

Pengaruh kombinasi Fe dan Co terhadap pertumbuhan *Chlorella sp.* dan penyisihan COD limbah cair minyak sawit

Shinta Elystia^{1*}, Indah Kartika Zulfa¹, Sri Rezeki Muria²

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Riau Kampus Bina Widya Km. 12,5 Simpang Baru Pekanbaru, Riau, Indonesia

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Riau Kampus Bina Widya Km. 12,5 Simpang Baru Pekanbaru, Riau, Indonesia

*Koresponden E-mail: shintaelystia@yahoo.com

(Diterima 15 Februari 2020|Disetujui 17 Juni 2020|Diterbitkan 30 Juli 2020)

Abstract : Palm oil mill effluent contains pollutants and has high content of organic matter. The treatment process of palm oil mill effluent generally with open pond system that requires extensive land and a long contact time. To reduce the number of ponds needed in the process of palm oil mill effluent, microalgae *Chlorella sp.* by using palm mill effluent which contains organic material as a source of nutrition for microalgae cultivation media *Chlorella sp.* to improve the efficiency of COD removal in palm oil mill effluent. In this research, variations of the concentration of Fe and Co micronutrients were combined with variations concentrations of Fe (0.3; 0.5 and 0.7) mg/L and Co (1 and 2) mg/L in flat-photobioreactors were carried out for 7 days with lighting by using sunlight. The results showed that at a combination of 0.5 mg/L Fe + 0.2 mg/L Co, the highest microalgae cell growth was 6×10^6 cell/ml and the highest removal efficiency of COD was 83.3%.

Keywords: *chlorella sp.*, fe (iron), co (cobalt), COD, POME

Provinsi Riau adalah salah satu provinsi di Indonesia yang memiliki perkebunan sawit terbesar dengan luas area perkebunan sawit sebesar 2,5 juta hektar dengan total produksi CPO mencapai 8,7 juta ton (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2018). Produksi minyak sawit yang cenderung meningkat dari tahun ke tahun menyebabkan peningkatan jumlah limbah cair atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME) yang dihasilkan dari proses pengolahan buah sawit menjadi *Crude Palm Oil* (CPO). POME merupakan limbah terbesar karena setiap ton pengolahan minyak mentah sawit dapat menghasilkan POME sebanyak 2,5 ton (Taha dan Ibrahim, 2014).

Sebagian besar pabrik minyak sawit mengolah POME menggunakan sistem kolam terbuka untuk mengurangi kadar COD, BOD, dan polutan lain. 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 (Hadiyanto, et al., 2012).

Pada kondisi lapangan mikroalga dapat tumbuh pada kolam IV atau kolam maturasi I, yang memiliki kandungan COD, BOD, dan pH berturut-turut sebesar 3.228; 1.827 dan 7,9 mg/l (PT. X, 2019). Menurut Yonas, et al. (2012), limbah POME kolam IV dapat dijadikan media pertumbuhan mikroalga sehingga dapat mengurangi kadar BOD dan COD. Oleh karena itu mikroalga dapat dimanfaatkan untuk pengolahan limbah POME yang berpotensi sebagai nutrisi untuk pertumbuhan alga khususnya pada reaksi fotosintesis karena mengandung bahan organik yang masih tinggi (Hadiyanto, et al., 2012).

Salah satu mikroalga yang berpotensi sebagai agen pengolahan air limbah adalah *Chlorella sp.*,

karena memiliki kemampuan untuk menyerap nutrisi lebih tinggi dibandingkan spesies lainnya (Liu et al., 2012) dan layak untuk dibudidayakan karena sifatnya yang mudah dan cepat berkembangbiak (Darsono, 2007).

Dalam penelitian Ahmad, et al. (2016) mikroalga *Chlorella sp.* dapat menyisihkan parameter COD dan Nitrogen Total yang terkandung dalam POME berturut-turut 98% dan 78% setelah 7 hari.

Pertumbuhan mikroalga dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor salah satunya yaitu nutrisi. Nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroalga untuk pertumbuhannya terdiri dari makronutrien dan mikronutrien. Makronutrien adalah nutrisi yang dibutuhkan dalam jumlah besar antara lain C, H, N, P, K, S, Mg, dan Ca. Makronutrien diperoleh mikroalga dari bahan organik yang terkandung didalam POME (Hadiyanto, et al., 2012). Mikronutrien dengan komposisi yang tepat dapat meningkatkan pertumbuhan biomassa mikroalga

Menurut Rizky, et al. (2013) penambahan mikronutrien Fe pada *Chlorella vulgaris* dapat meningkatkan laju pertumbuhan sel, dimana laju pertumbuhan sel tertinggi pada konsentrasi *C. vulgaris* 0,6 ppm dengan kepadatan sel 9.612×10^4 sel/mL dengan perbandingan jumlah sel pada kontrol $8,2 \times 10^4$ sel/mL. Dalam penelitian Pranakasih (2013) pertumbuhan *N. salina* yang ditambahkan ion Co²⁺ dapat meningkatkan pertumbuhan sel tertinggi pada konsentrasi 2 ppm dengan populasi sebesar $70,25 \times 10^4$ sel/mL. Selain meningkatkan laju pertumbuhan sel penambahan mikronutrien dapat meningkatkan kemampuan penyisihan polutan pada suatu limbah cair organik. Hal ini dikarenakan bahwa semakin tinggi densitas sel, maka efisiensi penyisihan nutrisi

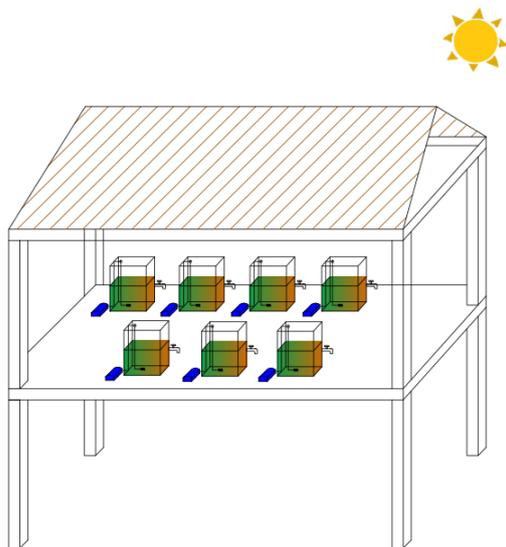
akan semakin baik. Aulia, et al. (2017) juga menunjukkan hal yang sama dalam penelitiannya bahwa semakin besar atau semakin banyak jumlah mikroalga yang tumbuh, menyebabkan kandungan nitrogen yang turun pun semakin banyak. Hal ini dikarenakan mikroalga tumbuh dengan memanfaatkan zat-zat organik sebagai nutrient.

Berdasarkan beberapa penelitian di atas menunjukkan bahwa penambahan mikronutrien Fe dan Co dapat meningkatkan laju pertumbuhan sel mikroalga dalam konsentrasi yang tepat. Oleh karena itu, akan dilakukan penelitian mengenai pengaruh kombinasi konsentrasi mikronutrien Fe dan Co untuk meningkatkan pertumbuhan sel mikroalga dan efisiensi penyisihan COD di dalam *flat-photobioreactor* menggunakan mikroalga *Chlorella* sp.

BAHAN DAN METODE

Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan *flatphotobioreactor* yang terbuat dari kaca dengan dimensi 20 cm x 7 cm x 25 cm yang dilengkapi dengan aerator 3 L/menit dengan sumber cahaya berasal cahaya matahari. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain sampel limbah cair sawit PT. X, mikroalga *Chlorella* sp. diperoleh dari Pusat Penelitian Alga, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Riau, medium Dahril *Solution*, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, dan $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Gambar *Flat-photobioreactor* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain *Flat-photobioreactor*

Metodologi

Preparasi Medium POME

Limbah cair sawit yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari kolam IV dan sebelumnya dilakukan penyaringan untuk memisahkan air limbah dari partikel-partikel besar seperti kayu dan kerikil. Teknik sampling air limbah dilakukan secara *grab sample*. Kemudian dilanjutkan dengan uji kandungan COD awal dengan menggunakan metode refluks terbuka secara titrimetri.

Kultivasi *Stock Mikroalga Chlorella* sp.

Mikroalga *Chlorella* sp. dikultivasi di dalam wadah 6000 mL menggunakan medium *Dahril Solution* selama 10 hari kemudian dipanen dan diaerasi secara kontinu untuk menghindari pengendapan sel, sehingga kontak sel dengan medium lebih merata. Jumlah sel mikroalga kemudian dihitung dengan menggunakan mikroskop dan *thomacytometer*. Jumlah sel/ml dihitung menggunakan persamaan berikut (LeGresley dan McDermott, 2010):

$$\text{Jumlah sel/ml} = \frac{\text{Jumlah sel rata-rata setiap petak} \times 1000}{L (\text{mm}^2) \times K (\text{mm})} \times P$$

Dimana : P = Faktor pengenceran
L = Luas petak $(0,2 \times 0,2) \text{ mm}^2 = (0,04 \text{ mm}^2)$
K = Kedalaman petak (0,1 mm)

Aklimatisasi Mikroalga *Chlorella* sp.

Aklimatisasi dilakukan setelah kultivasi *stock* mikroalga *Chlorella* sp. selesai. Menurut Andary (2010), tahap aklimatisasi merupakan tahap mengkondisikan mikroalga agar mikroalga dapat hidup dan melakukan penyesuaian terhadap lingkungan baru. Aklimatisasi dilakukan dengan dua tahap selama dua minggu secara bertahap hingga diperoleh kepadatan sel mikroalga *Chlorella* sp. minimal 10^6 sel/mL. Aklimatisasi tahap 1 pada tahap ini dilakukan dengan mencampurkan mikroalga *Chlorella* sp. dan limbah cair sawit dengan perbandingan 50% : 50% selama 7 hari dan didapatkan kepadatan sel pada hari ke-7 sebesar $9,80 \times 10^5$ sel/mL dari kepadatan awal $1,34 \times 10^7$ sel/mL.

Aklimatisasi tahap 2 dengan cara mencampurkan mikroalga yang berasal dari proses aklimatisasi tahap 1 dan limbah cair sawit dengan perbandingan mikroalga : limbah cair sawit yaitu 75% : 25% (Anggreani, 2011). Kepadatan sel pada akhir aklimatisasi tahap 2 yaitu $1,32 \times 10^6$ sel/mL.

Operasional *Flat-photobioreactor*

Limbah cair sawit sebanyak 1,8 L dimasukkan ke dalam enam buah *flat-photobioreactor*, dengan variasi kombinasi konsentrasi mikronutrien 0 (sebagai kontrol); Fe sebesar 0,3; 0,5 dan 0,7 mg/L dan Co sebesar 1 dan 2 mg/L. *Flat-photobioreactor* diberikan aerasi dengan debit sebesar 3 L/menit sebagai pengadukan dan diberikan pencahayaan yang berasal dari cahaya matahari.

Selama proses pengolahan berlangsung, densitas sel mikroalga di setiap variasi perlakuan dihitung untuk mengetahui pertumbuhan sel *Chlorella* sp. menggunakan *thomacytometer*. Pengolahan dilakukan selama 7 hari di dalam *flat-photobioreactor*. pH diuji menggunakan pH meter berdasarkan SNI 06-6989.11-2004.

Analisis parameter COD mengacu pada SNI 6989.73:2009 dengan metode refluks tertutup secara titrimetri pada hari ke 0, 1, 3, 5, dan 7. Kemudian dilakukan perhitungan efisiensi penyisihan dengan menggunakan rumus:

$$\text{Efisiensi (\%)} = \frac{C_{in} - C_{ef}}{C_{in}} \times 100\%$$

HASIL

Karakterisasi Sampel Limbah Cair Sawit Kolam IV PT. X

Adapun data karakteristik awal limbah cair sawit dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Karakteristik Sampel Limbah Cair Sawit Kolam IV

Parameter	Satuan	Hasil Uji
COD	mg/L	3.228
C	mg/L	287,9
N	mg/L	49,69
P	mg/L	2,879
Fe	mg/L	0,001
		2
Co	mg/L	0,026
		2
Suhu	°C	32
pH		7,9

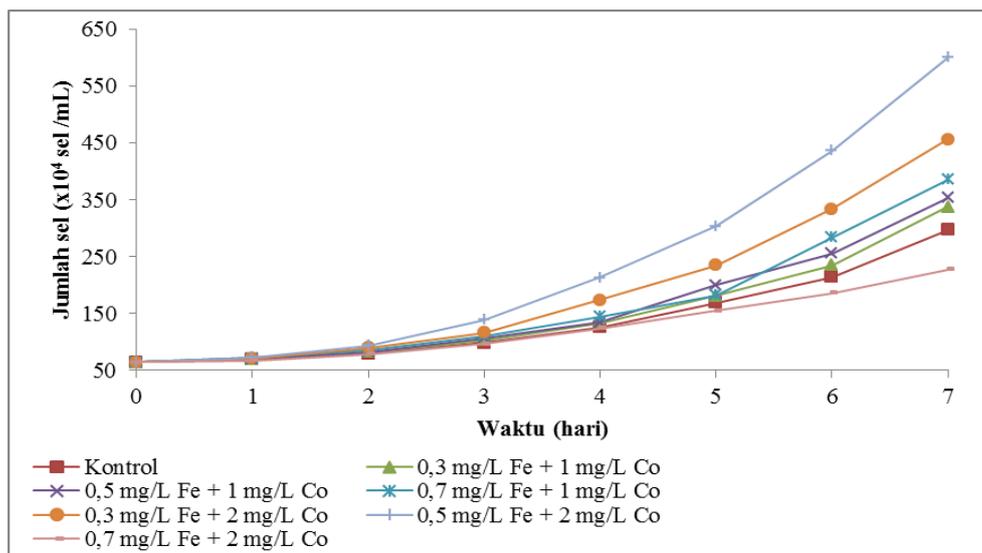
Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui hasil uji sampel kolam IV PT. X memiliki kandungan COD yang tinggi. Alternatif pengolahan limbah menggunakan mikroalga dapat mengurangi jumlah kolam sistem terbuka (*open pond*) yang membutuhkan area luas dan waktu kontak yang lama, sehingga dapat mengurangi beban pengolahan, mempersingkat waktu pengolahan dan meningkatkan efisiensi pengolahan. Hasil uji menunjukkan bahwa komposisi makronutrien C, N, dan P dalam POME berturut-turut 287,9 mg/L; 49,69 mg/L dan 2,879 mg/L, kondisi ini sudah ideal untuk pertumbuhan mikroalga dimana kondisi C:N:P

ideal pada alga adalah sebesar 100:16:1 (Darwinastwentya, 2014). Konsentrasi Fe dan Co pada POME berturut turut adalah 0,0012 mg/L dan 0,0262 mg/L. Menurut Burgess, dkk (2000) rentang persyaratan mikronutrien teoretis untuk Fe adalah 0,1-4,0 mg/L dan Co adalah 0,1-5,0. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi mikronutrien Fe dan Co yang terdapat di kolam IV PT. X jumlahnya masih kurang untuk memenuhi kebutuhan nutrisi mikroalga, sehingga pada penelitian ini dilakukan modifikasi nutrien dengan melakukan kombinasi antara unsur besi (Fe) dan kobalt (Co) sebagai sumber mikronutrien agar komposisinya tepat dan mencapai rentang persyaratan mikronutrien.

Pertumbuhan Sel *Chlorella* sp. Selama ProsPengolahan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, sel mikroalga *Chlorella* sp. mampu melakukan pembelahan sel dan bertahan hidup. Hal ini ditandai dengan meningkatnya densitas sel mikroalga *Chlorella* sp. Densitas sel awal pada setiap *flat-photobioreactor* sebesar $1,32 \times 10^6$ sel/mL dan meningkat setiap harinya hingga fase eksponensial. Peningkatan densitas sel ini menunjukkan bahwa sel *Chlorella* sp. mampu memanfaatkan bahan organik yang terdapat di dalam limbah car sawit sebagai sumber nutrisi.

Pertumbuhan sel *Chlorella* sp. terbaik terdapat pada *flat-photobioreactor* pada konsentrasi 0,5 mg/L Fe dan 2 mg/L Co dengan pertumbuhan sel tertinggi terjadi pada hari ke tujuh dengan densitas sel sebesar $6,00 \times 10^6$ sel/mL. Pertumbuhan sel *Chlorella* sp. pada setiap *flat-photobioreactor* dapat dilihat pada Gambar 2.

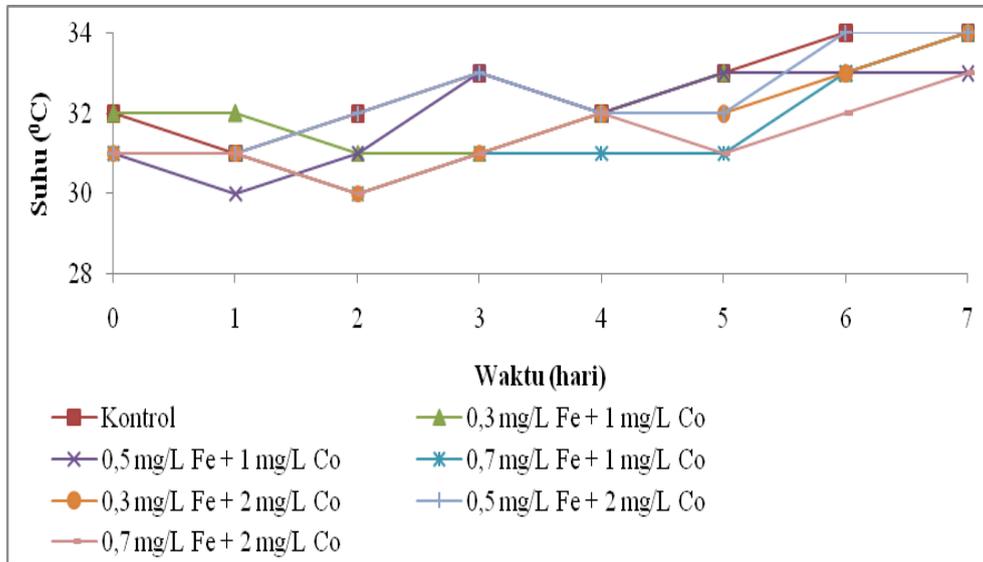


Gambar 2. Grafik Pertumbuhan Sel *Chlorella* sp.

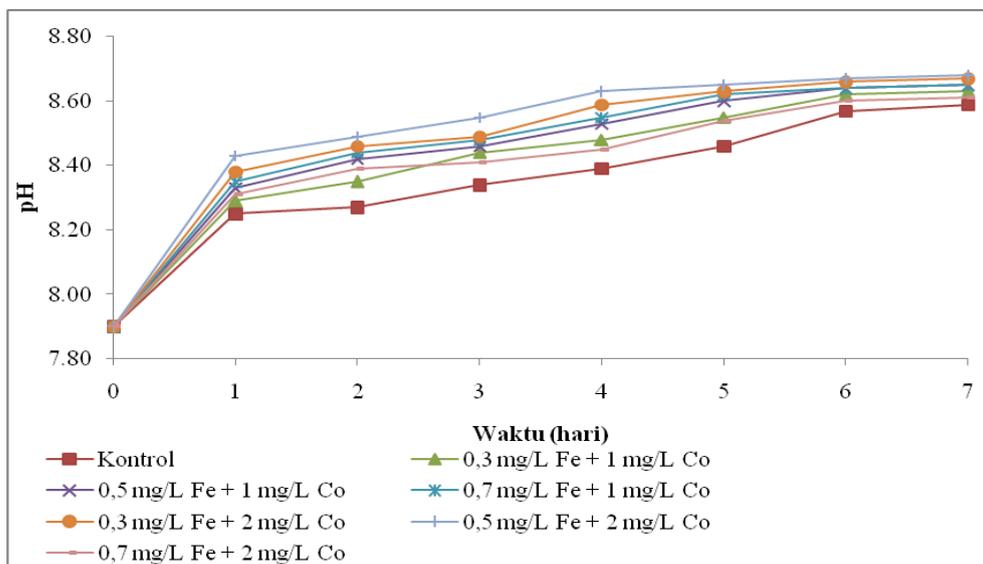
Pengaruh Kombinasi Konsentrasi Mikronutrien Fe dan Co terhadap Suhu dan pH Medium Kultivasi Mikroalga *Chlorella* sp.

Suhu dan pH mikroalga *Chlorella* sp. selama proses pengolahan dapat dilihat pada Gambar 3 (a) dan (b). Suhu medium limbah cair sawit selama proses kultivasi berada pada rentang 30-34°C. Kisaran suhu tersebut masih dalam batas pertumbuhan *Chlorella* sp, dimana

Chlorella sp. mampu hidup dan tumbuh secara optimum pada kisaran suhu 25-35°C (Prabowo, 2009). Berdasarkan Gambar 3 (b), kisaran pH pada masing-masing perlakuan yaitu 6,9 - 8,6. Rentang pH penelitian sudah masuk dalam rentang pH optimum pertumbuhan mikroalga *Chlorella* sp. yaitu pH 6-9 (Hadiyanto, et al., 2012)



(a)



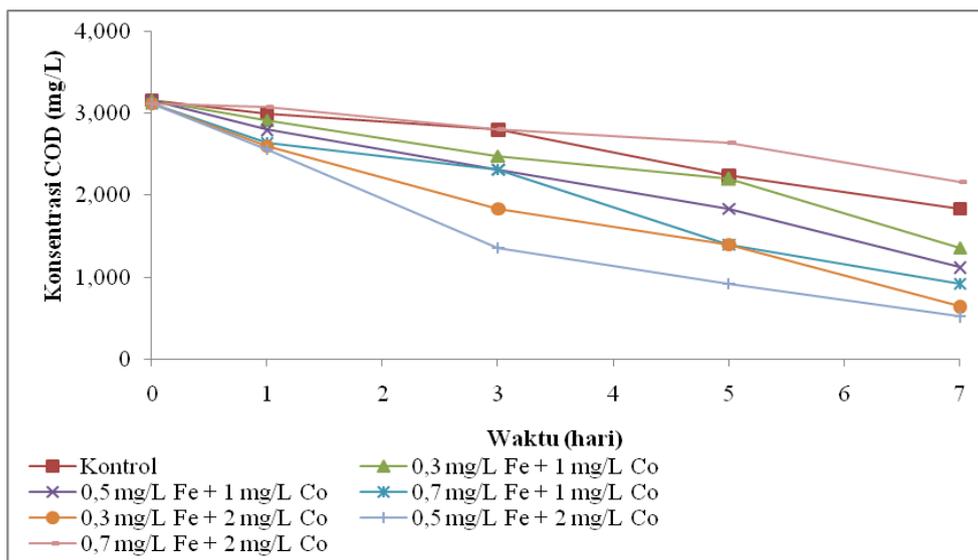
(b)

Gambar 3. (a) Grafik Perubahan Parameter Suhu Selama Proses Pengolahan (b) Grafik Perubahan Parameter pH Selama Proses Pengolahan

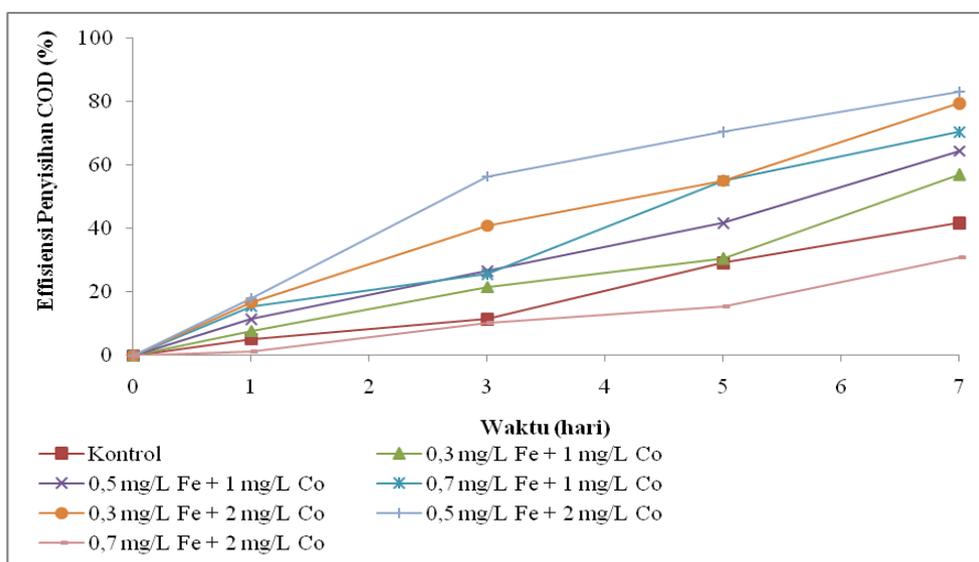
Efisiensi Penyisihan COD

Flat-photobioreactor yang memperoleh efisiensi penyisihan tertinggi sebesar 83,3% pada kombinasi konsentrasi 0,5 mg/L Fe + 2 mg/L Co dengan konsentrasi COD sebesar 520 mg/L pada hari ke tujuh, sedangkan penyisihan terendah pada *Flat-photobioreactor*

dengan penambahan kombinasi konsentrasi 0,7 mg/L Fe + 2 mg/L Co sebesar 30,8% dengan konsentrasi COD setelah pengolahan sebesar 2160 mg/L. Grafik nilai konsentrasi COD dan efisiensi penyisihan COD untuk setiap perlakuan dapat dilihat pada Gambar 4.



(a)



(b)

Gambar 4. (a) Grafik Nilai Konsentrasi COD dan (b) Efisiensi Penyisihan COD

PEMBAHASAN

Berdasarkan Gambar 2 terlihat bahwa pola pertumbuhan sel mikroalga *Chlorella* sp. pada kombinasi konsentrasi 0,3 mg/L Fe + 1 mg/L Co; 0,5 mg/L Fe + 1 mg/L Co dan 0,7 mg/L Fe + 1 mg/L Co memperlihatkan jumlah sel yang tidak jauh berbeda dengan kontrol. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan kombinasi konsentrasi tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap pertumbuhan sel mikroalga *Chlorella* sp. Jumlah sel tertinggi terdapat pada kombinasi konsentrasi 0,5 mg/L Fe + 2 mg/L Co yaitu sebesar $6,00 \times 10^6$ sel/mL.

Terdapat fenomena yang terjadi pada penelitian ini yakni jumlah kepadatan sel *Chlorella* sp. pada penambahan ion 0,7 mg/L Fe + 2 mg/L Co berada di bawah kontrol. Kemungkinan disebabkan nutrisi yang terkandung di dalam medium menjadi berlebih. Konsentrasi mikronutrien yang berlebih menyebabkan pertumbuhan sel yang lambat sehingga jumlah sel yang

dihasilkan lebih sedikit dan pertumbuhan jumlah sel berada dibawah kontrol. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan kombinasi konsentrasi 0,7 mg/L Fe + 2 mg/L Co bersifat toksik sehingga akan menghambat pertumbuhan sel mikroalga *Chlorella* sp.

Konsentrasi maksimum logam Fe yang dapat ditoleransi pada *Chlorella* sp. adalah pada konsentrasi 0,5 mg/L ppm untuk Co 2 mg/L. Kombinasi konsentrasi 0,5 mg/L Fe + 2 mg/L Co merupakan konsentrasi yang tepat untuk pertumbuhan sel mikroalga *Chlorella* sp, dikarenakan konsentrasi logam yang ditambahkan hingga *Maximum Tolerance Concentration* (MTC) tercapai.

Menurut Febtisuhasri (2016), keberadaan mikronutrien tidak bisa diganti oleh zat lain dan mikronutrien dengan komposisi yang tepat dapat meningkatkan pertumbuhan biomassa mikroalga namun jika terlalu banyak justru merupakan racun bagi mikroalga. Hal yang sama juga didapatkan pada penelitian Rizky, et al. (2013) menggunakan Fe

menunjukkan pada konsentrasi Fe diatas variasi 0,6 ppm semakin toksik terhadap mikroalga.

Pada mikroalga, ion logam Fe memainkan peran sangat penting dalam regulasi metabolisme sel sebagai unsur esensial, sebagai tambahan nutrisi dan membantu proses fotosintesis (Millaleo et al., 2010; Allen et al., 2011).

Fase pertumbuhan sel yang dialami oleh mikroalga pada penelitian ini yaitu fase *lag* dan fase eksponensial. Fase *lag* adalah fase dimana sel-sel *Chlorella* sp. belum sepenuhnya memanfaatkan nutrisi yang ada dalam limbah cair sawit dan pembelahan sel masih sedikit serta sel mikroalga masih menyesuaikan diri dengan kondisi mediumnya dalam *flat-photobioreactor* sehingga jumlah sel tidak banyak mengalami peningkatan (Kawaroe, 2010).

Setelah melewati fase *lag* (adaptasi), mikroalga *Chlorella* sp. memasuki fase eksponensial (*log phase*). Kemampuan mikroalga beradaptasi dengan baik dan lebih singkat pada fase *lag* menyebabkan sel mikroalga lebih mampu tumbuh dan bertahan dengan memanfaatkan nutrisi yang ada pada limbah cair sawit sehingga sel akan cepat memasuki fase eksponensial (Kawaroe, 2010).

Hal ini dipengaruhi oleh adanya proses aklimatisasi mikroalga pada limbah cair sawit dimana sesuai dengan penelitian Irhamni dan Munir (2015) yang menyatakan bahwa aklimatisasi tersebut memiliki kelebihan yaitu sel mikroalga lebih aktif secara fisiologis dan mampu memanfaatkan lebih banyak nutrisi yang ada didalam limbah cair untuk pertumbuhan dan metabolismenya.

Fase eksponensial juga terjadi pembelahan sel-sel *Chlorella* sp. dengan cepat, enzim-enzim dan senyawa-senyawa metabolit yang dibutuhkan untuk pembelahan sel sudah tersedia sehingga kepadatan populasi meningkat. Mikronutrien Fe dan Co mulai bekerja sesuai perannya, dimana Fe dalam pembentukan klorofil dan membantu kerja enzim ferodoksin-NADP⁺ reduktase dalam mereduksi NADP⁺ dan membentuk *Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate* (NADPH) pada Fotosistem I dalam proses fotosintesis. Reaksinya adalah



Ion H⁺ yang telah dipompa ke dalam membran tilakoid akan masuk ke dalam *Adenosine Triphosphate* (ATP) sintase. ATP sintase akan menggandengkan pembentukan ATP dengan pengangkutan elektron dan H⁺ melintasi membran tilakoid. Masuknya H⁺ pada ATP sintase akan membuat ATP sintase bekerja mengubah *Adenosine Diphosphate* (ADP) dan fosfat anorganik (Pi) menjadi ATP.

Nutrien Co berfungsi sebagai unsur esensial dalam pertumbuhan klorofil dan unsur pokok vitamin B12 yang dibutuhkan oleh mikroalga serta turunan koenzim (Wijoseno, 2011). Penambahan mikronutrien Fe dan Co memberikan pengaruh terhadap meningkatnya pertumbuhan jumlah sel mikroalga *Chlorella* sp.

Efisiensi penyisihan tertinggi sebesar 83,3% pada kombinasi konsentrasi 0,5 mg/L Fe + 2 mg/L Co dengan konsentrasi COD sebesar 520 mg/L pada hari ke tujuh. Efisiensi penyisihan COD akan semakin tinggi

seiring dengan semakin tingginya pertumbuhan sel-sel mikroalga *Chlorella* sp.

Flat-photobioreactor dengan penambahan kombinasi konsentrasi 0,7 mg/L Fe + 2 mg/L Co hanya mampu menyisihkan COD sebesar 30,8% dengan konsentrasi COD sebesar 2160 mg/L pada hari ke tujuh. Hal ini dikarenakan dengan konsentrasi tersebut menghambat pertumbuhan sel-sel mikroalga *Chlorella* sp. sehingga jumlah sel yang dapat mendegradasi senyawa organik menjadi sedikit. Hal yang sama juga didapatkan pada penelitian Supriyatna, et al. (2013) menggunakan Fe menunjukkan pada konsentrasi Fe diatas variasi 0,791 ppm (12500 sel/mL) pertumbuhan sel mikroalga tidak sebanyak konsentrasi 0,385 ppm (25000 sel/mL), hal ini mengindikasikan semakin besar konsentrasi Fe maka semakin toksik terhadap mikroalga. Dapat disimpulkan penambahan mikronutrien Fe dan Co memberikan pengaruh terhadap tingkat pertumbuhan sel mikroalga sehingga dengan banyaknya jumlah sel mikroalga maka kadar COD akan semakin berkurang dengan efisiensi penyisihan COD yang semakin besar. Pertumbuhan sel mikroalga berbanding lurus dengan efisiensi penyisihan COD dan berbanding terbalik dengan kandungan COD yang ada di dalam limbah cair sawit

Menurunnya nilai COD disebabkan mikroalga *Chlorella* sp. memanfaatkan senyawa-senyawa organik yang terkandung dalam limbah cair POME. Senyawa-senyawa organik tersebut merupakan nutrisi yang dibutuhkan oleh *Chlorella* sp. dalam pertumbuhannya. Menurut Kawaroe (2010) media air limbah dapat diolah secara biologis oleh mikroalga sekaligus memberikan masukan nutrient dalam pertumbuhannya.

SIMPULAN

Interaksi kombinasi mikronutrien logam Fe dan Co secara umum memiliki pengaruh terhadap pertumbuhan sel mikroalga *Chlorella* sp. Tingkat pertumbuhan sel *Chlorella* sp dan Efisiensi penyisihan COD tertinggi terjadi pada *flat-photobioreactor* dengan kombinasi konsentrasi mikronutrien sebesar 0,5 mg/L Fe + 2 mg/L Co dengan jumlah sel sebesar 6,00 x 10⁶ sel/mL dengan efisiensi COD 83,3% pada hari ke tujuh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan kepada Laboratorium Pengendalian dan Pencemaran Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Riau dan Pusat Penelitian Alga, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Riau serta semua pihak yang telah memberikan bantuan dalam menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A., Buang, A., & Bhat, A.H. (2016). Renewable and Sustainable Bioenergy Production from Microalgal Co-Cultivation with Palm Oil Effluent (POME). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 65: 214-234.
DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.084.
- Allen, J. F., de Paula, B. M. W/. Puthiyaveetil, S., & Nield, J., (2011), Review: A structural Phylogenetic

- Map for Chloroplast Photosynthesis, Trends in Plant Science, 16 (12): 645-655.
DOI: 10.1016/j.tplants.2011.10.004.
- Andary., Antania, H., Oktiawan., Wiharyanto., & Samudro, G. (2010). Studi Penurunan COD DAN Warna pada Limbah Industri Testil PT. Apac Inti Corpora dengan Kombinasi Anaerob-Aerob Menggunakan UASB dan HUASB. *Skripsi*. Program Studi Teknik Lingkungan FT Universitas Diponegoro, Semarang.
- Anggreani, B. (2011). Efek Aerasi terhadap Dominasi Mikroba dalam Sistem High Rate Algae Pond (HRAP) untuk Pengolahan Air Boezem Morokrengan. *Skripsi*. Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Aulia, M., Titik, I., & Sudarno. (2017). Penyisihan Kadar COD dan Nitrat Melalui Kultivasi *Chlorella* sp. dengan Variasi Konsentrasi Limbah Cair Tahu. *Jurnal Teknik Lingkungan, Vol. 6 (2): 1-9*. Semarang. DOI: <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v14i2.88-96>.
- Burgess, J. E., Harkness, J., Longhurst, P. J., & Stephenson, T. (2000). *Nutrient Balancing for Enhanced Activated Sludge Reactor Performance: UK perspective. Technovation*. 41 (12): 223-231.
DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0276>.
- Darsono. (2007). *Pengolahan Limbah Cair Tahu Secara Anaerob dan Aerob*. Universitas Atmajaya: Yogyakarta.
- Darwinastwantya, A.S., Slamet, A., & Hermana, V. (2014). Penambahan Urea sebagai Co-Substrat pada Sistem High Rate Algae Reactor (HRAR) untuk Pengolahan Air Limbah Tercemar Minyak Solar. *Jurnal Teknik Pomits Vol. 3, No. 2, ISSN: 2337-3539*. DOI: 10.12962/j23373539.v3i2.6935.
- Direktorat Jenderal Perkebunan. (2018). *Statistik Perkebunan Indonesia 2015-2017 Perkebunan Sawit*. Jakarta: Direktorat Jenderal Perkebunan.
- Febtisuhasri, A. (2016). Kepadatan Sel dan Kadar Lipid Mikroalga *Chlorella* sp. dalam Kultur Media Alternatif Kotoran Ternak. *Skripsi*. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Indonesia. Depok.
- Hadiyanto, W., & Kumoro, A.C. (2012). Potency of microalgae as biodiesel source in Indonesia, *Int. Journal of Renewable Energy Development*. 1: 23-27. DOI: <https://doi.org/10.14710/ijred.1.1.23-27>.
- Irhamni., & Munir, E. (2015). Kultivasi Mikroalga untuk Bioteknologi Biomassa sebagai Energi Terbarukan. *Jurnal Teknik Lingkungan, Vol. 3, No. 1*.
- Kawaroe, M., Prartono, T., Sunuddin, A., Wulan S.D., & Augustine, D. (2010). *Mikroalga Potensi Dan Pemanfaatannya Untuk Produksi Bio Bahan Bakar*. PT Penerbit IPB Press: Bogor.
- LeGresley, M., McDermott, G. (2010). Counting Chamber Methods for Quantitative Phytoplankton Analysis—Haemocytometer, Palmer-Maloney Cell and Sedgewick-Rafter Cell. Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis. UNESCO; (IOC Manuals and Guides), 25-30.
- Liu, K., Li, J., Qiao, H., Lin, A., & Wang, G. (2012). Immobilization *Chlorella sorokiana* GXNN 01 in Alginate for Removal of N and P from synthetic wastewater. *Bioresource Technology Journal*. 114: 26-32. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.003.
- Millaleo, R., Reyes-Diaz, M., Ivanov, A. G., Mora, M. L., & Alberdi, M. (2010), Manganese as Essential and Toxic Element for Plants: Transport, Accumulation and Resistance and Mechanisms, *J. Soil Sci.Plant Nutr*, 10 (4): 476-494. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S071895162010000200008>.
- Prabowo, D. A. (2009). Optimasi Pengembangan Media Untuk Pertumbuhan *Chlorella* sp. pada Skala Laboratorium. *Skripsi*. Program Studi Ilmu dan Teknologi Kelautan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Pranakasih., Yusafir, H., & Paulina, T. (2015). Biosorpsi Co^{2+} Dan Dampaknya Terhadap Konsentrasi Klorofil Pada *Nannochloropsis Salina* di Lingkungan Perairan Laut. *Skripsi*. FMIPA Universitas Hasanuddin. Makassar.
- Rizky, Y. A., Jaya, S., Ayusti, D., & Ilham. (2013). Pengaruh Penambahan Logam Fe (II) Terhadap Laju Pertumbuhan Fitoplankton *Chlorella Vulgaris* Dan *Porphyridium Cruentum*. FMIPA Universitas Hasanuddin. *Jurnal Kimia*. 1-7.
- SNI 06-6989.11. (2004). *Cara Uji Derajat Keasaman (pH) menggunakan Alat pH Meter*. Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 6989.73. (2009). *Cara Uji Kebutuhan Oksigen Kimiawi (Chemical Oxygen Demand/COD) dengan Metode Refluks Terbuka Secara Titrimetri*. Badan Standarisasi Nasional.
- Supriyatna, A., Ramdani, R. D., Dede, S. (2013). Korelasi Kandungan Besi Terlarut Terhadap Kelimpahan *Phytoconis* Sp. Pada Perairan Situ Ciburuy Kabupaten Bandung Barat. *Jurnal ISTEK*. 7 (1) : 1-18.
- Taha, M. R., Ibrahim, A. H. (2014). COD Removal from Anaerobically Treated Palm Oil Mill Effluent (AT-POME) Via Aerated Heterogeneous Fenton Process: Optimization study. *Journal of Water Process Engineering (1)*: 8-16.
DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2016.123>.
- Wijoseno, T. (2011). Uji Pengaruh Variasi Media Kultur Terhadap Tingkat Pertumbuhan dan Kandungan Protein, Lipid, Klorofil dan Karotenoid pada Mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzong. *Skripsi*. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Indonesia. Depok.
- Yonas, R., Uray, I., Hantoro, S. (2012). Pengolahan Limbah POME (*Palm Oil Mill Effluent*) dengan Menggunakan Mikroalga. *Jurnal Teknologi Kimia dan Industri*. 7-13.