



MEKANISME DAN IMPLEMENTASI BIOREMEDIASI BERBASIS MIKROORGANISME UNTUK PEMULIHAN LAHAN TERCEMAR LIMBAH INDUSTRI

Arif Sardi

Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Ar-Raniry Banda Aceh

E-mail: arif.sardi@ar-raniry.ac.id

Informasi Naskah :

Diterima Redaksi:
4 Desember 2025

Revisi Akhir:
24 Desember 2025

Diterbitkan Online:
31 Desember 2025

ABSTRAK : Bioremediasi merupakan teknologi restorasi lingkungan yang memanfaatkan mikroorganisme untuk menguraikan atau mentransformasi senyawa pencemar menjadi senyawa anorganik tidak berbahaya. Penelitian ini bertujuan mengkaji mekanisme detoksifikasi mikroba serta strategi implementasi pada lahan industri tercemar. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur kritis terhadap data teknis dan studi kasus relevan. Hasil menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi sangat bergantung pada optimalisasi biostimulasi khususnya parameter pH (rentang 6.0–8.0), suhu mesofilik (25°C–40°C), dan rasio C:N:P seimbang (misalnya 100:10:1). Studi kasus di Indonesia menunjukkan penambahan biokompos secara drastis meningkatkan efisiensi degradasi TPH; sebanyak 165,79 Kg TPH berhasil dihilangkan dari 2565 m³ tanah dalam 150 hari. Untuk polutan logam berat, mekanisme biosorpsi oleh fungi indigenus seperti *Aspergillus flavus* menunjukkan potensi besar. Arah masa depan riset berfokus pada bioremediasi presisi melalui integrasi teknik 'omik' dan ekologi sintetik untuk merancang konsorsium mikroba yang resilien terhadap tantangan lingkungan heterogen.

Kata Kunci: Bioremediasi, Biostimulasi, konsorsium mikroba

ABSTRACT : Bioremediation is an environmental restoration technology that utilizes microorganisms to decompose or transform pollutants into harmless inorganic compounds. This study aims to examine microbial detoxification mechanisms and implementation strategies on contaminated industrial sites. The method used is a critical literature review of technical data and relevant case studies. The results show that implementation success depends heavily on biostimulation optimization, particularly pH (range 6.0–8.0), mesophilic temperature (25°C–40°C), and a balanced C:N:P ratio (e.g., 100:10:1). Case studies in Indonesia demonstrate that the addition of biocompost drastically increased TPH degradation efficiency; 165.79 Kg of TPH was successfully removed from 2565 m³ of soil in 150 days. For heavy metal pollutants, biosorption mechanisms by indigenous fungi such as *Aspergillus flavus* show great potential. Future research directions focus on precision bioremediation through the integration of 'omics' techniques and synthetic ecology to design resilient microbial consortia against heterogeneous environmental challenges.

Keyword: Bioremediation, Biostimulation, Microbial Consortia

PENDAHULUAN

Aktivitas industri dan manusia telah membawa dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan, terutama melalui pencemaran tanah dan air (Garg et al, 2021). Dalam konteks analisis dampak lingkungan, limbah industri diklasifikasikan berdasarkan wujudnya menjadi limbah cair, limbah padat, limbah gas, dan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Pembuangan limbah padat ke daratan tanpa melalui proses pengolahan yang memadai, seperti sisa plastik, potongan kayu, atau lumpur semen, akan mengakibatkan pencemaran lingkungan yang serius di wilayah tersebut (Kareem et al, 2023).

Menghadapi tantangan polusi ini, kebutuhan akan teknologi pemulihan lingkungan yang efektif dan berkelanjutan menjadi mendesak. Bioremediasi muncul sebagai solusi teknologi yang ramah lingkungan, memanfaatkan mikroorganisme atau organisme hidup lainnya (seperti cacing tanah, ganggang, dan tanaman) untuk menguraikan, mentransformasi, atau mendetoksifikasi senyawa pencemar dalam lingkungan. (Bala et al, 2022).

Bioremediasi didefinisikan sebagai penggunaan agen biologis, terutama mikroorganisme, untuk mengurangi polutan di lingkungan. Prinsip dasar dari proses ini adalah biodegradasi, yang idealnya mencapai mineralisasi lengkap

polutan organik menjadi senyawa anorganik yang tidak berbahaya, seperti karbon dioksida (CO₂), air (H₂O) atau biomassa (Salaria et al, 2024).

Dibandingkan dengan metode fisik atau kimia konvensional (misalnya, pembakaran, penggalian, atau ekstraksi), bioremediasi menawarkan beberapa keunggulan komparatif yang menjadikannya pilihan yang diutamakan dalam upaya keberlanjutan. Pertama, teknologi ini dikenal ramah lingkungan karena memanfaatkan mikroorganisme alami, bukan bahan kimia tambahan yang berpotensi toksik. Residu yang dihasilkan dari proses degradasi mikrobial umumnya tidak berbahaya. Kedua, bioremediasi terbukti lebih efisien biaya dibandingkan metode lain yang memerlukan energi tinggi atau proses penggalian dan pemindahan material. Efisiensi ini diperkuat oleh fakta bahwa residu yang tidak berbahaya yang dihasilkan sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular. Ketiga, bioremediasi, khususnya melalui teknik *in situ*, tidak merubah karakteristik atau struktur lingkungan asli, menjadikannya metode yang efektif untuk pemulihan area yang luas (Sharma et al, 2020; Muhammad et al, 2024).

Keunggulan bioremediasi melampaui aspek teknis dan lingkungan semata. Penggunaan teknologi ini, dengan residu yang aman dan minimnya dampak destruktif terhadap lingkungan, sangat relevan dengan tuntutan regulasi modern seperti Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup (PROPER) di Indonesia. Kinerja lingkungan industri saat ini tidak hanya diukur dari ketaatan terhadap standar baku mutu, tetapi juga dari kinerja yang melebihi ketaatan (*beyond compliance*), termasuk penilaian daur hidup (*life cycle assessment*). Dengan menghasilkan produk akhir yang benign/tidak berbahaya (CO₂, air, biomassa), bioremediasi memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kinerja "hijau" perusahaan, mendukung efisiensi sumber daya, dan penurunan beban air limbah, yang semuanya merupakan komponen penting dalam sistem manajemen lingkungan yang unggul (Permen LHK No. 1 Tahun 2021).

Meskipun keunggulannya signifikan, bioremediasi memiliki keterbatasan. Proses ini memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan metode ekstraksi atau pemindahan fisik. Selain itu, efektivitasnya sangat bergantung pada kondisi lingkungan dan terbatas pada bahan cemar tertentu. Oleh karena itu, diperlukan penelitian dan evaluasi yang teliti sebelum implementasi untuk menentukan organisme yang paling sesuai dan mengoptimalkan kondisi operasional (Muhammad et al, 2024).

TINJAUAN PUSTAKA

Klasifikasi Kontaminan Industri dan Mekanisme Detoksifikasi Mikroba

Lahan tercemar industri seringkali mengandung campuran polutan yang kompleks. Keberhasilan bioremediasi terletak pada pemilihan mikroorganisme spesifik yang memiliki jalur metabolisme yang sesuai untuk mendegradasi, mentransformasi, atau menstabilkan polutan tersebut.

Senyawa Hidrokarbon (TPH, Minyak Mentah, Senyawa Aromatik)

Pencemaran hidrokarbon, seperti lumpur minyak bumi (*Oily Sludge*), merupakan masalah lingkungan yang umum dalam sektor perminyakan, dari eksplorasi hingga pengilangan. Senyawa Total Petroleum Hidrokarbon (TPH) pada limbah ini sulit diurai dan berpotensi terendap sebagai zat beracun di dalam tanah (Hasan et al, 2024). Mikroorganisme yang berperan penting dalam penguraian hidrokarbon dikenal sebagai bakteri hidrokarbonoklastik. Kelompok bakteri yang umum digunakan untuk bioremediasi minyak meliputi *Alcanivorax*, *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, dan *Bacillus*.

Untuk Hidrokarbon Alifatik (Alkana), bakteri kunci seperti *Alcanivorax*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan *Rhodococcus* berperan dengan menggunakan enzim oksigenase terminal untuk mengaktifkan rantai alkana, mengubahnya menjadi alkohol, aldehida, dan akhirnya asam lemak yang dimasukkan ke jalur metabolisme sentral. Sementara itu, degradasi Hidrokarbon Aromatik Polisiklik (PAHs) umumnya dilakukan oleh bakteri seperti *Cycloclasticus*, *Pseudomonas*, dan *Rhodococcus*, yang bekerja menggunakan enzim dioksigenase untuk memasukkan dua atom oksigen ke dalam cincin aromatik, memutus cincin tersebut, dan mengubahnya menjadi senyawa yang siap masuk ke jalur siklus asam trikarboksilat (TCA) untuk diuraikan lebih lanjut. Karena kontaminasi hidrokarbon umumnya merupakan campuran berbagai bahan kimia, maka penghilangan yang efektif memerlukan konsorsium bakteri (kombinasi beberapa spesies) alih-alih hanya mengandalkan satu spesies saja (Pandolfo et al, 2023; Yakimov et al, 2022).

Logam Berat dan Biotransformasi Non-Organik

Logam berat (seperti Kadmium (Cd), Timbal (Pb), Kromium (Cr), dan Raksa (Hg)) menimbulkan masalah toksisitas dan bioavailabilitas karena mereka tidak dapat diurai dan dimusnahkan secara biologis, melainkan harus ditransformasi atau distabilkan (Noverita et al, 2023).

Biosorpsi dan Bioakumulasi oleh Bakteri

Beberapa jenis bakteri menunjukkan kemampuan tinggi dalam menangani logam berat:

- **Kadmium (Cd):** Bakteri seperti *Staphylococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Citrobacter*, *Klebsiella*, dan *Rhodococcus* efektif mengatasi Cd.
- **Kromium (Cr):** *Alcaligenes* dan *Pseudomonas* berperan dalam remediasi Cr.
- **Timbal (Pb):** Isolat bakteri seperti *Bacillus thuringiensis*, *Alcaligenes faecalis*, dan *Pseudomonas aeruginosa* mampu menurunkan konsentrasi Timbal dalam sedimen.

Mekanisme yang digunakan termasuk biosorpsi—penyerapan logam pada permukaan sel—yang dianggap sebagai metode remediasi yang paling tepat untuk menangani pencemaran logam berat terlarut dalam larutan kompleks yang sangat encer. Bakteri juga bermanfaat dalam menurunkan kadar sulfat dan logam berat dalam air limbah industri (Aryal, 2021; Noverita et al, 2023).

Mikoremediasi dan Potensi Fungi Lokal

Fungi dan jamur makro juga merupakan biosorben yang sangat efisien. Pemanfaatan jamur makro (*Agaricus bisporus*, *Auricularia polytricha*, dll.) dianjurkan karena pertumbuhannya yang cepat, kemampuan metabolisme yang beragam, dan kemudahan dalam penanganan (Kumar et al, 2021). Berbagai strain fungi menunjukkan potensi besar sebagai biosorben ion logam Kadmium. Mengingat tingginya keanekaragaman jamur makro di Indonesia, dan efisiensi fungi dalam proses biosorpsi, terdapat peluang besar untuk penelitian eksplorasi lebih lanjut. Penelitian harus difokuskan pada isolasi dan seleksi strain fungi indigenus Indonesia yang potensial untuk biosorpsi logam berat khususnya Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd). Pendekatan ini bertujuan untuk mengembangkan biosorben lokal yang adaptif terhadap kondisi lingkungan Indonesia (Haya, 2023; Aryanto, 2024).

Degradasi Senyawa Organik Persisten dan Pestisida

Polutan organik persisten (POPs), seperti DDT, dan residu pestisida merupakan target penting dalam bioremediasi. Detoksifikasi lingkungan yang tercemar pestisida dapat dilakukan melalui mikoremediasi (Bokade et al, 2021). Khamir (*yeast*) telah teridentifikasi sebagai bioremediator yang efektif untuk fungisida berbahan aktif Mankozebe (Kusumaningtyas et al, 2021). Studi menunjukkan bahwa khamir hasil eksplorasi dari lahan tercemar mampu beradaptasi dan mempertahankan daya tumbuh bahkan pada konsentrasi fungisida yang tinggi, yang mengindikasikan kemampuan degradasi yang kuat. Selain itu, mikoremediasi juga memainkan peran penting dalam mengolah limbah pulp dan kertas yang sering mengandung zat beracun (Kumar et al, 2020).

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi pustaka atau *literature review*. Data dikumpulkan dari berbagai sumber primer termasuk jurnal ilmiah, laporan teknis industri, serta regulasi lingkungan. Analisis difokuskan pada perbandingan efikasi teknik *in situ* vs *ex situ*, serta identifikasi faktor lingkungan pembatas dalam skala lapangan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Strategi Peningkatan Bioremediasi dan Implementasi Lapangan

Keberhasilan implementasi bioremediasi pada lahan tercemar bergantung pada strategi yang dipilih, baik berdasarkan lokasi (*in situ* atau *ex situ*) maupun pendekatan mikrobiologis (*biostimulasi* atau *bioaugmentasi*).

Perbandingan Strategi Lokasi (In Situ vs Ex Situ)

Strategi remediasi dapat diklasifikasikan berdasarkan lokasi penanganan, yaitu strategi lokasi *In Situ* dan strategi lokasi *Ex Situ*. Adapun perbandingan dari kedua strategi tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan strategi lokasi (*in situ* vs *ex situ*)

Strategi Lokasi	Deskripsi	Teknik	Kelebihan	Keterbatasan
In Situ	Pemulihan dilakukan di lokasi asli kontaminasi.	<i>Landfill</i> , <i>Aerobic composting</i> (di tempat), <i>Anaerobic digestion</i> (di tempat)	Lebih efisien biaya, tidak mengubah struktur tanah.	Kontrol kondisi lingkungan (pH, Oksigen) sulit, memakan waktu.
Ex Situ	Material yang tercemar dipindahkan ke lokasi lain untuk pengolahan terkontrol.	<i>Biopile</i> , <i>Slurry-phase bioreactor</i> , <i>Landfarming</i>	Kontrol kondisi (suhu, nutrisi, pH) lebih mudah, potensi laju degradasi lebih cepat.	Biaya tinggi karena proses penggalian dan pemindahan material.

Meskipun teknik *in situ* umumnya dipilih karena kemampuannya mempertahankan karakteristik lingkungan dan efektivitasnya untuk area yang luas, teknik *ex situ* sering diperlukan ketika kontaminasi parah atau ketika diperlukan kontrol ketat terhadap kondisi lingkungan untuk mencapai degradasi maksimal (Paul et al, 2021; Perez-Vazquez et al, 2024; Sharma et al, 2020).

Optimalisasi Biostimulasi

Biostimulasi adalah pendekatan mendasar yang bertujuan untuk merangsang pertumbuhan dan metabolisme mikroorganisme pendegradasi asli (*indigenous*) dengan menambahkan nutrisi pembatas atau *cosubstrates*.

Prasyarat Lingkungan Esensial

Keberhasilan biostimulasi sangat bergantung pada pemenuhan prasyarat lingkungan dasar (Romantschuk et al, 2023):

- Ketersediaan Oksigen (O₂) pada level residual minimal 1 ppm, terutama untuk degradasi hidrokarbon aerobik.
- Nutrisi inorganik esensial, terutama Nitrogen (N) dan Fosfor (P).
- Air yang cukup, untuk transfer massa dan mempertahankan kelembaban optimal.
- Kontak maksimal antara mikroba dan substrat pencemar.

Kontrol Rasio C:N:P

Pengendalian rasio Karbon (C), Nitrogen (N), dan Fosfor (P) sangat vital. Mikroorganisme memerlukan sumber karbon untuk sintesis sel baru (jika heterotropik, menggunakan bahan organik) dan sumber energi. Nitrogen dan Fosfor adalah elemen anorganik penting untuk proses sintesis. Rasio C:N:P yang seimbang (misalnya 100:10:1) sering diuji dalam simulasi bioremediasi, karena rasio yang tidak optimal dapat membatasi pertumbuhan dan kecepatan metabolisme mikroba (Kundu et al, 2022).

Peran Bioaugmentasi dan Konsorsium Mikroba

Bioaugmentasi adalah strategi di mana mikroorganisme pendegradasi minyak atau mikroba spesies eksogen (non-indigenus) diinokulasi ke lokasi yang terkontaminasi untuk meningkatkan populasi mikroba yang sudah ada. Strategi ini sering digunakan bersama teknik lain seperti *bioventing* dan *biosparging* (Hussain et al, 2022; Sayed et al, 2021)

Keunggulan Konsorsium

Penelitian saat ini menunjukkan bahwa formulasi konsorsium mikroba—gabungan beberapa isolat dengan jalur metabolisme yang beragam—jauh lebih efektif daripada isolat tunggal dalam mendegradasi berbagai jenis senyawa hidrokarbon dan kontaminan kompleks. Keberhasilan bioaugmentasi sangat bergantung pada diversitas jenis dan kelimpahan mikroba potensial yang diinokulasikan (Muter, 2023).

Kebutuhan Sinergi Strategi

Dalam praktik lapangan, bioaugmentasi harus dipertimbangkan sebagai teknik spesial yang membutuhkan pemantauan yang tepat dan canggih. Proses bioaugmentasi hanya akan berhasil jika didukung oleh kondisi lingkungan yang dioptimalkan melalui biostimulasi. Mikroba tambahan (eksogen) yang diinokulasi akan gagal bertahan atau berkompetisi jika ketersediaan nutrisi, pH, dan kelembaban tidak diatur dengan baik. Oleh karena itu, pendekatan yang paling efisien adalah memastikan biostimulasi yang optimal untuk mendukung populasi indigenus, baru kemudian mempertimbangkan inokulasi konsorsium yang teruji untuk melengkapi jalur degradasi yang mungkin kurang pada mikroba asli (López, & dos Santos Silva 2023; Muter, 2023).

Faktor Lingkungan Krusial dan Pemantauan Kinerja

Efektivitas bioremediasi sangat bergantung pada kontrol ketat faktor lingkungan, fisik, dan kimia, yang secara kolektif mempengaruhi laju metabolisme mikroba.

Pengaruh Parameter Fisika-Kimia pH dan Suhu

- pH: pH memainkan peran krusial dalam menentukan keberhasilan proses, karena mempengaruhi aktivitas enzim dan viabilitas sel mikroba. Sebagian besar bakteri tumbuh optimal pada kisaran pH 6.0 hingga 8.0. Dalam studi kasus bioremediasi lumpur minyak, penurunan nilai pH dari 8.25 menjadi 6.25 setelah 35 hari menunjukkan adanya aktivitas mikroorganisme yang signifikan, karena fermentasi atau oksidasi menghasilkan senyawa organik yang bersifat asam.
- Suhu: Kecepatan metabolisme mikroorganisme sangat dipengaruhi oleh suhu. Rentang suhu mesofilik (25°C hingga 40°C) dianggap ideal untuk laju pertumbuhan dan fungsi sel mikroba. Meskipun ada strain yang beradaptasi pada suhu *psychrophilic* (12°C - 18°C) atau *thermophilic* (55°C - 65°C), kondisi mesofilik sering menjadi target di lapangan (Alori et al, 2022; Hazaimah & Ahmed, 2021).

Kadar Air dan Oksigen

Kelembaban, atau kadar air, adalah faktor fisik yang menentukan ketersediaan air dan transfer massa substrat. Kadar air yang memadai sangat penting untuk memastikan mikroba dan substrat berada dalam kontak maksimal. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan *Water Holding Capacity* (WHC) tanah yang tercemar berkorelasi dengan efisiensi degradasi yang lebih tinggi. Selain itu, ketersediaan oksigen—sebagai akseptor elektron—harus dipertahankan pada tingkat residual minimal 1 ppm untuk memastikan proses degradasi aerobik yang efisien (Irfan et al, 2022).

Peran Biokompos dan Nutrisi Organik

Penggunaan biokompos atau kompos yang diperkaya nutrisi telah terbukti menjadi metode biostimulasi yang sangat efektif, terutama dalam remediasi lumpur minyak. Biokompos berfungsi ganda: sebagai sumber nutrisi tambahan (N dan P) dan sebagai agen pembawa (*bulking agent*) yang memperbaiki struktur tanah.

Dalam studi kasus bioremediasi lumpur minyak di Minas - Riau, penambahan biokompos menggunakan serbuk gergaji dari pelepah dan batang kelapa sawit, serta kotoran ternak (sapi, kambing, ayam) yang difermentasi terbukti secara drastis meningkatkan efisiensi degradasi TPH. Setelah 150 hari operasi bioremediasi, konsentrasi rata-rata TPH dalam tanah berhasil diturunkan. Sebanyak 165,79 Kg TPH dihilangkan dari total 2565 m³ tanah (Helmy & Kardenia, 2024). Hal ini menunjukkan bahwa biokompos dapat menstimulasi pertumbuhan bakteri pendegradasi minyak

bumi yang indigenus, bahkan tanpa inokulan eksogen, melalui optimasi media pertumbuhan dan kondisi lingkungan. Pada **Tabel 2** disajikan optimalisasi parameter lingkungan.

Tabel 2. Optimalisasi Parameter Lingkungan untuk Peningkatan Bioremediasi Tanah

Parameter Kritis	Rentang Optimal	Signifikansi Fungsional
pH	6.0 – 8.0	Memaksimalkan laju reaksi enzimatis dan viabilitas mikroba.
Suhu Operasional	25°C - 40°C (Mesofilik)	Kecepatan metabolisme sel maksimum.
Ketersediaan Oksigen	> 1 ppm (Aerobik)	Akseptor elektron vital untuk degradasi hidrokarbon.
Rasio C:N:P	100:10:1 hingga 100:5:1	Menjamin nutrisi seluler seimbang dengan substrat polutan.

Metode Pemantauan Kinerja

Pemantauan yang teliti dan berkelanjutan sangat penting untuk memastikan keberhasilan bioremediasi. Metode pemantauan yang digunakan meliputi:

- Pengukuran Chemical Oxygen Demand (COD): COD digunakan untuk menentukan konsentrasi total bahan kimia yang terdapat pada limbah sebelum dan sesudah bioremediasi. Pengukuran ini dilakukan dengan metode Dichromate Reflux Technique Standar.
- Analisis Total Petroleum Hidrokarbon (TPH): Tingkat degradasi dihitung berdasarkan persentase pengurangan TPH awal dibandingkan TPH akhir, biasanya melalui metode ekstraksi dengan n-heksana dan penguapan pada suhu 70°C.
- Total Plate Count (TPC): Analisis TPC bertujuan untuk memantau pola pertumbuhan dan kelimpahan biomassa bakteri selama proses bioremediasi, yang memberikan indikasi langsung terhadap aktivitas mikroba (Mansouri et al, 2022; Noverita et al, 2023).

Tantangan, Risiko, dan Arah Penelitian Masa Depan Tantangan Implementasi dan Skalabilitas

Salah satu tantangan terbesar dalam bioremediasi adalah memastikan efektivitasnya di lapangan, yang seringkali memiliki kondisi lingkungan yang heterogen. Efektivitas proses akan sangat bergantung pada faktor eksternal seperti suhu, pH, dan ketersediaan nutrisi, yang sulit dikontrol dalam skala besar *in situ*. Selain itu, waktu yang dibutuhkan untuk remediasi lebih lama dibandingkan metode fisik.

Tantangan teknis lainnya adalah sifat kompleks polutan industri. Mikroorganisme harus mampu mendegradasi, mentransformasi, atau mendetoksifikasi berbagai jenis kontaminan secara simultan dalam matriks yang mungkin mengandung senyawa organik dan anorganik (logam berat).

Risiko Lingkungan Bioteknologi

Seiring dengan kemajuan bioteknologi, muncul risiko ekologis yang memerlukan mitigasi. Salah satu perhatian utama adalah potensi pelepasan atau transfer Gen Resisten Antibiotik (ARG) dari mikroorganisme yang digunakan dalam proses bioremediasi (terutama strain yang diinokulasi atau direkayasa) ke mikroba lingkungan alami. Transfer ARG dapat berkontribusi pada penyebaran resistensi antimikroba, sebuah isu kesehatan global (Cunningham et al, 2020; Koch et al, 2021).

Oleh karena itu, pemanfaatan *Genetically Modified Microorganisms* (GMMs) atau strain yang diisolasi harus diimbangi dengan strategi biokontainmen yang ketat. Diperlukan analisis genomik yang cermat untuk memastikan bahwa strain yang digunakan tidak membawa ARG yang dapat ditransfer. Selain itu, pengembangan GMMs untuk bioremediasi memerlukan mekanisme biokontainmen biologis (misalnya, mekanisme *bunuh diri* seluler) atau biokontainmen fisik yang kuat untuk mencegah pelepasannya ke lingkungan alami (Cunningham et al, 2020; Koch et al, 2021).

Di Indonesia, adopsi teknologi berbasis mikroorganisme rekayasa genetik (GMMs) dan pengelolaan limbah B3 diatur dengan ketat oleh peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (misalnya, Permen LHK No. 6 Tahun 2021 dan P.56 Menlhk-Setjen/2015). Kepatuhan terhadap regulasi ini menjadi tantangan yang membatasi adopsi teknologi mikroorganisme yang direkayasa secara genetik secara luas di dalam negeri.

Tren Masa Depan dalam Bioremediasi Presisi

Arah penelitian dan pengembangan teknologi bioremediasi bergeser dari pendekatan empiris (isolasi strain terbaik) menuju rekayasa sistem yang presisi dan adaptif.

Bioremediasi Berbasis Konsorsium dan Ekologi Sintetik

Masa depan bioremediasi terletak pada perancangan konsorsium mikroba lintas-kingdom yang melibatkan bakteri, fungi, dan mikroalga. Integrasi ekologi sintetik memungkinkan konsorsium dirancang tidak hanya untuk mendegradasi polutan tertentu tetapi juga untuk membentuk ekosistem mikro yang resilien, yang penting untuk operasi pada skala industri. Proses ini menuntut penguasaan teknik isolasi, identifikasi, dan rekayasa genetika untuk meningkatkan efektivitas mikroba.

Integrasi Teknologi 'Omik'

Untuk memahami dan merekayasa komunitas mikroba secara presisi, integrasi teknologi 'omik' menjadi sangat penting. Kombinasi data metagenomik (analisis genetik), metatranskriptomik (analisis aktivitas gen), dan metabolomik (analisis produk metabolik) yang dilakukan secara berkelanjutan (*time series meta omics*) memungkinkan peneliti mengidentifikasi pola respons komunitas mikroba terhadap gangguan lingkungan dan memprediksi efektivitas degradasi di lapangan secara lebih akurat. Teknologi ini memungkinkan para peneliti untuk beralih dari sekadar mencari mikroba alami yang adaptif menjadi merekayasa jalur metabolisme dan meningkatkan toleransi stres lingkungan.

KESIMPULAN

Bioremediasi merupakan teknologi pemulihan lahan tercemar limbah industri yang unggul karena efisiensi biaya, sifat ramah lingkungan, dan kemampuannya untuk menguraikan polutan kompleks seperti hidrokarbon (TPH), logam berat, dan pestisida. Keberhasilan proses ini sangat bergantung pada optimalisasi faktor lingkungan, terutama pH (6.0-8.0), suhu mesofilik (25°C - 40°C), dan rasio nutrisi C:N:P yang seimbang.

Studi kasus di Indonesia telah menunjukkan efikasi yang sangat tinggi, penambahan biokompos menggunakan serbuk gergaji dari pelepah dan batang kelapa sawit, serta kotoran ternak (sapi, kambing, ayam) yang difermentasi terbukti secara drastis meningkatkan efisiensi degradasi TPH. Setelah 150 hari operasi bioremediasi, konsentrasi rata-rata TPH dalam tanah berhasil diturunkan. Sebanyak 165,79 Kg TPH dihilangkan dari total 2565 m³ tanah. Oleh karena itu, strategi biostimulasi, yang didukung oleh bahan organik lokal (biokompos) untuk merangsang mikroba indigenus yang sudah beradaptasi, merupakan fondasi utama keberhasilan remediasi di Indonesia.

Dalam pengembangan solusi bioremediasi di Indonesia, prioritas utama bagi praktisi lingkungan adalah optimasi kondisi lingkungan (biostimulasi) dengan memastikan ketersediaan nutrisi, pH, dan oksigen yang optimal, mengingat faktor-faktor ini merupakan pembatas utama di lapangan sebelum mempertimbangkan bioaugmentasi. Seiring dengan itu, penelitian harus diarahkan pada eksplorasi keanekaragaman hayati lokal, khususnya isolasi strain mikroorganisme, terutama fungi dan jamur makro indigenus, yang berpotensi tinggi sebagai biosorben untuk mengatasi kontaminasi logam berat spesifik (seperti Cadmium/Cd dan Timbal/Pb). Untuk mencapai efisiensi maksimal, Pemerintah dan institusi penelitian perlu mendukung pengembangan bioremediasi presisi yang mengintegrasikan teknik 'omik' (metagenomik dan metatranskriptomik) dan ekologi sintetik untuk merancang

konsorsium mikroba yang lebih resilien dan efisien pada skala industri. Namun, upaya ini harus diimbangi dengan mitigasi risiko bioteknologi yang kuat, di mana setiap penggunaan Organisme Hasil Modifikasi Genetik (GMMs) atau konsorsium yang direkayasa harus diiringi dengan penelitian mendalam mengenai risiko lingkungan, khususnya potensi pelepasan Gen Resisten Antibiotik (ARG), serta penerapan strategi biokontainmen yang kokoh sesuai dengan kerangka regulasi lingkungan Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Aliyanta, B., & Mujab, A. S. (2012). Penggunaan biokompos dalam bioremediasi lahan tercemar limbah minyak bumi. *Jurnal Kimia VALENSI*, 2(3).
- Alori, E. T., Gabasawa, A. I., Elenwo, C. E., & Agbeyegbe, O. O. (2022). Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment. *Frontiers in Soil Science*, 2, 937186.
- Aryal, M. (2021). A comprehensive study on the bacterial biosorption of heavy metals: materials, performances, mechanisms, and mathematical modellings. *Reviews in Chemical Engineering*, 37(6), 715-754.
- Aryanto, R. (2024). *BIOSORPSI LOGAM TIMBAL (PB) OLEH Polyporus tenuiculus DAN Marasmius sp. 21* (Thesis, Universitas Nasional).
- Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B. V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., & Tripathi, M. (2022). Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: a review for a green and sustainable environment. *Toxics*, 10(8), 484.
- Bokade, P., Purohit, H. J., & Bajaj, A. (2021). Myco-remediation of chlorinated pesticides: insights into fungal metabolic system. *Indian Journal of Microbiology*, 61(3), 237-249.
- Cunningham, C. J., Kuyukina, M. S., Ivshina, I. B., Konev, A. I., Peshkur, T. A., & Knapp, C. W. (2020). Potential risks of antibiotic resistant bacteria and genes in bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soils. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(5), 1110-1124.
- Garg, S., Chowdhury, Z. Z., Faisal, A. N. M., Rumjit, N. P., & Thomas, P. (2021). Impact of industrial wastewater on environment and human health. In *Advanced industrial wastewater Treatment and Reclamation of water: comparative Study of water pollution Index during pre-industrial, industrial Period and Prospect of wastewater Treatment for water resource conservation* (pp. 197-209). Cham: Springer International Publishing.
- Ha, B. N., & Tan, T. N. (2025). Integration of bioremediation and physico-chemical methods for wastewater treatment and resource recovery. *Biotechnologies for Wastewater Treatment and Resource Recovery*, 109-122.
- Hasan, A. M., Kamal, R. S., Farag, R. K., & Abdel-Raouf, M. E. (2024). Petroleum sludge formation and its treatment methodologies: a

- review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(6), 8369-8386.
- Haya, D. A. F. (2023). *Potensi Jamur Indigenous dari Tanah TPA Piyungan dalam Bioremediasi Logam Timbal (Pb)* (Thesis, Universitas Islam Indonesia).
- Hazaimah, M. D., & Ahmed, E. S. (2021). Bioremediation perspectives and progress in petroleum pollution in the marine environment: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(39), 54238-54259.
- Helmy, Q., & Kardena, E. (2024). Enhancing field-scale bioremediation of weathered petroleum oil-contaminated soil with biocompost as a bulking agent. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100735.
- Hussain, A., Rehman, F., Rafeeq, H., Waqas, M., Asghar, A., Afsheen, N., ... & Iqbal, H. M. (2022). In-situ, Ex-situ, and nano-remediation strategies to treat polluted soil, water, and air—A review. *Chemosphere*, 289, 133252.
- Irfan, S., Ranjha, M. M. A. N., Shafique, B., Ullah, M. I., Siddiqui, A. R., & Wang, L. (2022). Bioremediation of soil: an overview. *Advances in Bioremediation and Phytoremediation for Sustainable Soil Management: Principles, Monitoring and Remediation*, 1-16.
- Kareem, H. A., Riaz, S., Sadia, H., & Mehmood, R. (2023). Industrial waste, types, sources, pollution potential, and country-wise comparisons. In *Waste Problems and Management in Developing Countries* (pp. 169-203). Apple Academic Press.
- Koch, N., Islam, N. F., Sonowal, S., Prasad, R., & Sarma, H. (2021). Environmental antibiotics and resistance genes as emerging contaminants: methods of detection and bioremediation. *Current research in microbial sciences*, 2, 100027.
- Kumar, V., & Dwivedi, S. K. (2021). Mycoremediation of heavy metals: processes, mechanisms, and affecting factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(9), 10375-10412.
- Kumar, V., Thakur, I. S., & Shah, M. P. (2020). Bioremediation approaches for treatment of pulp and paper industry wastewater: Recent advances and challenges. *Microbial bioremediation & biodegradation*, 1-48.
- Kundu, A., Harrison, O., & Ghoshal, S. (2022). Evaluating the impact of nutrient doses on biostimulation of petroleum hydrocarbon biodegradation in cold region soils. *ACS ES&T Engineering*, 2(12), 2287-2300.
- Kusumaningtyas, D., Sulistyowati, L., & Djauhari, S. (2021). Pemanfaatan khamir sebagai bioremediator fungisida berbahan aktif mankozeb. *Jurnal HPT (Hama Penyakit Tumbuhan)*, 9(3), 85-95.
- López, A. M. Q., & dos Santos Silva, A. L. (2023). Biostimulation and Bioaugmentation: Case Studies. *Genomics Approach to Bioremediation: Principles, Tools, and Emerging Technologies*, 53-68.
- Mansouri, A., Cregut, M., Jouanneau, S., Abbes, C., Landoulsi, A., Thouand, G., & Durand, M. J. (2022). Evaluation of Biomonitoring Strategies to Assess Performance of a Bioremediation Bioprocess. *Sustainability*, 14(17), 10932.
- Muhammad, M., Batool, S., Hivare, V., Li, W. J., Waheed, A., & Sinha, D. (2024). Bioremediation techniques—classification, principles, advantages, limitations, and prospects. In *Microbiome-assisted bioremediation* (pp. 1-23). Academic Press.
- Muter, O. (2023). Current trends in bioaugmentation tools for bioremediation: a critical review of advances and knowledge gaps. *Microorganisms*, 11(3), 710.
- Noverita, N., Ratnaningtyas, N. I., Sukara, E., Ekowati, N., & Lestari, S. (2023). Tinjauan Biosorpsi Logam Berat Pb dan Cd Oleh Jamur Makro. *Al-Kauniyah: Jurnal Biologi*, 16(2), 309-326.
- Pandolfo, E., Barra Caracciolo, A., & Rolando, L. (2023). Recent advances in bacterial degradation of hydrocarbons. *Water*, 15(2), 375.
- Paul, O., Jasu, A., Lahiri, D., Nag, M., & Ray, R. R. (2021). In situ and ex situ bioremediation of heavy metals: the present scenario. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 29(4), 454-469.
- Peraturan Menteri LHK No. P.56/Menlhk-Setjen/2015 tentang Tata Cara dan Persyaratan Teknis Pengelolaan Limbah B3 dari Fasilitas Pelayanan Kesehatan
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 1 Tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan Dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup
- Perez-Vazquez, A., Barciela, P., & Prieto, M. A. (2024). In situ and ex situ bioremediation of different persistent soil pollutants as agroecology tool. *Processes*, 12(10), 2223.
- Pertamina, 2023. Bioremediasi. <https://onesolution.pertamina.com/Insight/Page/Pengertian-Bioremediasi-adalah>
- Romantschuk, M., Lahti-Leikas, K., Kontro, M., Galitskaya, P., Talvenmäki, H., Simpanen, S., ... & Sinkkonen, A. (2023). Bioremediation of contaminated soil and groundwater by in situ biostimulation. *Frontiers in microbiology*, 14, 1258148.
- Salaria, N., Kumar, A., Singh, S., Rajput, A., Shukla, M., & Tripathi, S. K. (2024). Biotreatability of industrial hazardous wastes. In *Zero Waste Management Technologies* (pp. 227-249). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Sayed, K., Baloo, L., & Sharma, N. K. (2021). Bioremediation of total petroleum hydrocarbons (TPH) by bioaugmentation and biostimulation in water with floating oil spill containment booms as bioreactor basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2226.
- Sharma, I. (2020). Bioremediation techniques for polluted environment: concept, advantages, limitations, and prospects. In *Trace metals in the environment*

new approaches and recent advances.

IntechOpen.

Yakimov, M. M., Bargiela, R., & Golyshin, P. N. (2022). Calm and Frenzy: marine obligate hydrocarbonoclastic bacteria sustain ocean wellness. *Current Opinion in Biotechnology*, 73, 337-345.