

Optimasi Konsorsium Mikroalga *Chlorella* sebagai Upaya Revitalisasi Lingkungan Berbasis Biodegradasi Limbah POME (*Palm Oil Mill Effluent*)

Alip Faturrahman¹, Andira Rahmawati², Ariek Dwi Anggoro^{3*}, Andieni Fauziah Rahmah⁴, dan Muhammad Fadly Haksara²

¹Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

²Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

³Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

⁴Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia; e-mail: ariekdwiang@gmail.com

ABSTRAK

Kelapa sawit menjadi komoditas unggulan dalam segi pendapatan non tambang. Pesatnya industri sawit memberikan dampak buruk bagi lingkungan, salah satunya limbah cair yang dihasilkan. Limbah POME memiliki kandungan nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) berkisar 55.250 mg/L yang 100 kali lebih berbahaya daripada limbah domestik. Akumulasi limbah POME dalam perairan dapat menurunkan konsentrasi O₂ dan meningkatkan konsentrasi CO₂. Sehingga diperlukan mitigasi lingkungan dalam menghadapi kondisi ini. Upaya pemanfaatan *Chlorella vulgaris* dan *Chlorella pyrenoidosa* sebagai media biodegradasi limbah POME menjadi solusi terkini. Riset ini bertujuan untuk menganalisis tingkat efektivitas konsorsium mikroalga *Chlorella* dalam mendegradasi polutan *nutrient-rich wastewater* POME. Riset ini dilakukan menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan *single factor* secara eksperimental. Parameter yang diukur berupa pH, COD, total padatan terlarut (TDS), warna dan secara *in silico*. Riset ini menggunakan variasi konsentrasi limbah POME yang ditambahkan dengan variasi imobilisasi *biobeads* mikroalga. Hasil menunjukkan bahwa antara konsorsium mikroalga memberikan pengurai warna tertinggi dan pH netral. Adapun *removal* COD dan TDS, konsorsium mikroalga memiliki kinerja lebih baik dibandingkan kelompok tunggal *Chlorella* dengan *percent removal* sebesar 95,6%. Riset ini memberikan wawasan penting dalam pengembangan metode yang efisien dan ramah lingkungan untuk mengolah air limbah dengan menggabungkan *green technology* dalam sistem pengolahan.

Kata kunci: biodegradasi, konsorsium mikroalga *Chlorella*, limbah POME

ABSTRACT

Palm oil is a leading commodity in terms of non-mining income. The rapid growth of the palm oil industry has a negative impact on the environment, one of which is the liquid waste produced. POME waste has a COD (Chemical Oxygen Demand) value of around 55,250 mg/L which is 100 times more dangerous than domestic waste. The accumulation of POME effluent in waters can reduce O₂ concentration and increase CO₂ concentration. So that environmental mitigation is needed in dealing with this condition. Efforts to utilize *Chlorella vulgaris* and *Chlorella pyrenoidosa* as a medium for biodegradation of POME waste is the latest solution. This research aims to analyze the effectiveness of *Chlorella* microalgae consortium in degrading nutrient-rich pollutants of POME wastewater. This research was conducted using a Randomized Block Design (RBD) with a single factor experimentally. Parameters measured were pH, COD, total dissolved solids (TDS), color and *in silico*. This research uses variations in the concentration of POME effluent added with variations in microalgae biobeads immobilization. The results showed that the microalgae consortium gave the highest color degradation and neutral pH. As for COD and TDS removal, the microalgae consortium performed better than the single *Chlorella* group with a percent removal of 95,6%. This research provides important insights in the development of efficient and environmentally friendly methods to treat wastewater by incorporating green technology in the treatment system.

Keywords: biodegradation, chlorella microalgae consortium, POME waste

Citation: Faturrahman, A., Rahmawati, A., Anggoro, D. A., Rahmah, A. F., dan Haksara, M. F. (2025). Optimasi Konsorsium Mikroalga *Chlorella* sebagai Upaya Revitalisasi Lingkungan Berbasis Biodegradasi Limbah POME (*Palm Oil Mill Effluent*). Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(3), 721-729, doi:10.14710/jil.23.3.721-729

1. PENDAHULUAN

Air limbah menjadi permasalahan utama yang memberikan dampak buruk bagi lingkungan dan

masyarakat. Air limbah didefinisikan sebagai air buangan hasil dari proses produksi dan berbagai aktivitas lain yang ditampung dalam danau buatan.

Terdapat dua jenis limbah yang dikenal oleh masyarakat diantaranya adalah air limbah domestik dan industri. Kedua air limbah tersebut dikategorikan ke dalam jenis limbah cair mengandung bahan organik, anorganik, dan mikroorganisme yang bersumber dari aktivitas manusia. Karakteristik tersebut menimbulkan penurunan kualitas lingkungan dan kesehatan manusia pada jangka panjang (Fajri *et al.*, 2020).

Sumber utama air limbah sendiri berasal dari kegiatan masyarakat berupa aktivitas industri, pertanian, dan pembangunan. Aktivitas industri dari berbagai bidang sangat berpengaruh terhadap peningkatan air limbah industri yang lebih sulit ditangani daripada limbah domestik. Kegiatan industri yang berperan aktif selama bertahun-tahun adalah industri kelapa sawit (Al Amshawee *et al.*, 2020). Secara perekonomian, industri kelapa sawit berperan menjadi salah satu komoditas utama dalam menghasilkan devisa. Di sisi lain, terjadi peningkatan limbah dari proses pengolahan buah kelapa sawit menjadi CPO seiring dengan peningkatan produktivitas kelapa sawit. Limbah yang dihasilkan dari industri kelapa sawit merupakan limbah cair yang dikenal dengan *Palm Oil Mill Effluent* (POME).

Limbah POME merupakan suspensi koloid kecokelatan berisi kombinasi air, minyak, dan suspensi halus padatan dengan persentase 95-96% air, 0,6-0,7% minyak dan 4-5% lemak dan padatan total sesuai dengan ketentuan Direktur Pengolahan dan Pemasaran Hasil Perkebunan, Departemen Pertanian. Kandungan BOD (*Biological Oxygen Demand*) pada limbah POME berkisar sekitar 25.000 mg/L dengan nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) dengan total 55.250 mg/L, serta jumlah padatan tersuspensi (SS) 19.610 mg/L yang 100 kali lebih berbahaya daripada limbah domestik (Abdurahman *et al.*, 2013). Hal ini menunjukkan bahwa apabila limbah POME tidak segera diatasi, maka tingkat pencemaran air akan semakin meningkat tiap tahunnya ditandai dengan meningkatnya pula CO₂ dan menurunnya kadar O₂ dalam air.

Beberapa riset melakukan penanganan limbah POME melalui degradasi senyawa organik POME menggunakan bakteri seperti *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, dan *Rhodococcus opacus* (Karim *et al.*, 2021). Namun, penggunaan bakteri membutuhkan waktu yang lama. Berdasarkan hasil riset dalam mengatasi permasalahan tersebut, terdapat solusi terbaru yang ditawarkan berupa inovasi konsorsium mikroalga *Chlorella* sebagai revitalisasi lingkungan berbasis biodegradasi limbah POME yang memanfaatkan mikroalga sebagai penyerap CO₂ secara signifikan (Mohammad *et al.*, 2021). Mikroalga *Chlorella* merupakan jenis alga yang menurunkan kadar COD sebanyak 20-80% (Udaiyappan *et al.*, 2020). Konsorsium mikroalga *Chlorella vulgaris* dan *Chlorella pyrenoidosa* akan membuat penyerapan CO₂ lebih cepat sehingga terjadi penurunan tingkat pencemaran limbah POME. Fokus penelitian ini adalah membandingkan kinerja mikroalga kultur

murni *Chlorella vulgaris*, mikroalga kultur murni *Chlorella pyrenoidosa*, dan mikroalga kultur campuran dalam menghilangkan warna, pH, COD, dan TDS limbah POME. Nilai awal konsentrasi dari POME dirancang pada 15-20% untuk mengamati kinerja mikroalga pada berbagai konsentrasi dan untuk menentukan kondisi optimal dalam penghilangan polutan dan hasil lipid.

2. METODE PENELITIAN

Riset dilaksanakan selama 5 bulan dimulai dari bulan Juni hingga Oktober 2023. Riset ini dilaksanakan di Laboratorium Bioremediasi, Jurusan Teknik Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian dan Laboratorium Reproduksi dan Penyakit, Jurusan Budidaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya.

Alat yang digunakan adalah pipet volumetrik volume 10 ml, DO meter, dan pH paper, botol kaca, gelas beaker, gelas ukur, tabung reaksi, wadah aquades, pengaduk kaca, spatula, *syringe*, saringan, corong, botol gelap, labu ukur 100 ml dan 25 ml, botol alluvial, pipet tetes, timbangan analitik, selang, pemberat, autoklaf, dan spektrofotometer. Bahan yang digunakan meliputi mikroalga (*Chlorella vulgaris* dan *Chlorella pyrenoidosa*) yang diperoleh dari isolat Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya yang dikultur pada laboratorium, media BG11, aquades, larutan *digestion*, larutan pereaksi, *sodium alginate*, CaCl₂ (*calcium dichloride*), alkohol 90%, dan limbah POME berasal dari kolam PT. Sawit Arum Madani, Blitar. Karakteristik limbah POME dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Limbah POME

Karakteristik	Rerata Konsentrasi
pH	4,25
COD	1600 mg/L
BOD	330 mg/L
TDS	1500 ppm
Total nitrogen	500 mg/L

Metode yang digunakan adalah metode eksperimen dengan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan satu faktor yang terdiri dari 9 perlakuan dan 3 kali ulangan sehingga diperoleh 27 unit percobaan. Dengan perlakuan:

- C₁ : *Chlorella vulgaris* konsentrasi 15%
- C₂ : *Chlorella vulgaris* konsentrasi 17,5%
- C₃ : *Chlorella vulgaris* konsentrasi 20%
- C₄ : *Chlorella pyrenoidosa* konsentrasi 15%
- C₅ : *Chlorella pyrenoidosa* konsentrasi 17,5%
- C₆ : *Chlorella pyrenoidosa* konsentrasi 20%
- C₇ : Konsorsium (*C. vulgaris* dan *C. pyrenoidosa*) konsentrasi 15%
- C₈ : Konsorsium (*C. vulgaris* dan *C. pyrenoidosa*) konsentrasi 17,5%
- C₉ : Konsorsium (*C. vulgaris* dan *C. pyrenoidosa*) konsentrasi 20%

Variabel yang digunakan dalam riset ini adalah konsentrasi limbah POME, konsentrasi COD,

konsentrasi warna, pH, kadar lipid, dan kadar TDS. Variabel kontrol meliputi konsentrasi warna dan konsentrasi pH limbah POME, variabel bebas meliputi konsentrasi limbah POME dan konsentrasi COD, dan variabel terikat dengan pengukuran konsentrasi warna, pH, kadar COD, dan TDS. Ulangan pada rancangan dilakukan dengan memastikan tingkat *reproducibility* yang lebih valid dan menjaga konsistensi dalam penelitian mencakup kondisi serta parameter lainnya secara terstruktur.

Persiapan stok kultur konsorsium mikroalga dimulai dengan kultivasi isolat *Chlorella vulgaris* dan *Chlorella pyrenoidosa* yang didapatkan Laboratorium Reproduksi FPIK UB dan dimasukkan ke dalam media BG 11. Media BG 11 menjadi media yang optimal dalam proses pertumbuhan mikroalga karena terdiri dari beberapa komponen (Tabel 2) yang memiliki banyak nutrient yang dapat menunjang perkembangbiakan mikroalga seperti nitrogen, fosfor, kalium dan lainnya. Proses kultivasi dilakukan secara aseptis di dalam ruang *Laminar Air Flow* dan diberikan aerasi di bawah pencahayaan lampu. Media BG11 dengan masing-masing kultur diinkubasi selama 10 hari. Stok kultur tersebut kemudian diambil 10% dari setiap mikroalga sebagai inokulum dalam pembuatan imobilisasi *biobeads*. Optimasi pembuatan *biobeads* dilakukan dengan konsentrasi matriks imobilisasi, yaitu melarutkan *polyvinyl alcohol* (PVA) dan sodium alginat dengan perbandingan 12.5:0.05.

2.1. Persiapan Isolat dan Media Kultur

Tabel 2. Komposisi Media BG 11

Komponen	Jumlah (g/l)
NaNO ₃	1.5
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	0.04
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.075
CaCl ₂ ·H ₂ O	0.036
Na ₂ CO ₃	0.02
EDTA	0.001
H ₃ BO ₄	0.0028
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.0081
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.00022
CuSO ₄ ·H ₂ O	0.00079
NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0.00039
Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0.000494

Matriks sodium-PVA dapat digunakan untuk imobilisasi dengan mencampurkan 10 ml suspensi sel alga hingga merata dan dimasukkan ke dalam *syringe* untuk membentuk *beads* imobilisasi. *Biobeads* dapat berfungsi secara efektif ditinjau dari beberapa faktor yakni, kepadatan gel, ukuran *biobeads* yang tepat, serta retensi dan komposisi yang seimbang. *Biobeads* imobilisasi diteteskan melalui *syringe* ke atas larutan kalsium klorida 1,5 g/L dan didiamkan 5 menit untuk menjaga struktur *beads* dan menghasilkan *beads* yang elastis serta menyerupai *hydrogel*. *Biobeads* disaring dan dicuci menggunakan aquades sebanyak dua kali.

2.2. Pembuatan Konsentrasi Limbah

Media biodegradasi berupa media limbah cair sawit sebesar 10 L yang berasal dari kolam PT. Sawit Arum Madani, Blitar. 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 dicampurkan aquades dengan perbandingan 15%, 17,5%, dan 20%. Pada 100 ml larutan terdiri dari komposisi 15 ml air limbah : 85 ml aquades (1), 17,5 ml air limbah : 82,5 ml aquades (2), dan 20 ml air limbah : 80 ml aquades (3) sebagaimana komposisi tersebut sesuai dengan perlakuan rancangan dan diberikan *biobeads* sebagai degradator. Limbah cair sawit dengan volume 5 L dapat diolah melalui imobilisasi mikroalga dengan komposisi mikroalga dengan limbah yakni 1:3 pada kurun waktu selama 7 hari dalam skala laboratorium.

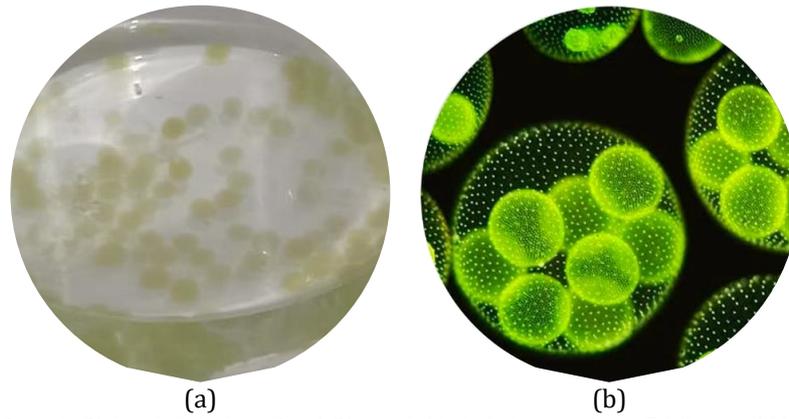
2.3. Pengujian Karakteristik dan Parameter Limbah

Selanjutnya dilakukan pengujian karakteristik awal COD, warna, pH, TDS total dengan konsentrasi limbah cair yang telah ditetapkan. Pengujian biodegradasi POME dilakukan untuk mengetahui efektivitas kemampuan konsorsium mikroalga terimobilisasi dalam *biobeads* dalam mendegradasi warna, COD, pH, dan TDS. Pengujian dilakukan pada labu ukur 100 ml dan 25 ml dengan penambahan media biodegradasi berupa POME dan ditambahkan *biobeads*. Proses biodegradasi dilakukan pada suhu 25°C dengan konsentrasi 15%, 17,5%, dan 20%. Pengujian dilakukan dengan mengukur beberapa parameter pada limbah POME dari sampel yang dianalisis melalui pengujian visual berdasarkan warna dan tingkat kejernihan yang telah diaplikasikan perlakuan, uji senyawa secara *in silico*, dan uji efektivitas degradasi pada limbah POME yang memuat pH, TDS, dan COD.

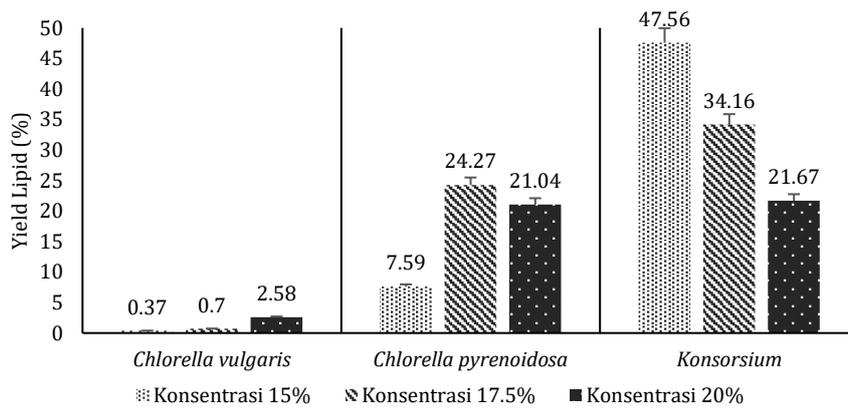
Uji visual dilakukan dengan parameter bau dan warna dari limbah POME yang diberi kelompok mikroalga tunggal dan konsorsium mikroalga dengan melihat tingkat kejernihan limbah dan dibandingkan dengan limbah POME kontrol tanpa mikroalga. Uji *In Silico* dilakukan dengan parameter *molecular docking* dengan menggunakan ligan natif yaitu nilai *binding affinity* dari protein pada mikroalga menggunakan *galic acid* dan *protocatechuic acid* dengan dua kali *running*. Uji efektivitas dilakukan dengan mengukur parameter pencemar limbah POME dari sampel dianalisis sesuai dengan *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* serta SNI 6989.02:2019. Adapun parameter tersebut meliputi:

1. Pengujian pH
2. Pengujian Kadar TDS (*Total Dissolved Solid*)
3. Pengujian Kadar COD (*Chemical Oxygen Demand*)

Pengujian kadar COD menggunakan metode *spektrofotometri UV-Vis* yang diuji dengan sampel pada hari ke 1, 4, dan 7 sebagai asumsi terjadinya perubahan signifikan pada hari tersebut.



Gambar 1. Bentuk Biobeads (a) Aktualisasi Biobeads Skala Laboratorium; (b) Ilustrasi Model Biobeads



Gambar 2. Kadar Lipid (Yield Lipid) Mikroalga

2.4. Analisis Data

Teknik pengumpulan data dilakukan berdasarkan data kualitatif dan data kuantitatif. Data dari pengujian sinergitas mikroalga diambil secara kualitatif. Data hasil pengujian efektivitas konsorsium mikroalga dan uji *in silico* diambil secara kuantitatif berdasarkan parameter yang diuji. Hasil pengamatan pengujian dianalisis secara statistik menggunakan *analysis of variance* (ANOVA) dan apabila terdapat perbedaan nyata akan diuji lanjut dengan uji Beda Nyata Jujur (BNJ) pada taraf 5%. Keseluruhan data dan variabel dianalisis menggunakan perangkat lunak statistik. Hasil riset disimpulkan berdasarkan analisis data secara deskriptif yang telah dilakukan pada data kualitatif dan data kuantitatif.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Analisis Kadar Lipid

Analisis kadar lipid pada mikroalga dilakukan untuk mengetahui potensi mikroalga *Chlorella* sebagai agen dalam produksi *biofuel* di masa depan. Hal ini karena mikroalga memiliki kandungan lemak dan asam lemak yang dapat dikonversi menjadi salah satu energi alternatif *biofuel*. Hasil uji kadar lipid dengan variasi konsentrasi COD POME dapat dilihat pada Gambar 1 menunjukkan bahwa mikroalga *Chlorella pyrenoidosa* pada COD 600 mg/L memiliki hasil lipid tertinggi, yaitu 24,27%, diikuti oleh hasil

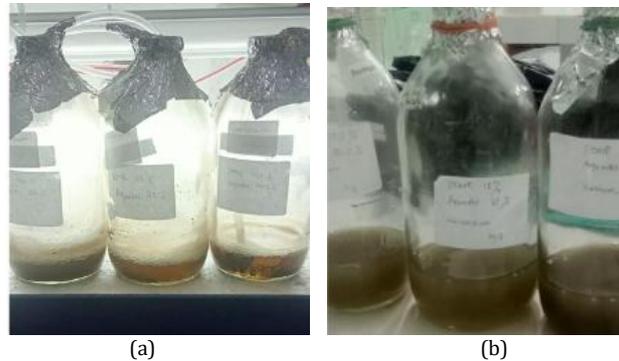
lipid sebesar 47,56% dan 34,16% dari kombinasi kedua mikroalga. Berdasarkan grafik hasil lipid, mikroalga *Chlorella vulgaris* dapat mencapai hingga 2,58% lipid dan untuk mikroalga *Chlorella pyrenoidosa*, hasil lipid dapat mencapai hingga 24,27%. Sementara itu, untuk kombinasi mikroalga, hasil lipid dapat mencapai hingga 47,56%. Secara keseluruhan, kinerja mikroalga *Chlorella pyrenoidosa* dan kombinasi mikroalga memiliki kinerja baik dalam menghasilkan kadar lipid yang tinggi dan berpotensi sebagai agen produksi *biofuel*.

Perbandingan kadar lipid pada riset yang telah dilakukan sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 3. Pada riset ini kadar lipid yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan riset lainnya. Riset ini memiliki perbedaan dibandingkan dengan riset sebelumnya yang menggunakan konsorsium mikroalga campuran dan dikultivikasi pada berbagai jenis limbah, sedangkan pada riset ini menggunakan konsorsium mikroalga yang dikultivikasi pada air limbah yaitu POME. Konsorsium mikroalga mudah beradaptasi dengan suhu lingkungannya serta pertumbuhannya lebih cepat dalam memasuki fase eksponensial, sehingga akumulasi kadar lipid didalamnya tidak membutuhkan waktu yang lama (Palanisamy *et al.*, 2020). Selain itu, dapat menghemat biaya pada proses kultivasinya karena memanfaatkan mikroalga sebagai bahan baku *biofuel*.

Tabel 3. Kadar Lipid Mikroalga pada Kondisi Kultivasi yang Berbeda

No	Mikroalga	Limbah yang Digunakan	Kadar Lipid (%)	Referensi
1.	Konsorsium mikroalga <i>Chlorella</i>	Limbah cair industri karpet	6,82	Chinnasamy et al., 2020
2.	Konsorsium mikroalga	Limbah cair <i>artificial</i>	10,00	Rahmasari, 2022
3.	Konsorsium mikroalga <i>indigeneous</i>	Limbah cair rumah pemotongan hewan	19,33	Kyle dan Wudneh, 2021
4.	Konsorsium mikroalga <i>Chlorella</i>	Limbah POME	34,16	Riset ini, 2023

Sumber data: hasil literature review



Gambar 3. Visual POME (a) Imobilisasi Mikroalga (85% Cairan, 15% Padatan); (b) POME Kontrol

3.2. Analisis Uji Degradasi Limbah POME

3.2.1. Analisis Pengujian Karakteristik Visual

Berdasarkan uji visual melalui pengamatan dan pengumpulan data perubahan warna, didapatkan hasil bahwa setiap hari limbah POME mengalami perubahan warna menjadi jernih. Hal ini dikarenakan adanya proses pengikatan bahan organik yang terkandung dalam limbah POME oleh imobilisasi *biobeads* mikroalga *Chlorella*. Mikroalga *Chlorella* memisahkan antara partikel yang terkandung dan juga air dari limbah POME sehingga terjadi perubahan warna. Pada uji warna didapatkan tingkat perubahan warna sangat keruh pada hari ke-1 dan 2, keruh pada hari ke-3, jernih pada hari ke-4 dan 6, dan sangat jernih pada hari ke-7. Makin jernih air maka kualitas air meningkat dan kandungan pencemar berkurang.

Berdasarkan gambar yang dapat dilihat dari Gambar 2 bahwa POME yang terindikasi pada konsentrasi COD tertinggi memiliki warna yang lebih gelap (kecoklatan) dibandingkan POME yang memiliki konsentrasi COD lebih rendah (Irfan et al., 2017). Warna kecoklatan pada limbah POME yang muncul disebabkan oleh adanya respon pigmen dari tandan buah segar (TBS) (Bello et al., 2013). Pigmen tersebut dapat berupa bentuk fenolik, lignin, dan karoten (Altogbia et al., 2021). Minyak kelapa sawit mentah (CPO) memiliki karoten sekitar antara 4.000-6.000 ppm (Ng & Choo, 2016). Warna POME pada gambar memiliki perubahan menjadi kuning jernih setelah diberikan perlakuan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa mikroalga telah teraktivasi dan dapat menghilangkan karoten pada POME dari aktivitas yang dilakukan mikroalga dalam mendegradasi senyawa pada POME (Dominic & Baidurah, 2022).

Penghilangan warna terjadi ketika proses adsorpsi pigmen dari biomassa. Aplikasi mikroalga pada POME dapat merubah warna dalam jangka waktu tertentu. *Chlorella pyrenoidosa* (kelompok tunggal) dan Konsorsium (kelompok gabungan) memiliki mekanisme kinerja yang lebih baik daripada *Chlorella*

vulgaris (kelompok tunggal) dalam mendegradasi warna pada POME. Berbagai bentuk gugus fungsi dalam dinding sel mikroalga berperan penting dalam adsorpsi warna, khususnya pada karoten (Daneshvar et al., 2017). Mikroalga mampu menyerap pigmen dari POME yang diasimilasi dengan dinding selnya untuk membantu proses fotosintesis yang lebih baik (Huang et al., 2010).

3.2.2. Analisis Pengujian Kadar pH

Kandungan pH pada air dengan kualitas baik diidentifikasi dengan rentang nilai 7-8 dan didapatkan data pada Tabel 3. Limbah POME yang memiliki kandungan minyak dan asam memiliki kandungan pH kurang dari 7 yang diidentifikasi pada hari ke-1. Berdasarkan analisis parameter pH, didapatkan bahwa konsentrasi pH mengalami kenaikan setiap hari dengan total rata-rata akhir dimana pada *Chlorella vulgaris* memiliki rentang sebesar 6,8-7,56, *Chlorella pyrenoidosa* antara 6,13-7,23, dan konsorsium *Chlorella* memiliki interval antara 5,60-6,60. Kadar pH konsorsium *Chlorella* membuktikan tingkat degradasi efisien didasarkan pada peningkatan nilai pH signifikan dan normal.

Peranan tingkat keasaman (pH) memiliki signifikansi yang besar dalam proses kimiawi di dalam larutan karena kondisi larutan dapat memengaruhi berbagai aspek, seperti aktivitas biologis dan mikrobiologis yang memerlukan rentang pH tertentu untuk mencapai hasil optimal. Salah satu faktor yang memengaruhi perubahan pH dalam air adalah ketersediaan CO₂ terlarut, yang dapat berasal dari atmosfer dan hasil respirasi mikroorganisme (Wais et al., 2024). Hasil pengukuran pH pada limbah POME menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap hasil setiap perlakuan yang diterapkan. Meskipun pH awal limbah POME sebelum dicampur dengan mikroalga adalah 4,2 dimana rata-rata nilai pH akhir berkisar antara 5,6 hingga 7,56. Kenaikan pH ini dipengaruhi oleh proses fotosintesis *Chlorella*, yang

mampu meningkatkan tingkat keasaman pada limbah POME. Riset ini sejalan dengan temuan Hartini (2016), yang menunjukkan bahwa penambahan *Chlorella* sp. tanpa bakteri lain dapat meningkatkan nilai pH. Menurut Jasmiati *et al.* (2010), penyerapan CO₂ dan bikarbonat oleh mikroalga dapat mengurangi konsentrasi CO₂, mengakibatkan peningkatan pH. Kenaikan nilai pH juga dapat disebabkan oleh proses pengenceran dalam limbah, di mana penambahan mikroalga mengurangi tingkat keasaman limbah karena sifat basa mikroalga, sehingga nilai pH limbah secara otomatis meningkat (Simatupang *et al.*, 2017).

3.2.3. Analisis Pengujian Kadar TDS

Kadar TDS pada air limbah POME didapatkan nilai yang fluktuasi dengan rentang nilai 200-1.400 ppm dan didapatkan data pada Gambar 3 (a, b, dan c). Limbah POME mengalami penurunan pada kadar TDS di setiap harinya dengan penurunan secara signifikan terjadi pada hari ke-7 di setiap perlakuannya.

Nilai TDS pada limbah POME dengan *Chlorella vulgaris* memiliki rata-rata sebesar 775.3, 876, 908 mg/l berturut-turut pada konsentrasi 15%, 17.5%, dan 20%. Berdasarkan nilai rerata TDS tersebut, limbah POME memiliki interval yang beragam tergantung fluktuasi yang diberikan pada tingkat konsentrasi tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa pada *Chlorella vulgaris* memiliki efektivitas degradasi pada tingkat konsentrasi 15% karena memiliki nilai TDS dengan rerata nilai total terendah yang mampu mendegradasi limbah POME.

Nilai TDS pada limbah POME dengan *Chlorella pyrenoidosa* memiliki rata-rata sebesar 666.7, 565.3, 673.3 mg/l berturut-turut pada konsentrasi 15%, 17.5%, dan 20%. Hal ini menunjukkan pada *Chlorella pyrenoidosa* memiliki efektivitas degradasi pada konsentrasi 17.5%. Nilai TDS pada limbah POME dengan konsorsium *Chlorella* memiliki rata-rata sebesar 672, 782.3, 1052 mg/l berturut-turut pada konsentrasi 15%, 17.5%, dan 20%. Hal ini menunjukkan pada konsorsium *Chlorella* memiliki efektivitas degradasi pada konsentrasi 15%.

Konsentrasi TDS mengalami penurunan setiap hari diidentifikasi dengan grafik nilai yang menurun. Hal ini membuktikan bahwa *Chlorella* mampu mengikat kandungan senyawa organik sehingga menurunkan kadar TDS dalam limbah (Shoiful *et al.*, 2023). Kandungan pH pada air dengan kualitas baik diidentifikasi dengan rentang nilai 7-8. Limbah POME yang memiliki kandungan minyak

dan asam memiliki kandungan pH kurang dari 7 (Kamyab *et al.*, 2015). Kadar pH konsorsium *Chlorella* memiliki tingkat degradasi efisien didasarkan pada peningkatan nilai pH secara signifikan.

3.3. Pengukuran Tingkat Degradasi Polutan Nutrien-Rich Wastewater

3.3.1. Pengujian Kadar COD

Analisis uji COD dilakukan pada hari ke 1, 4, dan 7 dan didapatkan nilai bervariasi seperti terdapat pada Gambar 4 (d). Nilai ini kemudian diakumulasikan dengan persentase *removal* sehingga didapatkan efektivitas degradasi limbah. Dari perhitungan presentase *removal* COD untuk *C. vulgaris*, *C. pyrenoidosa*, dan konsorsium didapatkan rerata hasil berturut-turut tertinggi yaitu 72,4%, 74,5%, dan 81,2%. Persentase penyisihan terbesar didapatkan pada konsentrasi limbah POME 15% dengan perlakuan konsorsium mikroalga. Berdasarkan analisis data, hal ini membuktikan bahwa konsorsium *Chlorella* memiliki kemampuan untuk mendegradasi limbah POME jauh lebih baik dibandingkan dengan yang lainnya (Al-Amshawee *et al.*, 2020).

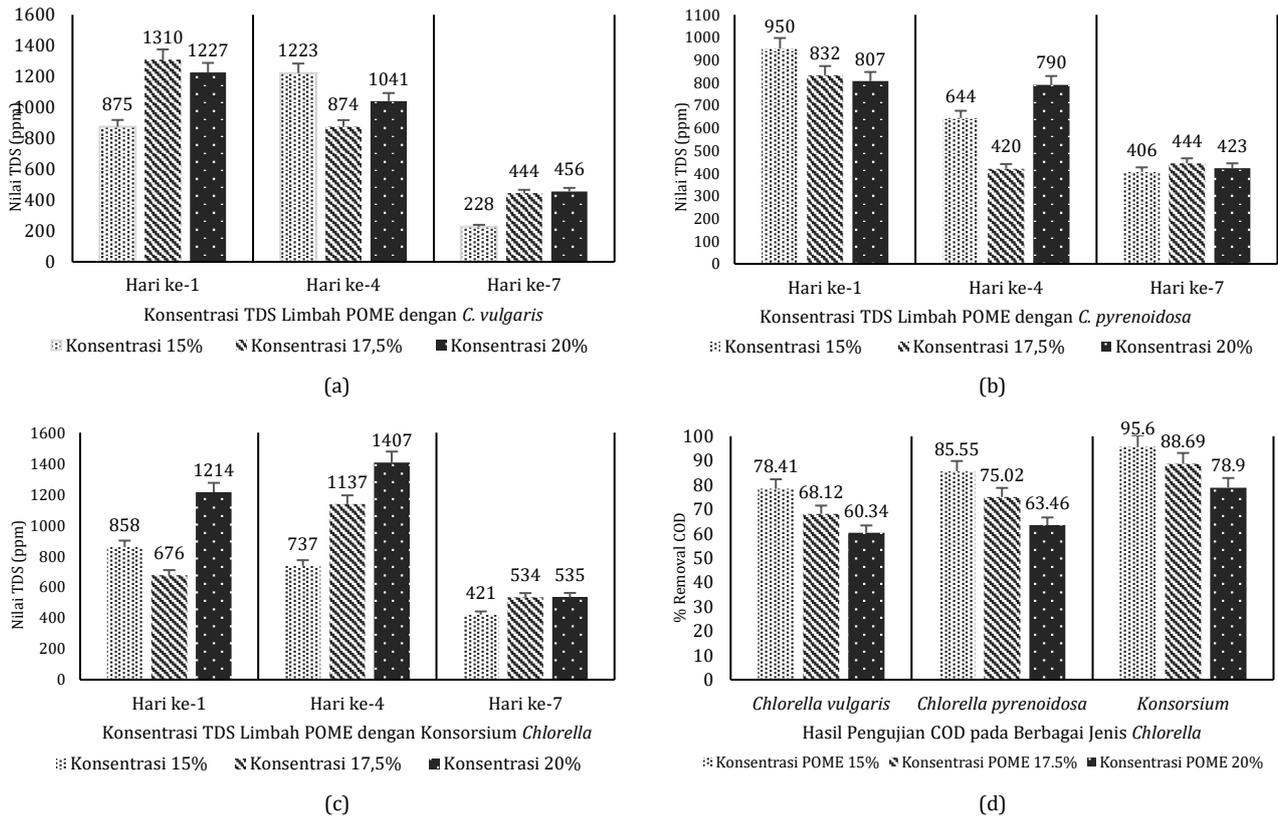
3.3.2. Hasil Analisis In Silico

Parameter yang akan digunakan pada riset *molecular docking* dengan menggunakan ligan natif, ialah nilai *binding affinity* dari protein pada mikroalga menggunakan *Gallic acid* dan *Protocatechuic acid* masing-masing *running* sebanyak 2 kali. Semakin kecil nilai *binding affinity* yang dihasilkan maka reaksi afinitas yang terjadi antara *reseptor* dengan *ligan* akan semakin tinggi dan semakin besar nilai *binding affinity* yang dihasilkan akan semakin rendah afinitas antar *reseptor* dengan *ligand* (Willaert, 2018). Setelah melakukan *molecular docking* didapatkan hasil bahwa nilai perbandingan histogram *bind affinity* antara senyawa dengan ligan natif & *bind affinity* dengan kandungan POME didapatkan nilai lebih kecil menunjukkan hasil bahwa protein pada mikroalga efektif menguraikan limbah organik pada POME. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai *binding affinity* sebesar -2.87 dan -2.87. Senyawa pada limbah POME secara *in silico* dapat dikatakan ikatannya dengan sisi aktif lebih kuat dan reaksi dapat lebih mudah terjadi pada protein mikroalga. Jumlah ikatan hidrogen yang banyak akan mendukung kekuatan ikatan lebih besar antara senyawa dengan sisi aktif enzim.

Tabel 4. Rerata Hasil Kadar pH Limbah POME pada Hari ke-7

Perlakuan	pH (H ₇)
C ₁ : <i>Chlorella vulgaris</i> konsentrasi 15%	5,60 ^a
C ₂ : <i>Chlorella vulgaris</i> konsentrasi 17,5%	6,23 ^b
C ₃ : <i>Chlorella vulgaris</i> konsentrasi 20%	6,60 ^c
C ₄ : <i>Chlorella pyrenoidosa</i> konsentrasi 15%	6,13 ^b
C ₅ : <i>Chlorella pyrenoidosa</i> konsentrasi 17,5%	6,60 ^c
C ₆ : <i>Chlorella pyrenoidosa</i> konsentrasi 20%	7,23 ^e
C ₇ : Konsorsium (<i>C. vulgaris</i> dan <i>C. pyrenoidosa</i>) konsentrasi 15%	7,06 ^e
C ₈ : Konsorsium (<i>C. vulgaris</i> dan <i>C. pyrenoidosa</i>) konsentrasi 17,5%	6,80 ^d
C ₉ : Konsorsium (<i>C. vulgaris</i> dan <i>C. pyrenoidosa</i>) konsentrasi 20%	7,56 ^f

Ket: Angka-angka yang diikuti oleh huruf kecil yang sama menunjukkan berbeda nyata menurut uji BNJ pada taraf 5%.



Gambar 4. Hasil Kadar Pengujian TDS pada (a) *C. vulgaris*, (b) *C. pyrenoidosa*, (c) Konsorsium *Chlorella*, dan (d) Hasil Pengujian COD Pada Berbagai Konsentrasi

3.4. Efektivitas Konsorsium Mikroalga *Chlorella* sebagai Pengurai Limbah POME

Uji efektivitas limbah didasarkan pada serangkaian uji parameter meliputi TDS, COD, dan pH. Serangkaian uji tersebut dilakukan pada berbagai konsentrasi limbah POME pada *Chlorella vulgaris*, *Chlorella pyrenoidosa*, dan konsorsium *Chlorella*. Nilai TDS pada limbah POME pada gambar yang tertera. Pada analisis kadar TDS menunjukkan bahwa pada *Chlorella vulgaris* memiliki efektivitas degradasi pada konsentrasi 15%, pada *Chlorella pyrenoidosa* memiliki efektivitas degradasi pada konsentrasi 17,5%, sedangkan pada konsorsium *Chlorella* memiliki efektivitas degradasi pada konsentrasi 15%. Konsentrasi TDS mengalami penurunan setiap hari diidentifikasi dengan grafik nilai yang menurun. Hal ini membuktikan bahwa *Chlorella* mampu mengikat kandungan senyawa organik sehingga menurunkan kadar TDS dalam limbah.

Kandungan pH pada air dengan kualitas baik diidentifikasi dengan rentang nilai 7-8 dan didapatkan data pada tabel tertera pada analisis pengujian kadar pH. Limbah POME yang memiliki kandungan minyak dan asam memiliki kandungan pH kurang dari 7. Berdasarkan analisis parameter pH, didapatkan bahwa konsentrasi pH mengalami kenaikan menuju pH normal, dimana pada *Chlorella vulgaris* sebesar 7,0, *Chlorella pyrenoidosa* 7,2, dan konsorsium *Chlorella* 7,6. Kadar pH konsorsium *Chlorella* membuktikan tingkat degradasi efisien

didasarkan pada peningkatan nilai pH secara signifikan.

Analisis uji COD dilakukan pada hari ke 1, 4, dan 7 dan didapatkan nilai bervariasi seperti terdapat pada Gambar diatas. Nilai ini kemudian diakumulasi dengan persen *removal* sehingga didapatkan efektivitas degradasi limbah. Dari perhitungan presentase *removal* COD untuk *Chlorella vulgaris*, *Chlorella pyrenoidosa*, dan konsorsium didapatkan hasil berturut-turut yaitu 84,33%, 80,12%, dan 87,73%. Penurunan nilai COD terbesar terjadi pada sampel POME pada konsentrasi 15% yang dicapai pada hari ke-7 dengan presentase penurunan COD sebesar 95,6%. Berdasarkan analisis data, hal ini membuktikan bahwa konsorsium *Chlorella* memiliki kemampuan untuk mendegradasi limbah POME jauh lebih baik dibandingkan dengan yang lainnya.

Berdasarkan hasil riset menunjukkan bahwa mikroalga *Chlorella* dapat digunakan untuk mengolah limbah cair kelapa sawit (POME), hal ini berpotensi sebagai nutrisi untuk pertumbuhan alga. Beberapa riset menunjukkan bahwa *Chlorella* sp. dapat mengurangi kadar polutan dalam limbah cair sagu dan POME, serta dapat mempercepat proses metabolisme dengan bersimbiosis dengan bakteri pengurai (Low *et al.*, 2021). Selain itu, *Chlorella* juga dapat diimobilisasi dalam matrik polimer seperti kalsium alginat untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair kelapa sawit. (Simatupang *et al.*, 2017). Tingkat efektivitas konsorsium mikroalga

Chlorella dalam mengolah limbah cair kelapa sawit dapat ditinjau melalui beberapa metode riset dengan menggunakan parameter seperti penurunan kadar polutan, pengukuran konsentrasi COD (*Chemical Oxygen Demand*), serta pertumbuhan mikroalga dalam kondisi limbah cair kelapa sawit (Elystia *et al.*, 2022). Selain itu, penggunaan teknik immobilisasi mikroalga *Chlorella* dalam matriks polimer juga telah diteliti untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair kelapa sawit. Mekanisme kerja mikroalga *Chlorella* dalam mendegradasi limbah cair kelapa sawit dipengaruhi oleh beberapa faktor meliputi ketersediaan nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan sulfur dalam limbah cair kelapa sawit yang memengaruhi pertumbuhan dan aktivitas metabolisme mikroalga *Chlorella* (Simatupang *et al.*, 2017). Nilai pH medium tempat pertumbuhan mikroalga *Chlorella* juga memengaruhi efektivitasnya dalam mengolah limbah cair kelapa sawit. pH yang sesuai akan mendukung pertumbuhan mikroalga (Muria *et al.*, 2020). Konsentrasi limbah cair kelapa sawit juga dapat memengaruhi efektivitas mikroalga *Chlorella* dalam mengolah limbah, di mana konsentrasi yang tinggi dapat memengaruhi pertumbuhan dan aktivitas metabolisme mikroalga (Elystia *et al.*, 2022). Faktor terakhir, penggunaan teknik immobilisasi mikroalga *Chlorella* dalam matriks polimer juga telah diteliti untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair kelapa sawit (Anggraini, *et al.*, 2023).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan tingkat degradasi dan penyisihan COD, TDS, pH, warna dari POME yang diolah dengan *Chlorella vulgaris* (kelompok tunggal), *Chlorella pyrenoidosa* (kelompok tunggal), dan konsorsium kedua jenis *Chlorella*. Pengolahan limbah POME menggunakan mikroalga dilakukan dengan memanfaatkan teknik immobilisasi sel, dimana kultur mikroalga yang telah ditumbuhkan pada media BG-11 dibuat *biobeads* agar dapat beradaptasi dan aktif mendegradasi limbah sawit (POME) sebagai medianya. Analisis tingkat degradasi polutan *nutrient-rich wastewater* POME dilakukan dengan mengukur parameter kualitatif dan kuantitatif yaitu konsentrasi warna. Kadar COD, TDS dan pH, jumlah biomassa sel dan *lipid yield*. Selain itu, hasil parameter ini juga didukung dengan analisis uji visual, *in silico*, dan juga perbandingan efektivitas degradasi limbah. Pada analisis data dengan serangkaian uji parameter yang meliputi TDS, COD, dan pH, konsentrasi limbah POME pada *Chlorella vulgaris*, *Chlorella pyrenoidosa*, dan konsorsium *Chlorella* diamati hasilnya pada hari ke 1, 4 dan 7. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa konsorsium *Chlorella* memiliki kemampuan untuk mendegradasi limbah POME lebih baik dan efektif dibandingkan dengan lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurahman, N.H., Y.M. Rosli, & N.H. Azhari. 2013. The Performance Evaluation of Anaerobic Methods for Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment: A review. *International Perspectives on Water Quality Management and Pollutant Control*, In Tech Open, London, United Kingdom. pp. 103-125.
- Al-Amshawee, S.K., M.Y. Yunus, & A.A. Azoddein. 2020. A Review Study of Biofilm Bacteria and Microalgae Bioremediation for Palm Oil Mill Effluent: Possible Approach. *IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng.* 736 (2): 1-13.
- Altogbia, W.M., N.A. Yusof, Z. Zainal, A. Idris, S.K.A. Rahman, S.F.A. Rahman, & A. Isha. 2021. Molecular Imprinted Polymer for β -carotene for Application in Palm Oil Mill Effluent Treatment. *Arab. J. Chem.* 14 (2): 102928.
- Bello, M.M., M.M. Nourouzi, L.C. Abdullah, T.S.Y. Choong, Y.S. Koay, & S. Keshani. 2013. POME is Treated for Removal of Color from Biologically Treated POME in Fixed Bed Column: Applying Wavelet Neural Network (WNN). *J. Hazard. Mater.* 262: 106-113.
- Chinnasamy, S., A. Bhatnagar, R.W. Hunt, & K.C. Das. 2020. Microalgae Cultivation in a Wastewater Dominated by Carpet Mill Effluents for Biofuel Applications. *Bioresour Technol.* 101 (9): 3097-3105.
- Daneshvar, E., A. Vazirzadeh, A. Niazi, M. Kousha, M. Naushad, & A. Bhatnagar. 2017. Desorption of Methylene Blue Dye from Brown Macroalga: Effects of Operating Parameters, Isotherm Study and Kinetic Modeling. *J. Clean. Prod.* 152: 443-453.
- Dominic, D.; Baidurah, S. 2022. Recent Developments in Biological Processing Technology for Palm Oil Mill Effluent Treatment—A Review. *Biology*, 11, 525.
- Elystia, S., J. Ahmad, & S. Anjar. 2019. Methane from Digestion of Palm Oil Mill Effluent (POME) in a Thermophilic Anaerobic Reactor. *International Journal of Science and Engineering*, 3 (1): 32-35.
- Fajri, R., P. Wahyuningsih, & B. Andika. 2020. Penentuan Nilai BOD dan COD sebagai Parameter Pencemaran Air dan Baku Mutu Air Limbah di Pusat Riset Kelapa Sawit (PPKS) Medan. *QUIMICA: Jurnal Kimia Sains dan Terapan.* 2 (1): 14-22.
- Hartini, F., F. Restuhadi, & T. Dahril. 2016. Pemanfaatan Mikroalga *Chlorella* sp. dalam Menurunkan Baku Mutu Polutan Limbah Cair Industri Sagu. *Jurnal Online Mahasiswa.* 4 (1): 34-46.
- Huang, G.H., F. Chen, D. Wei, X.W. Zhang, & G. Chen. 2010. Biodiesel Production by Microalgal Biotechnology. *Appl. Energy.* 87 (1): 38-46.
- Irfan, M., T. Butt, N. Imtiaz, N. Abbas, R.A. Khan, & A. Shafique. 2017. The Removal of COD, TSS and Colour of Black Liquor by Coagulation-Flocculation Process at Optimized pH, Settling and Dosing Rate. *Arab. J. Chem.* 10: S2307-S2318.
- Jasmiati, A., Sofia, & Thamrin. 2010. Bioremediasi Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Efektif Mikroorganisme (EM4). *Jurnal Lingkungan.* 2 (4): 248-258.
- Kamyab, H., M.F.M. Din, A. Keyvanfar, M.Z.A. Majid, A. Talaiekhosani, A. Shafaghat, C.T. Lee, L.J. Shiun, & H.H. Ismail. 2015. Efficiency of Microalgae *Chlamydomonas* on the Removal of Pollutants from Palm Oil Mill Effluent (POME). *Energy Procedia.* 75: 2400-2408.
- Karim, A., M.A. Islam, Z.B. Khalid, A. Yousuf, M.M.R. Khan, & C.K.M. Faizal. 2021. Microbial Lipid Accumulation

- Faturrahman, A., Rahmawati, A., Anggoro, D. A., Rahmah, A. F., dan Haksara, M. F. (2025). Optimasi Konsorsium Mikroalga *Chlorella* sebagai Upaya Revitalisasi Lingkungan Berbasis Biodegradasi Limbah POME (*Palm Oil Mill Effluent*). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(3), 721-729, doi:10.14710/jil.23.3.721-729
- Through Bioremediation of Palm Oil Mill Effluent Using a Yeast-Bacteria Coculture. *Renew. Energy*. 176: 106-114.
- Kyle, R.J. & A. Wudneh. 2021. Mixed Algae Cultures for Lowcost Environmental Compensation in Cultures Grown for Lipid Production and Wastewater Remediation. *Journal Chem Technol Biotechnol*. 88: 992-998.
- Low, S.S.; Bong, K.X.; Mubashir, M.; Cheng, C.K.; Lam, M.K.; Lim, J.W.; Ho, Y.C.; Lee, K.T.; Munawaroh, H.S.H.; Show, P.L. 2021. Microalgae Cultivation in Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment and Biofuel Production. *Sustainability*, 13, 3247.
- Mohammad, S.; Baidurah, S.; Kobayashi, T.; Ismail, N.; Leh, C.P. 2021. Palm Oil Mill Effluent Treatment Processes—A Review. *Processes*, 9, 739.
- Palanisamy, K.M., P. Paramasivam, G.P. Maniam, M.H.A. Rahim, R. Ramaraj, N. Govindan. 2020. Palm Oil Mill Effluent as a Potential Medium for Microalgae *Chlorella* sp. Cultivation for Lipid Production. *Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication*, 2 (2): 1-7.
- Rahmasari, W.J. 2022. Karakterisasi Pertumbuhan Mikroalga dan Penyisihan Nutrien dari Limbah Cair Rumah Potong Hewan dengan Sitem Kultur Semikontinu. Skripsi. Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.
- Shoiful, A., K.R. Almira, S. Hasiany, & D.R.K. Hartaja. 2023. Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment Using a Combined Anaerobic-Microalgae Down-Flow Hanging Sponge (DHS) Reactor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1201 (1): 012018.
- Simatupang, D., F. Restuhadi, & T. Dahril. 2017. Pemanfaatan Simbiosis Mikroalga *Chlorella* sp. dan EM4 untuk Menurunkan Kadar Polutan Limbah Cair Sagu. *Jom FAPERTA*. 4 (1): 1-13.
- Udaiyappana, A.F.M., H.A. Hasan, M.S. Takriff, S.R.S Abdullah, T. Maeda, N.A. Mustapha, N.H.M. Yasin, N.I.N.M. Hakimi. 2020. Microalgae-Bacteria Interaction in Palm Oil Mill Effluent Treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 35, 10120.
- Wais, M.N., S. Zulkifly, M.H. Ibrahim, A. Mohamed, and Z.R.Z Rudin. 2024. Evaluation of Microalgae *Chlorella vulgaris* and *Tetrademus bernardii* for Cultivation and Nutrient Removal in Palm Oil Mill Effluent. *Pertanika J. Sci. & Technol*. 32 (3): 1161-1185.
- Willaert, R. 2018. Cell Immobilization and Its Applications in Biotechnology: Current Trends and Future Prospects. In *Fermentation Microbiology and Biotechnology*, Third Edition. 313-367. CRC Press: Boca Raton.