetrasi cahaya dan kehabisan nutrisi di dalam reaktor (Elystia dkk, 2021). Namun, waktu terbaik dalam pergantian air limbah selama pengolahan menggunakan teknologi *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR) masih belum diketahui. Oleh karena itu, tujuan dalam penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh periode pergantian air limbah pada sistem semikontinu, sehingga dapat menjadi dasar optimasi pertumbuhan mikroalga berbasis tersuspensi dan melekat pada reaktor RABR, sehingga dihasilkan produksi biomassa, kadar lipid dan penyisihan senyawa organik limbah cair tahu yang optimal.

2. METODOLOGI PENELITIAN

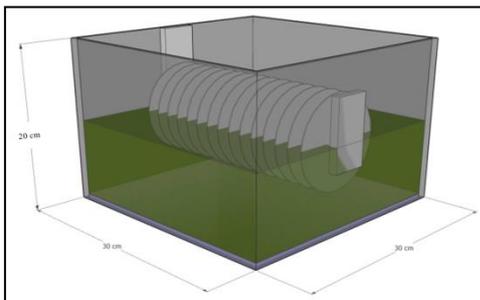
2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Pusat Penelitian Alga, Fakultas Perikanan dan Laboratorium Dasar Proses dan Operasi Pabrik, Fakultas Teknik, Universitas Riau pada bulan Maret-Juli tahun 2023.

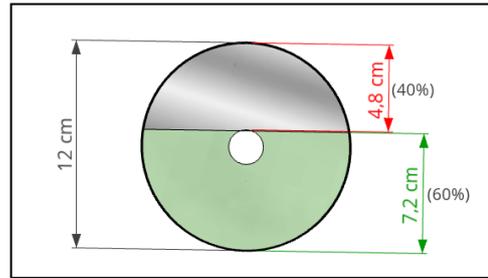
2.2 Metode Penelitian

A. Persiapan Alat dan Bahan

Alat utama yang digunakan adalah Rotary Algae Biofilm Reactor (RABR) berbahan *acrylic* dengan dimensi 30 x 30 x 20 cm. Reaktor ini direncanakan untuk dapat mengolah limbah cair tahu dengan volume 10 Liter. Media disk yang digunakan pada penelitian ini bersifat hidrofobik agar memudahkan mikroalga melekat membentuk lapisan biofilm, dan terbuat dari kaca *acrylic* tipis berbentuk lingkaran dengan diameter 12 cm yang dipasang sejajar. Kedalaman media *disk* pada penelitian ini adalah 60% dari diameter disk dengan tujuan untuk memaksimalkan pertumbuhan biomassa mikroalga *Chlorella* sp. Desain reaktor dan media disk yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Desain Rotary Algae Biofilm Reactor



Gambar 2. Media Disk dengan Kedalaman Terendam 60%

Alat lainnya yang digunakan pada penelitian ini adalah mikroskop, thomacytometer, pH meter, thermometer, erlenmeyer 1000 ml dan peralatan pendukung lainnya. Bahan utama yang digunakan adalah sampel limbah cair tahu yang diambil sebanyak 20 liter pada satu titik tempat pengambilan kemudian diendapkan terlebih dahulu selama 6 jam, bibit mikroalga *Chlorella* sp., medium Dahril Solution dan akuades.

B. Seeding mikroalga *Chlorella* sp.

Tahapan *seeding* mikroalga diawali dengan penambahan 100 mL bibit mikroalga *Chlorella* sp. dan 400 mL medium Dahril Solution ke dalam 3,5 liter aquades. Selain itu, dilakukan pengamatan jumlah sel mikroalga *Chlorella* sp. menggunakan mikroskop dan thomacytometer setiap 24 jam sekali yang bertujuan untuk mengetahui kepadatan sel mikroalga *Chlorella* sp. Kultur mikroalga yang telah melalui tahapan *seeding* kemudian akan digunakan pada tahap aklimatisasi.

C. Aklimatisasi mikroalga *Chlorella* sp.

Aklimatisasi mikroalga *Chlorella* sp. dilakukan secara dua tahap dengan volume kerja 10 liter. Pada aklimatisasi tahap satu menggunakan limbah cair tahu yang telah diendapkan selama 6 jam, kemudian diencerkan dengan konsentrasi 50% dalam 6 liter medium, terdiri dari 3 liter limbah cair tahu dan 3 liter akuades.

Proses yang dilakukan pada aklimatisasi tahap satu adalah mikroalga *Chlorella* sp. yang telah melewati tahapan *seeding* dan limbah cair tahu yang telah diencerkan dimasukkan ke dalam reaktor dengan perbandingan 40%:60% dari volume kerja. Jika aklimatisasi tahap satu didapatkan mikroalga yang sudah mencapai fase eksponensial dengan jumlah kepadatan sel mencapai 1×10^6 sel/ml, maka akan dilanjutkan ke tahap berikutnya.

Pada tahap selanjutnya, mikroalga dari hasil tahap aklimatisasi satu dan 100% limbah cair tahu yang telah diendapkan dimasukkan ke dalam reaktor dengan perbandingan 40%:60% dari volume kerja. Tahap aklimatisasi dua dilakukan hingga jumlah sel mencapai 1×10^6 sel/ml dan ketebalan lapisan biofilm pada media disk sebesar 22 μ m hingga 2 mm (Wang dkk, 2018).

D. Percobaan Utama

Percobaan utama dilakukan pengolahan menggunakan mikroalga *Chlorella* sp. pada medium

limbah cair tahu dalam reaktor RABR dengan volume kerja 10 L (10.000 ml). Suspensi mikroalga sebanyak 40% dari volume kerja, yaitu 4 liter ditambahkan dengan limbah cair tahu yang telah mengalami proses *pre-treatment* terlebih dahulu sebanyak 60% dari volume kerja, yaitu 6 liter, kemudian dimasukkan ke dalam masing-masing reaktor RABR berdasarkan variasi perlakuan, yaitu

- Reaktor 1 (4 liter suspensi alga + 6 liter limbah cair tahu, dengan pergantian air limbah sebanyak 3x di hari ke-3, hari ke-6 dan hari ke-9 selama 12 hari pengolahan)
- Reaktor 2 (4 liter suspensi alga + 6 liter limbah cair tahu, dengan pergantian air limbah sebanyak 2x di hari ke-4 dan ke-8 selama 12 hari pengolahan)
- Reaktor 3 (4 liter suspensi alga + 6 liter limbah cair tahu, dengan pergantian air limbah sebanyak 1x di hari ke-6 selama 12 hari pengolahan)

Setelah masing-masing reaktor mencapai waktu pergantian air limbah, maka tahap selanjutnya adalah mengeluarkan medium kultur sebanyak 30% dari volume kerja, yaitu 3 liter dan diganti dengan 3 liter *fresh medium* limbah cair tahu.

Selama proses pengolahan, dilakukan perhitungan jumlah sel mikroalga di dalam RABR, serta pengukuran pH dan suhu untuk mengamati kondisi lingkungan pertumbuhan. Jumlah sel mikroalga, pH dan suhu diukur setiap hari, perhitungan kadar lipid di hari ke-0, sebelum pergantian air limbah dan di hari ke-12, serta perhitungan konsentrasi COD dilakukan di hari ke-0, sebelum dan sesudah pergantian air limbah, serta di hari ke-12. Mengenai alat atau metode yang digunakan untuk pengujian parameter penelitian tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Uji Laboratorium

Parameter	Alat/Metode
Jumlah Sel Mikroalga	Thomacytometer
pH	pH Meter
Suhu	Thermometer
COD	Titrimetri
Kadar Lipid	Bligh Dyer

Kadar lipid yang terkandung dalam sel mikroalga *Chlorella* sp. selama proses pengolahan dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Kadar Lipid (\%)} = \frac{LW}{BW} \times 100\%$$

Keterangan:

Lw = Bobot lipid (gram)

Bw = Bobot biomassa (gram)

Untuk mengetahui efisiensi penyisihan COD dapat digunakan persamaan berikut:

$$\text{Efisiensi (\%)} = \frac{Cin - Cef}{Cin} \times 100\%$$

Keterangan:

Cin = Konsentrasi influen (mg/L)

Cef = Konsentrasi efluen (mg/L)

Periode pergantian limbah terbaik dapat diketahui berdasarkan nilai tertinggi dari total jumlah sel tersuspensi dan biofilm, produksi lipid mikroalga *Chlorella* sp. dan efisiensi penyisihan COD limbah cair

tahu menggunakan teknologi *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 *Pre-treatment* Proses Pengolahan Limbah Cair Tahu

Pada penelitian ini limbah yang digunakan adalah limbah cair tahu yang telah melewati proses pengendapan selama 6 jam. Menurut Srimongkol dkk (2022), pengolahan limbah berbasis mikroalga perlu dilakukan pengendapan pada air limbah untuk mencegah penghambatan pertumbuhan mikroalga yang disebabkan oleh konsentrasi senyawa organik yang tinggi dan dapat mengoptimalkan penurunan senyawa organik dari limbah cair tahu. Hasil uji senyawa organik limbah cair sebelum dan sesudah pengendapan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Parameter COD pada Sampel Limbah Cair Tahu

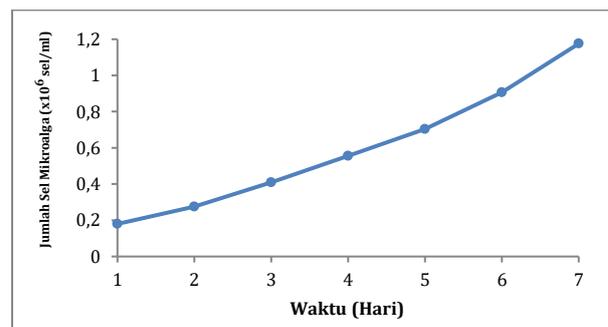
Hasil Uji (mg/L)		
Sebelum Pengendapan (6 Jam)	Setelah Pengendapan (6 Jam)	Baku Mutu (mg/L)*
2580	1317	300

Sumber: *Permen LH No. 5 Tahun 2014

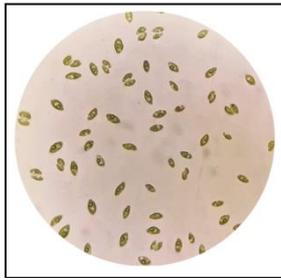
Berdasarkan Tabel 2. konsentrasi zat organik (mg/l COD) limbah cair tahu setelah pengendapan masih tinggi, yaitu besar dari 1000 mg/L dan belum memenuhi standar baku mutu yang telah ditetapkan oleh Menteri Lingkungan Hidup, untuk itu diperlukan pengolahan limbah cair tahu sebelum dibuang ke badan air penerima, salah satunya menggunakan *Rotary Alga Biofilm Reactor* (RABR).

3.2 *Seeding* dan Aklimatisasi Mikroalga *Chlorella* sp. pada Limbah Cair Tahu Menggunakan RABR

Seeding merupakan tahap pembibitan yang bertujuan untuk memperbanyak sel mikroalga yang akan digunakan dalam proses pengolahan hingga fase eksponensial dengan jumlah sel tersuspensi dan biofilm mencapai 1×10^6 sel/ml. Hasil yang didapatkan dari tahapan *seeding* mikroalga *Chlorella* sp. adalah jumlah sel telah mencapai $1,18 \times 10^6$ sel/ml di hari ke-7. Adapun grafik pertumbuhan dan bentuk morfologi sel mikroalga *Chlorella* sp. selama proses *seeding* dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Grafik Jumlah Sel Mikroalga *Chlorella* sp. Selama Proses *Seeding*

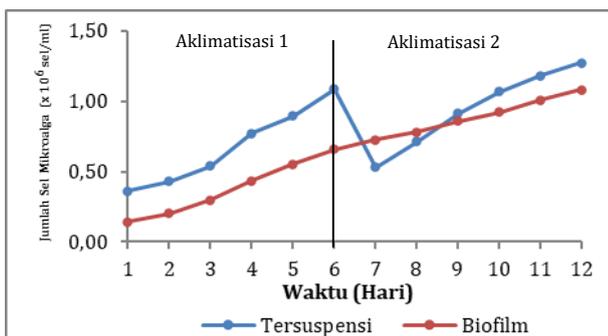


Gambar 4. Morfologi Sel Mikroalga *Chlorella* sp.

Pada penglihatan mikroskopis, terlihat sel-sel mikroalga *Chlorella* sp. berwarna hijau dengan bentuk bulat telur. Awal pertumbuhan mikroalga mengalami fase adaptasi yang terjadi dalam waktu singkat, ditandai dengan adanya peningkatan jumlah sel yang terjadi dari awal proses *seeding*, sehingga dimungkinkan mikroalga *Chlorella* sp. telah mampu beradaptasi dengan lingkungan kultur dan akan mencapai fase eksponensial untuk kemudian dilakukan tahapan aklimatisasi.

Aklimatisasi adalah proses yang ditujukan agar kondisi mikroalga *Chlorella* sp. hasil perbanyakan dapat beradaptasi dengan kondisi lingkungannya yang baru yakni pada medium limbah cair tahu. Selain itu, aklimatisasi juga dilakukan agar terjadi pembentukan biofilm pada media *disk*. Dalam proses ini, bakteri *indigeneous* yang terdapat pada limbah cair tahu berinteraksi dengan mikroalga menghasilkan EPS (*Extracellular Polymeric Substances*) yang membantu dalam proses pelekatan biofilm secara stabil pada permukaan media *disk* (Mantzorou dan Filippos, 2019).

Tahapan aklimatisasi pada penelitian ini dibagi menjadi tahap satu dan tahap dua selama total 6-12 hari dengan tujuan untuk memperpanjang waktu kontak antara mikroalga *Chlorella* sp. dengan limbah cair tahu. Jumlah sel mikroalga *Chlorella* sp. selama tahap aklimatisasi satu dan dua berbasis tersuspensi dan biofilm dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Jumlah Sel Mikroalga *Chlorella* sp. Selama Tahap Aklimatisasi

Berdasarkan grafik yang tertera pada Gambar 5 tersebut, dapat diketahui bahwa pada proses aklimatisasi tahap satu, sel mikroalga *Chlorella* sp. telah mencapai fase eksponensial di hari ke-6 dengan total jumlah sel tersuspensi sebesar $1,09 \times 10^6$ sel/ml, namun jumlah sel berbasis biofilm hanya mencapai $0,66 \times 10^6$ sel/ml, sehingga perlu dilanjutkan dengan

proses aklimatisasi tahap dua selama 6 hari dengan total jumlah sel tersuspensi sebesar $1,27 \times 10^6$ sel/ml dan biofilm mengalami peningkatan mencapai $1,08 \times 10^6$ sel/ml. Oleh karena itu, dapat diketahui bahwa mikroalga *Chlorella* sp. mampu memanfaatkan nutrisi yang berasal dari limbah cair tahu untuk metabolisme dan produksi biomassa.

3.3 Faktor Lingkungan Medium Pertumbuhan Mikroalga *Chlorella* sp.

Faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga *Chlorella* sp. pada *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR) adalah pH dan suhu. Rentang nilai pH dan suhu selama proses pengolahan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengukuran pH dan Suhu Selama Proses Pengolahan

Faktor Lingkungan	Variasi Periode Pergantian Air Limbah		
	Setiap 3 Hari	Setiap 4 Hari	Setiap 6 Hari
pH	5,38-7,21	5,31-7,28	5,33-7
Suhu	25-30°C	26-31°C	25-31°C

Berdasarkan Tabel 3, pH air limbah selama pengolahan berada pada kisaran 5,31-7,28. Menurut Boroh dkk (2019), mikroalga *Chlorella* sp. dapat tumbuh pada kisaran pH 5-8. pH air limbah pada masing-masing reaktor berada pada rentang optimum pertumbuhan mikroalga. Nilai pH selama pengolahan mengalami peningkatan pada pengamatan ke-1 sampai ke-12 hari. Hal ini disebabkan adanya aktivitas fotosintesis mikroalga pada saat fotosintesis, CO₂ bebas merupakan jenis karbon anorganik utama yang digunakan mikroalga berupa ion karbonat (CO₃²⁻) dan ion bikarbonat (HCO₃⁻). Penyerapan CO₂ bebas dan bikarbonat oleh mikroalga menyebabkan penurunan konsentrasi CO₂ terlarut dan mengakibatkan peningkatan nilai pH

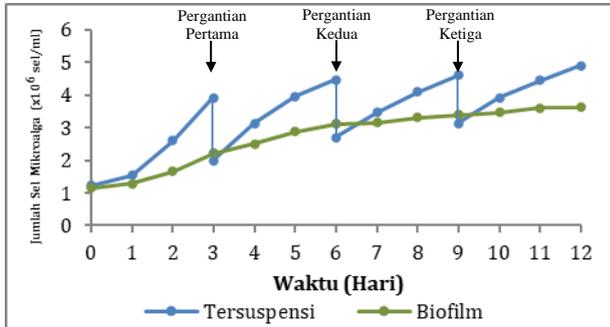
Berdasarkan Tabel 4 diketahui suhu medium kultur limbah cair tahu selama proses pengolahan menggunakan mikroalga *Chlorella* sp. berada pada rentang 25-31°C. Menurut Boroh dkk (2019), dalam mempertahankan keberlangsungan hidup dan reproduksi sel, suhu optimal pertumbuhan mikroalga *Chlorella* sp. berada pada rentang 25-32°C, sehingga dapat disimpulkan bahwa rentang suhu dalam penelitian ini memenuhi kriteria pertumbuhan mikroalga *Chlorella* sp.

3.4 Pengaruh Periode Pergantian Air Limbah terhadap Jumlah Sel Mikroalga *Chlorella* sp. Selama Proses Pengolahan

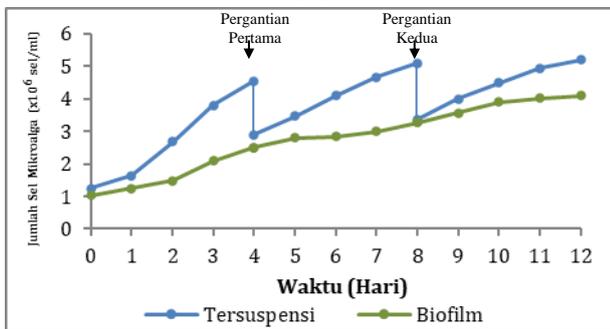
Pergantian air limbah dilakukan sebagai penambahan nutrisi pada medium kultur mikroalga *Chlorella* sp. di dalam RABR, dan proses tersebut berpengaruh terhadap jumlah sel mikroalga *Chlorella* sp. tersuspensi dan biofilm yang dapat dilihat pada Tabel 4 mengenai perbedaan jumlah sel di hari terakhir proses pengolahan, yaitu di hari ke-12, sedangkan Gambar 6 menggambarkan grafik pertumbuhan sel mikroalga *Chlorella* sp. selama proses pengolahan.

Tabel 4. Jumlah Sel Mikroalga *Chlorella* sp. di Hari ke-12 Proses Pengolahan

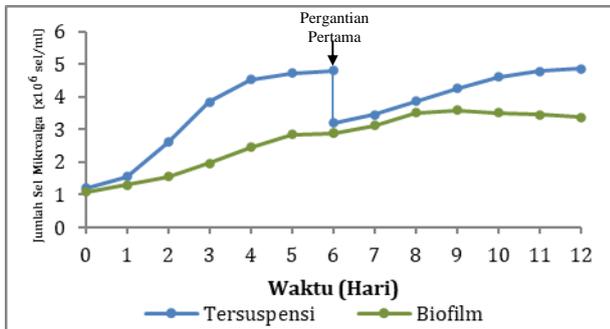
Variasi Pergantian Air Limbah	Jumlah Sel Mikroalga ($\times 10^6$ sel/ml)		
	Tersuspensi	Biofilm	Total
Setiap 3 Hari	4,9	3,62	8,52
Setiap 4 Hari	5,2	4,1	9,3
Setiap 6 Hari	4,85	3,37	8,22



(A)



(B)



(C)

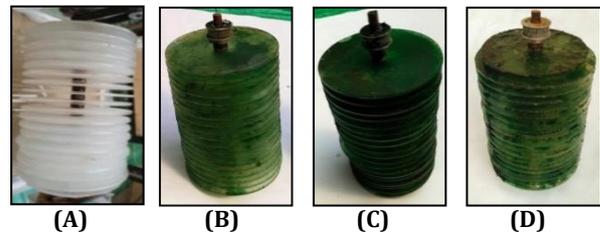
Gambar 6. Jumlah Sel Mikroalga *Chlorella* sp. Tersuspensi dan Biofilm pada Variasi Periode Pergantian Air Limbah (A) Setiap 3 Hari (B) Setiap 4 Hari (C) Setiap 6 Hari

Berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 6 dapat diketahui bahwa total jumlah sel tersuspensi dan biofilm tertinggi di hari terakhir proses pengolahan terdapat pada periode pergantian air limbah setiap 4 hari, yaitu mencapai $9,3 \times 10^6$ sel/ml. Pola pertumbuhan mikroalga ini dipengaruhi oleh pemberian nutrisi sebelum mikroalga memasuki fase stasioner. Pada saat nutrisi di dalam reaktor terpenuhi dengan baik, laju pertumbuhan sel menjadi meningkat, sehingga didapatkan periode pergantian limbah setiap 4 hari merupakan waktu yang tepat untuk mengganti sebagian kultur pertumbuhan

mikroalga di dalam reaktor dengan *fresh* medium limbah cair tahu, sehingga menghasilkan biomassa optimal dan dapat menjaga stabilitas kondisi kualitas air kultur. Pada periode pergantian limbah setiap 3 hari didapatkan jumlah sel belum tumbuh secara maksimal, hal ini dikarenakan ketersediaan nutrisi di dalam reaktor dalam jumlah yang berlebih sehingga membutuhkan waktu bagi mikroalga untuk beradaptasi, sedangkan total jumlah sel terendah terdapat pada periode pergantian air limbah setiap 6 hari. Selama periode pergantian air limbah setiap 6 hari, nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroalga *Chlorella* sp. mulai berkurang karena telah banyak dimanfaatkan selama fase eksponensial dan mikroalga telah mencapai tahap populasi maksimum, sehingga menghalangi cahaya masuk ke medium dan mempengaruhi kemampuan pembelahan sel yang menyebabkan jumlah sel semakin menurun.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Simamora (2017) mengenai pengolahan limbah cair tahu menggunakan fotobioreaktor secara semikontinu, didapatkan jumlah sel mikroalga hanya sebesar $1,2 \times 10^6$ sel/ml, sehingga dapat diketahui bahwa jumlah sel selama pengolahan menggunakan RABR lebih besar 9 kali lipat dibandingkan dengan sistem fotobioreaktor.

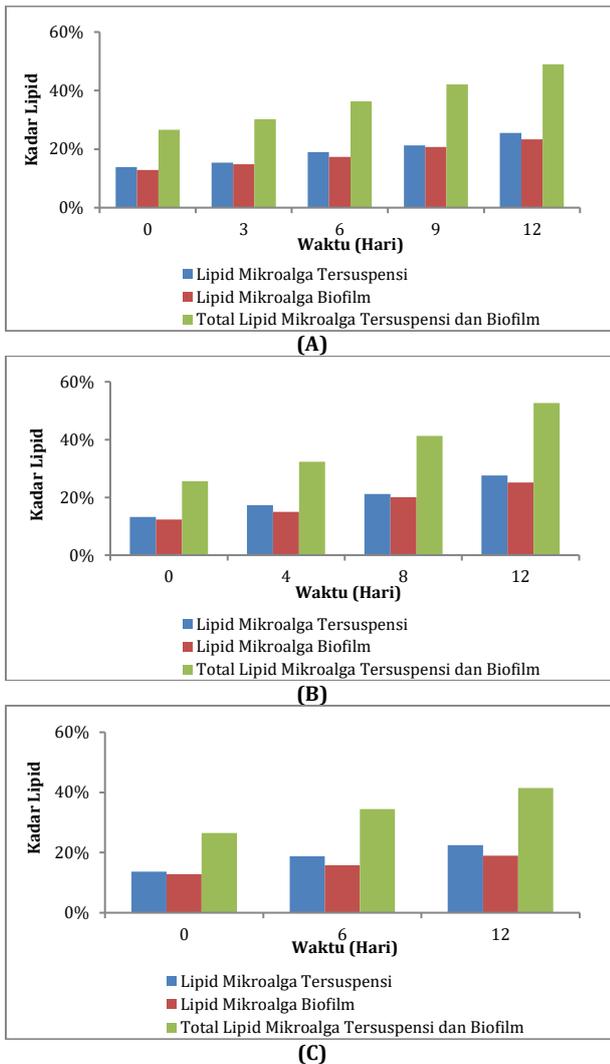
Berdasarkan pengamatan yang dilakukan, pada reaktor 1 menghasilkan lapisan biofilm pada permukaan disk berwarna hijau dengan ketebalan 2,1 mm. Sementara itu, permukaan disk pada reaktor 2 menghasilkan lapisan biofilm berwarna hijau pekat dengan ketebalan 2,5 mm, dan permukaan media disk pada reaktor 3 mulai terjadi pelepasan sel biofilm dengan ketebalan disk 1,95 mm, seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Biofilm Mikroalga *Chlorella* sp. pada Media Disk dengan Variasi Periode Pergantian Air Limbah (A) Sebelum Pengolahan (B) Setiap 3 Hari (C) Setiap 4 Hari (D) Setiap 6 Hari

3.5 Pengaruh Periode Pergantian Air Limbah terhadap Kadar Lipid dalam Sel Mikroalga *Chlorella* sp.

Hasil uji kadar lipid yang terkandung pada sel mikroalga *Chlorella* sp. pada masing-masing reaktor dengan variasi periode pergantian air limbah dan total kadar lipid pada sel mikroalga *Chlorella* sp. tersuspensi dan biofilm selama proses pengolahan menggunakan *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR) dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Perbandingan Kadar Lipid dalam Sel Mikroalga *Chlorella* sp. Tersuspensi dan Biofilm dengan Variasi Periode Pergantian Air Limbah (A) Setiap 3 Hari (B) Setiap 4 Hari (C) Setiap 6 Hari

Pergantian air limbah berpengaruh terhadap ketersediaan nutrisi di dalam RABR, dan berkaitan erat dengan kadar lipid yang dihasilkan. Berdasarkan Gambar 8, dapat diketahui bahwa total kadar lipid pada sel mikroalga *Chlorella* sp. dengan nilai tertinggi terdapat pada reaktor dengan variasi periode pergantian air limbah setiap 4 hari yaitu 52,66%, kemudian diikuti dengan variasi periode pergantian air limbah setiap 3 dan 6 hari secara berturut-turut adalah 48,92% dan 41,51%. Kadar lipid yang dihasilkan berbanding lurus dengan laju respirasi sel mikroalga *Chlorella* sp. Pada proses respirasi, sel akan menguraikan glukosa untuk menghasilkan energi berupa ATP, dan jika terjadi kelebihan energi pada proses glikolisis, energi tersebut kemudian diubah menjadi senyawa lipid dan disimpan sebagai cadangan energi, sehingga semakin banyak jumlah sel selama proses pengolahan menggunakan RABR, maka akumulasi kadar lipid dalam sel mikroalga akan semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Hasanuddin (2012) yang menyatakan bahwa tingginya laju pertumbuhan akan meningkatkan kadar lipid di dalam sel mikroalga.

Pada variasi periode pergantian air limbah setiap 3 hari, kadar lipid yang dihasilkan belum mencapai jumlah yang optimum, dikarenakan jumlah sel yang lebih rendah dibandingkan pergantian limbah setiap 4 hari dengan kadar lipid yang paling baik dibandingkan yang lainnya. Hasil ini sesuai dengan penelitian Widayat dan Hadiyanto (2015), yang menyatakan bahwa apabila nutrisi yang tersedia di dalam reaktor tercukupi, maka terjadi peningkatan jumlah sel dan kadar lipid, sedangkan pada variasi pergantian limbah setiap 6 hari, mikroalga sudah memasuki fase penurunan laju pertumbuhan, sehingga berpengaruh terhadap menurunnya jumlah sel akibat nutrisi yang tersedia di dalam reaktor untuk pertumbuhan mikroalga sudah mulai berkurang. Pada prinsipnya semakin tingginya jumlah nutrisi dalam batas kisaran tertentu, akan semakin meningkat pula produktivitas lipid dalam sel mikroalga. Hal ini berkaitan dengan aktivitas enzim asetil KoA karboksilase yang merupakan prekursor dalam proses biosintesis lipid pada sel mikroalga (Hasanuddin, 2012).

Pada sistem kultur semikontinu, pergantian air limbah bertujuan sebagai penambahan nutrisi, seperti nitrogen dan glukosa sebagai sumber karbon pada medium pertumbuhan sehingga nutrisi tercukupi dengan baik dan mendukung proses sintesis lipid melalui pertumbuhan mikroalga dengan maksimal, yang dapat dilihat dengan adanya peningkatan jumlah kepadatan sel. Menurut Hadiyanto (2010), biomassa mikroalga sejalan dengan pertumbuhan selnya, apabila pertumbuhan selnya meningkat maka biomassa yang dihasilkan juga akan semakin tinggi.

Perbandingan kadar lipid pada penelitian lain dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Penelitian Terkait Pengukuran Kadar Lipid

No.	Peneliti	Alat	Mikroalga	Jenis Limbah	Metode	Total Kadar Lipid
1.	Elystia (2021)	Flat Photo-bioreactor	Konsorsium Mikroalga	POME	Semi-kontinu	19,33%
2.	Elystia (2019)	Photo-bioreactor	<i>Chlorella</i> sp.	Limbah Cair Hotel	Batch	36,84%
3.	Dianursantia (2014)	Photo-bioreactor	<i>Chlorella vulgaris</i>	Limbah Cair Tahu	Batch	14,46%
4.	Penelitian ini (2023)	RABR	<i>Chlorella</i> sp.	Limbah Cair Tahu	Semi-kontinu	52,66%

Berdasarkan data pada Tabel 5 didapatkan kadar lipid tertinggi pada metode *Rotary Alga Biofilm Reactor* (RABR), yaitu mencapai 52,66%. Diketahui kadar lipid pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan penelitian lainnya disebabkan adanya faktor perbedaan sistem kultur mikroalga dan teknologi yang digunakan. Pada sistem kultur semikontinu, pergantian air limbah bertujuan sebagai penambahan nutrisi, seperti nitrogen dan glukosa sebagai sumber karbon pada medium pertumbuhan sehingga nutrisi tercukupi dengan baik dan mendukung proses sintesis lipid melalui

pertumbuhan mikroalga dengan maksimal, yang dapat dilihat dengan adanya peningkatan jumlah kepadatan sel.

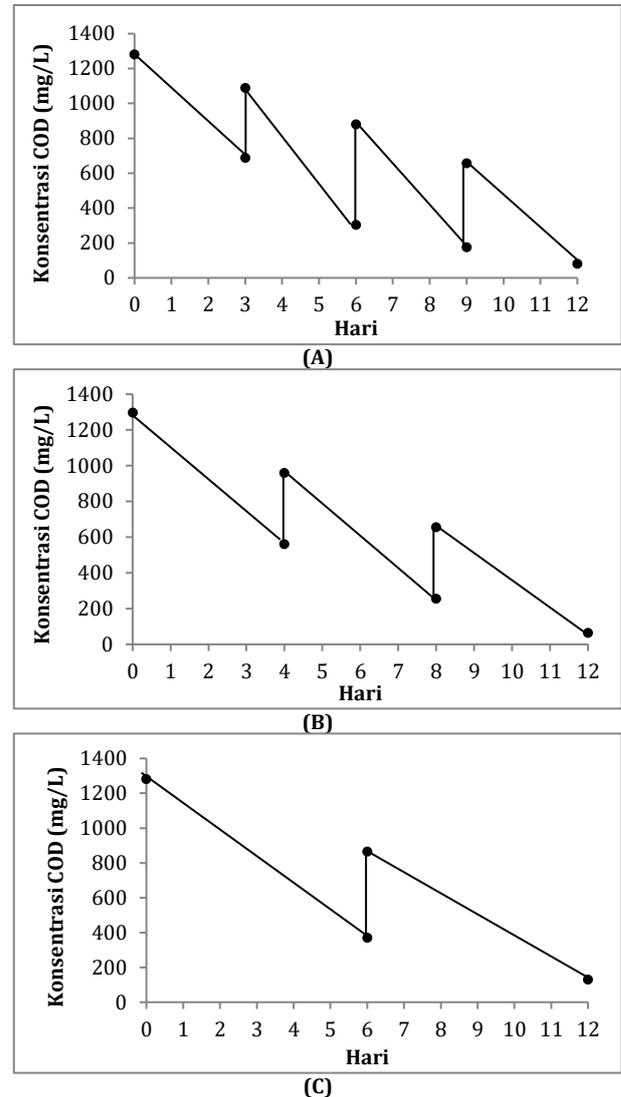
Pada penggunaan teknologi RABR, kadar lipid rata-rata di dalam reaktor dipengaruhi oleh pertumbuhan sel mikroalga *Chlorella* sp. yang terjadi secara tersuspensi di dalam air limbah dan biofilm yang melekat pada media disk, sehingga meningkatkan jumlah biomassa dan kadar lipid, dimana semakin tinggi jumlah biomassa mikroalga maka kadar lipid yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan sel-sel mikroalga yang telah terbentuk jika telah mencapai jumlah yang maksimum dalam medium pertumbuhannya akan mengalami fase penurunan laju pertumbuhan akibat kekurangan nutrisi, sehingga sel-sel mikroalga tersebut akan merubah penggunaan karbon dari proses pertumbuhan menjadi cadangan energi seperti lipid.

Pada penggunaan teknologi RABR, kadar lipid di dalam reaktor dipengaruhi oleh pertumbuhan sel mikroalga *Chlorella* sp. yang terjadi secara tersuspensi di dalam air limbah dan biofilm yang melekat pada media disk, sehingga meningkatkan jumlah biomassa dan kadar lipid, dimana semakin tinggi jumlah biomassa mikroalga maka kadar lipid yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan sel-sel mikroalga yang telah terbentuk jika telah mencapai jumlah yang maksimum dalam medium pertumbuhannya akan mengalami fase penurunan laju pertumbuhan akibat kekurangan nutrisi, sehingga sel-sel mikroalga tersebut akan merubah penggunaan karbon dari proses pertumbuhan menjadi cadangan energi seperti lipid.

3.5 Pengaruh Periode Pergantian Air Limbah terhadap Konsentrasi dan Efisiensi Penyisihan COD Limbah Cair Tahu

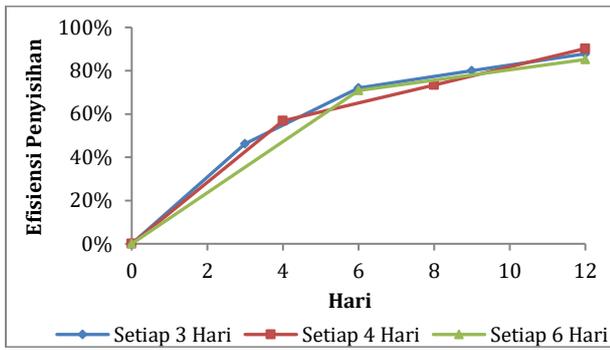
Grafik konsentrasi COD selama proses pengolahan dapat dilihat pada Gambar 9. Berdasarkan grafik pada Gambar 9 dapat diketahui bahwa waktu pergantian air limbah berpengaruh pada tingkat penyisihan COD. Hasil penyisihan COD terbaik didapatkan pada variasi periode pergantian air limbah setiap 4 hari, yaitu mencapai 90,24% dengan konsentrasi COD akhir sebesar 64 mg/L, hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya pergantian air limbah di waktu yang tepat menyebabkan mikroalga dapat memanfaatkan senyawa organik yang terkandung di dalam limbah cair tahu sebagai nutrisi pertumbuhannya dengan baik, sehingga optimal dalam menurunkan konsentrasi COD di dalam reaktor. Sementara itu, pada variasi periode pergantian air limbah setiap 3 hari, konsentrasi COD dipengaruhi oleh jumlah sel mikroalga yang lebih rendah dibandingkan dengan variasi periode pergantian air limbah setiap 4 hari, hal ini menyebabkan penyisihan COD di dalam reaktor tidak terjadi secara maksimal dengan kadar COD akhir sebesar 80 mg/L, namun nilai tersebut tidak lebih tinggi jika dibandingkan dengan pergantian air limbah setiap 6 hari, yaitu 128 mg/L. Kemudian setelah

dilakukan pergantian air limbah dengan *fresh medium* limbah cair tahu terjadi peningkatan nilai COD yang menunjukkan senyawa organik yang terkandung dalam limbah cair tahu cukup tinggi.



Gambar 9. Grafik Konsentrasi COD Selama Proses Pengolahan dengan Variasi Periode Pergantian Air Limbah (A) Setiap 3 Hari (B) Setiap 4 Hari (C) Setiap 6 Hari

Mikroalga di dalam reaktor dengan variasi periode pergantian air limbah setiap 6 hari sudah mencapai fase penurunan laju pertumbuhan akibat ketersediaan nutrisi pada RABR menurun, sehingga tidak lagi maksimal dalam menguraikan senyawa organik yang terkandung dalam limbah. Selain itu, konsentrasi COD pada hari terakhir periode pergantian air limbah setiap 6 hari, yaitu di hari ke-12 dapat dipengaruhi oleh terjadinya *lysis* (pecahnya sel mikroorganisme). Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Septiani dkk (2014), dimana pada saat terjadi *lysis*, kandungan organik yang ada dalam sel mikroorganisme akan terukur sebagai COD. Adapun grafik efisiensi penyisihan COD dapat dilihat pada Gambar 10.

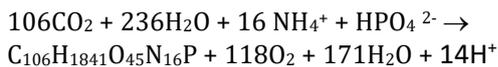


Gambar 10. Grafik Efisiensi Penyisihan COD Selama Proses Pengolahan

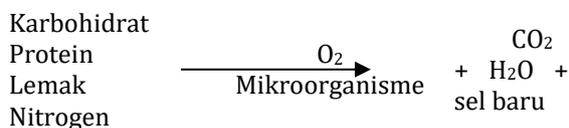
Berdasarkan grafik yang tertera pada Gambar 10, dapat diketahui bahwa selama 12 hari proses pengolahan limbah cair tahu, terjadi peningkatan efisiensi penyisihan COD yang terkandung di dalam limbah cair tahu. Hal ini disebabkan oleh semakin lama interval pergantian air limbah, maka pembelahan sel mikroalga *Chlorella* sp. semakin meningkat melalui penyerapan nutrisi berupa senyawa organik yang terkandung di dalam limbah cair tahu. Namun, apabila telah melebihi waktu optimal periode pergantian air limbah, yaitu setiap 4 hari, maka pertumbuhan mikroalga akan menurun yang diindikasikan dengan penurunan COD lebih kecil.

Jumlah nutrisi di dalam air limbah secara bertahap menurun sejalan dengan akumulasi biomassa ketika mikroalga dibiakkan dalam air limbah, hal ini menunjukkan adanya proses penguraian dan pemanfaatan senyawa organik oleh mikroalga untuk pertumbuhan, sehingga terjadi peningkatan efisiensi penyisihan COD selama proses pengolahan.

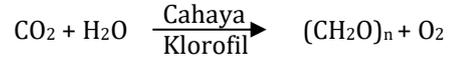
Dalam penelitian ini, penurunan konsentrasi COD pada setiap perlakuan variasi juga terjadi karena adanya simbiosis antara mikroalga *Chlorella* sp. dan bakteri *indigenous* yang terkandung dalam limbah cair tahu, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Jannah (2022), di dalam limbah cair tahu teridentifikasi adanya bakteri *Bacillus* sp. Bakteri tersebut akan memanfaatkan O_2 yang dihasilkan oleh mikroalga untuk mendegradasi senyawa organik dan kemudian berkembang biak menjadi sel-sel baru dan menghasilkan CO_2 . Pemanfaatan karbondioksida dan nutrisi pada limbah cair tahu dalam proses pembentukan sel mikroalga dapat ditunjukkan sebagai berikut:



Proses degradasi senyawa organik yang terkandung di dalam limbah cair tahu secara sederhana dapat dituliskan dengan reaksi berikut:



Selain itu, melalui mekanisme fotosintesis mikroalga akan melepaskan oksigen yang akan dimanfaatkan oleh bakteri pengurai untuk mempercepat proses penguraiannya. Dengan bertambahnya karbon maka biomassa dalam bentuk $(CH_2O)_n$ semakin meningkat, dan dapat dilihat pada persamaan reaksi berikut:



Efisiensi penyisihan COD dipengaruhi oleh teknologi dan sistem pengolahan air limbah. Adapun perbandingan efisiensi penyisihan COD oleh mikroalga pada penelitian lainnya dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Penelitian Terkait Efisiensi Penyisihan COD

No.	Peneliti	Alat	Mikroalga	Jenis Limbah	Metode	Efisiensi
1.	Nasution (2022)	RABR	<i>Chlorella</i> sp.	Limbah Cair Tahu	Batch	75,88%
2.	Elystia (2021)	Flat photo-bioreactor	Konsorsium Mikroalga	POME	Semi-kontinu	81,25%
3.	Istikhorotun (2017)	Reaktor Buble Coloumn	<i>Chlorella</i> sp.	Limbah Cair Tahu	Batch	77,40%
4.	Penelitian ini (2023)	RABR	<i>Chlorella</i> sp.	Limbah Cair Tahu	Semi-kontinu	90,24%

Berdasarkan data pada Tabel 6, dapat diketahui bahwa efisiensi penyisihan polutan tertinggi terdapat pada metode *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR), dengan efisiensi sebesar 90,24%. Jika dibandingkan dengan penelitian lainnya, efisiensi penyisihan COD pada penelitian ini lebih tinggi dikarenakan kinerja mikroalga *Chlorella* sp. pada RABR terjadi secara tersuspensi dan biofilm. Adanya biofilm yang melekat pada permukaan disk dapat meningkatkan jumlah mikroorganisme yang ada di dalam RABR dan mempengaruhi efisiensi penyisihan polutan yang terkandung pada air limbah, dimana semakin tinggi tingkat kepadatan jumlah sel mikroalga *Chlorella* sp. dalam suatu medium maka semakin banyak unsur hara yang telah dimanfaatkan sehingga efisiensi penyisihan akan semakin tinggi (Restuhadi dkk, 2017).

Pengolahan limbah cair tahu yang hanya memanfaatkan mikroalga berbasis suspensi tidak akan semaksimal pengolahan dengan menggunakan mikroalga *Chlorella* sp. tersuspensi dan biofilm. Hal ini sesuai dengan penelitian Zhuang dkk (2016), yang menyatakan bahwa adanya media biofilm meningkatkan penyisihan kandungan organik dibandingkan pengolahan yang hanya memanfaatkan suspensi mikroalga.

Selain itu, dengan adanya penerapan sistem kultur semikontinu melalui pergantian air limbah secara periodik berpengaruh terhadap jumlah nutrisi yang tersedia di dalam RABR. Apabila jumlah kepadatan sel di dalam reaktor terus meningkat tanpa adanya pergantian dan penambahan nutrisi, maka yang

Elystia, S., David, A., Dewi, F., Aryo, S., dan Rahmadini, S. (2024). Pengembangan *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR) Sistem Semikontinu untuk Produksi Biomassa dan Kadar Lipid, serta Penyisihan Polutan Organik Konsentrasi Tinggi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 693-703, doi:10.14710/jil.22.3.693-703

terjadi adalah cahaya terhalang masuk ke dalam reaktor dan menyebabkan proses fotosintesis terganggu. Selain itu, akibat adanya kompetisi antar mikroalga untuk bertahan hidup, nutrisi yang ada menjadi terbatas dan terbentuk zat toksik yang dapat meracuni mikroalga itu sendiri.

Oleh karena itu, dengan adanya pergantian 30% medium kultur mikroalga dengan *fresh* medium limbah cair tahu pada penelitian ini telah terjadi pengenceran dan intensitas cahaya dapat masuk ke dalam media kultur secara maksimal, sehingga dapat diyakinkan bahwa nutrisi di dalam RABR tetap terpenuhi dan mikroalga dapat tumbuh dengan optimal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR) sistem semikontinu efektif untuk meningkatkan produksi biomassa, kadar lipid, serta penyisihan polutan organik konsentrasi tinggi. Hal ini dipengaruhi oleh pertumbuhan mikroalga yang tidak hanya terjadi secara tersuspensi, namun juga terdapat pertumbuhan melekat (biofilm) mikroalga *Chlorella* sp. yang melekat pada media disk, serta dengan adanya sistem semikontinu dapat menjaga nutrisi untuk memenuhi kebutuhan pertumbuhan mikroalga di dalam reaktor, dimana hasil terbaik selama 12 hari proses pengolahan didapat pada periode pergantian air limbah setiap 4 hari.

Pada penelitian ini hanya dilakukan uji kadar lipid dan penyisihan polutan organik, namun belum ada pengujian kandungan lainnya dari mikroalga *Chlorella* sp. yang dapat dimanfaatkan, sehingga pada penelitian selanjutnya diharapkan tidak hanya menghitung kadar lipid yang dihasilkan, tetapi untuk menilai produk bernilai tinggi lainnya, seperti: phycobiliprotein, pigmen dan metabolit lain dari mikroalga berbasis tersuspensi dan biofilm yang dikultur dalam air limbah. Selain itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai potensi bioproduk yang dihasilkan, seperti: biofuel, pupuk, pangan dan biogas. pencemar lainnya yang terkandung di dalam mikroalga.

DAFTAR PUSTAKA

Amenorfenyo, D. K., Huang, X., Zhang, Y., Zeng, Q., Zhang, N., Ren, J., & Huang, Q. 2019. Microalgae brewery wastewater treatment: potentials, benefits and the challenges. *International journal of environmental research and public health*, 16(11), 1910.

Amini, E., Babaei, A., Mehrnia, M. R., Shayegan, J., & Safdari, M. S. 2020. Municipal wastewater treatment by semi-continuous and membrane algal-bacterial photo-bioreactors. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101274.

Asril, M., Oktaviani, I., & Leksikowati, S. 2019. Isolasi Bakteri Indigineous dari Limbah Cai Tahu dalam Mendegradasi Protein dan Melarutkan Fosfat. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(1), 67-72.

Boroh, R., Litaay, M., Umar, M. R., & Ambeng, A. 2019. Pertumbuhan *Chlorella* sp. pada beberapa kombinasi media kultur. *BIOMA: Jurnal Biologi Makassar*, 4(2), 129-137.

Cheah, W. Y., Tau, C. L., Pau, L. S., Joon, C. J., Jo, S. C., dan Duu J. L. 2016. Cultivation in Wastewaters for Energy: A Microalgae Platform. *Applied Energy*. 179: 609-625.

Chisti, Y. 2007. Biodiesel from Microalgae. *Biotechnology Advances*. 25: 294-306.

Chaudhary R, Tong YW, Dikshit AK. 2018. Kinetic study of nutrients removal from municipal wastewater by *Chlorella vulgaris* in photobioreactor supplied with CO₂ -enriched air. *Environmental Technology*. 41(5):617-626.

Dianursantia, R. B., Mohamad, T. G., & Taufik, H. A. 2014. Industrial tofu wastewater as a cultivation medium of microalgae *Chlorella vulgaris*. *Energy Procedia*, 47, 56-61.

El-Naggar, N. E. A., Hamouda, R. A., & Abou-El-Souod, G. W. 2022. Statistical optimization for simultaneous removal of methyl red and production of fatty acid methyl esters using fresh alga *Scenedesmus obliquus*. *Scientific Reports*, 12(1), 7156.

Elystia, S., Lestari, A. S., & Muria, S. R. 2019. Peningkatan Kandungan Lipid dan Biomassa Mikroalga *Scenedesmus* sp. dari Media Kultivasi Limbah Cair Tahu Sebagai Bahan Baku Biodiesel. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 5(2), 19-28.

Elystia, S., Novira, T.B., & Muria, S.R. 2021. Sistem Kultur Semikontinu dalam Produksi Lipid dan Penyisihan COD Menggunakan Konsorsium Mikroalga dari Palm Oil Mill Effluent (POME). *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, 10(1), 28-39.

Hasanudin, M. 2012. *Pengaruh perbedaan intensitas cahaya terhadap pertumbuhan dan kadar lipid mikroalga Scenedesmus sp. yang dibudidayakan pada limbah cair tapioka* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).

Hossain, ABMS, Salleh, A., Boyce, A.N., Chowdhury, P., dan Naquiddin M. 2008. Biodiesel Fuel Production from Algae as Renewable Energy American. *Journal of Biochemistry and Biotechnology*. 4(3): 250-254.

Istirokhatun, T., Aulia, M., & Utomo, S. 2017. Potensi *Chlorella* sp. untuk menyisihkan COD dan nitrat dalam limbah cair tahu. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*. 14(2), 88-96.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2014. Permen LHK No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Jakarta.

Lestano, W., Ihsan, I. M., & Santoso, A. D. 2018. Profitabilitas Biodiesel dari Biomasa Mikroalga. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 19(1), 117.

Mata, T. M., Antonio, A. M., dan Nidia, S. C. 2010. Microalgae for Biodiesel Production and Other Applications: A Review. *Renew Sustain Energy Rev*. 14: 217-32.

Mantzorou, A., Filippou, V. 2019. Microalgal Biofilms: A Further Step Over Current Microalgal Cultivation Techniques. *Science of The Total Environment*, 651, 3187-3201.

Naiola, E., & Soeka, Y. S. 2007. Fermentasi Kecap dari Beberapa Jenis Kacang-Kacangan dengan Menggunakan Ragi Mutan *Aspergillus* sp. K-1 dan *Aspergillus* sp. K-1a. *Berita Biologi*, 8(5), 365-373.

Nasution, F.H.M. 2022. Pengaruh Variasi Konsentrasi Limbah Cair Tahu Terhadap Penyisihan COD dan

- NH₃ Menggunakan *Rotary Algae Biofilm Reactor* (RABR). *Skripsi*. Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru.
- Kiran, M., Pakshirajan, K., & Das, G. 2017. A New Application Of Anaerobic Rotating Biological Contactor Reactor For Heavy Metal Removal Under Sulfate Reducing Condition. *Chemical Engineering Journal*. 3-4
- Restuhadi, F., Zalfiatri, Y., & Pringgondani, D. 2017. Pemanfaatan Simbiosis Mikroalga *Chlorella* sp. dan Starbact Untuk Menurunkan Kadar Polutan Limbah Cair Sagu. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 11(2): 140-141.
- Ruiz, M.A., Mendoza-Espinosa, L.G., T., Stephenson. 2010. Growth and Nutrient Removal in Free and Immobilized Green Algae in Batch and Semi-Continuous Cultures Treating Real Wastewater. *Bioresource Technology*, 101(1), 58-64.ruiz
- Septiani, W. D., Slamet, A., & Hermana, J. 2014. Pengaruh konsentrasi substrat terhadap laju pertumbuhan alga dan bakteri heterotropik pada sistem HRAR. *Jurnal Teknik ITS*, 3(2), D98-D103.
- Simamora, L.A., Sudarno, S., & Istirokhatun, T. 2017. Kultivasi Mikroalga Sebagai Metode Pengolahan dalam Menyisihkan Kadar COD dan Amonium pada Limbah Cair Tahu. *Disertasi. Universitas Diponegoro*.
- Udayan, A., Pandey, A. K., Sirohi, R., Sreekumar, N., Sang, B. I., Sim, S. J., Kim, S. H., & Pandey, A. 2022. Production of microalgae with high lipid content and their potential as sources of nutraceuticals. *Phytochemistry Reviews*, 1-28.
- Wang, J. H., Zhuang, L. L., Xu, X. Q., Deantes-Espinosa, V. M., Wang, X. X., dan Hu, H. Y. 2018. Microalgal attachment and attached systems for biomass production and wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 331-342.
- Widari, N. S., Rasmito, A., & Rovidatama, G. 2020. Optimalisasi pemakaian starter Em4 dan lamanya fermentasi pada pembuatan pupuk organik berbahan limbah cair industri tahu. *Jurnal Teknik Kimia*, 15(1), 1-7.
- Widayat, W., & Hadiyanto, H. 2015. Pemanfaatan Limbah Cair Industri Tahu untuk Produksi Biomassa Mikroalga *Nannochloropsis* sp. sebagai Bahan Baku Biodiesel. *Reaktor*, 15(4), 253-260.
- Zhang, Q., Liu, C., Li, Y., Yu, Z., Chen, Z., Ye, T., & Jin, S. 2017. Cultivation Of Algal Biofilm Using Different Lignocellulosic Materials As Carriers. *Biotechnology for biofuels*, 10(1), 1-16.
- Zhuang, L. L., Azimi, Y., Yu, D., Wang, W. L., Wu, Y. H., Dao, G. H., dan Hu, H. Y. 2016. Enhanced Attached Growth of Microalgae *Scenedesmus*. LXI Through Ambient Bacterial Pre-Coating Of Cotton Fiber Carriers. *Journal of Bioresource Technology*, 1-31