

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Peran strategis dalam perekonomian di Indonesia adalah industri kelapa sawit diproyeksikan terus meningkat Produksi minyak sawit pada tahun 2026 (49,8 juta ton), *Crude Palm Oil* (CPO) meningkat 26% sekitar 13,6 juta ton. Kenaikan pertumbuhan industri minyak sawit sekitar 4-5% dari tahun sebelumnya (Gapki 2026). Namun produksi ini linear dengan peningkatan limbah kelapa sawit. Potensi limbah kelapa sawit yang sangat besar ini dapat memberikan nilai tambah pada industri sawit nusantara jika dimanfaatkan dengan baik (Dirgantoro & Adawiyah, 2018). Limbah Kelapa Sawit dapat berupa limbah padat, limbah cair dan limbah gas (Haryanti et al, 2014; Susanto et al., 2017; Dewi et al., 2022). Adapun limbah pabrik yang dihasilkan dari sisa proses pengolahan dari tandan buah segar. Dua jenis limbah yaitu limbah cair dan limbah padat. (Salema et al., 2017; Hayati et al., 2020; Apriyanto, 2020)

Limbah cair kelapa sawit atau yang dikenal dengan *Palm Oil Mill Effluent* (POME) sebagian besar terdiri dari air, minyak, dan residu biomassa. Bahan organik yang terkandung dalam limbah tersebut kaya akan nutrisi sehingga dapat digunakan untuk tanaman pertanian. Kadar *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD) maupun *Total Suspended Solid* (TSS) yang tinggi pada limbah POME dapat mencemari lingkungan. Kandungan nutrisi dari

limbah POME antara lain: karbon organik, nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), dan magnesium (Mg) yang penting untuk pertumbuhan tanaman. Kandungan nutrisi N dan P tinggi dapat memicu eutrofikasi di perairan, oleh karena itu kandungan ini dapat dimanfaatkan sebagai pupuk. Selain itu, POME mengandung sejumlah mikronutrien lain seperti Ca, Zn, Fe, Cu, Cd, Cr serta lipid, serat, dan karbohidrat.

Sistem pengolahan limbah industri minyak kelapa sawit secara konvensional banyak diterapkan saat ini mayoritas menggunakan kolam anaerobik (Komala & Aziz, 2019). Sistem ini relatif sederhana dan biaya operasional rendah. Sistem pengolahan tersebut terdiri dari proses pendinginan, pengolahan di dalam kolam anaerobik, pengolahan secara aerobik dan pengendapan/stabilisasi (Maulinda, 2017; Cheng et al., 2021). Namun, metode eksisting ini mempunyai beberapa kelemahan diantaranya *Hydraulic Retention Time* (HRT) yang sangat lama, menimbulkan masalah bau dan kontaminasi air tanah di daerah sekitar kolam, memiliki hasil samping gas metana yang beracun, memerlukan pemeliharaan secara periodik.

Sistem konvensional ini tidak berkontribusi dalam penyerapan emisi karbon (Oktari, 2019). Hal ini bertentangan dengan peraturan perundang-undangan di Indonesia. Beberapa peraturan perundang-undangan yang relevan yang mengatur tentang pengendalian dampak perubahan iklim di Indonesia meliputi: Undang-Undang No 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. *Pedoman ini mengatur prosedur dan pedoman pelaporan inventarisasi*

emisi dan penyerapan gas rumah kaca, yang diperlukan untuk pemantauan dan pelaporan dampak perubahan iklim.

Berdasarkan observasi awal, limbah POME di PT X Y Z memiliki kolam penampungan limbah yang cukup banyak hingga kolam ke 17. Sistem pengolahan ini sudah tidak efektif dan menghabiskan lahan secara masif. Apabila tidak ada teknologi yang lebih cepat maka perusahaan akan mengalami kendala penyediaan lahan dan resiko kegagalan pengolahan limbah sesuai standar baku mutu air limbah. Sampel yang akan digunakan dalam penelitian ini diambil dari limbah POME pada kolam 13. Hal ini disebabkan karena kolam ke 13 ini termasuk kolam sedimen yang memiliki kandungan COD dan BOD tinggi dibandingkan dengan kolam 15-17 meskipun sama-sama termasuk kedalam kolam sedimen. Selain itu kolam sedimen digunakan untuk mengendapkan partikel fisik dan prosesnya tidak melibatkan mikroorganisme anaerobik dalam fermentasinya. Adapun gambaran umum IPAL di PT X Y Z Kabupaten Luwu Timur, Sulawesi Selatan dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1. 1- IPAL di PT X Y Z

Pada gambar 1 nampak kolam penampungan limbah sudah memenuhi lahan, sehingga semakin hari lahan yang dibutuhkan untuk membuat kolam penampungan limbah juga akan semakin banyak. Penanganan limbah harus serius agar limbah setelah diolah tidak mencemari lingkungan sekitar. Kolam penampungan limbah saat ini sebenarnya sudah sesuai dengan standar baku mutu air limbah dengan pH 8-9 namun kandungan polutan masih tinggi, warna dan bau masih menjadi masalah untuk melepas air limbah ke aliran sungai. Keluhan masyarakat dan potensi sanksi lingkungan menjadi alasan diperlukan proses pengolahan air limbah yang biayanya hemat, pengolahan tidak rumit dan praktis, serta tidak menimbulkan dampak negatif bagi ekosistem air. Tindakan sebelumnya dalam pengolahan limbah cair kelapa sawit adalah remediasi menggunakan *Spirulina sp.* dan penambahan bakteri yang belum maksimal pada kolam 17 sehingga masih menimbulkan masalah sampai saat ini.

Salah satu hal yang dapat dilakukan dalam menangani masalah air limbah kelapa sawit perlu adanya kerjasama antara industri dengan peneliti sehingga harapan agar limbah dapat dibuang sesuai standar baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah sekaligus keadaan lingkungan sekitar industri juga tidak terganggu baik udara, air maupun tanah. Salah satu metode pengolahan POME yang mendapat perhatian dalam beberapa tahun terakhir ini adalah penggunaan mikroalga (fikoremediasi). Beberapa penelitian terbaru, menyoroti berbagai metode dalam meningkatkan biomassa mikroalga. Budidaya mikroalga tentunya memerlukan nutrisi dalam kultivasi. Nutrisi dari mikroalga dapat diperoleh dari limbah organik yang berasal dari aktivitas industri pertanian, perkebunan, peternakan, dan

sebagainya. Optimalisasi nutrisi menggunakan POME terhadap mikroalga secara signifikan 1 : 4 dapat menurunkan kadar BOD dan COD (Baihaqi & Pratama 2023;, Yonas et al., 2022)

Penggunaan mikroalga menawarkan potensi yang unggul untuk menghasilkan biomassa dari kandungan organik dan nutrisi dari POME serta menghasilkan bioenergi (Mohd et al., 2024). Mikroalga merupakan salah satu biomassa yang dapat dijadikan sebagai bahan baku energi terbarukan seperti biodiesel, biofuel, bioethanol (Gultom, 2018). Jenis *Cyanobacteria*/alga hijau biru yang mudah dikembangbiakkan karena reproduksinya mudah dan memiliki produktivitas yang tinggi (Hindarti & Ayuningtyas, 2020). Selain itu, teknologi ini selaras dengan beberapa Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), termasuk SDG 6 (Air Bersih dan Sanitasi), SDG 7 (Energi Terjangkau dan Bersih), SDG 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur), dan SDG 13 (Aksi Iklim). Oleh karenanya, diperlukan sistem pengolahan air limbah pabrik minyak kelapa sawit dengan metode pengolahan biologis berbasis mikroalga.

Pengolahan limbah cair bertujuan untuk menurunkan kadar pencemar agar mencapai baku mutu dan meminimalkan dampak lingkungan secara berkelanjutan. Keuntungan paling signifikan dari pengolahan biologi dibandingkan metode kimia atau fisik karena ramah lingkungan dan biaya lebih murah. Pengolahan biologis adalah proses pembersihan lingkungan dari bahan pencemar secara biologi dengan memanfaatkan organisme, baik secara insitu maupun eksitu (Hussain et al., 2022). Pengolahan biologis memiliki kelebihan dibandingkan dengan teknologi pengolahan lainnya antara lain : (1) mendegradasi atau menghilangkan unsur-unsur

berbahaya dari media yang tercemar dibandingkan hanya memindahkannya, (2) metode ini tidak menimbulkan gangguan dibandingkan beberapa metode yang dilakukan berbasis penggalian terhadap lingkungan, dan (3) pengolahan lokasi limbah berbahaya dapat jauh lebih murah dibandingkan metode konvensional (Azubuike et al., 2016).

Adapun metode pengolahan biologis antara lain seperti (a) Fitoremediasi: remediasi menggunakan tanaman untuk menghilangkan kontaminan dari tanah dan air tanah; (b) Mikoremediasi: remediasi menggunakan jamur busuk putih dan jamur lainnya untuk mengurangi kontaminan; (c) Fikoremediasi: mikroalga dan makroalga digunakan untuk remediasi polutan (Khuzaimah & Astuti, 2023; PHang et al., 2015).

Salah satu kelebihan dari fikoremediasi adalah kemampuannya dalam menyerap dan mengakumulasi berbagai polutan seperti logam berat, nitrogen, fosfor ataupun zat organik yang terdapat didalam air limbah. Mikroalga memiliki kemampuan alami dalam menyerap nutrisi untuk pertumbuhannya sehingga secara simultan mampu membersihkan air dan mengurangi dampak negatif polutan terhadap lingkungan. Metode ini tidak memerlukan penggunaan kimia tambahan yang mengakibatkan dampak buruk terhadap ekosistem. Metode fikoremediasi juga memiliki keuntungan dari sisi biaya dan keberlanjutan karena tidak memerlukan peralatan yang rumit atau intensif. Mikroalga mampu tumbuh dengan cepat dan mudah beradaptasi pada kondisi yang sesuai dan produk biomassa mikroalga dapat digunakan kembali misalnya sebagai pakan ternak ataupun pupuk.

Beberapa spesies mikroalga yang telah banyak diteliti untuk bioremediasi adalah *Spirulina platensis*, *Chlorella sp* (Muria et al., 2020, Elystia et al, 2022), *Tetraselmis chuii* (Govindan,et al., 2022), *Nannochloropsis oculata* (Emparan et al., 2020), *Dunaliella salina* dan sebagainya. Pemanfaatan mikroalga pada salah satu kolam biologi di Instalasi Pengolah Air Limbah (IPAL) dapat terjadi penurunan parameter BOD, COD, TSS. Jenis mikroalga hijau mudah dikembangbiakkan karena reproduksinya mudah dan memiliki produktifitas yang tinggi (Hindarti & Ayuningtyas, 2020). Salah satu mikroalga hijau yang berpotensi dalam remediasi limbah cair kelapa sawit adalah *Tetraselmis chuii*, *Nannochloropsis oculata*, *Chlorella vulgaris*.

Tetraselmis chuii memiliki potensi dalam remediasi air limbah dan produksi biomassa. Govindan et al. (2022) menyatakan bahwa *Tetraselmis sp.* mencapai pertumbuhan optimal pada konsentrasi 10% dalam limbah POME. Kadar BOD dan COD juga menunjukkan pengaruh yang signifikan pada *Tetraselmis sp* yakni mengalami penurunan sebesar 27 mg/L dan kadar COD sebesar 178 mg/L. Selain itu, *Tetraselmis sp.* juga efektif dalam menghilangkan nitrogen hingga 95,5% dan 94,4% fosfat (Alva & Pabello, 2021). Kandungan lipid 37 % dalam biomassa yang dihasilkan oleh *Tetraselmis sp* dapat dimanfaatkan sebagai alternatif produksi biofuel (Govindan et al., 2022)] serta berpotensi untuk pakan akuakultur (Villar-Navarro, 2022).

Adapun mikroalga hijau lain yang dapat digunakan dalam remediasi limbah POME adalah *Nannochloropsis oculata*. *Nannochloropsis oculata* secara efektif menurunkan kadar COD dalam limbah POME hingga 71% ketika

diimobilisasi dalam manik-manik natrium alginat (Emparan et al., 2020). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pertumbuhan *Nannochloropsis oculata* spesifik nilai *Optical Density* (OD) maksimum 0,390 A dengan kadar lipid 61,60% didalam media limbah POME 60% (Resdi et al., 2021). Selain itu, *Nannochloropsis oculata* saat imobilisasi dengan *Bacillus polymyxa* berperan signifikan dalam menghilangkan amonium 59,85% dan fosfat 90,44% (Wang et al., 2019).

Pengolahan limbah POME dapat juga menggunakan mikroalga hijau lainnya misalnya *Chlorella vulgaris*. Efisiensi dekomposisi COD mencapai 93,75% pada *Chlorella vulgaris* dalam pengolahan limbah POME (Sidabutar et al., 2024). Mikroalga ini juga menunjukkan efisiensi tinggi dalam menurunkan kadar nitrogen dan fosfor hingga mencapai 100% pada kondisi tertentu (Kong et al., 2023). Kemampuan mikroalga dalam menurunkan atau menyerap kadar CO₂ dalam pengolahan limbah POME ini sangat penting dalam industri pabrik kelapa sawit (Kong et al., 2023).

Pemanfaatan mikroalga hijau secara monokultur dalam pengolahan limbah cair telah banyak diteliti, namun sistem monokultur memiliki beberapa keterbatasan misalnya peka terhadap perubahan lingkungan, kompetisi nutrien yang tidak seimbang beresiko kontaminasi mikroorganisme lain. Oleh karena itu, penggunaan konsorsium mikroalga mulai dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah dan sistem yang stabil dengan interaksi kooperatif antar spesies. Konsorsium mikroalga adalah kumpulan berbagai jenis mikroalga yang hidup dan bekerja sama dalam satu ekosistem atau lingkungan tertentu.

Konsorsium mikroalga terdiri dari beberapa spesies mikroalga yang berbeda dengan sifat dan fungsi yang saling melengkapi. Setiap spesies mikroalga dalam sistem ini memiliki peran tertentu, seperti menghasilkan oksigen, menyerap nutrisi, atau menguraikan bahan organik. Tujuan utama dari konsorsium mikroalga adalah meningkatkan efisiensi proses biologis yang lebih kompleks dibandingkan dengan menggunakan satu spesies mikroalga saja. Menurut Rashid et al. (2019) menyatakan bahwa monokultur (mikroalga tunggal) memiliki pertumbuhan dan biomassa yang lebih rendah dibandingkan dengan konsorsium mikroalga.

Budidaya dua mikroalga berinteraksi secara kompetitif atau kooperatif. Apabila kedua mikroalga tersebut berinteraksi kompetitif, satu spesies mengungguli spesies lainnya dan mengganggu kestabilan hubungan simbiosis sehingga menghasilkan produktivitas metabolit yang rendah. Sebaliknya, dalam interaksi kooperatif, spesies mengembangkan sinergisme untuk saling mendukung dan mengatur produktivitas metabolit yang tinggi (Rashid et al., 2019). Selain itu, kadar COD pada air limbah berkurang seiring dengan adanya aktivitas mikroalga yang menghasilkan oksigen dari proses fotosintesis (Hadiyanto, 2012). Adapun kelebihan dari konsorsium adalah memungkinkan peningkatan kemampuan dalam menyerap dan mengolah nutrisi yang terdapat dalam limbah, setiap spesies mikroalga dalam konsorsium memiliki fungsi spesifik yang saling mendukung, adanya interaksi antara spesies dapat saling mendukung pada kondisi yang kurang menguntungkan, produktivitas biomassa cenderung lebih tinggi (Mandal & Corcoran, 2022). Kehadiran beberapa spesies dapat menyangga stres, meningkatkan stabilitas dalam produksi biomassa (Kong et al., 2024).

Selain itu, sebagian besar penelitian remediasi menggunakan mikroalga masih terkendala pada skala laboratorium yang sulit diterapkan secara industri. Oleh karena itu pengujian konsorsium mikroalga dalam sistem *Open Raceway Pond* (ORP) yang lebih mirip dengan operasional pabrik perlu diteliti. ORP dipilih karena biaya operasional lebih hemat dan praktis dibandingkan dengan reaktor tertutup sesuai kebutuhan industri. Sistem ORP yang efisien menjadi solusi agar PT X Y Z tidak perlu menambah kolam penampungan yang membutuhkan lahan luar. Penggunaan sistem ORP tidak hanya mampu menurunkan COD dan BOD namun juga mampu menjadi gap penelitian terkait optimalisasi penyerapan karbon dalam proses pengolahan limbah cair kelapa sawit. Penghitungan serapan karbon dalam remediasi POME secara bersamaan juga merupakan upaya mitigasi perubahan iklim.

Implementasi sistem ORP dalam remediasi limbah cair kelapa sawit menggunakan konsorsium mikroalga menawarkan solusi inovatif. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk mengevaluasi kinerja konsorsium mikroalga dalam sistem ORP sebagai strategi berkelanjutan yang selaras dengan tujuan pembangunan berkelanjutan dan sesuai standar regulasi perundang-undangan yang berlaku di Indonesia dengan tujuan penurunan emisi karbon nasional.

B. Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah yang dapat diambil adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana mengidentifikasi jenis konsorsium mikroalga yang paling cocok untuk mengolah limbah cair kelapa sawit?

2. Bagaimana karakteristik konsorsium mikroalga dalam pertumbuhan sel dan efisiensi penghilangan polutan?
3. Bagaimana kinerja konsorsium mikroalga pada *Open Raceway Pond* (ORP) dibandingkan dengan skala laboratorium ?
4. Bagaimana kontribusi konsorsium mikroalga terhadap mitigasi perubahan iklim melalui penyerapan karbon dalam pengolahan limbah cair kelapa sawit?

C. Tujuan

1. Tujuan Umum

Tujuan umum dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas pengolahan limbah cair kelapa sawit dan penyerapan karbon menggunakan konsorsium mikroalga.

2. Tujuan Khusus

- a. Mengidentifikasi jenis konsorsium mikroalga yang digunakan untuk pengolahan limbah cair kelapa sawit.
- b. Menganalisis karakteristik konsorsium mikroalga dalam pertumbuhan sel dan efisiensi penghilangan polutan.
- c. Mengevaluasi kinerja konsorsium mikroalga dalam sistem *Open Raceway Pond* (ORP) dibandingkan skala laboratorium.
- d. Mengkuantifikasi kontribusi konsorsium mikroalga terhadap mitigasi perubahan iklim melalui penyerapan karbon dalam pengolahan limbah cair kelapa sawit.

D. Manfaat

1. Manfaat Ilmiah

Manfaat ilmiah dalam penelitian ini adalah adanya perkembangan ilmu pengetahuan tentang pengolahan biologis dan serapan karbon menggunakan konsorsium mikroalga pada pengolahan limbah cair kelapa sawit melalui publikasi ilmiah dalam bentuk jurnal, HKI dan prosiding.

2. Manfaat bagi Institusi

Manfaat untuk pemerintah dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam penanganan limbah cair di industri kelapa sawit yang ada di Indonesia. Selain itu, untuk memberikan pertimbangan dalam menanggulangi dampak negatif dari perubahan iklim di Indonesia.

3. Manfaat bagi praktisi/industri

Manfaat bagi praktisi/industri dapat menjadi solusi dalam mengelola limbah cair kelapa sawit dengan baik dan tidak mencemari air di lingkungan sekitar area industri.

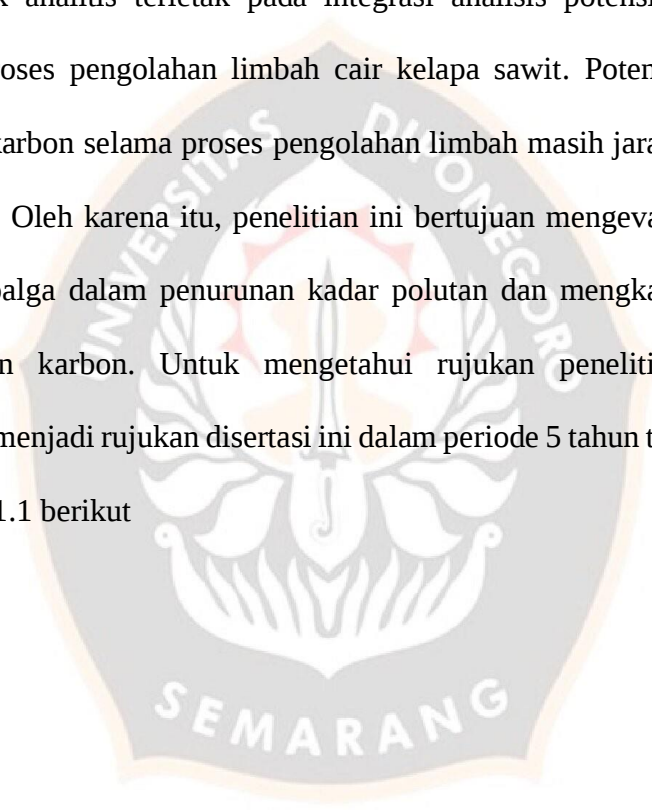
E. Orisinalitas

Penelitian disertasi yang berjudul Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit Menggunakan Konsorsium Mikroalga dan Kontribusinya Dalam Mitigasi Perubahan Iklim” memiliki kebaruan ilmiah yang terdiri atas tiga aspek yakni aspek konseptual, metodologis dan analitis. Aspek konseptual dalam penelitian ini mengembangkan pendekatan pengolahan biologis menggunakan konsorsium mikroalga. Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penyerapan nutrien dan degradasi senyawa organik dibandingkan dengan monokultur.

Penelitian sebelumnya menunjukkan ada berbagai jenis mikroalga yang telah diteliti. Konsorsium antara mikroalga masih sedikit dalam mengolah limbah cair kelapa sawit seperti pada penelitian Liyana et al. (2023) yang meneliti *Chlorella sp* dengan *Scenedesmus sp*. selain itu konsorsium antara mikroalga dengan mikroorganisme lainnya seperti bakteri juga telah diteliti sebelumnya contohnya *Anabaena* dan *Nannochloropsis* serta *Spirulina*, konsorsium Bakteri alkali dengan *Scenedesmus sp* dapat mengetahui kinerja fotosintesis dan serapan karbon dengan variabel sumber nitrogen yang berbeda (Nath et al., 2019; Ruiz-Ruiz et al., 2024). Penggunaan konsorsium mikroalga memiliki potensi dalam mengolah limbah cair kelapa sawit. Pendekatan konsorsium mikroalga memungkinkan interaksi sinergis antarspesies mikroalga untuk meningkatkan stabilitas sistem dan produktivitas biomassa selama proses remediasi limbah.

Kebaruan ilmiah berdasarkan aspek metodologis terletak pada penerapan fotobioreaktor *Open Raceway Pond* (ORP) sistem *batch* dalam proses kultivasi konsorsium mikroalga untuk remediasi POME. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa efisiensi dekomposisi COD dapat mencapai 900 mg/L yang menggunakan ORP *fed-batch system* dalam penelitian tersebut (Sidabutar, 2024). Kadar COD ini masih tinggi dari standar baku mutu yang ditetapkan pemerintah. Oleh karena itu, perlu adanya penelitian lebih lanjut tentang fotobioreaktor *Open Raceway Pond* (ORP) sebagai simulasi yang mirip di lapangan dan tanpa penambahan limbah secara kontinyu. Pendekatan ini diharapkan lebih komprehensif mengenai dinamika pertumbuhan mikroalga selama proses pengolahan limbah.

Penelitian sebelumnya menjelaskan tentang fotobioreaktor ORP yang digunakan dalam remediasi limbah cair industri biaya produksi dan cara operasionalnya lebih mudah. Fotobioreaktor yang digunakan dapat disimulasikan dalam penelitian ini untuk menganalisis efisiensi konsorsium mikroalga dalam menyerap karbon dan mengolah limbah cair kelapa sawit. Kebaruan ilmiah berdasarkan aspek analitis terletak pada integrasi analisis potensi penyerapan karbon dengan proses pengolahan limbah cair kelapa sawit. Potensi mikroalga dalam menyerap karbon selama proses pengolahan limbah masih jarang dianalisis secara bersamaan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja konsorsium mikroalga dalam penurunan kadar polutan dan mengkaji kontribusi dalam penyerapan karbon. Untuk mengetahui rujukan penelitian-penelitian sebelumnya yang menjadi rujukan disertasi ini dalam periode 5 tahun terakhir dapat dilihat pada tabel 1.1 berikut



SEKOLAH PASCASARJANA

Tabel 1. 1 Rujukan Penelitian 5 Tahun Terakhir

No.	Judul, Nama Peneliti dan Jurnal	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1	Judul: Comparative studies on phycoremediation efficiency of different water samples by microalgae. Peneliti: Shaidatul Liyana Abdul Talib, Nazlina Haiza Mohd Yasin, Mohd Sobri Takriff, Azima Syafaini Japar. Jurnal : <i>Journal of Water Process Engineering</i> 52 (2023)	Untuk mengidentifikasi mikroalga terbaik pada fikoremediasi di berbagai sumber air (limbah POME, limbah air perkotaan dan limbah air tercemar	Perlakuan menggunakan inokulum 30% (v/v) <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorella</i> sp, <i>Scenedesmus</i> sp yang diberikan kedalam berbagai sumber air (limbah POME, limbah air perkotaan dan limbah air tercemar. Pengukuran dilakukan setiap 2 hari sekali berat kering sel. Parameter yang diukur COD, pH, turbiditas, TSS, Total nitrogen, total fosfor.	Limbah POME yang memiliki kandungan nutrisi paling tinggi dibandingkan limbah lainnya yang cocok untuk pertumbuhan mikroalga. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Menggunakan konsorsium mikroalga dalam remediasi limbah POME
2	Judul: Evaluation of carbon capture in competent microalgal consortium for enhanced	Untuk mengevaluasi efisiensi konsorsium mikroalga dalam mengakumulasi lipid,	Pengukuran densitas sel menggunakan spektrofotometer UV-Vis, analisis fotofiksasi karbon	Serapan karbon sebanyak 10% pada pH 8 meningkatkan pertumbuhan, biomassa, karbohidrat, lipid pada konsorsium

	biomass, lipid, and carbohydrate production. Peneliti: Adi Nath, Pravin K. Tiwari, Awadhesh K. Rai, Shanthi Sundaram. Jurnal : Journal Biotech (2019) 9:379	protein maupun biomassa. Selain itu untuk menganalisis kinerja pertumbuhan, fotosintesis dan penyerapan karbon	diukur menggunakan Pulse Amplitude Modulation (PAM) Fluorometer (foton System Instrument, Pvt. Ltd., Czech Republic) Fiksasi karbon diukur menggunakan CO ₂ meter digital. Untuk menghitung pertumbuhan, karbohidrat dan fiksasi karbon menggunakan Response Surface Methodology (RSM)	MC8 (<i>Anabaena cylindrica</i> , <i>Lyngbya</i> sp., <i>Scenedesmus dimorphus</i> , <i>Spirulina platensis</i> , <i>Synechocystis</i> PCC6803, <i>Nannochloropsis</i> sp. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Menggunakan kombinasi 2-3 mikroalga (<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Tetraselmis chuii</i> , dan <i>Nannochloropsis oculata</i>) dengan nutrisi dari limbah POME untuk mengetahui kinerja serapan karbon dari konsorsium mikroalga.
3	Judul: Innovative membrane photobioreactor for sustainable CO ₂ capture and utilization. Peneliti: Senatore, V., Buonerba, A., Zarra, T., Oliva, G., Belgiorio, V., Boguniewicz-Zablocka, J. and Naddeo, V. Jurnal : Journal Chemosphere, 273, p.129682. 2021.	Untuk menguji membran fotobioreaktor dalam meningkatkan serapan CO ₂ dari air limbah IPAL, TPS, serta untuk memproduksi biomassa alga.	Efisiensi penghilangan CO ₂ (RE) ditentukan dengan mengukur konsentrasi CO ₂ baik dalam aliran gas influen maupun limbah, menggunakan alat pengukur CO ₂ digital GA2000 dari instrumen Geoteknik. Volume konsentrasi masuk CO ₂ pada 5, 10 dan 15 v%. Media kultur yang digunakan adalah mBBM dengan pH akhir nilai sekitar	Potensi membran fotobioreaktor merupakan alat yang efektif untuk menangkap CO ₂ dan filtrasi SFDM (Self Forming Dinamic Membran) bentuk persegi panjang pada area penyaringan sebesar 0.02 m ² adalah alat pemanenan biomassa yang simultan, lebih murah dibanding teknik mikrofiltrasi, dan ultrafiltrasi. Penelitian sekarang : Teknologi yang digunakan menggunakan fotobioreaktor.

			7. Konsentrasi CO₂ (Periode permulaan). Sistem telah diinokulasi dengan mikroalga <i>Chlorella vulgaris</i> pada DW awal 0,05 g L⁻¹ dan dioperasikan dalam mode batch selama 5 hari hingga konsentrasi 0,10 g L⁻¹. Sistem kemudian dioperasikan dalam mode semi-kontinyu selama 38 hari. Aliran gas CO₂ diumpankan selama 8 jam selama penerangan periode ke dalam AC dengan laju alir 100 mL min⁻¹. Kelebihan gas, terakumulasi, kemudian disalurkan ke fotobioreaktor dari bawah. Selanjutnya masuk CO₂ konsentrasi ditetapkan pada 15 v%. Pada Tahap III dan IV membran ditempatkan di MPBR dan resirkulasi kaldu cair dilakukan meningkat dari 1000 mL min⁻¹ (rasio L/G ¼ 10) menjadi 1500 mL min⁻¹ (Rasio L/G	
--	--	--	---	--

			¼ 15). Laju aliran permeat (Q_{per}) ditetapkan pada 28,8 mL menit⁻¹. Pembaharuan menengah (MR) ditingkatkan secara bertahap dari 200 mL menjadi 1000 mL per hari, sebagai fungsi peningkatan konsumsi nutrisi oleh mikroalga dan volumenya meresap dikeluarkan dari fotobioreaktor.	
4	Judul : Current perspective on wastewater treatment using photobioreactor for Tetraselmis sp.: an emerging and foreseeable sustainable approach. Peneliti: Goswami, R.K., Agrawal, K., Mehariya, S. and Verma, P. Jurnal : Journal Environmental Science and Pollution Research,	Untuk menganalisis morfologi dan biokimia dari Tetraselmis sp, produktivitasnya yang dipengaruhi oleh kondisi fisiologi, nutrisi, interaksi mikroba, toksisitas logam berat serta efektivitas kinerja fotobioreaktor (PBR) dalam kultivasi mikroalga	Tipe fotobioreaktor (PBR) yang di review dalam kultivasi mikroalga pada limbah cair yakni PBR-tubuler, PBR Vertical tube, reaktor heliks dan PBR bak distirrer. Modifikasi PBR menggunakan polybag, tangki plastik transparan, airbag	Optimalisasi menggunakan PBR meningkatkan produksi biomassa Tetraselmis sp dan penghilangan nutrient yang diambil dari air limbah mencapai 90%. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Penggunaan konsorsium mikroalga. Modifikasi PBR lebih ekonomis menggunakan paddle wheel dan aerator pada skala prototype 3 liter dan wavemaker pada skala 200 liter.

	29(41), pp.61905-61937.2022			Nutrisi mikroalga diambil dari limbah POME.
5	Judul : Diluted methane mitigation by a co-culture of alkaliphilic methanotrophs and the microalgae <i>Scenedesmus obtusiusculus</i> towards carbon neutrality. Peneliti : Ruiz-Ruiz, P., Gómez-Borraz, T.L., Saldivar, A., Hernández, S., Morales-Ibarria, M. and Revah, S. Jurnal : Engineering Journal, 203, p.109211. 2024.	Untuk merancang konsumsi metana dan CO₂ melalui konsorsium bakteri metanotrofik alkalifilik dan <i>Scenedesmus</i> sp. Untuk mengevaluasi tangkapan CH₄ dan produksi CO₂ menggunakan ko-kultur pada fotobioreaktor. Untuk mengetahui dampak sumber nitrogen pada tingkatan konsumsi CH₄.	Tingkat konsumsi metana dan CO₂ dengan meningkatkan pH fotonik 9,1 ± 0,5 dengan tingkat konsumsi 196 mg CH₄ g biomassa. Menggunakan kromatografi gas dalam mengevaluasi tangkapan CH₄ dan produksi CO₂ menggunakan ko-kultur pada fotobioreaktor. Menggunakan sumber nitrogen yang berbeda NaNO₃, CO(NH₂)₂, NH₄Cl untuk mengetahui tingkat konsumsi metana.	Ko-kultur bakteri dan mikroalga menunjukkan konsumsi metana dan CO₂ yang efisien dengan periode yang lama. Keberadaan nitrat dan kontrol pH sangat mempengaruhi serapan metana dan CO₂. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Tidak menggunakan sumber nitrogen yang berbeda melainkan menggunakan limbah POME.
6	Judul : CO₂ capture and lipid production performance of microalgae in the S-shaped photobioreactor under different culture	Untuk merancang PBR berbentuk S. Untuk menganalisis serapan karbon dan produksi lipid pada	Mengukur menggunakan spektrofotometer UV untuk pengukuran biomassa 680 nm. Menggunakan perangkat lunak origin 2020	Terjadi peningkatan transfer massa gas-cair, biomassa, produksi lipid dan serapan CO₂. Mode mixotrophic menunjukkan tingkat produksi lipid dan efisiensi serapan CO₂. PBR berbentuk S

	modes. Peneliti : Yang, H. and Xin, X. Jurnal : Journal Enzyme and Microbial Technology, 165, p.110194. 2023.	jenis kultur yang berbeda.	untuk mensimulasi pertumbuhan.	efisien dalam menyerap CO₂ dan produksi lipid. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : simulasi PBR bentuk kolam terbuka dengan penambahan paddle wheel dan aerator dalam skala prototype 3 liter dan wavemaker pada skala 200 liter pada konsorsium mikroalga
7	Judul : Boosting wastewater treatment and CO₂ bioremediation with Nile River microalgae: Resilience to simulated smoke and enhanced biomass production. Peneliti : Moghazy, R.M. and Abdalla, S.B.. Jurnal : Journal Bioresource Technology Reports, 25, p.101809. 2024.	Untuk mengevaluasi mikroalga untuk pengolahan air limbah dan efisiensi CO₂. Untuk menganalisis morfologi mikroalga menggunakan SEM.	Pengumpulan sampel air limbah dari pabrik pengolahan air limbah Zenin di Mesir. Karakterisasi morfologi mikroalga menggunakan SEM Sistem paparan asap skala lab untuk replikasi dampak asap antropogenik dan emisi CO₂ pada pertumbuhan mikroalga dengan pembakarnya menggunakan jerami padi dalam menghasilkan asap.	Peningkatan pertumbuhan alga sebesar 3093,2 µg/L dan konsentrasi klorofil 4157,4 µg/L. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Tidak menggunakan asap dari jerami padi. Hanya menghitung efisiensi karbon yang diserap oleh konsorsium mikroalga.
8	Judul : Influence of organic carbon source on	Untuk mengevaluasi pengaruh sumber	Sumber karbon organik berbeda : gliserin, sukrosa,	Sumber karbon organik secara signifikan mempengaruhi

	hydrogen production and nutrient removal by microbial consortium in anaerobic photobioreactors. Peneliti : Vargas, S.R., Macêdo, W.V., Trindade, L.F. and Zaiat, M. Jurnal : International Journal of Hydrogen Energy, 54, pp.1160-1168. 2024	karbon organik yang berbeda pada produksi hidrogen dan penghilangan nutrisi oleh konsorsium mikroba dalam fotobioreaktor anaerobik	glukosa, asam organik dan cairan kaya pentosa. Ini digunakan untuk produksi hidrogen dan penghilangan nutrisi melalui biofotolisis dan fotofermentasi dalam bioreaktor anaerobik batch. Strain Chlamydomonas menunjukkan produksi hidrogen bervariasi dan efisiensi penghilangan karbon organik tertinggi. Analisis fisikokimia menggunakan kromatografi gas dan kromatografi cair tekanan tinggi dan analisis tingkat kebutuhan nitrogen, fosfat dan oksigen menggunakan analisis kimia kjeldahl	produksi hidrogen dengan perlakuan Chlamydomonas sp dan CHLO₂ dari air limbah yang diperkaya sukrosa. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Tidak menggunakan konsorsium mikroba melainkan konsorsium mikroalga Artikel ini dapat menjadi rujukan untuk pembuatan bioreaktor.
9	Judul : A whole process study of dual microalgae cultivation coupled to domestic wastewater treatment and wheat growth. Peneliti : Wang, X., Wang, Q., Hong, Y.	Untuk menganalisis 2 mikroalga pada pengolahan air limbah dan gandum. Untuk menganalisis pertumbuhan, remediasi dan potensi	Pertumbuhan mikroalga dihitung dengan mikroskop (haemocytometer). Biomassa diperoleh dari mengukur berat kering. Kandungan lipid dan	Penggunaan 2 mikroalga menghasilkan biomassa yang tinggi dan tingkat remediasi juga tinggi. Kombinasi mikroalga meningkatkan pertumbuhan, penghilangan nutrisi dan akumulasi produk yang bernilai

	and Wang, Z. Jurnal : Environmental Research, p.119168. 2024	pupuk. Untuk mengetahui penyerapan nutrisi, produksi biomassa dan efek aerasi pada mikroalga.	polisakarida diukur dengan ekstraksi pelarut organik.	tinggi. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Mikroalga yang digunakan berbeda dan limbah yang digunakan juga berbeda. Namun artikel ini dapat digunakan untuk rujukan bahwa 2 mikroalga mampu meningkatkan biomassa dan remediasi yang efektif.
10	Judul: Biodesalination of saline aquaculture wastewater with simultaneous nutrient removal and biomass production using the microalgae Arthrospira and Dunaliella in a circular economy approach. Peneliti: Mirzaei, M., Jazini, M., Aminiershad, G. and Refardt, D. Jurnal: Desalination, 581, p.117564. 2024.	Untuk menganalisis biodesalinasi air limbah akuakultur menggunakan mikroalga. Untuk memahami dan menganalisis penghilangan nutrisi, produksi biomassa, dan efisiensi biodesalinasi dalam air limbah akuakultur.	Pengukuran desalinasi dilakukan menggunakan EC meter dan analisis ICP-OES. Analisis FTIR, FE-SEM dan EDS. untuk mengetahui biosorpsinya. Analisis statistik untuk mengukur pertumbuhan dan pengurangan EC.	Biodesalinasi air limbah menggunakan Arthrospira dan Dunaliella mampu menghilangkan nutrisi (remediasi). EC berkurang hingga 45% dengan Arthrospira dan Dunaliella. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Analisis juga akan mensitasi pada artikel ini namun penggunaan limbahnya berbeda dan mikroalga yang digunakan berbeda.
11	Judul : Treatment of effluent from the upflow	Untuk mengamati pertumbuhan	Pengukuran kepadatan sel dilakukan menggunakan alat	Pertumbuhan Chlorella vulgaris akibat aerasi dan pencahayaan

	anaerobic sludge blanket-hollow centered packed bed fermentor by utilizing <i>Chlorella vulgaris</i> in a fed-batch system. Peneliti : Sidabutar, R., Trisakti, B., Bani, O., Nasution, J.A., Khodijah, P., Alexander, V., Daimon, H. and Takriff, M.S. Jurnal : Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, p.100756.2024.	<i>Chlorella vulgaris</i> dan dekomposisi COD dalam pengolahan limbah. Untuk mengevaluasi kondisi dan parameter fed-batch pada efisiensi perlakuan.	spektrofotometer UV-VIS pada panjang gelombang 750 nm selain itu diukur juga berat keringnya. Kultivasi <i>Chlorella</i> terlebih dahulu dengan dibantu aerasi dan agitasi, kemudian dimasukkan kedalam fermentor dan masukkan limbah POME pada volume yang ditentukan dalam sistem tertutup, lama kelamaan volume akan bertambah.	yang baik. Efisiensi dekomposisi COD mencapai 900 mL. Tingkat agitasi yang optimal adalah 30 rpm untuk budidaya <i>Chlorella vulgaris</i>. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Menggunakan paddle wheel dan aerator pada skala prototype 3 liter dan wavemaker pada skala prototype 200 liter sebagai pengganti agitasi.
12	Judul: An Effective Two-Steps Polyacrylamide-Microalgae System for Flocculation and Bioremediation of Palm Oil Mill Effluent Peneliti: Muhammad Zakhiri Rusli, Azianabiha A. Halip Khalid*, Gong Tao Ding,	Untuk meningkatkan pertumbuhan dengan efisiensi bioremediasi. Untuk menganalisis pra-pengolahan PAM yang dikombinasikan dengan mikroalga. Untuk mengetahui optimalisasi dosis PAM dalam	Pra perlakuan menggunakan Poliakrilamida (PAM). Menganalisis tingkat signifikansi remediasi dari POME	Kekeruhan mencapai 46,5 % jika menggunakan pra-perlakuan PAM 24 ppm. Ketiga spesies mikroalga mampu mereduksi 95% NH₃-N secara efektif. Mikroalga mereduksi hingga 82,3% BOD, 56,7% COD dan 96,2% NH₃-N. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Tanpa menggunakan pre-perlakuan PAM.

	and Mohd Sobri Takriff Jurnal: International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 14, No. 2, April 2023	mengurangi kekeruhan limbah POME		
13	Judul: Immobilized <i>Nannochloropsis oculata</i> in a down-flow hanging sponge (DHS) reactor for the treatment of palm oil mill effluent (POME) Peneliti: Minturo, G.J., Noorain, R., Hitam, S.M.S., Shoiful, A., Azni, M.E., Ernawati, L., Abdullah, R. and Mohamad, R. Jurnal : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1017, No. 1, p. 012024. 2022	Untuk mengevaluasi <i>Nannochloropsis oculata</i> dalam reaktor DHS untuk pengolahan limbah POME. Mengukur kinerja mikroalga dalam remediasi limbah POME.	Reaktor seperti tabung diisi 25 spons poliuretan lalu direndam dalam larutan mikroalga <i>Nannochloropsis</i> . Limbah POME disuplai ke reaktor tersebut dilakukan melalui spons menggunakan pompa peristaltik. Limbah POME diberikan berbagai bahan kimia juga. Dilakukan dalam 2 fase.	Kadar COD 73%, amoniak 80% dan fosfat 83% tercapai pada fase 2. Penghilangan warna dapat dilakukan dalam 2 fase. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Menggunakan kombinasi mikroalga. Dapat digunakan rujukan untuk menghilangkan warna pada limbah POME, penurunan kadar polutan.
14	Judul : The effects of CO ₂ -induced	Untuk menganalisis kondisi kultur dalam	Mikroalga dikultur dengan PBR secara kontinyu,	Terjadi penurunan pH melalui pengasaman akibat karbon.

	acidification on Tetraselmis biomass production, photophysiology and antioxidant activity: A comparison using batch and continuous culture Peneliti: Coulombier, N., Blanchier, P., Le Dean, L., Barthelemy, V., Lebouvier, N. and Jauffrais, T Jurnal : Journal of Biotechnology, 325, pp.312-324. 2021.	aktivitas antioksidan, efek induksi CO₂ terhadap pertumbuhan Tetraselmis.	penambahan CO₂ secara otomatis dan suhu konstan	Aktivitas antioksidan tertinggi diukur dalam kultur kontinyu pada pH 6,5 dengan IC50 sebesar 3,44 ± 0,6 µg/mL. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Tidak mengukur antioksidan hanya serapan karbon dengan cara fotobioreaktor
15	Judul : Growth and Nitrate Uptake in <i>Nannochloropsis gaditana</i> and <i>Tetraselmis chuii</i> Culture Grown in Sequential Batch Reactors. Peneliti : Rafay, R., Uratani, J.M., Hernandez, H.H. and Rodríguez, J. Jurnal :	Untuk mengetahui laju pertumbuhan <i>Nannochloropsis</i> dan <i>Tetraselmis</i> yang tumbuh pada bak reaktor berurutan.	Mikroalga dikultur dalam bak fotobioreaktor secara berurutan. Biomassa di ukur menggunakan VSS dan spektrofotometer	Pertumbuhan pada kedua mikroalga meningkat secara spesifik yakni <i>Nannochloropsis</i> sebesar 0,23 ± 0,04 gVSS/gVSS dan <i>Tetraselmis</i> sebesar 0,22 ± 0,05 gVSS/gVSS. Jumlah kepadatan sel diukur pada 550nm. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sekarang : Menggunakan bioreaktor dan konsorsium mikroalga

	Frontiers in Marine Science, 7, p.77.			
--	---------------------------------------	--	--	--



SEKOLAH PASCASARJANA



SEKOLAH PASCASARJANA