

Pengurangan Nilai COD pada *Effluent* Fermentor Biogas UASB-HCPB dengan Memanfaatkan Mikroalga *Chlorella vulgaris*

Decomposition of COD Value in Effluent of UASB-HCPB Biogas Fermenter by Utilizing Microalgae Chlorella vulgaris

Rivaldi Sidabutar*, Bambang Trisakti, Irvan, Okta Bani, Juan Akmal Nasution

Departemen Teknik Kimia, Universitas Sumatera Utara, Jl. Almamater Kampus USU, Medan, 20155, Indonesia

*Email: rivaldi@usu.ac.id

Article history:

Diterima : 10 April 2024
Direvisi : 9 Agustus 2024
Disetujui : 21 Agustus 2024
Mulai online : 28 September 2024

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Rivaldi Sidabutar, Bambang Trisakti, Irvan, Okta Bani, Juan Akmal Nasution. (2024). Pengurangan Nilai COD pada Effluent Fermentor Biogas UASB-HCPB dengan Memanfaatkan Mikroalga *Chlorella vulgaris*. Jurnal Teknik Kimia USU, 13(2), 105-112.

ABSTRAK

Limbah cair kelapa sawit (LCPKS) adalah limbah utama yang dihasilkan dari industri kelapa sawit. LCPKS memiliki kadar COD 57.000-60.400 mg/L. Tingginya kadar COD dapat membahayakan lingkungan. Teknik pengolahan LCPKS pada umumnya menggunakan kombinasi metode pengolahan limbah secara anaerobik dan aerobik. Proses anaerobik telah dilakukan dengan menggunakan reaktor UASB-HCPB. Namun, kadar COD hasil anaerobik belum memenuhi baku mutu sehingga perlu dilakukan proses lanjutan. Mikroalga memiliki potensi untuk menurunkan kadar pencemar pada air limbah. Mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* merupakan mikroalga yang banyak dimanfaatkan dalam pengolahan limbah cair. Penelitian ini memanfaatkan *Chlorella vulgaris* dalam menurunkan kadar COD *effluent* fermentor biogas UASB-HCPB dengan variasi intensitas pencahayaan dan variasi rasio *effluent* terhadap mikroalga. Didapatkan hasil intensitas pencahayaan terang:gelap (24:0) jam memberikan pertumbuhan mikroalga yang optimal sehingga memberikan penurunan COD terbaik dengan efisiensi penurunan COD 87,5%. Rasio perbandingan mikroalga dengan *effluent* 1000 mL:500 mL menunjukkan penurunan COD terbaik dengan efisiensi 93,75%.

Kata kunci: *chorella vulgaris*, COD, *effluent* fermentor UASB-HCPB

ABSTRACT

Palm oil mill effluent (POME) is the main waste generated from the palm oil industry. LCPKS has a COD level of 57,000-60,400 mg/L. High levels of COD can harm the environment. LCPKS treatment techniques generally use a combination of anaerobic and aerobic waste treatment methods. The anaerobic process has been conducted using a UASB-HCPB reactor. But, the COD levels of anaerobic results have not reached the quality standards so that further processing is needed. Microalgae have the potential to reduce contaminant levels in wastewater. *Chlorella vulgaris* microalgae is a microalgae that is widely used in wastewater treatment. This study utilized *Chlorella vulgaris* in reducing the COD levels of the effluent of the UASB-HCPB biogas fermentor with variations in lighting intensity and variations in the ratio of effluent to microalgae. It was found that the lighting intensity of light:dark (24:0) hours provided optimal microalgae growth so as to provide the best COD reduction with a COD reduction efficiency of 87.5%. The ratio of microalgae to effluent of 1000 mL: 500 mL showed the best COD reduction with an efficiency of 93.75%.

Keyword: *chorella vulgaris*, COD, UASB-HCPB fermentor effluent



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v13i2.16161>

1. Pendahuluan

Limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) adalah limbah utama yang dihasilkan dari industri kelapa sawit. Setiap 1 ton tandan buah segar kelapa sawit akan menghasilkan sekitar 0,7-0,8 m³ LCPKS. LCPKS yang keluar dari proses pengolahan biasanya memiliki suhu tinggi berkisar 70-800 °C, dengan tingkat keasaman (pH) sekitar 4,56-4,98. *Chemical oxygen demand* (COD) berkisar antara 57.000-60.400 mg/L dan *total suspended solid* (TSS) 0,23-5,44 g/L. Tingginya kadar COD dapat membahayakan lingkungan dan mengkontaminasi rantai makanan apabila dibuang langsung tanpa diolah terlebih dahulu [1].

Teknik pengolahan LCPKS pada umumnya menggunakan kombinasi metode pengolahan limbah yaitu dengan proses anaerobik dan aerobik. Limbah cair yang dihasilkan oleh pabrik dialirkan ke bak penampungan untuk dipisahkan antara minyak yang terikut dan limbah cair. Kemudian limbah cair dialirkan ke kolam anaerobik untuk dilakukan proses pengolahan secara anaerobik [2]. Selain itu, pengolahan LCPKS dapat dilakukan menggunakan reaktor biogas seperti *anaerobic fluidized bed reactor* (AFBR), *upflow anaerobic sludge blanket* (UASB), *expanded granular sludge bed reactor* (EGSB), *anaerobic baffled reactor* (ABR), *continuous stirred tank reactor* (CSTR), dan *upflow anaerobic sludge fixed film* (UASFF) [3].

Penelitian pengolahan LCPKS dengan proses anaerobik menggunakan reaktor *upflow anaerobic sludge blanket-hollow centered packed bed* (UASB-HCPB) telah dilakukan dengan hasil terbaik yaitu kadar COD sebesar 21.000 mg/L [4]. Berdasarkan standar baku mutu air limbah sesuai PerMenLH No. 3 Tahun 2010 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Kawasan Industri mempunyai nilai maksimum kadar COD 100 mg/L sehingga belum bisa dibuang ke lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan pengolahan *effluent* dari proses anaerobik untuk mengurangi kadar COD yang dihasilkan, diantaranya menggunakan mikroalga.

Beberapa penelitian telah membuktikan potensi mikroalga dalam menghilangkan karbon organik, nitrogen, fosfor, sulfat, logam berat dari air limbah [5]. Penggunaan mikroalga untuk pengolahan limbah cair menawarkan beberapa keuntungan diantaranya efektivitas biaya untuk mendegradasi bahan-bahan organik dan menghilangkan patogen [6]. LCPKS mengandung nitrogen dan fosfor yang dapat digunakan sebagai nutrisi pertumbuhan mikroalga dengan rasio perbandingan massa C:N:P, yaitu 34:16:1. Namun, mikroalga juga membutuhkan nutrisi dari unsur-unsur mikronutrien seperti tembaga, seng dan besi [7].

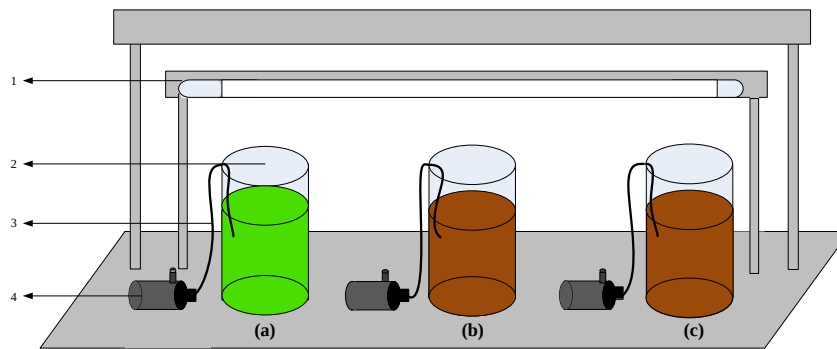
Mikroalga jenis *Chlorella* merupakan mikroalga yang banyak dimanfaatkan dalam pengolahan limbah cair. Kelebihan dari mikroalga jenis *Chlorella* merupakan mikroalga yang dapat tumbuh dalam lingkungan tercemar dikarenakan *Chlorella* memiliki *phytohormon* dan *polyamine* untuk adaptasi pada ekosistem air yang tercemar. Kemampuan *Chlorella* dalam mendegradasi COD ini didukung dengan kemampuan beradaptasi, bertumbuh dan dapat digunakan sebagai bioremediator [8].

2. Metode

Bahan baku yang digunakan sebagai media pertumbuhan mikroalga diperoleh dari *effluent* fermentor reaktor UASB-HCPB yang dilakukan Laboratorium Ekologi, Departemen Teknik Kimia, Universitas Sumatera Utara. Mikroalga *Chlorella vulgaris* diperoleh secara komersial dari pembudidaya mikroalga Indonesia. Bahan tambahan adalah aquades (H₂O), nutrisi F/2, kalium dikromat (K₂Cr₂O₇), perak sulfat (Ag₂SO₄), merkuri (II) sulfat (HgSO₄), dan ferroin (C₃₆H₂₄FeN₆₂⁺). Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Ekologi, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara (USU), Medan. Proses pengkulturan mikroalga *Chlorella vulgaris* dilakukan dengan menambahkan mikroalga *Chlorella vulgaris* murni dan aquades dengan perbandingan 1:1 (v/v) di dalam fotobioreaktor. Proses pengkulturan berlangsung selama 18 hari sampai didapat warna hijau pekat.

Proses kultivasi mikroalga *Chlorella vulgaris* dilakukan dengan variasi intensitas pencahayaan 12:12 (terang:gelap) dan 24:0 jam (terang:gelap) pada fotobioreaktor secara *batch*. Setelah didapat intensitas pencahayaan optimal dilanjutkan dengan variasi rasio mikroalga *Chlorella vulgaris* dan *effluent* yaitu 1000 mL:500 mL; 1000 mL:1000 mL; 1000 mL:1500 mL. Selama proses kultivasi, dilakukan analisis terhadap pertumbuhan *Chlorella vulgaris* dan penguraian senyawa organik pada *effluent*. Analisis yang dilakukan yaitu analisis kepadatan sel mikroalga, biomassa mikroalga, dan kadar COD pada *effluent*.



Gambar 1. Fotobioreaktor (a) Pengkulturan Mikroalga *Chlorella vulgaris* (b) Kultivasi Mikroalga *Chlorella vulgaris* (c) Kultivasi Mikroalga *Chlorella vulgaris*

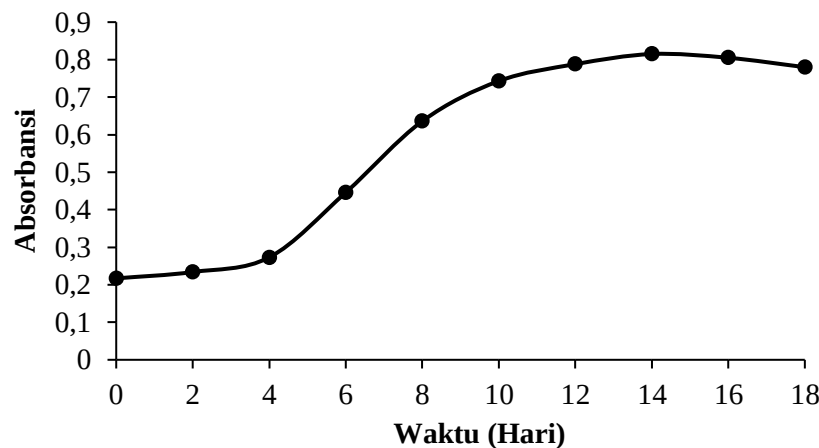
Keterangan:

1. Lampu TL 20 watt
2. Toples Kaca
3. Selang
4. Aerator

3. Hasil

3.1 Proses Pengkulturan Mikroalga *Chlorella vulgaris* di Fotobioreaktor

Proses pertumbuhan sel mikroalga dapat diinterpretasikan dari nilai kepadatan sel yang didapat [9]. Pertumbuhan kepadatan sel ini dapat diamati dengan menggunakan beberapa metode, tetapi penggunaan spektrofotometer UV-VIS adalah salah satu metode yang lebih sering digunakan. Kepadatan sel *Chlorella vulgaris* dapat ditentukan dengan spektrofotometer UV-VIS dengan kerapatan optik (OD) 750 nm [10]. Proses Pengkulturan mikroalga *Chlorella vulgaris* di fotobioreaktor dapat dilihat pada Gambar 1.

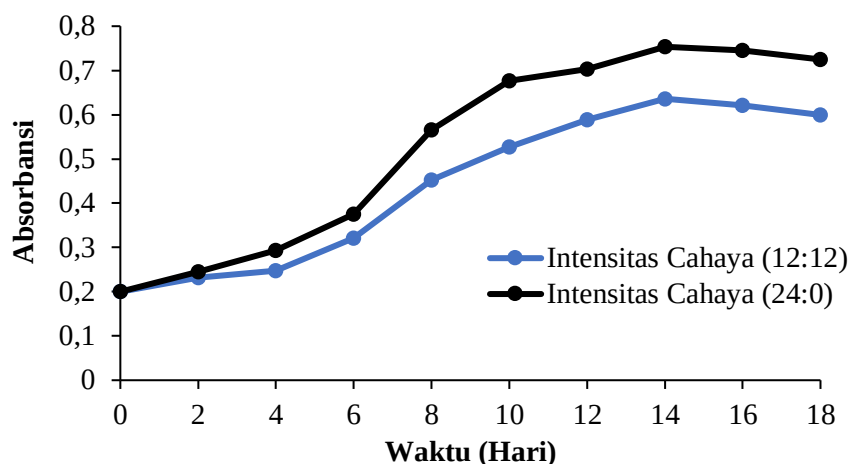


Gambar 2. Pola Pertumbuhan Mikroalga *Chlorella vulgaris* di dalam Fotobioreaktor

Pertumbuhan mikroalga terbagi menjadi beberapa fase yaitu fase *lag*, fase eksponensial, fase stasioner, dan fase kematian. Pengamatan hari ke-1 hingga hari ke-4 menunjukkan fase *lag*. Hal ini terlihat kepadatan sel tidak mengalami peningkatan yang signifikan karena proses adaptasi. Pada hari ke-5 sampai hari ke-11 menunjukkan fase eksponensial. Jumlah sel mengalami peningkatan yang cukup signifikan pada fase ini. Pada hari ke-12 hingga hari ke-15 terjadi fase stasioner karena jumlah kepadatan sel tidak jauh berbeda. Mulai hari ke-16 kepadatan sel mulai menurun. Fase ini merupakan fase kematian yang ditandai kematian sel karena jumlah nutrisi sudah semakin terbatas [11].

3.2 Pengaruh Intensitas Cahaya terhadap Kepadatan Sel Mikroalga *Chlorella vulgaris* pada Proses Kultivasi

Cahaya merupakan faktor yang penting dan sekaligus faktor pembatas bagi proses fotosintesis mikroalga. Penggunaan lampu dapat menggantikan cahaya matahari dalam proses kultur mikroalga [12]. Pengaruh intensitas pencahayaan terhadap pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada proses kultivasi dapat dilihat pada Gambar 2.

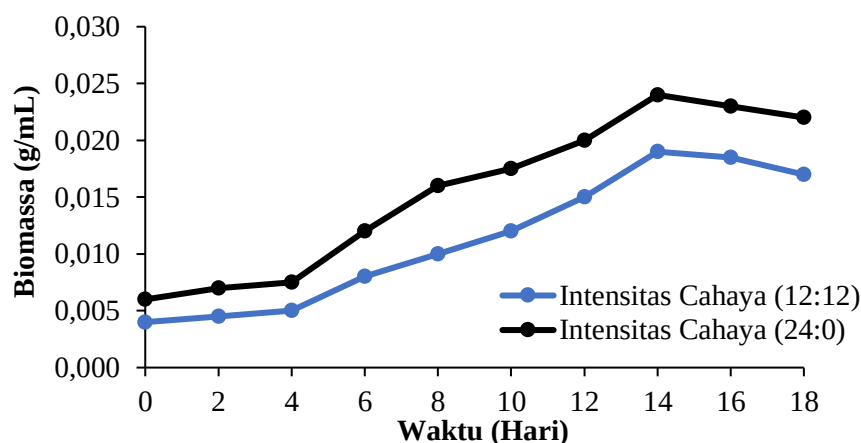


Gambar 3. Pengaruh Intensitas Cahaya terhadap Kepadatan Sel Mikroalga *Chlorella vulgaris* pada Proses Kultivasi

Pengaruh intensitas cahaya dengan variasi pencahayaan terang:gelap (24:0 dan 12:12) terhadap jumlah kepadatan sel mikroalga *Chlorella vulgaris* dilakukan pada proses kultivasi menggunakan *effluent* fermentor UASB-HCPB. Hasil terbaik didapatkan pada intensitas pencahayaan (24:0) dengan nilai absorbansi tertinggi 0,753. Penelitian terdahulu telah melakukan penelitian dengan mikroalga sejenis, yaitu *Chlorella sorokiniana* dengan hasil bahwa pertumbuhan sel meningkat pada intensitas cahaya yang lebih lama [13]. Oleh karena itu, semakin lama proses pencahayaan maka proses reproduksi dan pembelahan sel mikroalga banyak.

3.3 Pengaruh Intensitas Cahaya terhadap Biomassa Mikroalga *Chlorella vulgaris* pada Proses Kultivasi

Biomassa mikroalga dapat diukur dengan menggunakan beberapa metode, salah satunya adalah metode berat kering. Metode ini menggunakan kertas saring yang dikeringkan pada oven sampai diperoleh berat biomassa yang konstan [14]. Pengaruh intensitas cahaya terhadap biomassa mikroalga *Chlorella vulgaris* pada proses kultivasi dapat dilihat pada Gambar 4.

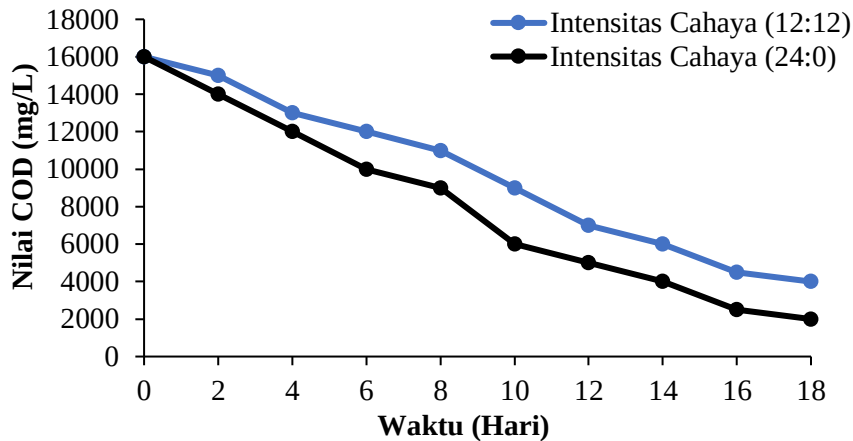


Gambar 4. Pengaruh Intensitas Cahaya terhadap Biomassa Mikroalga *Chlorella vulgaris* pada Proses Kultivasi

Pengaruh intensitas cahaya dengan variasi pencahayaan terang:gelap (24:0 dan 12:12) terhadap biomassa mikroalga *Chlorella vulgaris* dilakukan pada proses kultivasi menggunakan *effluent* fermentor UASB-HCPB. Hasil terbaik didapatkan pada intensitas cahaya (24:0) dengan kandungan biomassa tertinggi 0,024 g/mL pada hari ke-14. Mikroalga merupakan organisme autotrofik. Mikroalga membutuhkan cahaya untuk melaksanakan proses fotosintesis untuk meningkatkan pertumbuhan [15]. Berdasarkan hal tersebut, hasil analisa biomassa mikroalga *Chlorella vulgaris* meningkat seiring bertambahnya waktu pada durasi pencahayaan yang lebih lama.

3.4 Pengaruh Intensitas Cahaya Terhadap Penguraian Kadar COD *Effluent* Fermentor UASB-HCPB pada Proses Kultivasi

Mikroalga dapat digunakan sebagai agen bioremediasi karena kemampuannya yang dapat tumbuh di lingkungan yang tercemar. Proses bioremediasi merupakan proses penguraian kandungan polutan di lingkungan dengan menggunakan mikroorganisme. Tahap bioremediasi memerlukan tahapan dan kondisi yang sesuai agar efektif dalam menguraikan polutan [16]. Gambar 5 menunjukkan pengaruh intensitas cahaya terhadap penguraian kadar COD *effluent* fermentor UASB-HCPB pada proses kultivasi.

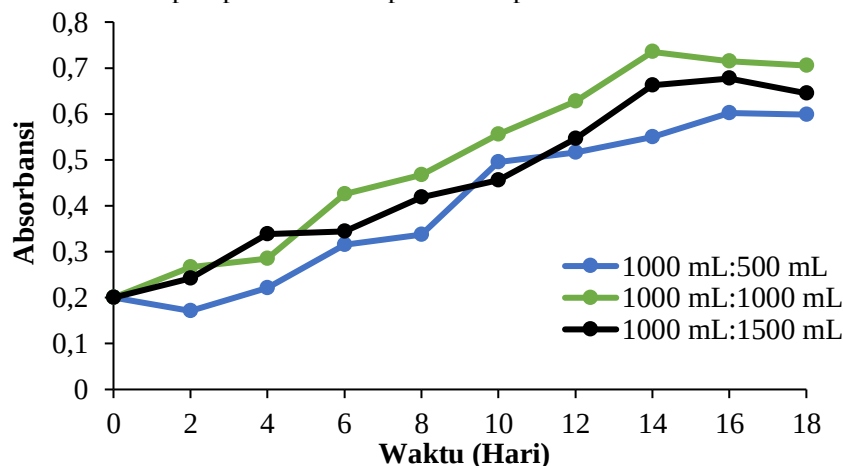


Gambar 5. Pengaruh Intensitas Cahaya terhadap Penguraian Kadar COD *Effluent* Fermentor UASB-HCPB pada Proses Kultivasi

Variasi pencahayaan terang:gelap (24:0 dan 12:12) dilakukan untuk mendapatkan intensitas pencahayaan optimal terhadap penguraian kadar COD *effluent* fermentor UASB-HCPB pada proses kultivasi. Didapatkan hasil bahwa intensitas pencahayaan (24:0) memberikan penurunan nilai COD yang lebih baik dibandingkan pencahayaan dengan (12:12). Pada pencahayaan (24:0) penurunan kadar COD memiliki efisiensi penurunan sebesar 87,5%, sedangkan efisiensi penurunan kadar COD dengan pencahayaan (12:12) sebesar 75%. Penurunan kadar COD pada limbah disebabkan peningkatan pertumbuhan mikroalga karena nutrisi yang terkandung dalam limbah digunakan sebagai proses metabolisme [17]. Dengan intensitas cahaya yang lebih lama, maka pertumbuhan sel mikroalga semakin banyak dan proses degradasi bahan organik semakin cepat.

3.5 Pengaruh rasio Mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *Effluent* Fermentor UASB-HCPB terhadap Kepadatan Sel

Penentuan rasio volume mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan volume *effluent* Fermentor UASB-HCPB dilakukan untuk memberikan rasio volume terbaik terhadap pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris* yang ditandai dengan peningkatan kepadatan selnya. Pengaruh rasio mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *effluent* fermentor UASB-HCPB terhadap kepadatan sel dapat dilihat pada Gambar 6.

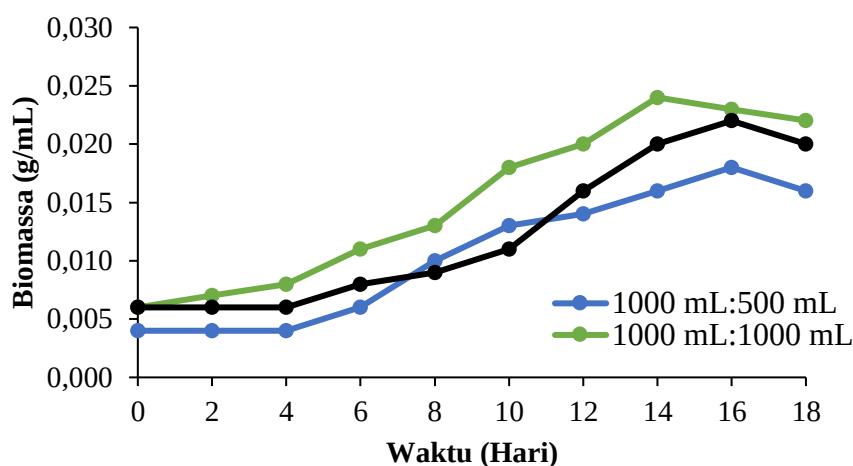


Gambar 6. Pengaruh Rasio Mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *Effluent* Fermentor UASB-HCPB terhadap Kepadatan Sel

Rasio volume mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *effluent* fermentor UASB-HCPB dilakukan dengan variasi volume 1000 mL:500 mL; 1000 mL:1000 mL; dan 1000 mL:1500 mL (v/v) dengan kondisi pencahayaan optimum yang telah didapatkan (24:0). Kepadatan sel terbaik terjadi pada rasio volume antara mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *effluent* sebesar 1000 mL:1000 mL dengan absorbansi tertinggi sebesar 0,735 pada hari ke-14. Pengaruh konsentrasi nutrisi terhadap mikroalga ditentukan dengan laju pertumbuhan yang diketahui dari pertambahan kepadatan sel. Pertumbuhan sel terbaik terjadi karena komposisi nutrisi medium dan kondisi lingkungan sesuai bagi pertumbuhan mikroalga sehingga pertumbuhan dan pembelahan berlangsung dengan cepat [18]. Berdasarkan hal tersebut rasio volume antara mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *effluent* sebesar 1000 mL:1000 mL merupakan kondisi pertumbuhan yang optimal.

3.6 Pengaruh Rasio Mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *Effluent* Fermentor UASB-HCPB terhadap Biomassa Mikroalga *Chlorella vulgaris*

Rasio konsentrasi mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *effluent* fermentor UASB-HCPB tentu akan mempengaruhi jumlah biomassa mikroalga yang didapatkan. Hal ini disebabkan peningkatan hasil kepadatan sel berbanding lurus dengan biomassa yang didapatkan. Gambar 7 memperlihatkan pengaruh rasio mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *effluent* fermentor UASB-HCPB terhadap biomassa mikroalga *Chlorella vulgaris*.

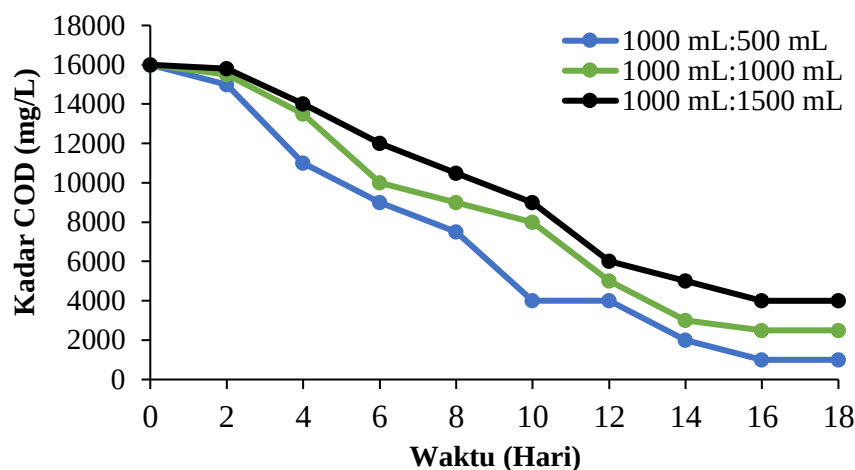


Gambar 7. Pengaruh Rasio Mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *Effluent* Fermentor UASB-HCPB terhadap Biomassa Mikroalga *Chlorella vulgaris*

Rasio volume mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *effluent* fermentor UASB-HCPB dilakukan dengan variasi volume 1000 mL:500 mL; 1000 mL:1000 mL; dan 1000 mL:1500 mL (v/v) dengan kondisi pencahayaan optimum yang telah didapatkan (24:0). Jumlah biomassa terbanyak didapatkan pada rasio volume antara mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *effluent* sebesar 1000 mL:1000 mL dengan biomassa sebesar 0,024 g/mL pada hari ke-14, tetapi menurun pada hari berikutnya. Peningkatan biomassa mikroalga dipengaruhi oleh keseimbangan jumlah nutrisi yang diberikan. Seperti contoh, pada penelitian pertumbuhan mikroalga dalam media limbah cair tahu dengan hasil bahwa volumen limbah 20% memberikan pertumbuhan yang optimum [19]. Pertumbuhan terus meningkat sampai jumlah nutrisi yang semakin terbatas [20]. Keterbatasan nutrisi akibat persaingan antar mikroalga menyebabkan penurunan pada hari ke-15 dan seterusnya.

3.7 Pengaruh Rasio Mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *Effluent* Fermentor UASB-HCPB terhadap Penguraian Kadar COD

Effluent fermentor UASB-HCPB sebagai media kultivasi memberikan nutrisi bagi pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris*. Nilai COD menunjukkan keberadaan karbon organik yang secara ilmiah dapat dioksidasi melalui proses mikrobiologis sehingga mengakibatkan berkurangnya oksigen di perairan. Rasio mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *effluent* fermentor UASB-HCPB terhadap penguraian kadar COD dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Pengaruh Rasio Mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *Effluent* Fermentor UASB-HCPB terhadap Penguraian Kadar COD

Rasio volume mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan *effluent* fermentor UASB-HCPB dilakukan dengan variasi volume 1000 mL:500 mL; 1000 mL:1000 mL; dan 1000 mL:1500 mL (v/v) dengan kondisi pencahayaan optimum yang telah didapatkan (24:0). Rasio volume 1000 mL:500 mL menghasilkan penurunan nilai COD dengan efisiensi terbaik, yaitu 93,75%, diikuti dengan rasio 1000 mL:1000 mL dengan efisiensi 84,37%; dan 1000 mL:1500 mL dengan efisiensi 75%. Mikroalga memiliki potensi dalam pengolahan LCPKS karena nutrisi yang dikandungnya seperti nitrogen, fosfor, dan karbon. Kandungan biomassa yang tinggi akan menyebabkan penurunan tingkat polusi yang lebih tinggi [21]. Hasil terbaik didapatkan pada rasio volume 1000 mL:500 mL. Hal ini dikarenakan jumlah mikroalga lebih banyak daripada jumlah *effluent*, tetapi jumlah biomassa yang dihasilkan lebih sedikit karena kandungan nutrisi semakin cepat sehingga fase kematian lebih cepat terjadi.

4. Kesimpulan

Mikroalga jenis *Chlorella vulgaris* terbukti mampu menurunkan kadar COD pada LCPKS. Penggunaan intensitas cahaya terang:gelap (24:0) jam memberikan pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris* lebih cepat yang ditandai dengan jumlah kepadatan sel dan biomassa yang lebih banyak sehingga penurunan kadar COD lebih baik dengan efisiensi penurunan COD sebesar 87,5%. Rasio perbandingan antara *Chlorella vulgaris* dengan *effluent* fermentor biogas UASB-HCPB sebesar 1000 mL:500 mL menghasilkan proses efisiensi penurunan kadar COD terbaik sebesar 93,75%. Walaupun kadar COD yang dihasilkan masih belum sesuai dengan baku mutu karena kadar COD awal yang tinggi, tetapi proses penurunan kadar COD dengan *Chlorella vulgaris* menunjukkan hasil efisiensi penurunan yang cukup besar.

5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung secara finansial oleh Penelitian Terapan TALENTA Universitas Sumatera Utara tahun anggaran 2023 No. 2837/UN5.1.R/SK/PPM/2023, tanggal 28 Agustus 2023, dan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian ini.

6. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] W. S. Winanti, Prasetiyadi, Wiharja, "Pengolahan *palm oil mill effluent (pome)* menjadi biogas dengan sistem anaerobik tipe *fixed bed* tanpa proses netralisasi," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 20, no.1, pp. 143-150, 2019.
- [2] D. P. Yuniarti, R. Komala, dan S. Aziz, D, "Pengaruh proses aerasi terhadap pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit di PTPN VII secara aerobik," *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 4, no. 2, pp. 7-16, 2019.
- [3] A. A. Zinatizadeh, P. Mohammadi, M. Mirghorayshi, S. Ibrahim, H. Younesi, and A. R. Mohamed, "An anaerobic hybrid bioreactor of granular and immobilized biomass for anaerobic digestion (AD)

and dark fermentation (DF) of palm oil mill effluent: mass transfer evaluation in granular sludge and role of internal packing,” *Biomass Bioenergy*, vol. 103, pp. 1-10, 2017.

- [4] D. S. Sembiring, B. Trisakti, and D. N. S. Sihombing, “Stabilitas reaktor *uplow anaerobic sludge blanket-hollow centered packed bed* dalam produksi biogas pada kondisi ruangan,” *Jurnal Teknik Kimia USU*, vol. 8, no. 2, pp. 67–71, 2019.
- [5] M. Rajanandini, and S. N. Kumar, “A biological and technological approach to treat wastewater by using macroalgae and microalgae photo bio and photo catalytic reactors view project bioreactors for crepe cotton wastewater treatment view project a biological and technological approach to treat wastewater by using macroalgae and microalgae,” *Research Journal of Chemistry and Environment*, vol. 25, no. 6, pp. 181-187, 2021.
- [6] S. Elystia, F. A. Hasti, and S. R. Muria, “Pengolahan limbah minyak sawit menggunakan *Chlorella sp.* yang diimobilisasi dalam *flat-fotobioreaktor*,” *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 11, no. 1, pp. 67–76, 2022.
- [7] S. R. Muria, Chairul, dan D. C. Naomi, “Pemanfaatan mikroalga *Chlorella sp.* untuk pengolahan *palm oil mill effluent (POME)* secara *fed batch*,” *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 19, no. 1, pp. 7–12, 2020.
- [8] Z. Selvika, A. B. Kusuma, N. E. Herliany, and B. F. S. P. Negara, “Pertumbuhan *Chlorella sp.* Pada Beberapa Konsentrasi Limbah Batubara,” *Depik*, vol. 5, no. 3, pp. 107-112, 2016.
- [9] K. D. Dewi, P. Santoso, and N. Dahoklory, “Karakteristik pertumbuhan *Chaetoceros sp* berdasarkan intensitas cahaya yang berbeda,” *Jurnal Vokasi Ilmu-Ilmu Perikanan*, vol. 3, no. 2, pp. 96-100, 2023.
- [10] R. Ramaraj, Y. Unpaprom, and N. Dussadee, “Cultivation of green microalga, *Chlorella vulgaris* for biogas purification,” *International Journal of New Technology and Research*, vol. 2, no. 3, pp. 117-122, 2016.
- [11] Y. Arkeman, L. Haris, G. Saefurahman, I. Hermadi, and D. S. Wibawa, “Cellular automata machine modeling to obtain optimal conditions and productivity of microalgae biomass. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2021.
- [12] L. D. Prasetyo, E. Supriyantini, and S. Sedjati, “Pertumbuhan mikroalga *Chaetoceros calcitrans* pada kultivasi dengan intensitas cahaya berbeda,” *Buletin Oseanografi Marina*, vol. 11, no. 1, pp. 59–70, 2022.
- [13] H. S. Yun, Y. S. Kim, and H. S. Yoon, “Characterization of *Chlorella sorokiniana* and *Chlorella vulgaris* fatty acid components under a wide range of light intensity and growth temperature for their use as biological resources,” *Heliyon*, vol. 6, no. 7, pp. 1-9, 2020.
- [14] M. A. Yaakob, R. M. S. R. Mohamed, A. Al-Gheethi, G. A. Ravishankar, and R. R. Ambati, “Influence of nitrogen and phosphorus on microalgal growth, biomass, lipid, and fatty acid production: an overview,” *Cells*, vol. 10, no. 393, 2021.
- [15] M. Fathurohman, H. Herdiana, W. T. Wulandari, A. Tri, and K. Pratita, “Uji aktivitas antioksidan senyawa eksopolisakarida dari mikroalga *Chlorella pyrenoidosa* dengan metode DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl),” *Prosiding Seminar Nasional Diseminasi Penelitian*, vol. 3, pp. 112-123, 2023.
- [16] L. Neneng, Nawan, dan A. Adelia, “Pengaruh tahapan bioremediasi terhadap efektivitas eliminasi merkuri (Hg) di media cair,” *Jurnal Ilmiah Kanderang Tingang*, vol. 14, no. 1, pp. 70–79, 2023.
- [17] M. Chairani, S. Elystia, dan S. R. Muria, “Penyisihan nitrogen total dalam limbah cair hotel dengan sistem *moving bed biofilm reactor* menggunakan *Chlorella sp.*,” *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 10, no. 1, pp. 16-27, 2021.
- [18] S. R. Muria, F. M. Shiddiq, I. Damayanti, and I. Purnama, “Kultivasi mikroalga *Chlorella sp.* secara *fed-batch* menggunakan limbah cair tahu untuk produksi lipid,” *JBCHEES*, vol. 4, no. 1, pp. 37-56, 2023.
- [19] Widayat and Hadiyanto, “Pemanfaatan limbah cair industri tahu untuk produksi biomassa mikroalga *Nannochloropsis Sp* sebagai bahan baku biodiesel,” *Reaktor*, vol. 15, no. 4, pp. 253-260, 2015.
- [20] I. Mishbach, N. S. Permatasari, M. Zainuri, H. P. Kusumaningrum, and E. D. Hastuti, “potensi mikroalga *Anabaena sp.* sebagai bahan utama bioetanol,” *EKOTONIA: Jurnal Penelitian Biologi, Botani, Zoologi dan Mikrobiologi*, vol. 7, no. 1, pp. 69–76, 2022.
- [21] Q. Emparan, R. Harun, and J. A. Kodiappan, “effect of microalgae-to-palm oil mill effluent (POME) ratio for rapid effective pollutants removal and biomass production,” *Desalination Water Treat*, vol. 198, pp. 119–125, 2020.