

Pengolahan Limbah Minyak Sawit Menggunakan *Chlorella* sp. yang Diimobilisasi dalam Flat-Fotobioreaktor

Shinta Elystia^{1*}, Fucy Adilla Hasti², Sri Rezeki Muria³ 

^{1,2} Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Riau Kampus Bina Widya, Pekanbaru, Indonesia

³ Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau Kampus Bina Widya, Pekanbaru, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received January 06, 2022

Revised January 08, 2022

Accepted April 02, 2022

Available online April 25, 2022

Kata Kunci:

Imobilisasi, *Chlorella* sp., Limbah Minyak Sawit

Keywords:

Immobilization, *Chlorella* sp., Palm Oil Waste



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2022 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Limbah cair minyak sawit masih menjadi persoalan di Indonesia. Tingginya kandungan organik jika tidak dilakukan pengolahan mengakibatkan pencemaran lingkungan, sehingga diperlukan pengolahan lanjutan salah satunya menggunakan mikroalga *Chlorella* sp yang diimobilisasi. Mikroalga *Chlorella* sp. dapat dimanfaatkan untuk pengolahan limbah POME karena berpotensi sebagai nutrisi untuk pertumbuhan alga. Tujuan penelitian ini menghitung efisiensi penyisihan COD, nitrogen total limbah cair sawit didalam flat-fotobioreaktor dengan variasi konsentrasi limbah dan sumber cahaya yang berbeda. Imobilisasi sel *Chlorella* sp. menggunakan kalsium alginat untuk membentuk *bead* alga diameter 3-4 mm. Pada Penelitian ini konsentrasi limbah POME divariasikan 50%, 75%, dan 100% (v/v) dan variasi sumber cahaya yang berasal dari cahaya matahari dan cahaya lampu dengan intensitas cahaya 5000±300 lux dan fotoperiode 12:12 jam. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan limbah cair sawit tertinggi pada konsentrasi limbah 50% (v/v) menggunakan sumber cahaya buatan dengan densitas maksimum mencapai $1,93 \times 10^7$ sel mL⁻¹ dan mampu menyisihkan COD, dan nitrogen total masing-masing yaitu 80% dan 84,93% pada hari ke 7. Maka, pengolahan limbah cair minyak sawit dengan proses imobilisasi mikroalga dalam *Chlorella* sp flat-fotobioreaktor cukup efektif untuk menurunkan konsentrasi COD dan nitrogen total.

ABSTRACT

Palm oil liquid waste is still a problem in Indonesia, the high organic content if not processed causes environmental pollution, so further processing is needed, one of which uses the microalgae *Chlorella* sp. immobilized. The microalgae *Chlorella* sp. can be used for POME waste treatment because it has the potential as a nutrient for algae growth. The purpose of this study was to calculate the removal efficiency of COD, total nitrogen of palm oil effluent in the photobioreactor flat with variations in the concentration of waste and different light sources. Immobilization of *Chlorella* sp. used calcium alginate to form algal beads with a diameter of 3-4 mm. In this study, the concentration of POME waste was varied by 50%, 75%, and 100% (v/v) and the variation of the light source from sunlight and lamps with a light intensity of 5000±300 lux and a photoperiod of 12:12 hours. The results showed that the efficiency of the removal of palm oil effluent was highest at a waste concentration of 50% (v/v) using an artificial light source with a maximum density of 1.93×10^7 cells mL⁻¹ and was able to remove COD and total nitrogen, respectively, which was 80. % and 84.93% on the 7th day. Therefore, the processing of palm oil effluent with the microalgae immobilization process in *Chlorella* sp flat-photobioreactor is quite effective in reducing COD and Total Nitrogen concentrations.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan produsen *Crude Palm Oil* (CPO) terbesar yang memiliki luas areal perkebunan sawit diperkirakan mencapai 12,3 juta hektar (Dermawan & Ashari, 2018; Zalfiatri et al., 2017). Kelapa sawit mempunyai peran yang cukup strategis dalam perekonomian Indonesia. Pertama, minyak sawit merupakan salah satu dari sembilan bahan pokok kebutuhan masyarakat, sehingga harganya harus terjangkau oleh seluruh lapisan masyarakat (Dermawan & Ashari, 2018). Kedua, sebagai salah satu komoditas pertanian andalan ekspor nonmigas dan sebagai sumber perolehan devisa maupun pajak (Shinta Elystia et al., 2017; Habib et al., 2003; Phalakornkule et al., 2010). Ketiga, menciptakan kesempatan kerja dan sekaligus meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Negara-negara yang dapat mengolah kelapa sawit dengan baik bisa mendapatkan hasil yang sangat menguntungkan dari industri komoditas ini (Parlina, 2013). Produk samping dari kegiatan pengolahan sawit menghasilkan limbah. *Palm Oil Mill Effluent* (POME) merupakan limbah terbesar yang menjadi persoalan utama karena setiap ton pengolahan minyak mentah sawit dapat menghasilkan limbah cair sawit sebanyak 2,5 ton (S Elystia et al., 2019; Muria et al., 2020).

*Corresponding author.

E-mail addresses: shintaelystia@yahoo.com (Shinta Elystia)

POME memiliki kandungan *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dan padatan tersuspensi yang tinggi serta mengandung bahan organik seperti total nitrogen, fosfor, dan kalium (S Elystia et al., 2019; Hidayah & Wusko, 2020). Fresh POME memiliki kandungan BOD, dan COD berturut sebesar 20.000 – 30.000 mg/l dan 40.000 – 60.000 mg/l. Sebagian besar pabrik sawit mengolah POME dengan melakukan pengolahan sistem kolam terbuka untuk mengurangi kadar COD, BOD, dan polutan lain seperti TSS.

Tetapi sistem kolam terbuka memiliki kekurangan yaitu membutuhkan area yang luas, waktu kontak yang lama, dan dapat terlepasnya gas-gas rumah kaca seperti CH₄ dan CO₂ ke lingkungan (Dermawan & Ashari, 2018; Phalakornkule et al., 2010). Kolam I, kolam II, dan kolam III berturut-turut merupakan *deolting pond*, *anaerobic pond* I, dan *anaerobic pond* II yang memiliki beban organik yang tinggi, dan harus didegradasi terlebih dahulu. Keberadaan limbah cair sebagai bagian dari proses pengolahan kelapa sawit yang tidak dikelola dengan benar berpotensi menimbulkan pencemaran (Muria et al., 2020; Zalfiatri et al., 2017). Tanaman kelapa sawit menghasilkan 3 jenis limbah utama yang dapat digunakan sebagai bahan pakan ternak yaitu pelepah daun kelapa sawit, lumpur minyak sawit, dan bungkil inti sawit. Limbah ini digolongkan dalam tiga jenis yaitu limbah padat, limbah cair, dan limbah gas (Haniefah et al., 2019). Pada kondisi lapangannya mikroalga dapat tumbuh pada kolam IV atau kolam maturasi I, yang memiliki kandungan COD, BOD, dan TSS berturut-turut sebesar 2.159 mg/l; 369,60 mg/l; dan 482 mg/l (Alejandro et al., 2010). Oleh karena itu, mikroalga dapat dimanfaatkan untuk pengolahan limbah POME karena berpotensi sebagai nutrisi untuk pertumbuhan alga, khususnya pada reaksi fotosintesis mengandung bahan organik yang masih tinggi.

Melalui proses pengolahan limbah cair dengan mikroalga mempunyai beberapa kelebihan di antaranya sangat ramah lingkungan, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan dapat menghasilkan biomassa dalam jumlah besar (Dermawan & Ashari, 2018; Zalfiatri et al., 2017). Mikroalga yang dapat digunakan dalam pengolahan limbah POME salah satunya adalah *Chlorella* sp (Shinta Elystia et al., 2017). *Chlorella* sp. merupakan mikroalga uniselular yang berwarna hijau, dan berukuran mikroskopis. *Chlorella* sp. dipilih karena sifatnya yang mudah dan cepat berkembangbiak (Darsono, 2007). *Chlorella* sp. memiliki kapasitas penyisihan nutrisi lebih tinggi dari pada alga lain, sehingga *Chlorella* dikenal sebagai agen pengolah limbah yang potensial, dan juga dapat menghasilkan oksigen melalui proses fotosintesis karena memiliki efisiensi fotosintesis yang tinggi (Muria et al., 2020). Biomassa mikroalga hijau memiliki ukuran yang sangat kecil, berat jenis yang rendah dan mudah rusak karena degradasi oleh mikroorganisme lain dan sulit untuk memisahkan biomassa alga dengan air limbah (Alejandro, 2010). Untuk mengatasi hal tersebut, maka dilakukan teknik imobilisasi (Zalfiatri et al., 2017). Imobilisasi merupakan metode untuk mengikat sel ke dalam suatu matriks pendukung untuk meningkatkan stabilitasnya dengan syarat aktivitas dari sel tersebut masih tetap ada dan dapat digunakan secara kontinu (Muria et al., 2020). Imobilisasi dilakukan agar ukuran biomassa menjadi lebih besar, mempunyai bentuk agregat yang stabil, serta alga dapat terlindung (Alejandro et al., 2010; Daniyati et al., 2012). Selain itu, alga yang diimobilisasi dapat meningkatkan waktu retensi sel di dalam air limbah, sehingga sel beradaptasi baik dengan substrat. Imobilisasi alga dapat dilakukan dengan menggunakan matriks polimer seperti kalsium alginat, karena bersifat transparan, efisien, harganya murah, dan proses imobilisasi yang sederhana.

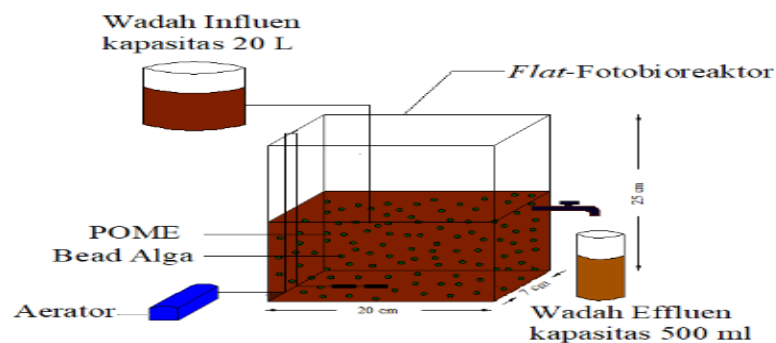
Beberapa temuan menyatakan Mikroalga *Chlorella* sp. merupakan mikroalga yang banyak dimanfaatkan dalam pengolahan limbah cair. Mikroalga *Chlorella* sp. dapat bersimbiosis dengan bakteri pengurai untuk mempercepat proses metabolisme (Zalfiatri et al., 2017). Kelebihan dari mikroalga jenis *Chlorella* sp. merupakan mikroalga yang dapat tumbuh dalam lingkungan tercemar dikarenakan *Chlorella* sp. memiliki Phytohormon dan Polyamine untuk adaptasi pada ekosistem air yang tercemar dengan logam berat (Selvika et al., 2016). Kemampuan *Chlorella* sp. dalam menyerap logam berat ini didukung dengan kemampuan beradaptasi, bertumbuh dan dapat digunakan sebagai bioremediasi (S Elystia et al., 2019; Shinta Elystia et al., 2017). Pada penelitian ini membahas tentang pengolahan limbah minyak sawit dengan menggunakan mikroalga *Chlorella* sp. yang diimobilisasi dengan kalsium alginat untuk membentuk *bead* alga diameter 3-4 mm di dalam *flat*-fotobioreaktor dengan variasi konsentrasi limbah dan sumber cahaya. Diharapkan alga *beads* dapat optima; menurunkan konsentrasi COD dan Nitrogen Total dari limbah dan *beads* lebih mudah dalam proses pemisahan sel alga dari medium air limbah.

2. METODE

Tahap penelitian yang pertama penelitian pendahuluan. Penelitian pendahuluan yang dilakukan meliputi uji karakteristik awal limbah cair sawit, kultivasi *Chlorella* sp. Limbah cair sawit yang digunakan berasal dari kolam IV (empat) PT. PN V Sei Pagar. Metode pengambilan sampel dilakukan secara *grab sample*. Kemudian dilakukan penyaringan pada air limbah untuk menyisihkan partikel dan pasir yang berukuran besar. Pada air limbah yang telah disaring dilakukan pengujian karakteristik awal COD, dan

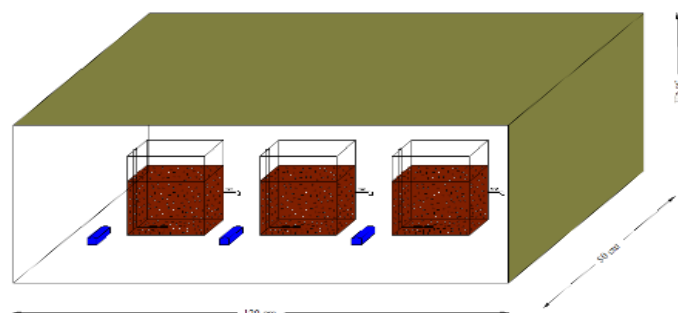
nitrogen total dengan konsentrasi limbah cair yang telah ditetapkan. Kultivasi bertujuan untuk memperbanyak jumlah sel *Chlorella* sp. Kultivasi *Chlorella* sp. dalam medium dahl solution selama 10 hari dilakukan di Pusat Penelitian Alga Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Riau. Selama kultivasi, densitas sel *Chlorella* sp. dihitung setiap 24 jam dengan menggunakan sebuah gelas objek yang setiap bidang kotak dihitung menggunakan *thomasiometer* dengan bantuan *hand counter* yang diamati di bawah mikroskop. Immobilisasi Sel *Chlorella* sp. *Chlorella* sp. yang telah diinkubasi selama 10 hari dipisahkan sel dari kultur mediumnya dengan metode sentrifugasi pada 4000 g force selama 10 menit sehingga dihasilkan endapan sel basah (Singh dkk., 2012). Residu sel alga disuspensikan ke dalam aquades sehingga terbentuk suspensi alga dengan densitas $3,4 \times 10^8$ sel mL⁻¹. Suspensi alga dihomogenkan dengan cara pengadukan agar tidak terjadi penumpukan sel. Suspensi sel alga yang telah homogen selanjutnya ditambahkan natrium alginat dengan konsentrasi 4%. Perbandingan volume antara suspensi sel alga dengan natrium alginat yaitu 1:1. Pembuatan *bead* menggunakan pompa peristaltik dengan diameter seragam dilakukan dengan cara meneteskan larutan alga alginat ke dalam larutan CaCl₂ 0,5 M. *Bead* alga telah yang terbentuk didiamkan selama 12 jam dalam larutan CaCl₂ 0,5 M pada suhu 4°C, sehingga *bead* mengeras. *Bead* alga yang telah terbentuk dicuci dengan larutan steril NaCl 0,85% dan selanjutnya dicuci dengan aquades guna menghilangkan sisa kelebihan Ca (Singh dkk., 2012).

Operasional *Flat-Fotobioreaktor*, pada penelitian ini digunakan fotobioreaktor kolam kaca berbentuk *flat* sebanyak enam buah *flat-fotobioreaktor* yang terbagi atas tiga buah *flat-fotobioreaktor* pada pencahayaan lampu, dan tiga buah *flat-fotobioreaktor* lainnya menggunakan sumber cahaya alami dari matahari dengan volume efektif air limbah sebesar 1,8 liter. Gambar perspektif *flat-fotobioreaktor* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Perspektif Instalasi Flat-Fotobioreaktor

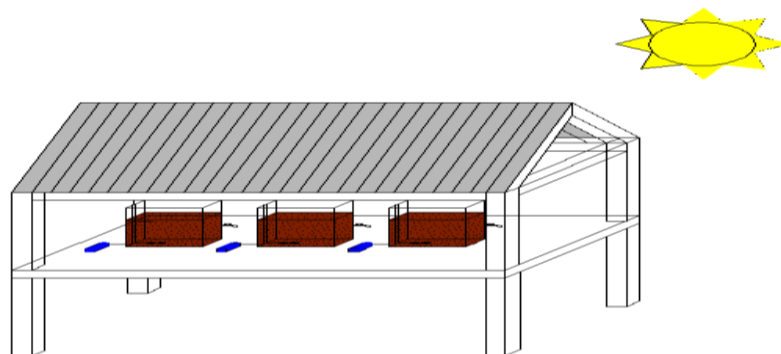
Tiga *flat-fotobioreaktor* diisi dengan *bead* alga *Chlorella* sp. di bawah penerangan cahaya lampu dengan variasi konsentrasi limbah cair sawit terhadap aquades pada perbandingan yang telah ditetapkan yaitu 50:50, 75:25, dan 100:0 (% v/v). Kemudian akan diletakkan di dalam *chamber* cahaya. Sumber cahaya pada *chamber* ini menggunakan lampu LED *white-cool flourescent* dengan intensitas cahaya 5000 ± 300 lux (S Elystia et al., 2019). Gambar desain *flat-fotobioreaktor* untuk sumber cahaya lampu menggunakan *chamber* cahaya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Flat-Fotobioreaktor Didalam Chamber Cahaya

Intensitas cahaya diukur dengan luxmeter didalam *chamber* cahaya dengan fotoperiode terang-gelap yang dilakukan yaitu 12:12 jam, dan dioperasikan pada suhu ruangan. Bagian dalam dari *chamber* cahaya dilapisi oleh aluminium foil agar tidak terpengaruh cahaya dari luar *chamber* sehingga *flat-*

fotobioreaktor mendapatkan penyinaran cahaya secara maksimal (Zhu et al., 2013). Tiga flat-fotobioreaktor pada sumber cahaya matahari diisi dengan *bead* alga *Chlorella* sp. dengan variasi konsentrasi limbah cair sawit terhadap aquades dengan perbandingan 50:50, 75:25, dan 100:0 (% v/v). Gambar desain flat-fotobioreaktor untuk sumber cahaya matahari dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Flat-Fotobioreaktor Sumber Cahaya Matahari

Kedua, penelitian utama, tiga flat-fotobioreaktor diisi dengan *bead* alga konsentrasi 10 *bead* ml⁻¹ masing-masing flat-fotobioreaktor diisi limbah dengan variasi konsentrasi limbah POME terhadap aquades dengan perbandingan 50:50, 75:25, dan 100:0 (% v/v) di bawah intensitas cahaya 5000±300 lux yang bersumber dari lampu LED *cool-white fluorescent*. Tiga flat-fotobioreaktor yang lain menggunakan sumber cahaya matahari yang masing-masing juga diisi dengan variasi konsentrasi limbah POME terhadap aquades dengan perbandingan 50:50, 75:25, dan 100:0 (% v/v) dengan menggunakan konsentrasi *bead* 10 *bead* mL⁻¹. Semua flat-fotobioreaktor di lakukan aerasi secara kontinu menggunakan pompa aerasi pada debit 3 l/menit agar terjadi pengadukan sehingga *bead* alga dapat kontak dengan air limbah. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan konsentrasi limbah POME dan sumber cahaya yang paling baik untuk menyisihkan kandungan COD dan nitrogen total pada air limbah. Proses penyisihan dalam penelitian ini akan dilakukan selama 7 hari. Sampel air limbah akan di ambil untuk menguji kandungan COD dan nitrogen total dalam air limbah pada hari ke 0,1,3,5,7 (hari). Setelah penelitian utama selesai dan dianalisis, setelah itu dilakukan perlakuan kontrol tanpa menggunakan alga pada satu flat-fotobioreaktor untuk hasil yang terbaik saja. Densitas sel di dalam *bead* alga dari flat-fotobioreaktor akan dihitung setiap hari selama proses penyisihan berlangsung. Sepuluh *bead* alga akan dikeluarkan dari flat-fotobioreaktor, lalu dilarutkan di dalam 1 mL steril sodium sitrat 0,2 M selama 30 menit pada suhu ruangan. Selanjutnya dilakukan perhitungan jumlah sel pada *thomasitometer* di bawah mikroskop untuk mendapatkan laju pertumbuhan sel alga di dalam *bead*. Data yang diperoleh dari hasil penelitian disajikan dalam bentuk grafik. Efisiensi penyisihan parameter COD dan nitrogen total dapat dihitung menggunakan persamaan efisiensi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

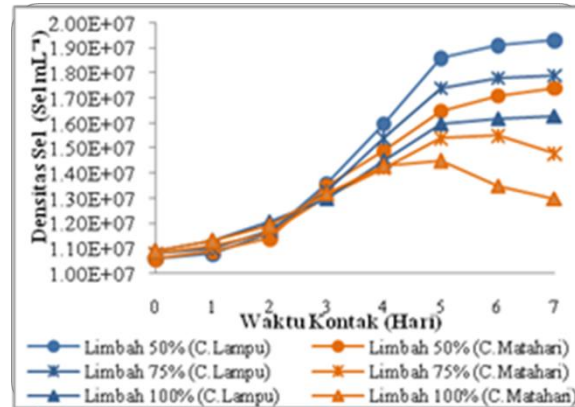
Berdasarkan karakteristik limbah cair sawit dalam penelitian ini adalah limbah yang berasal dari PT. PN V Sei. Pagar tepatnya di kolam IV (empat). Sebelum pengolahan terlebih dahulu dilakukan penyaringan limbah untuk menyisihkan partikel-partikel kasar dan besar, dan dilakukan analisa karakteristik awal sampel untuk mengetahui karakteristik limbah cair sawit awal yang digunakan dengan melakukan pengukuran untuk beberapa parameter yaitu COD, nitrogen total, dan pH. Data karakteristik awal limbah cair sawit dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Sampel Limbah Cair Sawit

Parameter	Hasil Uji (mg L ⁻¹) Konsentrasi Limbah			Baku Mutu Air Limbah Cair Permen LH RI No. 5 Tahun 2014
	50%	75%	100%	
COD	1600	2560	3040	350
Nitrogen Total	511	693	875	50
pH*	7,84	7,88	7,96	6-9

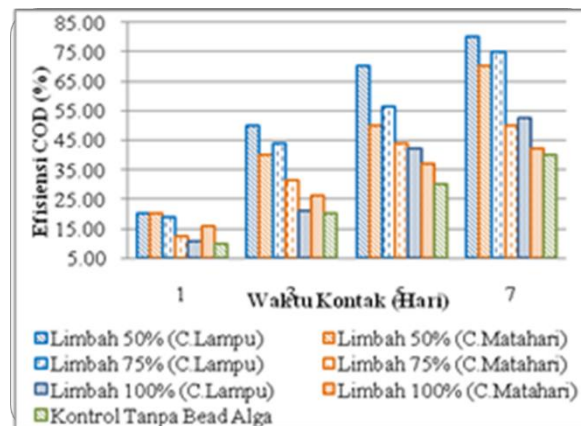
*tidak diukur dalam mg L⁻¹

Berdasarkan Tabel 1 Hasil uji awal parameter COD, nitrogen total masih di atas baku mutu. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengolahan untuk mengurangi jumlah kolam sistem terbuka yang membutuhkan area luas dan waktu kontak yang lama, sehingga dapat mengurangi beban pengolahan dan mempersingkat waktu pengolahan. Pertumbuhan sel mikroalga *Chlorella* sp. yang telah diimmobilisasi diukur menggunakan mikroskop dan *thomasitometer* untuk menghitung densitas sel setiap 24 jam selama proses pengolahan. Jumlah sel awal *Chlorella* sp. dalam setiap *bead* di dalam seluruh *flat*-fotobioreaktor pada konsentrasi limbah 50%, 75%, dan 100% (v/v) berturut-turut yaitu 1,06; 1,08; dan 1,09 ($\times 10^7$ sel mL^{-1}). Grafik densitas sel *bead* alga *Chlorella* sp. dapat dilihat pada Gambar 4.



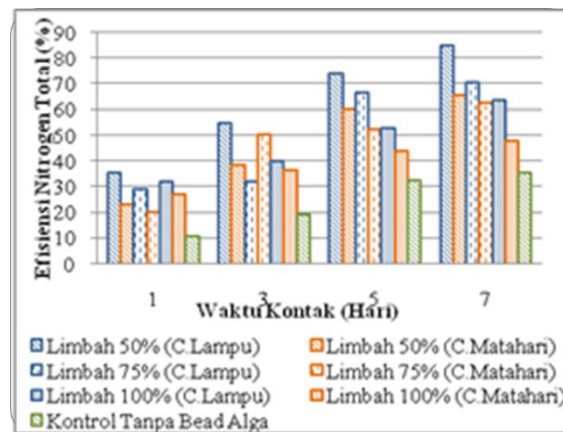
Gambar 4. Densitas Sel *Chlorella* sp. yang Diimmobilisasi

Hasil efisiensi penyisihan COD pada POME selama proses pengolahan di dalam *flat*-photobioreactor menggunakan *Chlorella* sp. diimmobilisasi dengan variasi konsentrasi limbah dan sumber cahaya dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Efisiensi Penyisihan COD

Berdasarkan Gambar 5 efisiensi penyisihan hari ke tujuh pada *flat*-fotobioreaktor dengan konsentrasi limbah 50%, 75%, dan 100% (v/v) dengan penggunaan lampu *fluorescent* sebagai sumber cahaya memperoleh efisiensi penyisihan masing-masing sebesar 80%, 75%, dan 52,63%. Sedangkan, efisiensi penyisihan COD yang diperoleh dengan penggunaan cahaya matahari sebagai sumber cahaya memperoleh efisiensi penyisihan pada masing-masing konsentrasi limbah sebesar 70%, 50%, dan 42,11%. Efisiensi untuk penyisihan nitrogen total mempunyai kecenderungan yang sama dengan penyisihan COD. Grafik efisiensi penyisihan nitrogen total dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Efisiensi Penyisihan Nitrogen Total

Berdasarkan Gambar 6 penurunan konsentrasi nitrogen total terjadi seiring lamanya waktu kontak. Dari konsentrasi yang didapat maka dapat diketahui efisiensi penyisihan. Efisiensi penyisihan nitrogen total tertinggi terjadi pada hari ke tujuh yang memperoleh efisiensi penyisihan untuk konsentrasi limbah 50%, 75%, dan 100% (v/v) dengan menggunakan sumber cahaya lampu berturut-turut yaitu 84,93%; 70,71%; dan 64%. Sedangkan efisiensi penyisihan pada variasi konsentrasi limbah yang sama menggunakan sumber cahaya matahari berturut-turut yaitu 65,75%; 62,63%; dan 48%.

Pembahasan

Berdasarkan penelitian ditemukan beberapa hasil. Pertama sel alga yang di immobilisasi mengalami pembelahan sel, sehingga terjadi peningkatan densitas sel pada tiap konsentrasi limbah dan sumber cahaya yang berbeda. Sel *Chlorella* yang diimmobilisasi di dalam *bead* alginat tetap hidup, mampu melakukan aktivitas metabolisme dan pembelahan sel (Daniyati et al., 2012; Habib et al., 2003). Pertumbuhan sel di dalam *bead* terjadi karena limbah cair sawit mengandung mineral-mineral organik maupun anorganik dalam bentuk ion yang lebih mudah diserap dan mengandung sejumlah besar nutrisi yang dimanfaatkan untuk pertumbuhan mikroalga *Chlorella* sp. dalam mengolah limbah. Fase lag terjadi selama dua hari yang ditandai dengan jumlah sel alga yang diimmobilisasi meningkat dalam jumlah yang sedikit. Terjadinya fase lag ini menunjukkan bahwa *Chlorella* sp. dapat beradaptasi dengan medium limbah cair sawit. Kemampuan mikroalga beradaptasi dipengaruhi oleh senyawa atau bahan organik dan anorganik dalam medium sebagai nutrisi (Prayitno, 2016; Zalfiatri et al., 2017). Seiring berjalannya waktu kontak *Chlorella* sp. dengan air limbah, maka semakin banyak pula pembelahan sel yang terjadi dan mikroalga tumbuh mencapai ke fase eksponensial. Pada fase ini, pembelahan sel yang banyak mengakibatkan densitas sel bertambah dan laju pertumbuhan juga akan meningkat (Muria et al., 2020). Terjadinya peningkatan pertumbuhan menunjukkan bahwa mikroalga *Chlorella* sp. mampu memanfaatkan nutrisi yang ada pada medium air limbah dengan sangat baik, sehingga densitas sel dan laju pertumbuhan pada fase eksponensial dapat mencapai nilai yang maksimal. Fase eksponensial terjadi pada hari ketiga sampai hari kelima. Laju pertumbuhan maksimum sel alga didalam *bead* yang terjadi pada hari ke lima untuk konsentrasi limbah 50%, 75%, 100% (v/v) dengan menggunakan sumber cahaya lampu yang memiliki densitas sel di dalam *bead* berturut-turut yaitu 1,86; 1,74; dan 1,60 (10^7 sel mL^{-1}). Sedangkan pada sumber cahaya matahari yang memiliki laju pertumbuhan maksimum pada hari ke lima terjadi pada konsentrasi limbah 50% dan 75% (v/v) dengan densitas sel didalam *bead* berturut-turut yaitu 1,66; 1,54 ($\times 10^7$ sel mL^{-1}). Pada konsentrasi limbah 100% (v/v) menggunakan sumber cahaya matahari mengalami laju pertumbuhan maksimum pada hari ke empat dengan densitas sel didalam *bead* yaitu $1,43 \times 10^7$ sel mL^{-1} .

Bead alga yang memiliki densitas sel tertinggi yaitu konsentrasi limbah 50% (v/v) densitas sel maksimum $1,93 \times 10^7$ sel mL^{-1} pada hari ke-7. Hal ini karena konsentrasi rendah memiliki medium yang lebih tembus cahaya. Selain itu, adanya keseimbangan antara jumlah nutrisi yang tersedia di dalam limbah dengan jumlah mikroorganisme *Chlorella* sp. yang memanfaatkan nutrisi. Medium POME dengan konsentrasi terendah memiliki pertumbuhan jumlah sel mikroalga yang paling tinggi meskipun memiliki kandungan nutrisi yang lebih sedikit, tetapi kontaminannya lebih rendah sehingga mikroalga lebih mudah untuk tumbuh (S Elystia et al., 2019). Dilihat dari sumber cahaya, hal ini juga terjadi karena karena cahaya yang didapat konstan 12:12 jam. Densitas sel terendah terjadi pada konsentrasi limbah 100% (v/v) menggunakan sumber cahaya matahari. Air limbah dengan konsentrasi nutrisi yang tinggi dapat menghambat pertumbuhan alga (Grothey et al., 2018). Pada limbah konsentrasi POME yang lebih tinggi

memengaruhi warna air limbah menjadi lebih gelap dalam medium yang mungkin berasal dari asam tanin (Phalakornkule et al., 2010). Asam tanin dapat menghambat *shading* dalam intensitas cahaya dan reaksi fotosintesis dan mempengaruhi tingkat pertumbuhan mikroalga (Muria et al., 2020). Pertumbuhan mikroalga sedikit terhambat pada konsentrasi air limbah > 60%, sehingga pada penelitiannya konsentrasi limbah 60% (v/v) yang diencerkan dengan aquades dianggap sebagai kultivasi mikroalga yang optimal. Sumber cahaya juga memengaruhi pertumbuhan sel alga (Prayitno, 2016). Kondisi mendung dan hujan tentunya akan menurunkan intensitas cahaya, maka akibatnya proses fotosintesis tidak berjalan optimal. Pada saat proses pengolahan menggunakan sumber cahaya matahari tidak mendapatkan cahaya konstan 12:12 jam karena perubahan cuaca yang tidak bisa dikontrol (Prayitno, 2016). Ketersediaan cahaya yang cukup akan mempercepat pertumbuhan mikroalga, karena proses fotosintesis semakin baik. Oleh karena itu, intensitas cahaya buatan yang konstan seperti menggunakan sumber cahaya dari lampu dapat meningkatkan proses fotosintesis dan pertumbuhan mikroalga yang lebih baik dengan periode terang gelap 12:12 jam mengikuti fenomena matahari terbit dan terbenam.

Kedua, penurunan nilai COD terjadi karena adanya kegiatan mikroalga mengonsumsi zat-zat organik didalam limbah cair sawit sehingga konsentrasi COD semakin berkurang. Senyawa-senyawa organik tersebut merupakan nutrisi yang dibutuhkan *Chlorella* sp. untuk pertumbuhannya melalui proses fotosintesis. Tingkat karbon dalam menyisihkan COD dapat dikaitkan dengan fakta bahwa karbon adalah makronutrien yang diperlukan untuk pertumbuhan mikroalga. Ketika sumber karbon organik hadir dalam medium air limbah, dan cahaya digunakan untuk energi, pertumbuhan alga dianggap sebagai pertumbuhan mikotrofik. Mikroalga *Chlorella* sp. dapat mengurangi kadar COD melalui metabolisme mikotrofik dengan menggunakan cahaya dan karbon organik yang terdapat pada air limbah (Selvika et al., 2016). Senyawa kompleks pada air limbah harus dioksidasi terlebih dahulu menjadi bentuk yang sederhana dan dapat diserap. Oksidasi ini dilakukan oleh aktivitas simbiosis alga dan bakteri (Suplemen et al., 2017). Mekanisme penguraian limbah karena terjadinya simbiosis mutualisme secara sinergis antara mikroalga dan bakteri pengurai, karena mikroalga menggunakan hasil metabolisme dari bakteri berupa CO₂ hasil perombakan bahan organik yang terdapat pada limbah sebagai sumber karbon utama, sedangkan bakteri menggunakan O₂ dari proses fotosintesis mikroalga untuk dimanfaatkan dalam proses penguraian atau mengoksidasi senyawa kompleks pada air limbah (Carvalho et al., 2011). Simbiosis antara mikroalga dan bakteri dapat menurunkan konsentrasi COD dan meningkatkan penyisihan. Proses simbiosis mutualisme antara mikroalga *Chlorella* sp. dan penambahan bakteri pengurai B-DECO₃ dalam kondisi aerob mampu menyisihkan COD pada air limbah sebesar 82,7% (Zalfiatri et al., 2017). Pada penelitian ini, proses pengolahan bahan organik didalam air limbah sawit terjadi secara non-steril sehingga diasumsikan adanya simbiosis mutualisme antara mikroalga dan bakteri alami dari air limbah untuk proses penyisihan.

Dilihat dari konsentrasi limbah, efisiensi tertinggi terjadi pada konsentrasi limbah 50% (v/v). Hal ini dikarenakan pada konsentrasi ini komposisi antara mikroalga dengan nutrisi seimbang, dan suplai oksigen selama pengolahan meningkat hingga hari ke tujuh. Hal ini juga didukung oleh penelitian Travieso (2006) limbah yang memiliki konsentrasi COD awal terendah karena adanya pengenceran limbah memperoleh hasil efisiensi COD yang terbesar dengan efisiensi penyisihan maksimum sebesar 88%. Dilihat dari sumber cahaya, efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada sumber cahaya lampu. Hal ini terjadi karena sumber cahaya lampu yang digunakan konstan dan merata. Dengan demikian, penggunaan cahaya lampu lebih efektif karena foto-periode pada perlakuan tiap *flat*-fotobioreaktor di dalam *chamber* konstan 12:12 jam. Sedangkan, penggunaan sumber cahaya matahari memperoleh efisiensi terendah. Hal ini terjadi karena pengolahan yang memanfaatkan sumber cahaya matahari itu bergantung pada siklus harian dan cuaca. Dilihat dari waktu tinggal menunjukkan bahwa semakin pendek waktu tinggal pada reaktor maka efisiensi penyisihan COD semakin menurun. Pada perlakuan kontrol tetap terjadi penyisihan COD. Hal ini menandai adanya aktivitas mikroorganisme dalam mendegradasi senyawa organik (S Elystia et al., 2019). Hal ini diduga juga karena pada limbah cair terdapat bakteri pengurai yang hidup secara alami. Inilah yang menyebabkan terjadinya penurunan konsentrasi COD pada perlakuan kontrol tanpa penambahan mikroalga *Chlorella* sp. Penurunan nilai COD pada perlakuan dengan menggunakan mikroalga *Chlorella* sp. lebih baik dibandingkan tanpa menggunakan penambahan mikroalga untuk membantu proses penguraian, dikarenakan lebih banyak terdapat interaksi antara alga dan limbah. Dengan adanya penambahan *bead* alga, maka terjadinya peningkatan penyisihan COD sebesar 40%.

Ketiga, dilihat dari konsentrasi limbah maka konsentrasi limbah 50% (v/v) menggunakan penerangan dari sumber cahaya lampu memperoleh efisiensi penyisihan tertinggi. Hal ini karena kebutuhan nutrisi untuk pertumbuhan mikroalga seimbang. Aslan dan Kapdan (2006) menganggap bahwa penyerapan nitrogen oleh mikroalga tidak memberikan penyisihan yang efisien dari medium pada konsentrasi limbah yang tinggi karena keterbatasan cahaya yang disebabkan oleh kelebihan kandungan klorofil (Aslan & Kapdan, 2006; Muria et al., 2020). Dilihat dari sumber cahaya maka efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada pencahayaan sumber cahaya lampu karena pencahayaan yang didapat konstan

dengan foto periode terang gelap 12:12 jam. Saat berlangsung fotosintesis, senyawa yang mengandung nitrogen seperti ATP dan NADPH diproduksi secara aktif oleh mikroalga ketika sel-sel diterangi, sehingga konsentrasi nitrogen berkurang. Efisiensi penyisihan nitrogen diperoleh sebesar 82,70% untuk mikroalga *Chlorella zofingiensis* di dalam limbah peternakan (dengan konsentrasi nitrogen 148 mg L⁻¹ di bawah penyinaran cahaya konstan) (Zhu et al., 2013). Pencahayaan buatan terbukti lebih efektif dalam menghilangkan nitrat daripada sumber cahaya matahari alami. Sedangkan penyisihan terendah terdapat pada penerangan dari sumber cahaya matahari. Hal ini terjadi karena cuaca yang tidak menentu dapat mempengaruhi pertumbuhan *Chlorella* sp. dalam berfotosintesis yang dimana cuaca pada saat proses pengolahan berlangsung terkadang hujan dan terkadang panas akibatnya proses penyisihan nutrisi juga tidak berjalan optimal.

Seiring dengan lamanya waktu kontak sel alga dengan air limbah, maka terjadi peningkatan densitas sel, sehingga semakin tinggi pula penyisihan nitrogen yang terjadi (De-Bashan & Bashan, 2010). Semakin tinggi tingkat kenaikan densitas sel mikroalga juga memengaruhi kemampuan air dalam melarutkan CO₂ karena semakin sulit CO₂ terlarut dalam air. Pada konsentrasi limbah lebih pekat maka medium akan lebih cepat jenuh sehingga pengurangan nitrogen yang dimanfaatkan oleh alga tidak efektif. Selain adanya densitas sel mikroalga, immobilisasi matriks juga mampu menyisihkan nutrisi dalam air limbah. Penyisihan limbah cair sawit dengan menggunakan *bead* kosong tanpa mikroalga masih dapat menyisihkan nitrogen total mencapai 8,3% dengan konsentrasi limbah awal tanpa dilakukannya pengenceran (Alejandro et al., 2010; Singh, S et al., 2012). Pada penelitian ini menggunakan *Chlorella* sp. yang diimmobilisasi dengan matriks alginat untuk mengurangi konsentrasi nitrogen total dalam limbah cair sawit. Selama proses pengolahan, konsentrasi nitrogen total terjadi penurunan karena bahan organik yang masuk perlahan ke dalam matriks alginat diserap oleh sel di dalam *bead* (S Elystia et al., 2019; Fontoura et al., 2017). Mikroalga yang terimmobilisasi dapat secara efisien menyisihkan nutrisi dari air limbah, karena nutrisi pertama kali mengadsorpsi pada permukaan matriks, kemudian menembus ke dalam matriks dan terus diasimilasi oleh sel. Sel yang diimmobilisasi dapat lebih efisien menyerap nutrisi dari pada sel yang tersuspensi (Grothey et al., 2018; Mutjaba et al., 2017). Penjeratan sel dalam matriks dapat memicu interaksi yang dapat meningkatkan serapan hara oleh alga. Matriks alginat memiliki gugus anionik (seperti gugus karboksil) yang menciptakan interaksi ion dengan ion amonium dan dengan demikian memfasilitasi pengurangan nitrogen dalam sistem sel terimmobilisasi.

Pada akhir pengolahan yang memperoleh efisiensi penyisihan terendah pada perlakuan kontrol tanpa penambahan *Chlorella* sp. dengan efisiensi yang diperoleh sebesar 35,62%. Limbah cair tanpa pemberian *Chlorella* sp. juga mengalami penurunan konsentrasi nitrogen, tetapi tidak sebesar pada limbah cair yang dengan adanya penambahan *Chlorella* sp. yang diimmobilisasi. Hal ini dikarenakan tidak adanya aktivitas yang sinergis dengan mikroalga, dan yang bekerja hanya bakteri pengurai alami dari limbah, sehingga efisiensi yang diperoleh kecil. Dengan adanya penambahan mikroalga *Chlorella* sp. yang diimmobilisasi maka efisiensi penyisihan nitrogen meningkat sebesar 49,31%. Dari hasil penelitian juga menunjukkan bahwa semakin pendek waktu tinggal pada reaktor maka efisiensi penyisihan COD dan nitrogen total semakin menurun. Semakin besar konsentrasi limbah yang masuk ke dalam flat-fotobioreaktor maka efisiensi penyisihannya semakin kecil dan pencahayaan buatan dari sumber cahaya lampu dengan pencahayaan konstan dengan fotoperiode terang gelap 12:12 jam menghasilkan penyisihan COD and Nitrogen Total yang tinggi. Pada penelitian ini menunjukkan konsentrasi akhir COD sudah memenuhi baku mutu yaitu 320 mg/L dan nitrogen total mendekati baku mutu yang ditetapkan sebesar 77 mg/L.

4. SIMPULAN

Pengolahan limbah cair minyak sawit dengan proses immobilisasi mikroalga dalam *Chlorella* sp flat-fotobioreaktor cukup efektif untuk menurunkan konsentrasi COD dan nitrogen total. Dari hasil penelitian didapatkan semakin besar konsentrasi limbah yang masuk ke dalam flat-fotobioreaktor, maka efisiensi penyisihannya semakin kecil. Pencahayaan buatan dari sumber cahaya lampu dengan pencahayaan konstan fotoperiode terang gelap 12:12 jam juga menghasilkan penyisihan COD and nitrogen total yang tinggi dibanding cahaya alami dari cahaya matahari. Efisiensi penyisihan COD mencapai 80% dan nitrogen total sebesar 84,93% pada hari ke-7 pengolahan.

5. DAFTAR PUSTAKA

Alejandro, R., Leopoldo, G., Mendoza, E., & Tom, S. (2010). Growth and Nutrient Removal in Free And Immobilized Green Algae in Batch and Semi- Continuous Cultures Treating Real Wastewater. *Journal Bioresource Technology*, 101, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.076>.

- Aslan, S., & Kapdan, I. . (2006). Batch Kinetics of Nitrogen and Phosphorus Removal From Synthetic Wastewater by Algae. *Ecological Engineering*, 28(1), 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.04.003>.
- Carvalho, A. ., Silva, S. ., Baptista, J. ., & Malcata, F. . (2011). Light Requirements in Microalgae Photobioreactors: An Overview of Biophotonic Aspects. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 89, doi: *Applied Microbiology and Biotechnology*, 89(5), 1275–1288. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-3047-8>.
- Daniyati, R., Gatut, Y., & Agus, R. (2012). Desain Closed Photobioreaktor *Chlorella Vulgaris* sebagai Mitigasi CO₂. *Jurnal Sains Dan Seni*, 1, 1–5. <https://doi.org/10.12962/j23373520.v1i1.239>.
- De-Bashan, L. E., & Bashan, Y. (2010). Immobilized Microalgae for Removing Pollutants: Reviwes of Practical Aspects. *Bioresource Technology*, 101, 1611–1627. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.043>.
- Dermawan, D., & Ashari, M. L. (2018). Studi Pemanfaatan Limbah Padat Industri Pengolahan Minyak Kelapa Sawit Spent Bleaching Earth sebagai Pengganti Agregat pada Campuran Beton. *Jurnal Presipitasi*, 15(1), 7 – 10. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v15i1.7-10>.
- Elystia, S, Darmayanti, I. D., & Muria, S. R. (2019). Pengaruh Variasi Konsentrasi Bead Alga *Chlorella Sp.* Dalam Flat-Fotobioreaktor untuk Menyisihkan Nutrien pada Palm Oil Mill Effluent (POME). *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 18(1), 14–20. <https://doi.org/10.31258/jst.v18.n1.p14-20>.
- Elystia, Shinta, Muria, R. ., & Anggraini, L. (2017). Removal Of COD and Total Nitrogen from Palm Oil Mill Effluent in Flat-Photobioreactor Using Immobilised Microalgae *Chlorella sp.* *Food Research*, 3(2), 126–130. <https://doi.org/10.26656/FR.2017>.
- Fontoura, J. T., Rolim, G. S., Farenzena, M., & Gutterres, M. (2017). Influence of Light Intensity and Tannery Wastewater Concentration on Biomass Production and Nutrient Removal by Microalgae *Scenedesmus sp.* : Brazil. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.024>. *Process Safety and Environment Protection*, 111, 355–362.
- Grothey, A., Taberner, J., Arnold, D., De Gramont, A., Ducreux, M. P., O'Dwyer, P. J., Van Cutsem, E., Bosanac, I., Srock, S., Mancao, C., Gilberg, F., Winter, J., & Schmoll, H.-J. (2018). Fluoropyrimidine (FP) + bevacizumab (BEV) + atezolizumab vs FP/BEV in BRAFwt Metastatic Colorectal Cancer (mCRC): Findings from Cohort 2 of MODUL – A Multicentre, Randomized Trial of Biomarker-Driven Maintenance Treatment Following First-Line Induction th. *Annals of Oncology*, 29(October), viii714–viii715. <https://doi.org/10.1093/annonc/mdy424.020>.
- Habib, M., Yusoff, F., Phang, S., Kamarudin, M., & Mohamed, S. (2003). Growth and Nutritional Values of *Molina Micrura Fed* on *Chlorella Vulgaris* Grown in Digested Palm Oil Mill Effluent. *Asian Fisheries Science*, 16, 107–119. <https://doi.org/10.33997/j.afs.2003.16.2.002>.
- Haniefah, U., Surya, I., & Burhanudin. (2019). Efektivitas Program Corporate Social Responsibility (Csr) Perusahaan Perkebunan Kelapa Sawit Pt. Tanjungmanis Arta Lestari. *EJournal Ilmu Pemerintahan*, 7(1), 3207–3220. <https://ejournal.ip.fisip-unmul.ac.id/site/?p=3150>.
- Hidayah, N., & Wusko, I. U. (2020). Characterization and Analysis of Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB) Waste of PT Kharisma Alam Persada South Borneo. *Majalah Obat Tradisional*, 25(3), 154 – 160. <https://doi.org/10.22146/mot.52715>.
- Muria, S. R., Chairul, C., & Naomi, D. C. (2020). Pemanfaatan Mikroalga *Chlorella sp.* untuk Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit UNTUK (POME) secara FED Batch. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 19(1), 7–12. <https://doi.org/10.31258/jst.v19.n1.p7-12>.
- Mutjaba, G., Rizwan, M., & Lee, K. (2017). Removal of Nutrient and COD from Wastewater Using Symbiotic Co-Cultur of *Bacterium Pseudomonas Putida* and Immobilixed Microalga *Chlorella Vulgaris*. *Journal of Industrial and Engineering*, 49, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.01.021>.
- Phalakornkule, C., Mangmeemak, J., & Intrachod, B. (2010). Pretreatment of Palm Oil Mill Effluent by Electrocoagulation and Coagulation. *Science Asia*, 36, 142–149. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2010.36.142>.
- Prayitno, J. (2016). Pola Pertumbuhan dan Pemanenan Biomassa dalam Fotobioreaktor Mikroalga untuk Penangkapan Karbon. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 17(1), 45–52. <https://doi.org/10.29122/jtl.v17i1.1464>.
- Selvika, Z., Kusuma, A. B., Herliany, N. E., & Negara, B. F. (2016). Pertumbuhan *Chlorella sp.* pada Beberapa Konsentrasi Limbah Batubara (The Growth Rate of the *Chlorella sp.* at Different Concentrations of Coal Waste Water). *Depik*, 5(3). <https://doi.org/10.13170/depik.5.3.5576>.
- Singh, S. K., Bansal, A., Jha, M. K., & Dey, A. (2012). An Integrated Approach to Remove Cr(VI) using Immobilized *Chlorellaminutissima* Grown in Nutrient Rich Sewage Wastewater. *Journal of Bioresource Technology*, 104, v. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.044>.
- Suplemen, P., Ajar, B., Berbasis, B., & Identifikasi, R. (2017). Pengembangan Suplemen Bahan Ajar Biologi

- Berbasis Riset Identifikasi Bakteri untuk Siswa SMA. *Journal of Innovative Science Education*, 6(2), 155–161. <https://doi.org/10.15294/jise.v6i2.19713>.
- Zalfiatri, Y., Restuhadi, F., & Maulana, T. (2017). Pemanfaatan Simbiosis Mikroorganisme D-deco3 dan Mikroalga Chlorella sp untuk Menurunkan Pencemaran Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 4(1), 8–17. <https://doi.org/10.31258/dli.4.1.p.8-17>.
- Zhu, L., Wang, Z., Shu, Q., Takala, J., Hiltunen, E., Feng, P., & Yuan, Z. (2013). Nutrient Removal and Biodiesel Production by Integration of Freshwater Algae Cultivation with Piggery Wastewater Treatment. *J Water Research*, 47, 4294–4302. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.004>.