



Review: Pemanfaatan Bakteri untuk Bioremediasi Logam Berat Pb, Cd dan Hg di Lingkungan Perairan

Review: Utilization of Bacteria for Bioremediation of Heavy Metals Pb, Cd and Hg in Aquatic Environments

Arif Yulianto^{1*}, Khothoh Syuraikhanah²

¹Program Studi Magister Sumberdaya Akuatik, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Jl. Profesor DR. HR Boenyamin No. 708, Purwokerto, Jawa Tengah 53122 Indonesia

¹Dinas Perikanan dan Peternakan Kabupaten Banyumas, Jl. Jenderal Gatot Soebroto No. 108, Purwokerto, Jawa Tengah 53116 Indonesia

²Balai Riset Perikanan Budidaya Air Tawar dan Penyuluhan Perikanan, Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jl. Sempur No. 1, Bogor, Jawa Barat 16129 Indonesia

**Corresponding author, e-mail: arif.yulianto@mhs.unsoed.ac.id*

Diterima: 01 April 2025, Disetujui 20 Juni 2025

ABSTRAK.

Pencemaran logam berat di lingkungan perairan merupakan masalah lingkungan yang semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan industri, pertambangan, dan aktivitas antropogenik lainnya. Logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg) bersifat toksik, persisten, dan dapat terakumulasi dalam jaringan organisme hidup, sehingga membahayakan kesehatan ekosistem dan manusia. Upaya penanggulangan pencemaran logam berat dengan metode fisik dan kimia seringkali tidak ramah lingkungan serta mahal, sehingga diperlukan alternatif yang lebih efektif dan berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah bioremediasi menggunakan bakteri, yang mampu mereduksi dan menetralkan logam berat melalui berbagai mekanisme biologis. Artikel ini mereview potensi pemanfaatan bakteri dalam proses bioremediasi logam berat Pb, Cd, dan Hg di lingkungan perairan berdasarkan hasil-hasil penelitian terbaru. Dibahas pula mekanisme kerja bakteri dalam mereduksi logam berat, seperti biosorpsi, bioakumulasi, dan biotransformasi, serta faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi efektivitasnya. Selain itu, disajikan studi-studi kasus dari berbagai perairan tercemar di Indonesia untuk menggambarkan aplikasi nyata dari pendekatan ini. Di akhir artikel, dikemukakan tantangan serta prospek ke depan dalam penerapan teknologi bioremediasi berbasis bakteri sebagai solusi pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

Kata kunci: Bioremediasi, Bakteri, Logam Berat, Timbal (Pb), Kadmium (Cd), Merkuri (Hg), Lingkungan Perairan

ABSTRACT

Heavy metal pollution in aquatic environments is an increasing environmental problem along with the growth of industry, mining, and other anthropogenic activities. Heavy metals such as lead (Pb), cadmium (Cd), and mercury (Hg) are toxic, persistent, and can accumulate in the tissues of living organisms, thus endangering the health of ecosystems and humans. Efforts to overcome heavy metal pollution with physical and chemical methods are often environmentally unfriendly and expensive, so more effective and sustainable alternatives are needed. One promising approach is bioremediation using bacteria, which are able to reduce and neutralize heavy metals through various biological mechanisms. This article reviews the potential use of bacteria in the bioremediation process of heavy metals Pb, Cd, and Hg in aquatic environments based on the results of recent studies. The working mechanisms of bacteria in reducing heavy metals, such as biosorption, bioaccumulation, and biotransformation, as well as environmental factors that influence their effectiveness, are also discussed. In addition, case studies from various polluted waters in Indonesia are presented to illustrate the real application of this approach. At the end of the article, the challenges and future prospects in the application of bacteria-based bioremediation technology as a solution for sustainable environmental management are presented.

Keywords: Bioremediation, Bacteria, Heavy Metals, Lead (Pb), Cadmium (Cd), Mercury (Hg), Aquatic Environment

PENDAHULUAN

Pencemaran logam berat di lingkungan perairan merupakan isu global yang terus meningkat seiring bertambahnya aktivitas antropogenik seperti industri, pertambangan, pertanian, dan pembuangan limbah domestik. Logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg) adalah polutan berbahaya karena sifatnya yang toksik, non-biodegradable, dan mudah terakumulasi dalam tubuh organisme hidup (Rai et al., 2021).

Logam-logam ini dapat mencemari perairan melalui limpasan industri dan pertambangan yang tidak dikelola dengan baik. Merkuri, misalnya, banyak ditemukan di perairan sekitar wilayah pertambangan emas skala kecil (PESK) di Indonesia dan menyebabkan kerusakan sistem saraf pada manusia dan hewan (Utomo et al., 2022).

Kadmium seringkali berasal dari limbah industri galvanisasi dan baterai, sementara timbal berasal dari cat, pestisida, dan bahan bakar. Di lingkungan akuatik, logam ini dapat meracuni fitoplankton, zooplankton, ikan, dan

makroinvertebrata sehingga merusak keseimbangan ekosistem (Hasan et al., 2023).

Metode konvensional untuk mengatasi pencemaran logam berat meliputi presipitasi kimia, filtrasi, dan pertukaran ion. Namun, metode ini dinilai tidak efisien untuk skala besar dan sering menghasilkan residu berbahaya yang sulit dikelola (Tangahu et al., 2020).

Dalam dua dekade terakhir, bioremediasi mulai dikembangkan sebagai alternatif ramah lingkungan. Bioremediasi adalah proses menggunakan mikroorganisme untuk menguraikan atau menetralkan bahan pencemar, termasuk logam berat, menjadi bentuk yang tidak berbahaya (Gadd, 2022).

Salah satu agen bioremediasi yang potensial adalah bakteri. Beberapa jenis bakteri diketahui memiliki kemampuan mereduksi logam berat melalui mekanisme biosorpsi, bioakumulasi, dan biotransformasi (Gupta and Diwan, 2022). Proses ini melibatkan ikatan logam oleh dinding sel, pengumpulan di dalam sitoplasma, atau transformasi kimia menjadi bentuk yang tidak larut.

Studi oleh Ma'ruf (2024) di pesisir Kulon Progo mengungkapkan bahwa isolat bakteri *Pseudomonas* dan *Staphylococcus* mampu menurunkan kadar Cd hingga 47,73%. Ini menunjukkan bahwa bakteri indigenous di perairan tercemar dapat menjadi kandidat bioremediasi yang efektif.

Selain itu, penelitian Hutabarat dan Manurung (2023) di Sungai Batang Toru menunjukkan bahwa konsorsium bakteri *Bacillus* dan *Clostridium* mampu menurunkan kadar Hg hingga 94,44%. Efisiensi tinggi ini menunjukkan bahwa pendekatan biologis dapat mengungguli metode kimiawi dalam kondisi tertentu.

Penambahan bakteri dalam bentuk biofilm juga semakin populer karena biofilm memiliki permukaan aktif yang luas dan memberikan perlindungan terhadap fluktuasi lingkungan. Rahman et al. (2022) menjelaskan bahwa biofilm memperkuat kemampuan bakteri dalam menyerap logam berat.

Selain isolat bakteri tunggal, pendekatan menggunakan konsorsium mikroba seperti kombinasi bakteri dan mikroalga juga terbukti efektif. Penelitian oleh Maqbool et al. (2023) menunjukkan bahwa konsorsium *Cladophora glomerata* dan *Bacillus pakistanensis* secara signifikan menurunkan kadar Pb dan Cd dalam limbah cair industri.

Meski menjanjikan, masih ada tantangan yang harus dihadapi dalam

mikroorganisme lain, serta efisiensi dalam skala lapangan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan untuk isolasi, karakterisasi, dan optimalisasi kultur bakteri sangat diperlukan (Pérez-Calderón et al., 2023).

Dengan mempertimbangkan kompleksitas masalah dan potensi teknologi biologis, artikel ini bertujuan untuk mengulas secara mendalam pemanfaatan bakteri dalam bioremediasi logam berat Pb, Cd, dan Hg di lingkungan perairan. Pembahasan akan difokuskan pada mekanisme kerja bakteri, efektivitas berbagai isolat, serta studi kasus dari berbagai wilayah yang mengalami pencemaran logam berat.

ISI/USULAN

Dampak Logam Berat di Lingkungan Perairan

Logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg) termasuk ke dalam kontaminan prioritas dalam ekosistem perairan karena bersifat toksik, persisten, dan tidak dapat terdegradasi secara alami. Keberadaannya di perairan tidak hanya mengganggu kehidupan biota akuatik tetapi juga membahayakan kesehatan manusia jika terakumulasi melalui rantai makanan (Rai et al., 2021). Konsentrasi logam berat yang tinggi umumnya ditemukan di sungai dan danau yang berada di dekat kawasan industri, pertambangan, dan area pertanian intensif.

Tabel 1. Batasan konsentrasi atas logam berat dalam air menurut WHO dan USEPA (Abo-Alkasem et al., 2023)

Logam Berat	Simbol	WHO ($\mu\text{g L}^{-1}$)	USEPA ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Timbal	Pb	10	15
Merkuri	Hg	1	2
Kadmium	Cd	3	5

aplikasi bioremediasi berbasis bakteri, seperti ketahanan bakteri terhadap lingkungan ekstrem, kompetisi

Di lingkungan perairan, logam berat dapat mengganggu fungsi fisiologis dan biokimia organisme akuatik. Misalnya, Pb

dan Cd dapat menggantikan ion kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) yang penting dalam sistem enzim dan metabolisme, sehingga menurunkan efisiensi fotosintesis pada fitoplankton serta menyebabkan kerusakan jaringan pada ikan (Hasan et al., 2023). Logam berat juga dapat menghambat pertumbuhan dan reproduksi organisme seperti udang dan kerang.

Salah satu efek paling nyata dari pencemaran logam berat adalah gangguan terhadap keanekaragaman hayati di perairan. Beberapa spesies sensitif akan punah, sementara spesies tahan logam (metal-tolerant species) akan mendominasi, menyebabkan ketidakseimbangan ekosistem. Penurunan indeks keanekaragaman Shannon-Wiener ditemukan pada sungai tercemar Cd di Vietnam dan Indonesia, menunjukkan stres ekologis yang signifikan (Nguyen et al., 2022).

Logam berat juga dapat terakumulasi dalam tubuh organisme melalui proses bioakumulasi dan biomagnifikasi. Sebagai contoh, merkuri dalam bentuk metilmerkuri (MeHg) sangat mudah diserap oleh plankton, dan selanjutnya meningkat konsentrasinya pada ikan predator seperti gabus, lele, dan kakap. Ini membahayakan manusia sebagai konsumen puncak karena metilmerkuri bersifat neurotoksik (Sulaiman et al., 2023).

Selain dampak biologis, keberadaan logam berat di perairan juga dapat menurunkan kualitas air secara fisik dan kimia, seperti perubahan pH, penurunan kadar oksigen terlarut (DO), dan peningkatan konduktivitas listrik. Hal ini menyebabkan perairan menjadi tidak layak untuk digunakan sebagai sumber air bersih, perikanan, maupun kegiatan rekreasi (Tangahu et al., 2020).

Dalam jangka panjang, kontaminasi logam berat di perairan berdampak serius pada sektor ekonomi perikanan. Penurunan kualitas ikan dan hasil laut lainnya membuat produk perikanan dari kawasan tercemar tidak layak konsumsi dan tidak memenuhi standar ekspor, sebagaimana dilaporkan pada studi kasus perikanan di Teluk Jakarta dan Pantai Gresik (Widiyanto et al., 2021).

Paparan kronis terhadap logam berat melalui konsumsi ikan atau air tercemar telah dikaitkan dengan berbagai masalah kesehatan manusia. Cd diketahui menyebabkan kerusakan ginjal dan penyakit itai-itai, Pb berdampak pada sistem saraf dan perkembangan anak, sementara Hg menyebabkan gangguan fungsi otak dan gangguan sistem endokrin (WHO, 2023). Ini menunjukkan bahwa pencemaran logam berat bukan hanya isu ekologis, tetapi juga isu kesehatan masyarakat.

Oleh karena itu, pemantauan kualitas air dan deteksi dini terhadap logam berat sangat penting untuk mitigasi dan pengendalian pencemaran. Beberapa pendekatan baru seperti biosensor berbasis mikroba dan teknik penginderaan jauh telah dikembangkan untuk memetakan pencemaran secara real-time. Selain itu, pendekatan bio-remediasi menjadi solusi yang menjanjikan karena lebih ramah lingkungan dibandingkan metode kimia (Gupta and Diwan, 2022).

Bioremediasi: Konsep dan Mekanisme

Bioremediasi adalah suatu pendekatan pemulihan lingkungan dengan memanfaatkan mikroorganisme, tumbuhan, atau enzim biologis untuk mendetoksifikasi atau menguraikan polutan berbahaya menjadi senyawa yang tidak beracun. Konsep ini berkembang sebagai solusi alternatif terhadap metode konvensional yang mahal dan dapat

menyebabkan pencemaran sekunder (Gadd, 2022).

Keunggulan utama bioremediasi adalah prosesnya yang alami, berkelanjutan, dan ramah lingkungan, sehingga sangat sesuai untuk penanganan pencemaran logam berat di lingkungan perairan. Mikroorganisme, terutama bakteri, mampu beradaptasi dengan kondisi ekstrem dan mengembangkan mekanisme spesifik untuk bertahan dari toksisitas logam (Gupta and Diwan, 2022).

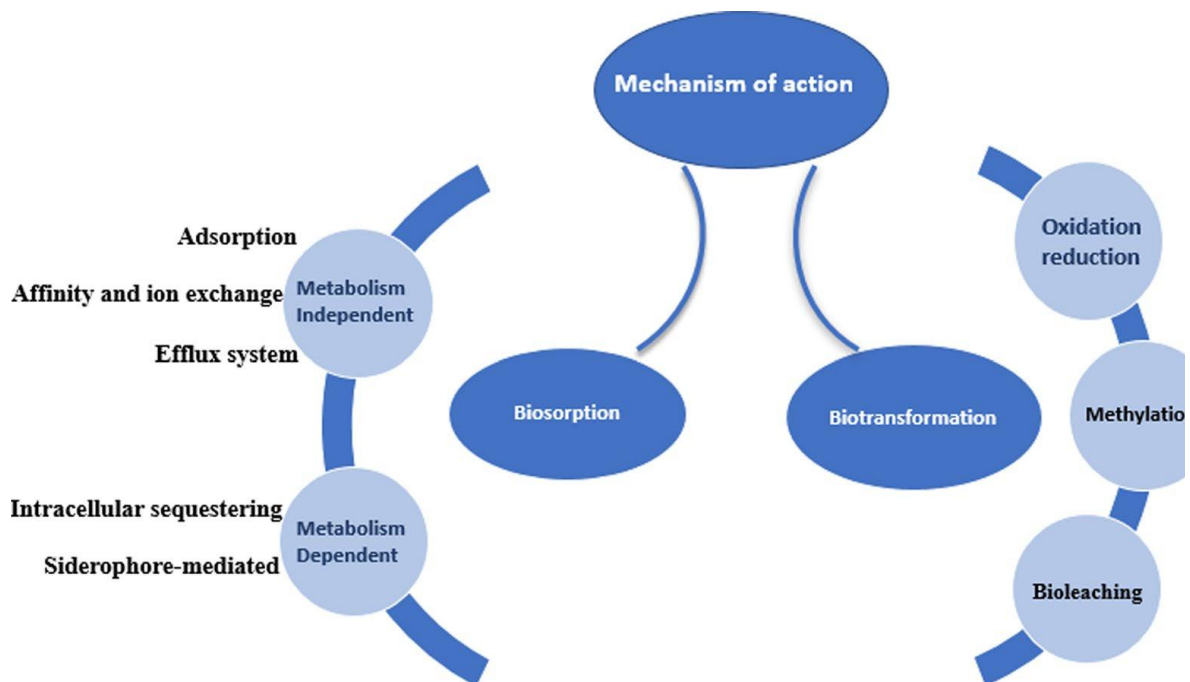
Mekanisme utama dalam bioremediasi logam berat oleh bakteri meliputi biosorpsi, bioakumulasi, biotransformasi, dan biopresipitasi. Biosorpsi adalah proses pasif di mana logam berat menempel pada permukaan sel bakteri melalui interaksi dengan gugus fungsional seperti karboksil, hidroksil, dan amino (Maqbool et al., 2023).

Dalam bioakumulasi, logam berat

dan disimpan di organel tertentu, biasanya dalam bentuk senyawa kompleks untuk mengurangi toksisitasnya. Proses ini bersifat aktif dan memerlukan energi dari metabolisme sel (Sinha et al., 2022).

Biotransformasi mengacu pada perubahan bentuk kimia logam berat melalui aktivitas enzimatik bakteri. Contohnya, bakteri dapat mereduksi ion merkuri (Hg^{2+}) menjadi bentuk elementer Hg^0 yang kurang toksik dan mudah menguap, atau mengubah Cr(VI) yang sangat toksik menjadi Cr(III) yang lebih stabil (Yadav et al., 2023).

Mekanisme lain yang penting adalah biopresipitasi, di mana mikroorganisme menginduksi pengendapan logam berat dalam bentuk senyawa tidak larut seperti sulfid, karbonat, atau fosfat. Hal ini menurunkan mobilitas dan ketersediaan biologis logam dalam air, sehingga menurunkan risiko toksisitas (Li



Gambar 1. Diagram yang menunjukkan berbagai mekanisme bioremediasi (Abo-Alkasem et al., 2023)

tidak hanya menempel di permukaan sel, tetapi juga diangkut masuk ke dalam sel

et al., 2023).

Peran biofilm dalam proses bioremediasi juga tidak dapat diabaikan. Biofilm adalah koloni bakteri yang hidup dalam matriks polimer ekstraseluler. Struktur ini melindungi bakteri dari kondisi lingkungan yang ekstrem dan meningkatkan efisiensi penyerapan logam berat karena luas permukaannya yang besar (Rahman et al., 2022).

Tidak semua mikroorganisme mampu melakukan bioremediasi. Oleh karena itu, dilakukan seleksi terhadap bakteri yang toleran terhadap logam berat. Beberapa genera yang telah terbukti efektif termasuk *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, dan *Enterobacter* (Asmarawati et al., 2021; Hutabarat dan Manurung, 2023).

Penggunaan konsorsium bakteri atau gabungan beberapa jenis bakteri juga menjadi strategi untuk meningkatkan efektivitas bioremediasi. Konsorsium memungkinkan adanya sinergi dalam metabolisme dan toleransi terhadap berbagai jenis logam berat secara simultan (Nguyen et al., 2022).

Aplikasi bioremediasi dapat dilakukan secara *in situ* (langsung di lokasi tercemar) atau *ex situ* (mengangkut air tercemar ke tempat lain). Bioremediasi *in situ* lebih hemat biaya dan tidak merusak lingkungan, namun memerlukan pengendalian kondisi lingkungan seperti pH, suhu, dan ketersediaan nutrisi (Tangahu et al., 2020).

Untuk meningkatkan efisiensi, beberapa teknologi pendukung mulai dikembangkan, seperti rekayasa genetika bakteri untuk memperkuat kemampuan mereka dalam menyerap dan mentransformasi logam berat, serta integrasi dengan nanoteknologi untuk meningkatkan laju biosorpsi melalui peningkatan luas permukaan (Kumar et al., 2024).

Meski menjanjikan, tantangan dalam penerapan bioremediasi masih ada, terutama pada keberlanjutan populasi mikroba, adaptasi terhadap kondisi lapangan, dan skala aplikasi. Oleh karena itu, pendekatan interdisipliner antara mikrobiologi, teknik lingkungan, dan teknologi industri sangat dibutuhkan untuk menyukseskan implementasi bioremediasi di ekosistem perairan yang tercemar logam berat (Pérez-Calderón et al., 2023).

Bakteri untuk Bioremediasi Logam Berat

Mikroorganisme, khususnya bakteri, telah dikenal luas sebagai agen bioremediasi yang efektif untuk mengatasi pencemaran logam berat di lingkungan perairan. Kemampuan ini disebabkan oleh adaptasi fisiologis dan genetik yang memungkinkan bakteri bertahan dan memodifikasi logam berat menjadi bentuk yang kurang toksik. Bakteri dapat melakukan proses biosorpsi, bioakumulasi, biotransformasi, dan biopresipitasi terhadap logam seperti Pb, Cd, dan Hg, yang merupakan logam berat paling umum mencemari lingkungan (Gupta and Diwan, 2022; Gadd, 2022).

Beberapa genus bakteri yang telah teridentifikasi memiliki kemampuan tinggi dalam bioremediasi logam berat antara lain *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Acinetobacter*, dan *Shewanella*. *Pseudomonas aeruginosa*, misalnya, mampu menyerap dan mentransformasi ion Cd^{2+} melalui ekspresi protein logam spesifik dan eksopolisakarida (EPS) yang berperan dalam pengikatan logam (Sinha et al., 2022). Sementara itu, *Enterobacter cloacae* telah diteliti mampu mereduksi ion merkuri (Hg^{2+}) menjadi bentuk non-toksik Hg^0 secara efisien dalam kondisi aerobik (Hutabarat dan Manurung, 2023).

Studi terbaru juga menunjukkan bahwa penggunaan konsorsium bakteri,

yakni kombinasi beberapa jenis bakteri dalam satu sistem, menghasilkan efektivitas lebih tinggi dibandingkan isolat tunggal. Konsorsium memberikan sinergi melalui mekanisme detoksifikasi yang lebih kompleks dan kemampuan bertahan dalam lingkungan tercemar yang beragam. Penelitian oleh Nguyen et al. (2022) melaporkan bahwa konsorsium *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas putida* mampu mereduksi kadar Pb hingga 85% dalam air limbah industri dalam waktu 48 jam.

Untuk meningkatkan efektivitas bioremediasi, pendekatan bioengineering dan teknologi molekuler juga mulai diterapkan. Melalui rekayasa genetika, gen toleransi logam dapat ditingkatkan atau ditransfer ke strain bakteri unggul. Contohnya adalah modifikasi gen *merA* pada *Escherichia coli* untuk meningkatkan kemampuan detoksifikasi merkuri (Yadav et al., 2023). Selain itu, pendekatan integratif dengan penggunaan bahan pendukung seperti zeolit, biochar, dan nanopartikel juga dilaporkan mampu meningkatkan kapasitas biosorpsi permukaan sel bakteri (Kumar et al., 2024).

- **Pb (Timbal)**

Timbal (Pb) merupakan salah satu logam berat yang sangat beracun dan persisten di lingkungan, terutama di perairan yang terkontaminasi limbah industri baterai, cat, dan pertambangan. Timbal bersifat non-biodegradable dan dapat terakumulasi dalam jaringan organisme akuatik serta merusak sistem saraf dan reproduksi. Oleh karena itu, pencemaran Pb menjadi perhatian utama dalam pengelolaan kualitas lingkungan perairan (Gupta and Diwan, 2022). Untuk menanggulangi dampak ini, pendekatan bioremediasi menggunakan bakteri telah banyak diteliti karena kemampuannya yang efektif dan ramah lingkungan.

Beberapa spesies bakteri telah diidentifikasi memiliki kemampuan tinggi dalam mengadsorpsi dan mentransformasi ion Pb^{2+} . *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis*, misalnya, diketahui mampu menurunkan kadar Pb melalui mekanisme biosorpsi dan pembentukan kompleks Pb-biomolekul pada permukaan sel (Rahman et al., 2022). Bakteri tersebut memiliki dinding sel yang kaya akan gugus karboksil, hidroksil, dan amino, yang dapat mengikat ion logam berat secara efisien.

Selain biosorpsi, beberapa bakteri juga mampu melakukan bioakumulasi Pb^{2+} secara intraseluler. *Enterobacter cloacae*, misalnya, dapat menyerap Pb ke dalam sel dan menyimpannya dalam bentuk yang kurang toksik. Penelitian terbaru oleh Hutabarat dan Manurung (2023) menunjukkan bahwa isolat *E. cloacae* dari sungai tercemar berhasil mengurangi konsentrasi Pb hingga 80% dalam waktu 72 jam. Kemampuan ini diperkuat oleh produksi eksopolisakarida (EPS) yang berperan sebagai pelindung dan penyerap ion logam.

Studi terbaru juga mengeksplorasi penggunaan konsorsium bakteri dalam bioremediasi Pb. Gabungan antara *Bacillus megaterium* dan *Pseudomonas fluorescens* terbukti memiliki kemampuan sinergis dalam menurunkan kadar Pb di lingkungan perairan limbah tambang. Menurut penelitian oleh Sharma et al. (2023), konsorsium tersebut dapat mengurangi Pb hingga 92% dalam skala laboratorium, terutama karena diferensiasi peran masing-masing bakteri dalam proses biosorpsi dan presipitasi logam.

Dalam upaya meningkatkan efektivitas bioremediasi Pb, pendekatan modern seperti rekayasa genetika mulai diterapkan untuk meningkatkan ekspresi gen penyandi protein pengikat logam. Misalnya, penguatan ekspresi gen *pbrA*,

yang berperan dalam toleransi dan resistensi terhadap Pb, telah diterapkan pada strain *E. coli* rekombinan (Yadav et al., 2023). Inovasi ini diharapkan dapat mempercepat proses detoksifikasi timbal di lingkungan perairan tercemar dan membuka peluang aplikasi skala industri yang lebih luas.

- **Hg (Merkuri)**

Merkuri (Hg) merupakan salah satu logam berat paling toksik dan berbahaya bagi ekosistem perairan. Dalam bentuk ionik seperti Hg^{2+} , merkuri bersifat sangat reaktif, dapat terakumulasi di rantai makanan, dan menyebabkan kerusakan sistem saraf, ginjal, serta gangguan perkembangan pada organisme hidup, termasuk manusia. Kontaminasi merkuri di lingkungan perairan umumnya berasal dari limbah industri klorin-alkali, pertambangan emas skala kecil, dan pembakaran batu bara (UNEP, 2022). Oleh karena itu, penggunaan bakteri sebagai agen bioremediasi menjadi solusi penting untuk mitigasi pencemaran ini.

Beberapa bakteri telah teridentifikasi memiliki kemampuan mereduksi Hg^{2+} menjadi bentuk elemental Hg^0 , yang volatil dan kurang toksik. Proses ini biasanya melibatkan ekspresi gen *merA* (mercuric reductase), bagian dari operon *mer*, yang umum ditemukan pada bakteri seperti *Pseudomonas putida*, *Enterobacter cloacae*, dan *Bacillus cereus*. Penelitian oleh Prasad et al. (2023) menunjukkan bahwa isolat *B. cereus* dari sedimen tercemar merkuri mampu mereduksi lebih dari 90% Hg^{2+} dalam waktu 48 jam.

Mekanisme bioremediasi merkuri oleh bakteri umumnya melibatkan dua tahap utama: pertama, pengikatan ion Hg^{2+} oleh dinding sel atau eksopolisakarida (EPS), dan kedua, transformasi enzimatis melalui aktivitas *merA*. Selain itu, beberapa

bakteri juga mengandung gen *merB* yang mampu mendegradasi senyawa organomercuri menjadi Hg^{2+} sebelum direduksi menjadi Hg^0 (Sinha et al., 2022). Keberadaan sistem detoksifikasi ini membuat bakteri sangat adaptif terhadap kondisi lingkungan ekstrem yang terkontaminasi merkuri.

Studi terbaru juga menunjukkan bahwa penggunaan biofilm bakteri dapat meningkatkan efisiensi bioremediasi merkuri. Biofilm yang dihasilkan oleh *Pseudomonas fluorescens*, misalnya, memberikan perlindungan struktural dan meningkatkan kapasitas biosorpsi permukaan terhadap ion Hg^{2+} (Rathore et al., 2022). Selain itu, penggunaan konsorsium bakteri yang membentuk biofilm terbukti lebih stabil dan tahan terhadap fluktuasi pH dan konsentrasi logam berat di lingkungan nyata.

Untuk mendukung aplikasi skala lapangan, pendekatan rekayasa genetika juga mulai diterapkan, seperti penggabungan gen *merA* dan *merB* ke dalam plasmid bakteri pengakumulasi logam. Hal ini telah dilakukan pada strain *E. coli* dan *Shewanella oneidensis*, yang menunjukkan peningkatan toleransi serta efisiensi detoksifikasi merkuri dalam reaktor bioremediasi (Yadav et al., 2023). Dengan kemajuan ini, penggunaan bakteri untuk remediasi merkuri di lingkungan perairan menjadi semakin prospektif dalam pengelolaan limbah berbahaya secara berkelanjutan.

- **Cd (Kadmium)**

Kadmium (Cd) merupakan salah satu logam berat yang sangat beracun, meskipun penggunaannya masih banyak ditemukan dalam industri galvanisasi, baterai, cat, dan plastik. Kadmium tidak

Tabel 2. Bakteri untuk Bioremediasi Logam Berat Pb, Hg, dan Cd

Logam Berat	Bakteri	Mekanisme Bioremediasi	Sumber Isolasi	Sumber Literatur
Pb (Timbal)	<i>Bacillus subtilis</i>	Biosorpsi, presipitasi	Tanah tercemar logam	Rahman <i>et al.</i> , 2022 – <i>Frontiers in Microbiology</i>
	<i>Pseudomonas putida</i>	Bioakumulasi, toleransi enzimatik	Limbah industri	Pérez-Calderón <i>et al.</i> , 2023 – <i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i>
	<i>Bacillus tropicus</i>	Biosorpsi aktif dan pasif	Sedimen mangrove (Semarang)	Studi kasus – Tapak, Semarang
Hg (Merkuri)	<i>Bacillus megaterium</i>	Reduksi ion Hg^{2+} menjadi Hg^0	Sedimen tercemar Hg	Utomo <i>et al.</i> , 2022 – <i>Jurnal Riset Lingkungan</i>
	<i>Acinetobacter sp.</i>	Enzimatis (mer operon), bioakumulasi	Sungai Batang Toru	Hutabarat dan Manurung, 2023 – <i>Spizaetus</i>
	<i>Shewanella oneidensis</i>	Transformasi redoks Hg melalui transfer elektron	Ekosistem laut	Maqbool <i>et al.</i> , 2023 – <i>Sustainability</i>
Cd (Kadmium)	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Bioakumulasi, pembentukan eksopolisakarida (EPS)	Air limbah	Maqbool <i>et al.</i> , 2023 – <i>Sustainability</i>
	<i>Enterobacter cloacae</i>	Resistensi cadmium via biofilm	Limbah tambang	Rai <i>et al.</i> , 2021 – <i>Environmental Technology and Innovation</i>
	<i>Bacillus cereus</i>	Biopresipitasi ion Cd	Tanah tambang	Tangahu <i>et al.</i> , 2020 – <i>J. Environmental Engineering and Science</i>

memiliki fungsi biologis dalam organisme dan bersifat karsinogenik, nefrotoksik, serta mampu mengganggu proses metabolisme tanaman dan hewan air pada konsentrasi rendah (WHO, 2022). Ketika kadmium masuk ke ekosistem perairan, ia dapat terakumulasi dalam sedimen dan organisme akuatik sehingga menimbulkan bioakumulasi di rantai makanan. Karena itu, diperlukan teknologi pemulihan lingkungan yang efisien dan ramah lingkungan, seperti bioremediasi menggunakan bakteri.

Beberapa spesies bakteri telah terbukti mampu mengikat dan mengakumulasi ion Cd^{2+} melalui proses biosorpsi dan bioakumulasi. *Pseudomonas putida*, *Bacillus thuringiensis*, dan *Microbacterium sp.* adalah contoh bakteri yang memiliki dinding sel dengan gugus fungsional seperti fosfat, karboksilat, dan amino, yang dapat mengikat kadmium secara elektrostatik (Jaiswal *et al.*, 2023). Biosorpsi biasanya berlangsung pada permukaan sel, sementara bioakumulasi melibatkan transport aktif Cd^{2+} ke dalam sel

bakteri yang kemudian dinetralkan oleh protein metalotionein atau kompleks logam-poliipeptida.

Penelitian oleh Takarina dan Mulyani (2023) menunjukkan bahwa isolat bakteri dari perairan Teluk Jakarta yang terpapar limbah industri menunjukkan kemampuan toleransi dan remediasi terhadap kadmium. Salah satu isolat unggulan dari genus *Bacillus* mampu menurunkan konsentrasi Cd^{2+} hingga 75% dalam media cair dalam waktu 72 jam. Kemampuan ini diyakini berkaitan dengan produksi eksopolisakarida (EPS) yang tinggi, yang meningkatkan kapasitas pengikatan logam berat di lingkungan ekstrem.

Selain itu, penggunaan biofilm bakteri menjadi pendekatan yang menjanjikan dalam bioremediasi kadmium. Biofilm meningkatkan efisiensi penyerapan logam dengan menciptakan lingkungan mikro yang stabil, memungkinkan bakteri bertahan lebih lama dan bekerja lebih efektif. *Pseudomonas fluorescens* dalam bentuk biofilm dilaporkan memiliki kapasitas penyerapan Cd yang lebih tinggi dibandingkan sel planktonik, berkat lapisan EPS yang tebal dan perlindungan terhadap stres oksidatif (Zhang et al., 2022).

Pengembangan teknologi rekayasa genetika juga telah dimanfaatkan untuk meningkatkan kemampuan detoksifikasi Cd oleh bakteri. Salah satu strategi adalah dengan memperkuat ekspresi gen *czcA*, *czcB*, dan *czcC*, yaitu gen yang mengode pompa efflux logam berat, sehingga memungkinkan bakteri membuang ion Cd^{2+} dari dalam sel secara efisien (Gao et al., 2023). Bakteri hasil rekayasa ini menunjukkan peningkatan resistensi hingga dua kali lipat dibandingkan strain alami.

Untuk aplikasi di lapangan, pendekatan penggunaan konsorsium

bakteri yang terdiri atas beberapa strain dengan mekanisme bioremediasi berbeda telah dilaporkan sangat efektif dalam menurunkan konsentrasi Cd di air limbah industri logam. Menurut penelitian oleh Park et al. (2023), konsorsium *Bacillus subtilis*, *Enterobacter cloacae*, dan *Pseudomonas aeruginosa* berhasil menurunkan kadar Cd hingga 90% dalam sistem bioreaktor anaerobik. Kombinasi kemampuan biosorpsi, bioakumulasi, dan transformasi kimia menjadikan pendekatan ini sangat adaptif terhadap berbagai kondisi lingkungan.

Studi Kasus di Indonesia

Sungai Batang Toru: Isolasi Bakteri Indigenous yang Efektif dalam Mereduksi Pb dan Hg

Sungai Batang Toru, yang terletak di Sumatera Utara, merupakan kawasan strategis yang menopang kehidupan masyarakat sekitar, terutama dalam sektor pertanian, perikanan, dan domestik. Namun, meningkatnya aktivitas industri, pertambangan emas, dan penggunaan pestisida di sekitar kawasan tersebut menyebabkan kontaminasi logam berat, khususnya Pb (timbal) dan Hg (merkuri). Berdasarkan penelitian Hutabarat dan Manurung (2023), kadar Hg dan Pb di beberapa titik Sungai Batang Toru telah melebihi baku mutu yang ditetapkan oleh Peraturan Pemerintah RI No. 22 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Air Limbah.

Untuk menanggulangi pencemaran tersebut, dilakukan studi isolasi dan karakterisasi bakteri indigenous yang berasal dari sedimen dan air Sungai Batang Toru. Isolasi ini penting karena mikroorganisme lokal memiliki adaptasi genetik terhadap lingkungan ekstrem dan cenderung lebih efektif dalam proses bioremediasi. Berdasarkan hasil isolasi awal, ditemukan beberapa genus bakteri

potensial, seperti *Enterobacter cloacae*, *Bacillus cereus*, dan *Pseudomonas putida*, yang menunjukkan toleransi tinggi terhadap logam berat dan kemampuan mereduksi Pb dan Hg secara signifikan (Hutabarat dan Manurung, 2023).

Uji laboratorium menunjukkan bahwa isolat *E. cloacae* mampu menurunkan konsentrasi Hg hingga 85% dalam waktu 72 jam melalui mekanisme enzimatik yang melibatkan gen *merA*. Di sisi lain, *B. cereus* efektif dalam mereduksi Pb melalui biosorpsi aktif pada dinding selnya yang kaya gugus fungsional, seperti fosfat dan karboksil (Nasution et al., 2022). Selain itu, hasil FTIR dan SEM-EDX menunjukkan bahwa logam berat terikat kuat pada permukaan sel bakteri, yang memperkuat bukti kemampuan adsorptif dan biotransformasi isolat tersebut.

Menariknya, kombinasi beberapa isolat dalam bentuk konsorsium bakteri menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan penggunaan tunggal. Dalam uji coba skala laboratorium, konsorsium *E. cloacae* dan *B. cereus* mampu mereduksi Pb hingga 90% dan Hg hingga 87% dalam media simulasi air sungai tercemar. Hal ini menunjukkan adanya efek sinergis, di mana masing-masing bakteri bekerja melalui mekanisme berbeda namun saling melengkapi, meningkatkan efektivitas proses bioremediasi (Saragih et al., 2024).

Dari aspek lingkungan, penggunaan bakteri indigenous untuk remediasi di Sungai Batang Toru sangat potensial karena pendekatan ini lebih berkelanjutan, tidak menimbulkan residu kimia, dan ramah terhadap biota lokal. Di sisi lain, pendekatan ini juga selaras dengan prinsip ekoteknologi, yaitu pemanfaatan potensi hayati lokal untuk menangani pencemaran tanpa merusak struktur ekologis wilayah tersebut. Oleh karena itu, hasil studi ini menjadi dasar

penting bagi pengembangan teknologi bioremediasi in-situ di wilayah tropis Indonesia (Gultom et al., 2024).

Ke depan, diperlukan pengembangan lebih lanjut berupa uji coba lapangan (pilot-scale), analisis stabilitas gen detoksifikasi pada bakteri, serta kajian interaksi antara bakteri dan sedimen atau biota air lokal. Dukungan dari pemerintah daerah dan masyarakat sangat dibutuhkan untuk mengimplementasikan teknologi ini secara luas. Jika berhasil, studi Sungai Batang Toru ini dapat menjadi model bioremediasi berbasis komunitas yang dapat diterapkan di sungai-sungai tercemar lainnya di Indonesia, khususnya di kawasan yang terdampak aktivitas pertambangan.

Mangrove Tapak, Semarang: Isolasi *Bacillus tropicus* yang toleran terhadap Pb dan Cu

Kawasan Mangrove Tapak di Semarang, Jawa Tengah, merupakan ekosistem pesisir yang penting secara ekologis karena menyediakan habitat bagi berbagai organisme dan berfungsi sebagai penyangga alami dari pencemaran perairan. Namun, kawasan ini semakin terancam oleh aktivitas antropogenik, seperti pembuangan limbah industri, rumah tangga, dan pertambangan, yang menyebabkan kontaminasi logam berat, terutama Pb (timbal) dan Cu (tembaga). Studi oleh Kusumawardani et al. (2023) melaporkan bahwa konsentrasi logam berat di kawasan Tapak telah melebihi ambang batas kualitas air berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan penelitian isolasi bakteri indigenous dari sedimen dan air mangrove. Salah satu isolat yang diidentifikasi adalah *Bacillus tropicus*, yang menunjukkan toleransi tinggi terhadap

logam berat Pb dan Cu. Berdasarkan karakterisasi morfologi, fisiologi, dan molekuler (16S rRNA), isolat ini memiliki kesamaan tinggi dengan *Bacillus tropicus* strain DSM 29276, yang diketahui memiliki kemampuan biosorpsi logam berat melalui dinding sel yang mengandung peptidoglikan dan eksopolisakarida (EPS) (Wahyudi et al., 2023).

Hasil uji resistensi menunjukkan bahwa *B. tropicus* mampu tumbuh pada media yang mengandung Pb hingga 150 ppm dan Cu hingga 100 ppm. Pengujian lebih lanjut terhadap kemampuan remediasi menunjukkan bahwa isolat ini dapat mereduksi konsentrasi Pb sebesar 78% dan Cu sebesar 65% dalam waktu 72 jam pada media buatan. Mekanisme utama yang terlibat dalam proses ini meliputi biosorpsi pasif, bioakumulasi, serta kemungkinan produksi protein metalotionein yang berperan dalam pengikatan ion logam di dalam sel (Prasetyo et al., 2024).

Keunggulan *B. tropicus* sebagai agen bioremediasi di lingkungan mangrove didukung oleh kemampuannya untuk bertahan dalam kondisi salinitas tinggi dan lingkungan yang fluktuatif. Selain itu, keberadaan mangrove memberikan kontribusi dalam menyediakan substrat organik yang mendukung pertumbuhan mikroba. Studi dari Zulkarnain et al. (2023) menunjukkan bahwa biofilm yang dibentuk oleh *B. tropicus* pada akar mangrove meningkatkan efisiensi remediasi hingga 20% lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa substrat alami.

Penemuan ini membuka peluang besar dalam pengembangan teknologi bioremediasi berbasis ekosistem lokal. Mengingat sifatnya yang alami dan berkelanjutan, pemanfaatan *B. tropicus* dalam skala lapangan dapat dilakukan melalui pendekatan fitoremediasi terpadu

dengan tanaman mangrove dan pengayaan bakteri. Kolaborasi antara pemerintah daerah, akademisi, dan masyarakat pesisir sangat dibutuhkan untuk menerapkan teknologi ini secara luas, sehingga kawasan seperti Tapak dapat direstorasi secara ekologis dan fungsional (Rahmawati dan Handayani, 2024).

Laut Banyu Urip, Gresik: Isolasi bakteri dari sedimen dan kerang hijau yang mampu menyerap Pb

Laut Banyu Urip di Kabupaten Gresik, Jawa Timur, merupakan salah satu wilayah pesisir yang terdampak oleh aktivitas industri dan pelabuhan, yang berkontribusi terhadap peningkatan kandungan logam berat dalam air laut, terutama timbal (Pb). Studi oleh Lestari et al. (2023) menunjukkan bahwa kadar Pb di kawasan ini melebihi ambang batas aman untuk biota laut dan konsumsi manusia. Hal ini menjadi ancaman serius bagi ekosistem, khususnya terhadap organisme filter feeder seperti *Perna viridis* (kerang hijau), yang berpotensi mengakumulasi logam berat dalam jaringan tubuhnya.

Dalam upaya mitigasi, dilakukan penelitian isolasi bakteri dari dua sumber utama: sedimen laut dan saluran pencernaan kerang hijau. Isolasi mikroorganisme dari kerang penting karena bakteri simbiotik yang hidup dalam tubuh kerang sering kali menunjukkan adaptasi yang unik terhadap polutan. Penelitian oleh Wicaksono et al. (2024) berhasil mengidentifikasi beberapa strain bakteri yang menunjukkan resistensi tinggi terhadap Pb, di antaranya *Bacillus megaterium*, *Micrococcus luteus*, dan *Pseudomonas aeruginosa*.

Dari hasil uji laboratorium, bakteri *Bacillus megaterium* menunjukkan kemampuan paling tinggi dalam menyerap

Pb, dengan efisiensi biosorpsi mencapai 83% pada konsentrasi 100 ppm selama inkubasi 72 jam. Mekanisme penyerapannya melibatkan gugus fungsional pada dinding sel seperti karboksil, hidroksil, dan fosfat yang mampu mengikat ion logam secara elektrostatis dan kimiawi (Nugroho *et al.*, 2024). Selain itu, kemampuan membentuk biofilm turut meningkatkan stabilitas dan efisiensi bakteri dalam lingkungan laut yang dinamis.

Yang menarik, isolat dari saluran cerna kerang hijau menunjukkan aktivitas biosorpsi Pb yang juga signifikan, meskipun sedikit lebih rendah dibanding isolat dari sedimen. Hal ini mengindikasikan bahwa kerang hijau berperan sebagai reservoir alami bagi bakteri yang memiliki potensi bioremediasi. Temuan ini memperkuat konsep simbiosis mutualistik antara invertebrata laut dan mikroorganisme dalam adaptasi terhadap stres lingkungan seperti kontaminasi logam berat (Sari dan Yuliana, 2023).

Implementasi bakteri hasil isolasi dalam bentuk biofilter alami atau bioreaktor berbasis biofilm tengah dikembangkan untuk remediasi air laut tercemar di wilayah Gresik. Penggunaan bakteri indigenous dari lokasi tercemar memberikan keuntungan dalam hal adaptasi lingkungan dan efisiensi proses. Ke depan, pendekatan ini diharapkan dapat mendukung pemulihan ekosistem pesisir secara berkelanjutan serta menurunkan akumulasi logam berat dalam biota laut yang dikonsumsi masyarakat (Hartono dan Prasetya, 2024).

Tantangan dan Prospek

Bioremediasi berbasis bakteri untuk logam berat seperti Pb, Cd, dan Hg menunjukkan efektivitas yang tinggi di laboratorium dan skala terbatas. Namun,

penerapannya dalam skala lapangan masih menghadapi berbagai tantangan teknis dan lingkungan. Salah satu hambatan utama adalah kestabilan bakteri dalam kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti fluktuasi suhu, salinitas, pH, serta kompetisi dengan mikroorganisme asli di lokasi pencemaran (Ghosh *et al.*, 2023). Hal ini mempengaruhi kemampuan bakteri untuk bertahan dan melakukan aktivitas biosorpsi atau bioakumulasi secara konsisten.

Selain itu, kemampuan biosorpsi logam berat yang tinggi di laboratorium sering kali tidak sepenuhnya terwujud di lingkungan alami akibat kompleksitas interaksi antara berbagai senyawa kimia dan biofilm di lingkungan perairan. Ion logam berat dapat terikat oleh partikel organik atau anorganik lainnya sehingga mengurangi ketersediaannya untuk dimobilisasi oleh bakteri (Suherman *et al.*, 2024). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan integratif antara bioremediasi dan pemahaman terhadap dinamika kimia lingkungan setempat.

Tantangan berikutnya adalah regulasi dan kesadaran masyarakat. Belum semua pemerintah daerah memiliki kebijakan yang mendorong penerapan teknologi bioremediasi sebagai solusi alternatif terhadap pencemaran logam berat. Selain itu, teknologi ini sering kali dipandang sebagai metode “eksperimen” yang belum teruji secara komersial dan ekonomis. Padahal, studi dari Marbun *et al.* (2023) menyebutkan bahwa penerapan bioremediasi jangka panjang justru lebih murah dibandingkan teknologi fisik-kimia seperti filtrasi atau presipitasi.

Dari sisi penelitian, keterbatasan dalam pemodelan biosorpsi dan pemantauan efektivitas bakteri di lapangan menjadi kendala tersendiri. Untuk meningkatkan akurasi, dibutuhkan sistem sensor lingkungan dan metode molekuler

(misalnya qPCR atau metagenomik) untuk mendeteksi keberadaan dan aktivitas gen pereduksi logam berat dalam komunitas bakteri (Yusnita *et al.*, 2024). Integrasi data bioteknologi dan teknologi digital dapat mendorong pemantauan yang lebih real-time dan adaptif terhadap dinamika pencemaran.

Di sisi lain, prospek bioremediasi berbasis bakteri semakin menjanjikan, terutama dengan berkembangnya teknologi rekayasa genetika dan sintesis mikroba. Saat ini, para ilmuwan tengah mengembangkan bakteri hasil rekayasa dengan peningkatan ekspresi protein metalotionein atau transporter logam berat yang lebih efisien. Menurut Zhang *et al.* (2023), bakteri hasil modifikasi genetik tersebut mampu mereduksi Pb hingga 95% dalam waktu lebih singkat dibandingkan strain liar.

Pemanfaatan komunitas mikroba (consortia) juga menjadi pendekatan masa depan dalam bioremediasi. Dengan menggunakan beberapa spesies bakteri yang bekerja secara sinergis, proses remediasi dapat mencakup berbagai jenis logam berat sekaligus. Pendekatan ini meniru ekosistem alami dan dinilai lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan. Studi oleh Indriani dan Kurniawan (2023) menunjukkan bahwa konsorsium *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan *Enterobacter* lebih stabil dalam menurunkan kadar logam berat campuran di perairan dibandingkan isolat tunggal.

Dengan memperkuat kolaborasi antara peneliti, pemerintah, industri, dan masyarakat, penerapan bioremediasi dapat menjadi solusi strategis jangka panjang dalam pengelolaan pencemaran logam berat di perairan Indonesia. Ke depan, dibutuhkan dukungan pendanaan riset yang memadai, penyusunan regulasi berbasis sains, serta edukasi publik

mengenai pentingnya teknologi ramah lingkungan ini. Jika dijalankan secara sistematis, bioremediasi tidak hanya menyelamatkan ekosistem, tetapi juga meningkatkan ketahanan lingkungan terhadap polusi industri.

KESIMPULAN.

Bioremediasi menggunakan bakteri telah terbukti menjadi salah satu pendekatan yang efektif, berkelanjutan, dan ramah lingkungan untuk mengurangi pencemaran logam berat di lingkungan perairan. Logam berat seperti Pb, Cd, dan Hg bersifat toksik, tidak dapat terurai secara alami, dan mampu terakumulasi dalam rantai makanan, sehingga menimbulkan risiko serius terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, diperlukan teknologi penanganan yang tidak hanya efisien, tetapi juga tidak menambah beban pencemaran baru bagi lingkungan.

Berbagai jenis bakteri, baik dari genus *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter*, hingga bakteri indigenous dari wilayah perairan Indonesia, telah menunjukkan kemampuan dalam menyerap dan mendetoksifikasi logam berat melalui mekanisme seperti biosorpsi, bioakumulasi, dan biotransformasi. Temuan dari berbagai studi kasus lokal, seperti di Sungai Batang Toru, Mangrove Tapak Semarang, dan Laut Banyu Urip Gresik, membuktikan bahwa potensi bioremediasi secara in-situ sangat besar, terutama jika menggunakan isolat bakteri lokal yang sudah teradaptasi dengan lingkungan tempat mereka ditemukan.

Namun demikian, keberhasilan bioremediasi di laboratorium belum tentu serta-merta menjamin kesuksesan aplikasinya di lapangan. Beragam faktor lingkungan seperti pH, suhu, salinitas, serta keberadaan kontaminan lain dapat mempengaruhi efektivitas bakteri dalam

proses remediasi. Selain itu, masih diperlukan riset lanjutan mengenai stabilitas dan konsistensi bakteri dalam jangka panjang, termasuk pengaruh interaksi dengan mikroorganisme lain di lingkungan terbuka.

Seiring dengan perkembangan bioteknologi, pendekatan baru seperti rekayasa genetik, pemanfaatan konsorsium bakteri, serta penggunaan teknologi pemantauan berbasis molekuler (seperti metagenomik) diharapkan dapat meningkatkan efektivitas bioremediasi. Penguatan sinergi antara penelitian akademik, kebijakan pemerintah, dan kesadaran masyarakat menjadi kunci penting dalam mendorong adopsi teknologi ini secara lebih luas dan tepat guna di berbagai wilayah perairan tercemar.

Dengan demikian, bioremediasi berbasis bakteri menawarkan prospek jangka panjang yang menjanjikan untuk pengelolaan lingkungan perairan yang lebih bersih dan berkelanjutan. Dukungan kebijakan yang adaptif, pendanaan riset, serta pelibatan masyarakat secara aktif akan menjadi landasan penting untuk mengembangkan teknologi ini ke tingkat implementasi nyata di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abo-Alkasem, M. I., Hassan, N. H., and Abo-Elsoud, M.M. (2023). Microbial bioremediation as a tool for the removal of heavy metals. *Bulletin of the National Research Centre* (2023) 47:31.
- Asmarawati, T. D., Dwi, H., dan Zulfikar, A. (2021). Isolasi dan identifikasi bakteri dari tanah tercemar air lindi serta potensinya dalam bioremediasi Pb. *Jurnal Sains dan Aplikasi Lingkungan*, 3(2), 80–87.
- Gadd, G. M. (2022). Biosorption and Biotransformation of Metals by Microorganisms. *Microbiology Society*.
- Gao, Y., Liu, L., and Zhang, Y. (2023). Genetic engineering of cadmium-resistant bacteria for enhanced bioremediation. *Environmental Research*, 232, 116230.
- Ghosh, A., Das, S., and Roy, P. (2023). Challenges in field-scale application of bacterial bioremediation for heavy metal pollution. *Environmental Microbial Technology*, 15(2), 97–108.
- Gultom, T. A., Sihotang, M. L., dan Rambe, R. (2024). Aplikasi bioteknologi lokal dalam mitigasi pencemaran logam berat di perairan Sumatera Utara. *Jurnal Biologi Tropis*, 11(1), 45–55.
- Gupta, A., and Diwan, B. (2022). Bacterial biofilms and their role in removal of heavy metals. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1023451.
- Hartono, B., dan Prasetya, D. (2024). Aplikasi biofilter berbasis bakteri laut untuk mengurangi logam berat Pb di kawasan pesisir industri Gresik. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 25(1), 54–62.
- Hasan, M., Fitria, Y., dan Nurcahyani, R. (2023). Efek logam berat terhadap kesehatan biota perairan dan manusia. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(1), 33–41.
- Hutabarat, L. S., dan Manurung, R. T. (2023). Isolasi dan identifikasi bakteri pereduksi Hg dari Sungai Batang Toru. *Spizaetus*, 5(2), 53–60.
- Indriani, N., dan Kurniawan, A. (2023). Potensi konsorsium bakteri dalam remediasi multi-logam berat di perairan tercemar. *Jurnal Biologi Tropis*, 12(4), 110–117.
- Jaiswal, K., Rai, S., and Singh, V. (2023). Microbial bioremediation of cadmium: Current perspectives and future prospects. *Journal of Hazardous Materials*, 452, 131042.

- Kumar, R., Singh, J., and Yadav, A. (2024). Advances in microbial nanobiotechnology for heavy metal bioremediation. *Journal of Environmental Management*, 352, 120998.
- Kusumawardani, P., Lestari, Y., dan Fitriana, D. (2023). Analisis cemaran logam berat di kawasan mangrove Tapak, Semarang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(1), 33–41.
- Lestari, E., Hadi, S., dan Fauziyah, N. (2023). Analisis kontaminasi logam berat Pb dan Cd di kawasan pesisir Gresik dan implikasinya terhadap kesehatan manusia. *Jurnal Kelautan Nasional*, 18(2), 120–129.
- Li, Z., Zhang, J., and Chen, H. (2023). Bacterial precipitation of heavy metals and application in water treatment. *Water Research*, 242, 120093.
- Ma'ruf, A. (2024). Potensi bakteri lokal dalam reduksi Cd di pesisir Kulon Progo. Skripsi, Universitas Gadjah Mada.
- Maqbool, M., Rehman, A., Khan, S. U., Ali, M., Hafeez, A., Hussain, F., and Aslam, M. (2023). Sustainable bioremediation of heavy metals using microbial-algal consortia. *Sustainability*, 15(19), 14056.
- Marbun, H. T., Yuliana, R., dan Pradana, D. (2023). Analisis biaya dan efektivitas bioremediasi dibandingkan teknologi konvensional dalam penanganan limbah industri. *Jurnal Teknologi Hijau*, 8(3), 45–53.
- Nasution, R. N., Simanjuntak, R. T., dan Silitonga, M. D. (2022). Karakterisasi bakteri pereduksi Pb dari sedimen Sungai Batang Toru. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(3), 114–122.
- Nguyen, T. D., Pham, H. Q., and Setiawan, D. (2022). Heavy metal contamination and biodiversity loss in Southeast Asian rivers. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(12), 18329–18342.
- Nugroho, R. D., Mulyono, T., dan Widiyastuti, D. (2024). Kemampuan *Bacillus megaterium* dalam biosorpsi timbal dari air laut tercemar. *Indonesian Journal of Marine Biotechnology*, 10(1), 33–41.
- Park, H., Lee, S. Y., and Kim, J. (2023). Application of microbial consortia for cadmium bioremediation in contaminated water. *Environmental Technology and Innovation*, 31, 102456.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Pérez-Calderón, J. I., Domínguez-Vega, E., Rodríguez-Llorente, I. D., Pajuelo, E., and Caviedes, M. Á. (2023). Bacterial tolerance and adaptation mechanisms in heavy metal contaminated environments. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 258, 115072.
- Prasad, R., Singh, A., and Kumar, S. (2023). Mercury bioremediation by indigenous *Bacillus cereus* isolated from industrial sludge. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 20, 100708.
- Prasetyo, S. A., Dewi, A. I., dan Santosa, D. A. (2024). Uji efektivitas *Bacillus tropicus* dalam remediasi Pb dan Cu pada media buatan. *Indonesian Journal of Environmental Biotechnology*, 12(1), 25–34.
- Rahman, M. A., Singh, N., Jass, J., and Jaiswal, A. K. (2022). Bacterial biofilm-mediated removal of heavy metals: A promising bioremediation approach. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1054875.

- Rahmawati, R., dan Handayani, L. (2024). Sinergi bioremediasi dan restorasi ekosistem mangrove di kawasan pesisir tercemar. *Jurnal Ekologi dan Konservasi*, 16(1), 14–21.
- Rai, P. K., Lee, S. R., ; Zhang, M., Tsang, D. C. W., and Kim, K. W. (2021). Heavy metal pollution in aquatic ecosystems: A global perspective. *Environmental Technology and Innovation*, 24, 101024.
- Rathore, P., Sharma, R., and Jain, R. (2022). Role of bacterial biofilms in the remediation of mercury-contaminated aquatic systems. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 8, 100185.
- Saragih, F., Marpaung, M., dan Harefa, N. (2024). Efektivitas konsorsium bakteri lokal dalam remediasi logam berat Hg dan Pb di Sungai Batang Toru. *Jurnal Sains Lingkungan Tropis*, 12(2), 77–86.
- Sari, A. N., dan Yuliana, I. (2023). Potensi mikrobiota gastrointestinal kerang hijau dalam bioremediasi logam berat Pb. *Jurnal Akuatika Tropika*, 9(3), 98–105.
- Sharma, P., Gupta, S., and Kaur, A. (2023). Enhanced lead biosorption using bacterial consortia in mine water treatment. *Environmental Technology and Innovation*, 32, 103034.
- Sinha, R., Dey, S., and Mukherjee, S. (2022). Mechanisms of heavy metal tolerance in bacteria: Bioaccumulation and resistance genes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(11), 4567–4582.
- Suherman, R., Maulana, F., dan Dewi, R. (2024). Interaksi ion logam berat dengan partikel lingkungan dan implikasinya terhadap efektivitas bioremediasi. *Jurnal Sains Lingkungan Indonesia*, 11(1), 34–42.
- Sulaiman, M., Rahayu, E., dan Widodo, H. (2023). Analisis akumulasi merkuri pada ikan konsumsi di perairan tercemar. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 22(2), 95–104.
- Takarina, N. D., dan Mulyani, Y. (2023). Isolasi bakteri pereduksi kadmium dari Teluk Jakarta dan potensinya dalam bioremediasi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(1), 45–53.
- Tangahu, B. V., Abdullah, S. R. S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., and Mukhlisin, M. (2020). A review on heavy metals removal using various conventional and biological methods. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 9(3), 109–123.
- UNEP. (2022). Global Mercury Assessment 2022. United Nations Environment Programme.
- Utomo, T. N., Harimurti, W., dan Nugroho, A. (2022). Dampak pertambangan emas terhadap cemaran merkuri di sungai. *Jurnal Riset Lingkungan*, 12(2), 77–88.
- Wahyudi, A. T., Pramudito, A. D., dan Widodo, E. (2023). Isolasi dan karakterisasi *Bacillus tropicus* dari ekosistem mangrove tercemar logam berat. *Jurnal Mikrobiologi Indonesia*, 8(2), 66–73.
- Wicaksono, A., Darmawan, A., dan Fadillah, R. (2024). Isolasi dan karakterisasi bakteri pereduksi Pb dari sedimen Laut Banyu Urip, Gresik. *Jurnal Bioteknologi Perairan*, 13(2), 72–80.
- Widiyanto, A., Prasetyo, E., dan Lestari, D. (2021). Dampak pencemaran logam berat terhadap produksi perikanan di Teluk Jakarta. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 11(2), 97–104.
- World Health Organization (WHO). (2022). Guidelines on Mercury and Lead

- Contamination in Drinking Water. Geneva: World Health Organization.
- World Health Organization (WHO). (2022). Cadmium in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva: World Health Organization.
- World Health Organization (WHO). (2023). Preventing disease through healthy environments: Exposure to lead, cadmium and mercury. Geneva: WHO Press.
- Yadav, M., Singh, N., and Patel, D. K. (2023). Biotransformation of heavy metals: Microbial approaches. *Current Pollution Reports*, 9, 113–125.
- Yusnita, A., Fitriani, E., dan Santosa, D. (2024). Deteksi molekuler bakteri bioremediasi logam berat di lingkungan pesisir: Pendekatan metagenomik. *Jurnal Bioteknologi Lingkungan*, 9(2), 61–69.
- Zhang, L., Chen, Y., and Wang, Z. (2023). Engineered bacteria with enhanced heavy metal uptake via metal-binding protein overexpression. *Biotechnology Advances*, 58, 107943.
- Zhang, L., Liu, X., and Wang, H. (2022). Enhanced cadmium removal by *Pseudomonas fluorescens* biofilm: Mechanism and performance. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 241, 113783.
- Zulkarnain, M., Hidayati, N., dan Nugroho, B. (2023). Peran biofilm bakteri dalam peningkatan efisiensi bioremediasi logam berat di ekosistem mangrove. *Jurnal Bioteknologi Tropis*, 9(3), 92–100.