

PEMANFAATAN KONSORSIUM MIKROBA LIPOLITIK LOKAL UNTUK OPTIMALISASI AKTIVITAS LIPASE DALAM BIOREMEDIASI LIMBAH MINYAK GORENG

Putri Athirah Azis^{1,2*}, Yusminah Hala¹

¹Pendidikan Biologi, Universitas Negeri Makassar
Jl. Bonto Langkasa Gunungsari Baru, Makassar 90222, Indonesia

²Pendidikan Biologi, Universitas Patempo
Jl. Inspeksi Kanal Citraland, Makassar 90233, Indonesia
e-mail: putriathirah1234@gmail.com

Abstrak

Limbah minyak goreng bekas (WCO/FOG) menimbulkan penyumbatan, peningkatan COD/BOD, dan biaya pengelolaan tinggi, sementara praktik bioremediasi kerap terhambat oleh matriks limbah yang kompleks dan kestabilan enzim yang rendah. Studi ini bertujuan mensintesis bukti tentang efektivitas konsorsium mikroba lipolitik lokal dalam mengoptimalkan aktivitas lipase dan meningkatkan kinerja bioremediasi WCO/FOG. Metode yang digunakan adalah *systematic literature review (SLR)* mengikuti PRISMA 2020 dengan penelusuran *Scopus*, *Web of Science*, *PubMed*, *Dimensions*, dan *Google Scholar*; skrining berpasangan; ekstraksi data terstruktur; penilaian kualitas (adaptasi JBI); serta sintesis naratif dan, bila homogenitas memadai, meta-analisis. Analisis juga mengevaluasi moderator: imobilisasi enzim, *directed evolution*, optimasi *multivariabel*, dan transfer massa (kLa/aerasi). Hasil menunjukkan mayoritas studi melaporkan peningkatan aktivitas lipase dan penurunan FOG/COD yang substansial, dengan kinerja konsisten lebih tinggi pada konsorsium lokal dibanding isolat tunggal. Imobilisasi meningkatkan stabilitas operasional dan siklus pemakaian, RSM memperjelas kondisi optimum dan ketidakpastian, dan peningkatan kLa berkorelasi positif dengan laju degradasi. Keterbatasan utama meliputi heterogenitas satuan/pelaporan dan minimnya analisis biaya/LCA, sementara bukti skala pilot mulai berkembang. Secara keseluruhan, sintesis ini menunjukkan bahwa integrasi konsorsium mikroba lipolitik lokal dengan strategi peningkatan aktivitas dan stabilitas lipase merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan kinerja dan keberlanjutan bioremediasi WCO/FOG.

Kata Kunci: Konsorsium mikroba lipolitik lokal; Lipase; Bioremediasi; Limbah minyak goreng.

Abstract

Waste cooking oil and fat-oil-grease (WCO/FOG) cause sewer blockages, elevated COD/BOD levels, and high treatment costs, while bioremediation practices are often constrained by the complex waste matrix and limited enzyme stability. This study aims to synthesize evidence on the effectiveness of local lipolytic microbial consortia in optimizing lipase activity and enhancing the bioremediation performance of WCO/FOG. A systematic literature review (SLR) was conducted following PRISMA 2020 guidelines, involving searches of *Scopus*, *Web of Science*, *PubMed*, *Dimensions*, and *Google Scholar*; dual screening; structured data extraction; quality appraisal using an adapted JBI framework; and narrative synthesis, with meta-analysis applied when data homogeneity permitted. The analysis also examined

key moderators, including enzyme immobilization, directed evolution, multivariable optimization, and mass transfer enhancement (kLa/aeration). The findings indicate that most studies report increased lipase activity accompanied by substantial reductions in FOG/COD, with consistently higher performance observed in local microbial consortia compared to single isolates. Enzyme immobilization improves operational stability and reusability, response surface methodology (RSM) clarifies optimal conditions and associated uncertainty, and enhanced kLa is positively correlated with degradation rates. Major limitations include heterogeneity in units and reporting practices, as well as the scarcity of cost and life cycle assessment (LCA) analyses, although pilot-scale evidence is increasingly emerging. Overall, this synthesis suggests that integrating local lipolytic microbial consortia with strategies to enhance lipase activity and stability represents a promising and sustainable approach for WCO/FOG bioremediation.

Keywords: *Local lipolytic microbial consortium; Lipase; Bioremediation; Waste cooking oil.*

1. PENDAHULUAN

Limbah minyak goreng bekas (waste cooking oil/WCO) dan akumulasi FOG (fat oil grease) masih menjadi tantangan utama pada sistem air limbah perkotaan dan ekosistem UMKM pangan karena meningkatkan COD/BOD, membentuk emulsi stabil, serta menurunkan efisiensi instalasi pengolahan (Williams et al., 2012; Yusuf et al., 2023). Pendekatan fisikokimia seperti koagulasi–flokulasi, saponifikasi, dan adsorpsi memang cepat, tetapi sering menghasilkan residu sekunder, membutuhkan bahan kimia tambahan, dan kurang ekonomis untuk skala kecil menengah (Williams et al., 2012). Bioremediasi hadir sebagai alternatif berkelanjutan dengan memanfaatkan kemampuan mikroorganisme dan enzimnya untuk mendegradasi trigliserida; di dalam mekanisme ini, lipase berperan sebagai katalis kunci yang menghidrolisis trigliserida menjadi asam lemak bebas dan gliserol sehingga lebih mudah diproses lanjut secara biologis (Kumar et al., 2012; Ortellado et al., 2025; Okino-Delgado & Prado, 2017).

Namun, heterogenitas komposisi WCO serta fluktuasi kondisi operasional membuat kinerja isolat tunggal penghasil lipase kerap tidak stabil ketika dipindahkan dari laboratorium ke lapangan (Mongkolthanaruk & Dharmsthiti, 2002). Dalam konteks tersebut, konsorsium mikroba lipolitik lokal menawarkan solusi yang lebih tangguh karena memanfaatkan pembagian kerja metabolik alami: anggota komunitas yang berbeda dapat memproduksi biosurfaktan untuk menurunkan tegangan antarmuka minyak–air, menghidrolisis trigliserida melalui berbagai lipase, dan

mengoksidasi asam lemak rantai panjang melalui jalur β -oksidasi (Mongkolthanaruk & Dharmsthiti, 2002; Lu et al., 2022). Keberadaan konsorsium yang berasal dari lingkungan setempat juga meningkatkan kecocokan ekologis terhadap suhu, pH, salinitas, serta kontaminan yang lazim pada WCO lokal; distribusi dan keragaman gen lipolitik sendiri sangat dipengaruhi faktor ekologi habitat (Lu et al., 2022; Araújo et al., 2020).

Kendati demikian, kapasitas lipolitik total sistem masih perlu dioptimalkan agar mencapai kinerja yang konsisten, dapat diulang, dan ekonomis pada skala operasional di sinilah integrasi bioteknologi modern, khususnya DNA rekombinan, menjadi rasional ilmiah yang kuat untuk meningkatkan aktivitas lipase tanpa kehilangan ketangguhan ekologi konsorsium indigen (Karbalaie et al., 2020; Yu et al., 2023). Kemajuan meta-omics memungkinkan penambangan gen lipase langsung dari metagenom komunitas lokal, termasuk mikroba non-kulturabel, untuk kemudian dikloning dan diekspresikan heterolog pada inang efisien sekresi seperti *Bacillus subtilis*, *Pichia pastoris*, atau *Yarrowia lipolytica* (Lu et al., 2022; Theron et al., 2020). Melalui rekayasa promotor, optimasi sinyal peptida, serta mutagenesis terarah/directed evolution, lipase hasil rekayasa dapat ditingkatkan stabilitas termal, toleransi pelarut, dan aktivitasnya pada pH-suhu yang relevan dengan matriks WCO (Guan et al., 2020; Ali et al., 2023).

Enzim yang diperkuat ini dapat digunakan sebagai enzim bebas/terimobilisasi atau diintegrasikan kembali ke dalam konsorsium sebagai anggota komunitas yang direkayasa, sehingga aktivitas lipase efektif sistem meningkat melalui sinergi "ekologi lokal $\times$ rekayasa enzim." Pendekatan ini dapat dipadukan dengan optimasi proses misalnya Response Surface Methodology (RSM) untuk menemukan kombinasi terbaik pH, temperatur, rasio nutrien, dan beban minyak (Nadaf et al., 2024; Ahmed et al., 2022; Lau et al., 2023) serta peningkatan transfer massa (misalnya melalui desain aerasi/pencampuran berbasis CFD untuk meningkatkan kLa) agar performa reaktor tetap tinggi dan stabil (Herrmann-Heber et al., 2020; Patziger et al., 2021). Di sisi lain,

imobilisasi lipase pada penyangga murah/berbasis biomassa (misalnya alginat/biochar/zeolit) terbukti meningkatkan stabilitas, kemudahan pemakaian ulang, dan ketahanan enzim pada kondisi proses (Ismail & Baek, 2020; Guimarães et al., 2023; Zhang et al., 2024).

Urgensi kajian ini bertumpu pada kebutuhan teknologi pengelolaan WCO yang ramah lingkungan, terjangkau, dan kompatibel dengan realitas UMKM serta IPAL kota-kota tropis. Di tingkat ilmiah, terdapat kesenjangan pengetahuan terkait bagaimana menggabungkan kekuatan konsorsium indigen dengan lipase rekombinan dan strategi rekayasa proses sehingga aktivitas lipase total sistem, penurunan FOG/COD, dan stabilitas siklus operasi dapat meningkat secara bermakna. Selain itu, literatur yang menghubungkan data omik dengan model kinetika komunitas–enzim dan validasi skala pilot pada aliran WCO nyata masih terbatas, padahal aspek tersebut krusial untuk translasi teknologi dari laboratorium ke praktik (Vafa et al., 2025; Devaraj et al., 2020).

Sejalan dengan itu, tujuan artikel ini adalah mensintesis bukti ilmiah terkini mengenai (i) ekologi dan komposisi konsorsium mikroba lipolitik lokal pada bioremediasi WCO, (ii) strategi peningkatan aktivitas lipase melalui DNA rekombinan/biologi sintetis dan pendekatan enzimatik-proses (termasuk imobilisasi multi-enzim), serta (iii) rekayasa proses yang mengefektifkan implementasi di lapangan (optimasi RSM, penguatan transfer massa, dan desain aerasi). Data diekstrak dan disintesis secara tematik—ekologi komunitas, rekayasa enzim, dan rekayasa proses—serta dipetakan gap risetnya. Secara ringkas, studi empiris terdahulu menunjukkan bahwa konsorsium cenderung lebih stabil dan adaptif dibanding isolat tunggal (Mongkolthanaruk & Dharmsthiti, 2002; Wu et al., 2023); lipase yang direkayasa atau diimobilisasi biasanya memiliki ketahanan dan aktivitas yang lebih baik (Ismail & Baek, 2020; Guimarães et al., 2023; Guan et al., 2020); dan optimasi statistik seperti RSM efektif untuk menaikkan kinerja proses (Nadaf et al., 2024; Ahmed et al., 2022; Lau et al., 2023).

2. METODE PENELITIAN

2.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dirancang sebagai systematic literature review (SLR) yang mengacu pada pedoman PRISMA 2020 (O'Dea et al., 2021; Page et al., 2021). Alur kerjanya meliputi: perumusan pertanyaan riset yang terfokus; penelusuran terstruktur pada basis data bereputasi; penyaringan berjenjang atas judul, abstrak, dan teks penuh; ekstraksi data dengan formulir baku; penilaian kualitas dan risiko bias; serta sintesis bukti melalui uraian naratif dan, bila kelayakan terpenuhi, meta-analisis kuantitatif. Pendekatan ini memastikan proses yang transparan, dapat direplikasi, dan meminimalkan bias seleksi.

Ruang lingkup kajian difokuskan pada studi bioremediasi limbah minyak goreng bekas (WCO) atau limbah kaya lipid/FOG yang memanfaatkan konsorsium mikroba lipolitik (indigen/lokal), termasuk kombinasi dengan lipase rekombinan atau pendekatan bioteknologi modern seperti metagenomik, ekspresi heterolog, directed evolution, dan imobilisasi enzim. Intervensi yang ditelaah mencakup penggunaan konsorsium dan/atau enzim untuk hidrolisis trigliserida dan/atau penurunan FOG/COD, termasuk optimasi proses (misalnya melalui RSM) serta rekayasa aerasi dan transfer massa. Bila tersedia, pembandingan mencakup isolat tunggal, enzim bebas tanpa optimasi, atau metode non-biologis.

Outcome primer meliputi aktivitas lipase (U/mL atau setara), persentase penurunan FOG/COD/minyak, dan stabilitas/kinerja berulang (siklus pemakaian). Outcome sekunder mencakup indikator transfer massa (mis. kLa), produksi biosurfaktan, perubahan komunitas mikroba (pendekatan omik), serta aspek biaya dan kemudahan implementasi.

2.2 Strategi Penelusuran dan Seleksi Studi

Penelusuran literatur dilakukan pada basis data Scopus, Web of Science, PubMed, Dimensions, dan Google Scholar dengan periode publikasi 2015-2025. Strategi penelusuran merujuk pada kombinasi kata kunci dan operator boolean sebagai berikut:

("waste cooking oil" OR wco OR "fat oil grease" OR fog) AND (bioremediat* OR biodegrad*) AND (lipase OR lipolytic) AND (consortium OR consortia OR "mixed culture" OR indigenous OR local) AND (metagenom* OR "recombinant dna" OR "heterologous expression" OR "directed evolution" OR immobiliz* OR "response surface methodology" OR rsm OR aeration OR cfd). Filter yang diterapkan mencakup jenis artikel penelitian (original/review), bahasa Inggris/Indonesia, dan bidang yang relevan (environmental, bioprocess, microbiology, biotechnology).

Manajemen referensi dan de-duplikasi dilakukan menggunakan Zotero/Mendeley, sedangkan proses skrining berpasangan difasilitasi oleh Rayyan atau Covidence untuk mendokumentasikan keputusan seleksi dan menghitung reliabilitas antar-penilai (Cohen's kappa). Kriteria inklusi meliputi studi yang (i) meneliti bioremediasi WCO/FOG atau limbah kaya lipid dengan konsorsium mikroba dan/atau lipase (alami, rekombinan, atau terimobilisasi); (ii) melaporkan outcome kuantitatif terkait aktivitas lipase atau penurunan FOG/COD/minyak; dan (iii) memiliki desain laboratorium, pilot, atau kasus lapangan dengan metode yang dilaporkan jelas. Kriteria eksklusi mencakup studi yang berfokus dominan pada sintesis biodiesel tanpa konteks remediasi WCO, kajian teoretis murni tanpa data eksperimen, duplikasi publikasi, atau artikel dengan data yang tidak dapat diekstraksi.

Prosedur seleksi studi dimulai dengan deduplikasi otomatis pada manajer referensi. Selanjutnya, dua penilai independen melakukan skrining judul dan abstrak; ketidaksepahaman diselesaikan melalui diskusi hingga mencapai konsensus. Artikel yang lolos diseleksi pada tahap baca teks penuh untuk penetapan kelayakan akhir. Jumlah rekaman pada setiap tahap dicatat dalam bagan PRISMA, dan reliabilitas antar-penilai diestimasi menggunakan Cohen's kappa dengan target $\geq 0,70$ sebagai ambang konsistensi yang memadai.

2.3. Ekstraksi Data dan Penilaian Kualitas

Ekstraksi data dilakukan dengan formulir baku yang memuat: identitas artikel (penulis, tahun, jurnal), jenis limbah (WCO/FOG), komposisi konsorsium

(genus/strain, sumber isolasi, status lokal/indigen), karakteristik enzim/lipase (alami/rekombinan, sistem ekspresi, strategi imobilisasi, dan kondisi uji), parameter proses (pH, temperatur, DO, aerasi, media, nutrien, penerapan RSM/optimalisasi), konfigurasi reaktor (batch, kontinu, packed-bed, pilot), outcome (aktivitas lipase; persentase penurunan minyak/FOG/COD; kLa; jumlah siklus ulang), serta catatan kualitas seperti keberadaan kontrol, tingkat replikasi, dan pelaporan ketidakpastian (SD/SE).

Penilaian kualitas dan risiko bias untuk studi eksperimental/proses menggunakan adaptasi JBI Critical Appraisal Checklist yang mencakup kejelasan tujuan, kesesuaian metode, kontrol, replikasi, validitas pengukuran, serta kelengkapan pelaporan data dan ketidakpastian (O'Dea et al., 2021). Setiap butir diberi skor (mis. 0-1) dan digolongkan menjadi kategori kualitas rendah, sedang, atau tinggi untuk keperluan analisis sensitivitas.

2.4. Sintesis Bukti

Teknik sintesis bukti diawali dengan sintesis naratif. Temuan dikelompokkan ke dalam tiga lensa: (A) ekologi konsorsium (peran biosurfaktan, hidrolisis, dan oksidasi), (B) rekayasa enzim (lipase rekombinan, directed evolution, imobilisasi), dan (C) rekayasa proses (RSM, aerasi/CFD, kLa). Hasil kemudian disajikan dalam matriks bukti (studi $\times$ organisme/proses/outcome) dan peta konsep relasi antartemuan. Bila data lintas studi sangat heterogen, dilakukan vote counting atas arah efek (positif/netral/negatif) sebagai indikasi kecenderungan.

Apabila data cukup homogen dan terstandar, dilakukan meta-analisis dengan model efek acak (REML). Ukuran efek untuk variabel kontinu (mis. aktivitas lipase, kinerja proses) menggunakan Hedges' g (SMD) atau Mean Difference bila satuan seragam; untuk proporsi/rasio penurunan FOG/COD/minyak digunakan log response ratio ($\ln RR$). Heterogenitas dilaporkan sebagai I^2 , τ^2 , dan 95% CI. Analisis subkelompok/moderator direncanakan untuk membandingkan konsorsium vs isolat tunggal, rekombinan vs alami, enzim terimobilisasi vs bebas, jenis carrier, penggunaan

RSM/optimasi, skala laboratorium vs pilot, serta rentang pH/temperatur. Potensi bias publikasi dievaluasi melalui funnel plot dan uji Egger (bila $n \geq 10$ studi), dan uji sensitivitas dilakukan dengan mengecualikan studi berisiko bias tinggi atau outlier.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

Penelusuran literatur menghasilkan kumpulan studi yang merepresentasikan tiga ranah utama: (i) ekologi konsorsium mikroba lipolitik indigen sering melibatkan *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Candida*/*Yarrowia* dengan kapasitas produksi biosurfaktan dan lipase yang saling melengkapi (Yusuf et al., 2023; Hentati et al., 2022; Wu et al., 2023); (ii) rekayasa enzim (lipase alami vs rekombinan, serta imobilisasi pada alginat, selulosa, atau poliuretan) untuk meningkatkan stabilitas dan pemakaian berulang (Theron et al., 2020; Karbalaie et al., 2020; Guan et al., 2020); dan (iii) rekayasa proses (optimasi RSM, aerasi/transfer massa/ k_La , konfigurasi reaktor batch–kontinu/packed-bed/pilot) (Nadaf et al., 2024; Herrmann-Heber et al., 2020; Patziger et al., 2021).

Sebagian besar artikel melaporkan penurunan substansial fraksi minyak/FOG/COD pada rentang waktu operasional praktis, dengan kecenderungan kinerja lebih tinggi pada sistem yang menggabungkan konsorsium ditambah strategi peningkatan transfer massa atau imobilisasi enzim (Zhao et al., 2023; Ortellado et al., 2025). Karakteristik metodologis menunjukkan variasi pada komposisi konsorsium (jumlah spesies dan rasio inokulum), kondisi proses (pH netral–alkalin ringan; suhu mesofilik), serta adanya kofaktor (mis. sumber N/P, inducer lipase). Studi yang menggunakan RSM melaporkan kondisi optimum yang lebih terdefinisi dan confidence interval yang dilaporkan lebih baik dibanding one-factor-at-a-time (Nadaf et al., 2024; Ahmed et al., 2022; Lau et al., 2023).

Pelaporan k_La atau indikator aerasi masih terbatas, namun ketika tersedia, metrik tersebut berkorelasi positif dengan laju degradasi minyak (Herrmann-Heber et al., 2020; Patziger et al., 2021). Pada studi enzimatik, imobilisasi lipase secara konsisten

meningkatkan stabilitas operasional (siklus pemakaian) dibanding enzim bebas, dengan kompromi berupa penurunan aktivitas awal yang dapat diimbangi oleh optimasi pH/ionik atau pemilihan carrier berpori (Ismail & Baek, 2020; Guimarães et al., 2023; Zhang et al., 2024; Nisola et al., 2009). Aplikasi lipase rekombinan—terutama varian yang direkayasa untuk ketahanan pelarut atau suhu—menunjukkan prospek baik pada beban minyak tinggi dan matriks limbah heterogen (Guan et al., 2020; Ali et al., 2023). Bukti pilot-scale mulai muncul, memperlihatkan keterterapan pada instalasi IPAL dan UMKM dengan kebutuhan kontrol proses yang realistis (Devaraj et al., 2020; Chen et al., 2010; Aghel et al., 2019).

3.2 Ekologi Konsorsium Mikroba Lipolitik Lokal

Temuan menguatkan hipotesis bahwa konsorsium mikroba indigen memberikan keuntungan fungsional melalui komplementaritas metabolik: biosurfaktan menurunkan tegangan antarmuka untuk meningkatkan ketersediaan substrat, lipase memecah trigliserida menjadi asam lemak dan gliserol, sementara taksa oksidatif memineralisasi produk antara (Araújo et al., 2020; Hentati et al., 2022; Yasmin et al., 2022). Zhao et al. (2023) melaporkan konsorsium bakteri pengurai minyak (YZQ-1, YZQ-3, YZQ-4) mencapai degradasi WCO $61,13 \pm 7,30\%$ dan penurunan COD $62,4 \pm 5,65\%$ dalam 72 jam, dengan aktivitas lipase tertinggi pada strain YZQ-3 sebesar $94,82 \pm 12,89$ U/L. Analisis komunitas mikroba menunjukkan YZQ-1 dan YZQ-3 adaptif terhadap air limbah dan dapat hidup berdampingan dengan bakteri lokal, sementara YZQ-4 tidak bertahan di lingkungan limbah.

Studi co-culture *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas aeruginosa* menunjukkan efek sinergis yang dramatis. Wu et al. (2023) menemukan bahwa co-culture dengan rasio 1:1 meningkatkan efisiensi degradasi minyak mentah dari 32,61% dan 54,35% (kultur tunggal) menjadi 63,05%, dengan penyisihan fraksi jenuh mencapai 75,06%. Sistem co-culture juga menunjukkan kinerja superior dalam pertumbuhan bakteri, hidrofobisitas permukaan sel (CSH), dan aktivitas emulsifikasi—menunjukkan bahwa

kombinasi *Bacillus* dan *Pseudomonas* secara efektif mempromosikan degradasi dan pemanfaatan minyak mentah (Wu et al., 2023).

Dalam konteks biosurfaktan, penelitian terbaru mendemonstrasikan bahwa *Bacillus subtilis* mampu memanfaatkan WCO untuk memproduksi lipopeptida biosurfaktan dengan tingkat utilisasi WCO 75,88% dan produksi biosurfaktan 0,30 g/L pada kondisi optimal (pH 6,0, 30°C, WCO 20 g/L, ekstrak ragi 5 g/L). Analisis genomik dan transkriptomik mengonfirmasi keberadaan dan upregulasi gen terkait biosintesis lipopeptida, khususnya gen *srf* (surfactin) dan *fen* (fengycin). Peran biosurfaktan dalam menurunkan tegangan permukaan minyak–air merupakan mekanisme kunci yang memfasilitasi akses enzim lipolitik terhadap substrat hidrofobik (Araújo et al., 2020; Hentati et al., 2022).

Konsorsium AK6 yang terdiri dari *Klebsiella*, *Pseudomonas*, dan *Enterobacter* menunjukkan kapasitas degradasi hidrokarbon petroleum (C₁₁-C₂₉ alkana) sekitar 90±5,2% dalam 7 hari inkubasi pada 40°C (Hentati et al., 2022). Analisis komposisi komunitas mengungkapkan bahwa *Pseudomonas* spp. muncul sebagai taksa kunci untuk biodegradasi hidrokarbon, terutama pada kondisi suhu tinggi dan konsentrasi lumpur awal yang tinggi. Keragaman fungsional dalam konsorsium memungkinkan adaptasi terhadap variasi substrat dan kondisi lingkungan yang tidak dapat dicapai oleh isolat tunggal (Mongkolthararuk & Dharmasthiti, 2002; Wu et al., 2023; Wang et al., 2025; Loayza et al., 2025).

3.3 Optimasi Proses: RSM, Transfer Massa, dan CFD

Dari sisi rekayasa proses, peningkatan transfer massa oksigen (kLa) serta kontrol aerasi/agitasi muncul sebagai pengungkit kinerja, khususnya ketika viskositas lumpur/limbah tinggi menghambat difusi (Herrmann-Heber et al., 2020; Patziger et al., 2021; Höhne & Mamedov, 2020). Penggunaan RSM tidak hanya mempercepat pencarian kondisi optimum multi-faktor, namun juga membuat hasil lebih dapat dibandingkan antar-studi karena pelaporan koefisien model dan interval

kepercayaannya (Nadaf et al., 2024; Ahmed et al., 2022; Lau et al., 2023; Pirghorbani & Ebrahimi, 2021).

Nadaf et al. (2024) menggunakan RSM berbasis central composite design (CCD) untuk optimasi produksi lipase oleh *Nocardia asiatica*, memprediksi aktivitas lipase optimal 58,53 U/mL pada kondisi 1,5% tryptone, ukuran inokulum 10 mL, dan periode inkubasi 48 jam pada 34°C, dengan aktivitas aktual yang diamati 57,85 U/mL—menunjukkan akurasi prediksi model yang sangat baik. Ahmed et al. (2022) menerapkan RSM untuk optimasi degradasi used-cooking-oil oleh *Burkholderia vietnamiensis* AQ5-12 dan *Burkholderia* sp. AQ5-13. Lau et al. (2023) membandingkan pendekatan RSM dan artificial neural network dengan genetic algorithm (ANN-GA) untuk optimasi produksi lipase oleh *Burkholderia cenocepacia* ST8 menggunakan minyak mesin otomotif bekas, dan kedua pendekatan meningkatkan produksi lipase sebesar 1,6-fold.

Studi tentang k_La dan aerasi menunjukkan bahwa dynamic aeration dalam bentuk pulsed modes dapat meningkatkan transfer massa oksigen hingga 24%, dengan pulsed modes menghasilkan gas hold-up yang lebih tinggi dan potensi peningkatan efisiensi aerasi sebesar 16% pada skala yang relevan untuk pengolahan air limbah (Herrmann-Heber et al., 2020). Herrmann-Heber et al. (2020) menginvestigasi metode aerasi dinamis yang menerapkan osilasi pada aliran gas, menunjukkan potensi tinggi untuk peningkatan transfer massa oksigen dan efisiensi energi proses pengolahan air limbah biologis. Simulasi computational fluid dynamics (CFD) memungkinkan visualisasi dampak parameter desain dan strategi operasional pada sistem hidrodinamik lokal, dan dengan menyertakan pemodelan turbulensi dan multifasa, memungkinkan pemodelan sistem aerasi WWTP yang lebih detail (Herrmann-Heber et al., 2020; Patziger et al., 2021; SCMTEC, 2023).

Patziger et al. (2021) memberikan contoh bagaimana CFD dapat berkontribusi pada peningkatan substansial efisiensi keseluruhan WWTP, termasuk isu yang jarang diselidiki seperti operasi grit chamber teraerasi, kinerja primary settling tank, performa

mixing di oxidation ditch, dan kontrol return sludge. Hasil menunjukkan bahwa laju intake udara dapat sangat diturunkan di sebagian besar grit chamber ($0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{h}$ vs $0,8\text{--}1,5 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{h}$ dalam guideline desain saat ini), optimasi geometri inlet primary settling tank sangat krusial terutama pada beban tinggi akibat storm event, dan desain kinerja mixer berdasarkan guideline saat ini sering memiliki kapasitas yang tidak perlu tinggi. CFD juga efektif untuk optimasi laju resirkulasi lumpur berdasarkan kinerja secondary settling tank (Patziger et al., 2021; SCMTEC, 2023).

3.4 Kesenjangan dan Keterbatasan Bukti

Kesenjangan yang masih mencolok adalah minimnya standarisasi pelaporan (mis. satuan aktivitas lipase seragam, profil waktu penurunan FOG/COD, dan pelaporan ketidakpastian) (Nisola et al., 2009; O'Dea et al., 2021; Page et al., 2021). Selain itu, hanya sebagian kecil studi yang menyajikan analisis biaya atau analisis siklus hidup (LCA), padahal aspek ini krusial untuk adopsi di UMKM/IPAL skala kota (Repository IPB, 2024; Vafa et al., 2025; Life Cycle Assessment, 2025; Vafa et al., 2025). Vafa et al. (2025) menunjukkan bahwa beberapa metode bioremediasi dapat memiliki konsekuensi lingkungan negatif; nutrient anorganik yang digunakan sebagai agen biostimulasi berpotensi membahayakan, sementara organic waste yang dimanfaatkan dalam restorasi tanah terkontaminasi minyak secara substansial mengurangi skor rata-rata environmental footprint hingga 37 mPt.

Secara konseptual, hasil SLR ini memetakan tiga jalur intervensi yang saling melengkapi: (A) penguatan ekologi konsorsium (pemilihan strain indigen dengan peran jelas + inokulum berimbang), (B) rekayasa enzim (rekombinan/varian tahan + imobilisasi cerdas), dan (C) rekayasa proses (k_La , konfigurasi reaktor, dan optimasi statistik). Kombinasi A–C cenderung menghasilkan kinerja paling stabil lintas variasi beban minyak (Zhao et al., 2023; Ortellado et al., 2025; Theron et al., 2020; Nadaf et al., 2024; Herrmann-Heber et al., 2020; Guan et al., 2020; Wu et al., 2023). Di sisi lain, heterogenitas desain dan matriks limbah menuntut validasi lintas-lokasi agar

rekomendasi bersifat generalis, bukan spesifik laboratorium (Nadaf et al., 2024; Patziger et al., 2021; O'Dea et al., 2021).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan systematic literature review yang mengacu pada pedoman PRISMA 2020, dapat disimpulkan bahwa konsorsium mikroba lipolitik indigen menunjukkan kinerja yang lebih baik dan lebih stabil dibandingkan isolat tunggal dalam pengolahan limbah minyak goreng bekas (WCO/FOG) yang kompleks. Keunggulan ini didukung oleh komplementaritas metabolik antaranggota konsorsium, termasuk produksi biosurfaktan, aktivitas lipase dalam hidrolisis trigliserida, serta mineralisasi lanjutan melalui jalur β -oksidasi. Selain itu, strategi peningkatan aktivitas dan stabilitas enzim melalui imobilisasi lipase dan penggunaan varian rekombinan atau hasil directed evolution terbukti meningkatkan stabilitas operasional dan potensi pemakaian ulang, dengan trade-off yang dapat dikelola melalui pemilihan carrier dan optimasi kondisi proses.

Dari sisi rekayasa proses, penguatan transfer massa (k_La , aerasi, dan agitasi) serta optimasi multivariabel menggunakan response surface methodology (RSM) merupakan faktor kunci dalam meningkatkan kinerja dan reproduibilitas proses bioremediasi. Secara keseluruhan, integrasi konsorsium mikroba lipolitik indigen, strategi rekayasa enzim, dan optimasi proses merupakan pendekatan paling prospektif untuk menghasilkan teknologi bioremediasi WCO/FOG yang efektif dan layak diterapkan pada skala IPAL dan UMKM, meskipun kajian skala pilot serta analisis biaya dan life cycle assessment (LCA) masih perlu diperkuat melalui penelitian lanjutan.

4.2 Saran

Pada Pengembangan penelitian dan implementasi bioremediasi WCO/FOG di masa mendatang, diperlukan standarisasi pelaporan yang mencakup satuan aktivitas

enzim, kurva penurunan FOG/COD, parameter transfer massa (kLa), serta pelaporan ketidakpastian dan ukuran efek agar hasil antar-studi lebih dapat dibandingkan. Penelitian lanjutan juga disarankan mengeksplorasi variasi carrier dan arsitektur reaktor (seperti packed-bed, moving-bed, dan biofilm pada media berpori) guna meningkatkan retensi biomassa atau enzim dan stabilitas operasional jangka panjang. Penggunaan konsorsium mikroba lipolitik indigen yang teruji secara lokal perlu diprioritaskan, didukung oleh imobilisasi atau media berpori untuk meningkatkan adaptasi ekologis. Selain itu, desain sistem dengan pemantauan kLa dan kendali aerasi-agitasi yang efisien, prosedur start-up berfase, serta dokumentasi SOP, aspek K3, dan analisis biaya serta life cycle assessment (LCA) menjadi langkah penting untuk memperkuat keberterapan dan keberlanjutan teknologi ini pada skala IPAL dan UMKM.

5. REFERENSI

- Williams, J. B., Clarkson, C., Mant, C., Drinkwater, A., & May, E. (2012). Fat, oil and grease deposits in sewers: Characterisation of deposits and formation mechanisms. *Water Research*, 46(19), 6319–6328. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.002>
- Yusuf, H. H., et al. (2023). Tackling fat, oil, and grease (FOG) build-up in sewers. *Science of the Total Environment*, 902, 165919. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165919>
- Kumar, S., Mathur, A., Singh, V., Nandy, S., & Khare, S. K. (2012). Bioremediation of waste cooking oil using a novel lipase produced by *Penicillium chrysogenum* SNP5. *Bioresource Technology*, 120, 300–304. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.098>
- Ortellado, L. E., Schimpf, A. R. A., Benítez, S. F., Villalba, L. L., Zapata, P. D., & Fonseca, M. I. (2025). Sustainable bioremediation of lipid-rich wastewater using a lipase from *Penicillium rubens* LBM 081. *Water*, 17(10), 1509. <https://doi.org/10.3390/w17101509>
- Okino-Delgado, C. H., & Prado, D. Z. (2017). Bioremediation of cooking oil waste using lipases from wastes. *PLOS ONE*, 12(10), e0186246. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186246>
- Mongkolthanaruk, W., & Dharmsthiti, S. (2002). Biodegradation of lipid-rich wastewater by a mixed bacterial consortium. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 50(2), 101–105. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00057-4](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00057-4)
- Lu, M., Li, G., Xu, J., et al. (2022). Metagenomic screening for lipolytic genes reveals an ecology-clustered distribution pattern. *Frontiers in Microbiology*, 13, 851969. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.851969>
- Karbalaei, M., Rezaee, S. A., & Farsiani, H. (2020). *Pichia pastoris*: A highly successful expression system for optimal synthesis of heterologous proteins. *Journal of Cellular Physiology*, 235(9), 5867–5881. <https://doi.org/10.1002/jcp.29583>

- Yu, S., Xu, Y., Liu, X., et al. (2023). Construction and testing of *Yarrowia lipolytica* recombinant protein expression chassis cells based on high-throughput screening and secretome. *Microbial Cell Factories*, 22, 196. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02196-x>
- Theron, C. W., et al. (2020). Comprehensive comparison of *Yarrowia lipolytica* and *Pichia pastoris* for production and secretion of lipase CalB. *Scientific Reports*, 10, 1183. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58683-3>
- Ali, S., Borah, M., Misra, S., & Sahoo, D. (2023). The recent advances in the utility of microbial lipases: A review. *Microorganisms*, 11(2), 510. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020510>
- Ahmed, M. S., Ahmad, S. A., Shukor, M. Y., & Yusof, M. T. (2022). Statistical optimisation of used-cooking-oil degradation by *Burkholderia vietnamiensis* AQ5-12 and *Burkholderia* sp. AQ5-13. *Processes*, 10(11), 2178. <https://doi.org/10.3390/pr10112178>
- Yu, M., Qin, S., & Tan, T. (2007). Enhancing production of *Yarrowia lipolytica* lipase Lip2 in *Pichia pastoris*. *Engineering in Life Sciences*, 7(3), 280–285. <https://doi.org/10.1002/elsc.200900102>
- Ismail, A. R., & Baek, K.-H. (2020). Lipase immobilization with support materials, preparation techniques, and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 1624–1639. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.021>
- Guimarães, J. R., Oliveira, K. S. G. C., Gonçalves, M. C. P., Romanelli, J. P., Lopes, L. A., Berenguer-Murcia, Á., Fernandez-Lafuente, R., & Tardioli, P. W. (2023). A review of lipase immobilization on hydrophobic supports. *Reaction Chemistry & Engineering*, 8, 2689–2702. <https://doi.org/10.1039/D3RE00420A>
- Nadaf, R. D., et al. (2024). Response surface methodology for optimization of media components for lipase production by *Nocardia asiatica*. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 11(2), e1164. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.1164>
- Herrmann-Heber, R., et al. (2020). Dynamic aeration for improved oxygen mass transfer in the activated sludge process. *Chemical Engineering Journal*, 386, 121359. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.121359>
- Guan, L., Li, J., Xu, Z., & Li, S. (2020). Directed evolution of *Pseudomonas fluorescens* lipase with improved thermostability. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 1034. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.01034>
- Reetz, M. T., et al. (2010). Increasing the stability of an enzyme toward hostile organic solvents by directed evolution based on iterative saturation mutagenesis using the B-FIT method. *Chemical Communications*, 46(45), 8657–8659. <https://doi.org/10.1039/c0cc02657c>
- Lau, H. L., Wong, F. W. F., Rahman, R. N. Z. R. A., Mohamed, M. S., Ariff, A. B., & Hii, S. L. (2023). Optimization of fermentation medium components by response surface methodology (RSM) and artificial neural network hybrid with genetic algorithm (ANN-GA) for lipase production by *Burkholderia cenocepacia* ST8. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 10567–10580. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01956-0>