



Aplikasi Mikroorganisme untuk Bioremediasi Tanah Tercemar: Suatu Tinjauan Pustaka

Azuza Evania^{1*}, Analekta Tiara Perdana²

¹⁻²Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Maulana Hasanuddin Banten, Indonesia

*Penulis Korespondensi: analekta.tiara@uinbanten.ac.id

Abstract. Soil contamination by hydrocarbons, pesticides, heavy metals, and complex pollutants is rapidly increasing and degrading essential ecosystem functions. Physical or chemical treatments offer faster results, yet they are often costly, energy-intensive, and risk disrupting soil biological integrity without fully eliminating pollution sources. Microorganism-based bioremediation provides a more sustainable alternative by utilizing microbial metabolism to degrade or immobilize pollutants into less toxic and less mobile forms. This article presents a structured literature review on the roles and applications of microorganisms for bioremediation of contaminated soils, covering comparisons between single isolates and microbial consortia, dominant biological mechanisms, and ecological challenges in field application. A Systematic Literature Review approach was applied, using narrative synthesis and thematic clustering of national and international journals published between 2020 and 2025. The review indicates that single microbial isolates are commonly selected for specific pollutant targets, whereas microbial consortia are preferred for mixed or persistent contaminants due to metabolic synergy that enhances microbial adaptability and stepwise pollutant breakdown in highly polluted soils. Adaptive mechanisms such as EPS production and biofilm formation contribute to microbial resilience under stress and help retain contaminants within the soil matrix. Key challenges identified include inoculum stability under extreme conditions and limited microbial access to pollutants trapped in micro-soil pores. The findings highlight that microbial selection strategies must be tailored to pollutant characteristics and soil environmental conditions, while also emphasizing the potential of biofilm-based systems and organic carriers to support broader field implementation of microbial bioremediation.

Keywords: Bioaccumulation; Biofilm; Cesium; Heavy Metals; Microbial Consortium.

Abstrak. Pencemaran tanah oleh hidrokarbon, pestisida, logam berat, dan polutan kompleks meningkat pesat dan menurunkan fungsi ekosistem tanah. Metode fisik atau kimia memang cepat, tetapi sering berbiaya tinggi, boros energi, dan berisiko merusak komponen biologis tanah tanpa benar-benar menghilangkan sumber kontaminasi. Bioremediasi berbasis mikroorganisme menjadi solusi yang lebih berkelanjutan karena memanfaatkan metabolisme mikroba untuk mendegradasi atau mengimobilisasi polutan menjadi bentuk yang kurang toksik dan tidak mudah berpindah. Artikel ini bertujuan menyajikan tinjauan pustaka yang terstruktur mengenai peran dan aplikasi mikroorganisme dalam bioremediasi tanah tercemar, termasuk perbandingan isolat tunggal dan konsorsium mikroba, mekanisme biologis dominan, serta tantangan ekologis di lapangan. Metode yang digunakan adalah *Systematic Literature Review* dengan sintesis naratif dan klusterisasi tematik terhadap jurnal nasional dan internasional terbitan 2020–2025. Hasil review menunjukkan bahwa isolat tunggal banyak dipakai untuk polutan spesifik, sedangkan konsorsium lebih dipilih pada polutan campuran karena sinergi metabolik antar mikroba meningkatkan kapasitas remediasi dan adaptasi di tanah tercemar berat. Mekanisme seperti pembentukan EPS atau biofilm juga berperan penting dalam melindungi mikroba dari stres lingkungan dan menahan polutan di matriks tanah. Tantangan utama yang ditemukan mencakup stabilitas inokulum di kondisi ekstrem dan keterbatasan akses mikroba ke polutan di pori mikro tanah. Secara implikatif, tinjauan ini menegaskan bahwa strategi pemilihan mikroba harus disesuaikan dengan karakter polutan dan kondisi tanah, serta menyoroti potensi pengembangan *carrier* organik dan sistem berbasis biofilm untuk mendukung implementasi bioremediasi mikroba di skala lapangan.

Kata Kunci: Bioakumulasi; Biofilm; Cesium; Konsorsium Mikroba; Logam Berat.

1. LATAR BELAKANG

Pencemaran dan kerusakan tanah merupakan salah satu isu lingkungan yang terus meningkat dan memberikan dampak signifikan terhadap keberlanjutan ekosistem. Kerusakan ini terjadi ketika sifat fisik, kimia, atau biologi tanah berubah melampaui ambang batas baku mutu akibat aktivitas manusia, baik pada kawasan produksi biomassa maupun di luar kawasan tersebut. Berbagai kegiatan seperti pertanian intensif, penggunaan pestisida dan pupuk kimia, pembuangan limbah industri, serta tumpahan minyak telah memicu penurunan kualitas tanah secara drastis. Kondisi ini berdampak pada berkurangnya keanekaragaman hayati, meningkatnya risiko bencana alam seperti banjir dan longsor, serta menurunnya kualitas air dan produktivitas lahan. Dalam jangka panjang, degradasi tanah juga berkontribusi terhadap perubahan iklim global dan dapat mengancam kehidupan manusia secara langsung maupun tidak langsung (Rahmah, 2022).

Metode fisik dan kimia untuk remediasi tanah, seperti cuci lahan (*soil washing*), desorpsi kimia, atau perlakuan termal, seringkali membutuhkan biaya tinggi, konsumsi energi besar, dan infrastruktur ekstensif, serta berisiko merusak sifat fisik dan biologi tanah, bahkan hanya memindahkan polutan ke media lain tanpa merehabilitasi ekosistem tanah secara keseluruhan. Oleh karena itu, ada kebutuhan mendesak terhadap metode alternatif yang lebih hemat biaya, ramah lingkungan, dan berkelanjutan yang tidak hanya menghilangkan polutan, tetapi juga memulihkan kualitas tanah secara menyeluruh (Michael-Igolima et al. 2022).

Pencemaran tanah di berbagai wilayah menunjukkan peningkatan yang signifikan dan telah menjadi ancaman serius bagi kesehatan lingkungan serta manusia. Berbagai jenis kontaminan yang sulit terdegradasi, terutama dari aktivitas industri dan pertanian, menyebabkan penurunan kualitas tanah dan terganggunya fungsi ekosistem. Dampak tersebut mencakup berkurangnya lahan produktif, penurunan hasil pertanian, hingga potensi kontaminasi pangan yang dapat memengaruhi ketahanan lingkungan dan ekonomi masyarakat. Kondisi ini menegaskan perlunya upaya remediasi yang efektif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk mencegah kerusakan lebih lanjut (Calvina et al. 2024)

Sejak dekade terakhir, penelitian tentang pemanfaatan mikroorganisme untuk bioremediasi tanah tercemar telah menunjukkan kemajuan signifikan. Berbagai studi melaporkan bahwa bakteri, fungi, dan actinomycetes mampu mendegradasi polutan organik seperti hidrokarbon maupun menstabilkan logam berat di tanah melalui mekanisme biologis seperti biosorpsi, bioakumulasi, dan biotransformasi (Ghazali et al. 2021). Penelitian terbaru oleh Ningombam et al. (2025) menunjukkan potensi fungi dalam degradasi polutan kompleks berkat sistem enzimatik dan jalur metabolik mereka yang beragam. Selain itu, penelitian oleh

Panjaitan dan Sidauruk 2024) mengungkap bahwa penggunaan konsorsium mikroba dengan kombinasi beberapa spesies mikroorganisme semakin populer karena sering memberikan efisiensi degradasi lebih tinggi dibandingkan isolat tunggal.

Meskipun perkembangan penelitian menunjukkan hasil yang menjanjikan, literatur komprehensif yang secara sistematis mengulas aplikasi mikroorganisme di berbagai kondisi (jenis polutan, karakteristik tanah, teknik bioremediasi, dan jenis mikroba) masih relatif sedikit. Kajian yang ada cenderung fokus pada kasus spesifik, sehingga kurang menggambarkan efektivitas bioremediasi secara holistik. Oleh karena itu, diperlukan tinjauan pustaka terkini yang mensintesis hasil-hasil penelitian tersebut, menganalisis faktor keberhasilan maupun tantangan, serta mengidentifikasi celah penelitian sebagai dasar pengembangan studi selanjutnya.

Artikel ini bertujuan untuk menyajikan tinjauan pustaka yang komprehensif mengenai peran dan aplikasi mikroorganisme dalam bioremediasi tanah tercemar. Penelitian ini juga bermaksud mensintesis perkembangan riset dalam satu dekade terakhir, termasuk efektivitas, mekanisme kerja, serta tantangan penggunaan mikroorganisme pada berbagai jenis polutan. Hasil tinjauan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih terstruktur dan mengidentifikasi peluang pengembangan bioremediasi berbasis mikroba untuk implementasi di masa mendatang.

2. KAJIAN TEORITIS

Bioremediasi merupakan solusi ekologis yang memanfaatkan kemampuan metabolik organisme hidup, seperti bakteri dan jamur, untuk mengurai atau menetralkan polutan berbahaya di dalam tanah. Secara teoritis, metode ini dianggap lebih unggul dibandingkan pendekatan fisik atau kimia karena bersifat berkelanjutan, efisien secara biaya, dan tidak merusak struktur alami tanah (Raffa & Chiampo 2021). Proses ini bekerja dengan cara mentransformasi senyawa kompleks dari residu pestisida, logam berat, hingga limbah farmasi menjadi bentuk yang lebih sederhana dan tidak beracun melalui aktivitas enzimatik mikroorganisme. Keberhasilan proses ini sangat bergantung pada interaksi antara jenis polutan, kondisi lingkungan seperti pH dan suhu, serta pemilihan isolat mikroba yang memiliki kemampuan adaptasi tinggi terhadap kontaminan tertentu (Chakraborty et al. 2025).

Peran mikroorganisme dalam memulihkan tanah yang tercemar melibatkan mekanisme biokimia yang kompleks, baik di dalam sel (intraseluler) maupun di luar sel (ekstraseluler). Bakteri dan mikroalga sering digunakan karena kecepatan reproduksinya, namun penggunaan fungi atau jamur (*mycoremediation*) memberikan keuntungan spesifik berupa jaringan hifa

yang mampu menembus pori-pori tanah yang sempit untuk menjangkau polutan (Wang et al. 2024). Jamur memproduksi enzim oksidatif kuat yang mampu memecah polutan rekalsitran atau senyawa yang sangat sulit terurai oleh organisme lain. Selain itu, dalam kasus pencemaran logam berat, mikroba berperan dalam proses bioadsorpsi atau mengubah valensi logam sehingga sifat racunnya berkurang dan tidak lagi membahayakan ekosistem (Chakraborty et al. 2025).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kombinasi berbagai agen biologi atau penggunaan konsorsium mikroba sering kali memberikan hasil yang lebih optimal dibandingkan penggunaan isolat tunggal. Raffa & Chiampo (2021) menekankan pentingnya manajemen nutrisi dan parameter tanah untuk mendukung kerja mikroba di lahan pertanian. Di sisi lain, Wang et al. (2024) menyoroti bahwa integrasi jamur dalam sistem bioremediasi tidak hanya membersihkan tanah tetapi juga meningkatkan kesehatan tanah secara biologis. Berdasarkan ulasan teori tersebut, penelitian ini dilakukan dengan landasan bahwa pemanfaatan mikroba spesifik yang didukung oleh pemahaman mekanisme degradasi yang tepat dapat menjadi acuan utama dalam memulihkan fungsi ekologis tanah yang terkontaminasi secara aman dan efektif.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *literature review* terarah untuk mengkaji aplikasi mikroorganisme dalam bioremediasi tanah tercemar. Sumber data diperoleh dari artikel ilmiah terindeks yang diakses melalui Scopus, ScienceDirect, PubMed, dan Google Scholar dengan kata kunci terkait bioremediasi tanah dan mikroorganisme. Proses penelusuran dan seleksi literatur dilakukan secara sistematis untuk mengidentifikasi jenis mikroorganisme, mekanisme biodegradasi, efisiensi remediasi, serta faktor lingkungan yang memengaruhi kinerjanya. Data yang diperoleh dianalisis melalui pengelompokan tematik dan perbandingan antar studi guna menghasilkan sintesis komprehensif mengenai efektivitas bioremediasi berbasis mikroorganisme.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk memberikan gambaran yang lebih terstruktur mengenai perkembangan riset bioremediasi berbasis mikroorganisme berdasarkan penelitian lima tahun terakhir, temuan dari berbagai penelitian nasional maupun internasional disintesis dan disajikan secara komparatif pada Tabel 1. Tabel ini merangkum jenis mikroba yang diteliti, target polutan, dan insight peran. Penyajian dalam bentuk tabel bertujuan untuk mempermudah analisis keterkaitan antara

karakter mikroorganisme, kondisi lingkungan penelitian, dan strategi bioremediasi yang diterapkan di berbagai lokasi studi, seperti tanah bengkel otomotif, lahan terpapar limbah hidrokarbon, residu pestisida, dan tanah yang mengalami akumulasi logam berat.

Tabel 1. Sintesis Peran Mikroorganisme dalam Bioremediasi Tanah Tercemar.

NO	Jurnal	Jenis Mikroba	Polutan Target	Insight Peran
1	Calvina et al. (2024)	<i>Konsorsium mikroba</i> (bakteri dan jamur) melalui pendekatan Biostimulasi (penambahan nutrisi atau pupuk).	Logam berat (Pb, Cd, Cr, Hg) dan Hidrokarbon (Minyak bumi).	Perluasan Jalur: Konsorsium memiliki variasi enzim lebih luas sehingga lebih stabil menghadapi polutan campuran.
2	Yayok dan Dhiningrum (2023)	Mikroba indigen (bakteri dan jamur alami) melalui teknik Pengomposan.	Pestisida (Sipermetrin, Klorpirifos, Profenofos).	Stimulasi Nutrisi: Penyesuaian rasio C/N memacu pertumbuhan koloni mikroba lokal untuk mengurangi residu pestisida secara sinergis.
3	Zafira (2021)	<i>Mikroba indigen</i> (bakteri lokal) dengan non-indigen.	Hidrokarbon minyak bumi.	Produksi Biosurfaktan: Mikroba indigen lebih efektif karena menghasilkan biosurfaktan yang meningkatkan bioavailabilitas (kelarutan) minyak untuk didegradasi.
4	Suryawan et al. (2025)	Konsorsium mikroba alami (bakteri dan fungi dari lumpur sawah).	Polutan hasil pembakaran (senyawa organik dan anorganik kompleks).	Aktivitas Enzimatis Spesifik: Mikroorganisme lumpur sawah menghasilkan enzim khusus yang mampu merombak senyawa kompleks sisa pembakaran menjadi bentuk tidak beracun.
5	Li et al. (2020)	Fungi isolat dan Konsorsium Fungi-Bakteri	Polutan campuran: Hidrokarbon & Logam Berat (Cd, Pb, Cu, Zn)	Sinergi lintas kingdom: Fungi menyediakan jalur transportasi (hifa) bagi bakteri dan memproduksi enzim ekstraseluler untuk degradasi hidrokarbon sekaligus akumulasi logam.
6	Pujiati et al. (2025)	Isolat bakteri (<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i>) & kapang (<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i>) dan Bio-slurry.	Pestisida Organofosfat (Profenofos).	Sinergi Bioaugmentasi: Kombinasi mikroba indigen, eksogen, dan bio-slurry mencapai degradasi total (dari 4,718 menjadi 0,000 mg/kg).
7	Putri dan Cintamulya (2020)	Bakteri & Fungi (Teknik Bioremediasi).	Residu Pestisida pada tanah.	Optimasi Kondisi: Penyesuaian keasaman tanah (pH) dan nutrisi sangat krusial untuk menjaga kesehatan mikroba pendegradasi senyawa kimia pestisida.
8	Mendoza-Burguete et al. (2023)	<i>Firmicutes</i> dan <i>Proteobacteria</i> (Sistematis Review).	Polutan dari Lindi (Leachate) TPA sampah.	Pemilihan Strategi: Keberhasilan sangat bergantung pada karakteristik lokasi dan jenis mikroba spesifik yang mampu mentoleransi toksisitas air lindi yang kompleks.
9	El-Baz et al. (2025)	Mikroorganisme pendegradasi hidrokarbon (Bakteri & Fungi).	Hidrokarbon Minyak Bumi (Petroleum).	Pendekatan Berkelanjutan: Pemanfaatan metabolisme mikroba untuk mengubah senyawa toksik minyak bumi menjadi produk sampingan yang tidak berbahaya secara efisien.
10	Tang (2025)	Mikroba tanah (Kajian dampak mikroplastik).	Mikroplastik (PE, PVC, PS) dan Logam Berat (Pb, Cd, Zn).	Gangguan Komunitas: Mikroplastik mengubah komposisi komunitas mikroba dan aktivitas enzimatis, yang secara tidak langsung menghambat proses degradasi alami tanah.

Berdasarkan Tabel 1, penelitian bioremediasi di Indonesia pada periode 2020–2025 menunjukkan kecenderungan penggunaan mikroorganisme indigenus, baik bakteri maupun fungi, yang diisolasi dari tanah atau perairan tercemar, khususnya pada lahan hidrokarbon, tanah bengkel, dan area terpapar logam berat. Mikroorganisme seperti *Pseudomonas*, *Micrococcus*, dan bakteri lipolitik tanah banyak digunakan sebagai isolat tunggal untuk target polutan spesifik, sedangkan konsorsium mikroba lebih umum diterapkan pada kondisi polutan campuran dan lingkungan tanah yang ekstrem. Penggunaan media pembawa seperti biokompos dan bioslurry serta pembentukan EPS/biofilm berperan penting dalam meningkatkan adaptasi dan stabilitas mikroba di lapangan. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Puspitasari dan Khaeruddin (2016) yang menyatakan bahwa bioremediasi menggunakan bakteri dan jamur mampu menghilangkan polutan pestisida secara permanen, dengan keberhasilan proses yang sangat dipengaruhi oleh jenis mikroorganisme, lokasi, dan faktor lingkungan.

Meskipun hasil bioremediasi di skala laboratorium sering menunjukkan efisiensi tinggi, beberapa studi melaporkan bahwa performanya dapat menurun di lapangan akibat heterogenitas tanah dan keterbatasan distribusi nutrisi, yang menjadi temuan konsisten dalam literatur sebelumnya. Oleh karena itu, strategi aplikasi mikroba indigenus dalam bentuk konsorsium dengan carrier biokompos/EPS-based system direkomendasikan sebagai pendekatan yang lebih adaptif untuk skala lapangan, terutama pada tanah dengan polutan campuran dan tekanan toksisitas tinggi.

Urgensi bioremediasi tanah tercemar

Meningkatnya pencemaran tanah akibat limbah industri, residu petrokimia, dan aktivitas pertanian membuat bioremediasi semakin penting untuk dikembangkan sebagai solusi pemulihan lingkungan. Metode fisik dan kimia seperti penggalian, pencucian tanah, atau penambahan bahan kimia memang bisa menurunkan polutan dengan cepat, tetapi pendekatan ini sering hanya memindahkan kontaminan, berisiko merusak kondisi biologis tanah, serta membutuhkan biaya besar dan energi tinggi, sehingga kurang efektif untuk perbaikan tanah dalam jangka panjang. Karena itu, bioremediasi berbasis mikroorganisme menjadi alternatif yang lebih aman bagi lingkungan, memanfaatkan bakteri, jamur, atau komunitas mikroba untuk menguraikan atau mengikat polutan hingga berubah menjadi senyawa yang jauh lebih rendah toksisitasnya, sekaligus membantu memulihkan keseimbangan ekosistem tanah. Mikroba memiliki peran kuat dalam degradasi hidrokarbon dan polutan organik lain melalui mekanisme biologis yang beragam, serta bisa ditingkatkan performanya dengan penambahan bahan organik pendukung dan aerasi untuk menciptakan kondisi metabolik yang lebih optimal bagi

mikroba, menjadikan bioremediasi sebagai strategi yang lebih berkelanjutan untuk pengelolaan tanah tercemar (Elshafei & Mansour 2024).

Ragam mikroorganisme yang digunakan dalam bioremediasi

Penggunaan mikroorganisme dalam bioremediasi tanah dan perairan tercemar makin berkembang dalam 10 tahun terakhir, berdasarkan penelitian Lestari & Meitiniarti (2023) mikroba punya kemampuan adaptasi tinggi terhadap berbagai polutan, baik organik maupun logam berat. Kelompok mikroba yang sering dipakai antara lain bakteri seperti *Pseudomonas sp.*, *Staphylococcus aureus*, dan *Escherichia coli* yang bisa mengikat ion logam di permukaan sel atau menahannya di dalam sel dengan bantuan protein pengikat logam, serta fungi yang mampu melakukan biosorpsi lewat dinding selnya. Selain itu, penelitian juga menunjukkan bahwa konsorsium bakteri indigen (kode A, D, E, J) yang diisolasi dari lingkungan tercemar lebih efektif menurunkan kadar polutan dibanding isolat tunggal, karena mereka bekerja secara sinergis dan lebih tahan terhadap kondisi limbah yang ekstrem. Efektivitas bioremediasi ini juga sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti pH, suhu, kadar oksigen, ketersediaan nutrisi, dan kepadatan tanah, di mana penambahan bahan organik seperti molases dan aerasi terbukti bisa meningkatkan aktivitas mikroba dan mempercepat proses penurunan polutan, meskipun metode *ex-situ* cenderung membutuhkan biaya lebih besar karena melibatkan proses penggalian dan pemindahan tanah.

Mekanisme kerja mikroorganisme dalam meremediasi polutan

Bioremediasi tanah makin relevan dibahas karena kasus kontaminasi lahan pertanian dan lingkungan terus meningkat, terutama akibat penggunaan bahan kimia berenergi tinggi seperti pestisida industri, yang residunya bisa bertahan lama di tanah, menurunkan produktivitas lahan, mengganggu keseimbangan organisme tanah, dan bahkan berisiko masuk ke rantai makanan melalui aliran air permukaan maupun hujan. Metode fisik dan kimia seperti penggalian, pencucian, atau pemanasan tanah memang bisa mengurangi polutan lebih cepat, tetapi sering hanya bersifat memindahkan kontaminan, butuh biaya besar, serta berpotensi merusak struktur dan komponen biologis tanah, sehingga kurang ideal untuk pemulihan ekosistem dalam jangka panjang. Mikroorganisme seperti bakteri, fungi, dan mikroalga menjadi pilihan utama dalam bioremediasi karena mampu mengurai atau mentransformasi senyawa berbahaya lewat mekanisme biologis yang lebih aman bagi lingkungan, efisien, fleksibel untuk diterapkan langsung di lapangan, dan lebih terjangkau secara operasional, sehingga strategi ini tidak hanya fokus menurunkan polutan, tetapi juga membantu tanah pulih secara bertahap tanpa menimbulkan dampak lingkungan sekunder yang besar (Chandel et al. 2025).

Efektivitas aplikasi mikroorganisme

Penelitian Fahmy et al. (2024) menunjukkan bahwa konsorsium mikroba lebih efektif dibandingkan isolat tunggal dalam mendegradasi polutan chlorantraniliprole (CAP) karena adanya sinergi metabolik antar bakteri yang memungkinkan pemecahan senyawa kompleks secara lebih optimal. Konsorsium enam bakteri mampu mencapai efisiensi degradasi hingga 98,65%, jauh lebih tinggi dibandingkan isolat tunggal *Bacillus subtilis* yang hanya mencapai 58,05% pada waktu yang sama, serta ditunjukkan oleh meningkatnya aktivitas biologis tanah seperti pertumbuhan populasi bakteri dan emisi CO₂. Keberhasilan bioremediasi sangat dipengaruhi oleh kemampuan adaptasi mikroba terhadap kondisi ekstrem lingkungan tercemar, sementara keterbatasan mikroba alami dalam menghasilkan enzim spesifik sering menjadi kendala. Oleh karena itu, pengembangan mikroba hasil rekayasa genetika yang mampu memproduksi enzim seperti hidrolase dan lakase menjadi strategi potensial untuk mempercepat proses biodegradasi, memperpendek waktu pemulihan lingkungan, dan meningkatkan efisiensi biaya (Afifah et al. 2025).

Faktor lingkungan yang mempengaruhi performa bioremediasi

Keberhasilan mikroba dalam mendegradasi polutan sangat ditentukan oleh kontrol terhadap faktor-faktor lingkungan seperti pH, suhu, kelembaban, dan ketersediaan oksigen. Tingkat keasaman (pH) tanah yang optimal, biasanya pada rentang netral, sangat penting karena memengaruhi kelarutan nutrisi dan aktivitas enzim spesifik yang digunakan mikroba untuk memecah molekul polutan. Sementara itu, suhu lingkungan berperan sebagai pemacu laju reaksi metabolisme; suhu yang terlalu rendah akan membekukan aktivitas mikroba, sedangkan suhu yang terlalu ekstrim dapat merusak sel mikroba itu sendiri. Faktor kelembaban tanah juga krusial karena air berfungsi sebagai media transportasi nutrisi dan oksigen ke dalam sel mikroba, di mana oksigen tersebut menjadi kunci utama bagi mikroba aerobik dalam proses oksidasi polutan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tidak beracun. Jika keseimbangan faktor-faktor fisik dan kimia ini terjaga, maka kapasitas pembersihan mandiri oleh mikroba di lahan yang tercemar akan meningkat secara signifikan (Dorthi & Lase 2025).

Efektivitas mikroba dalam mengurai polutan sangat bergantung pada kondisi lingkungan tanah yang mendukung pertumbuhan mereka. Ketersediaan nutrisi yang seimbang, terutama rasio karbon, nitrogen, dan fosfor, bertindak sebagai bahan bakar utama bagi mikroba untuk beraktivitas dan berkembang biak secara optimal. Selain itu, aerasi atau kecukupan oksigen di dalam pori-pori tanah sangat krusial bagi kelompok mikroba aerobik untuk menjalankan proses metabolisme yang cepat dalam menghancurkan senyawa berbahaya. Faktor kondisi fisik tanah, seperti tingkat kelembapan, suhu, dan pH, juga berperan sebagai penentu apakah lingkungan

tersebut ramah atau justru menghambat kelangsungan hidup mikroba; tanah yang terlalu padat atau terlalu kering dapat membatasi pergerakan oksigen dan nutrisi, sehingga memperlambat pemulihan lahan yang tercemar (Oro et al. 2024).

Tantangan penggunaan mikroorganisme untuk bioremediasi

Penerapan bioremediasi di lapangan menghadapi tantangan utama berupa kompleksitas dan ketidakpastian kondisi lingkungan yang sulit dikendalikan. Efektivitas mikroorganisme sering dibatasi oleh rendahnya bioavailabilitas polutan akibat ikatan kuat dengan partikel tanah, serta dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti fluktuasi suhu, ketidakseimbangan nutrisi, dan tingginya konsentrasi senyawa toksik yang dapat menghambat bahkan menurunkan viabilitas mikroba (Koushal et al. 2025). Kondisi ini menyebabkan hasil bioremediasi pada skala laboratorium tidak selalu dapat direplikasi secara optimal di lapangan. Selain itu, Maglione et al. (2024) melaporkan bahwa kompetisi antara mikroba hasil bioaugmentasi dan komunitas mikroba indigenous sering menurunkan keberhasilan proses remediasi, sementara penggunaan mikroorganisme hasil rekayasa genetika, meskipun berpotensi meningkatkan laju degradasi, menimbulkan kekhawatiran terkait keamanan lingkungan dan regulasi. Dengan demikian, tantangan bioremediasi tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga mencakup aspek ekologis, regulatif, dan penerimaan sosial untuk memastikan keberlanjutan pemulihan lingkungan.

Keamanan dan kelayakan aplikasi mikroba pada lingkungan

Keamanan aplikasi mikroba dalam memulihkan lahan tercemar sangat bergantung pada pemilihan jenis mikroorganisme yang tidak bersifat patogen terhadap tanaman, hewan, maupun manusia. Menurut Dorthi & Lase (2025) kelayakan proses bioremediasi memerlukan pemantauan ketat terhadap parameter lingkungan agar mikroba yang digunakan tidak mengganggu keseimbangan ekosistem asli atau menghasilkan produk sampingan yang justru lebih toksik. Penggunaan agen biologis ini dianggap layak dan aman apabila mikroba tersebut mampu beradaptasi dengan kondisi tanah spesifik tanpa mengubah struktur komunitas mikroba alami secara negatif, sehingga proses pembersihan polutan dapat berlangsung secara berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Keberhasilan bioremediasi tidak hanya ditentukan oleh aspek biologis, tetapi juga oleh metode teknis dan kelayakan operasional yang mampu mencegah penyebaran polutan. Berdasarkan penelitian Hakim et al. (2025) menunjukkan bahwa pengomposan *ex-situ* pada tanah tercemar limbah oli bekas merupakan pendekatan yang aman karena proses degradasi berlangsung di area terkontrol dengan dukungan bahan organik seperti jerami dan kapur dolomit. Namun, keberlanjutan pasca-remediasi tetap perlu diperhatikan, khususnya terkait stabilitas ekosistem tanah dan keanekaragaman mikroba. Oleh karena itu, pemantauan

laboratorium yang presisi serta penerapan regulasi yang ketat menjadi kunci agar bioremediasi dapat diimplementasikan secara efektif dan berkelanjutan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Aplikasi mikroorganisme, terutama dalam bentuk konsorsium, terbukti lebih efektif dan berkelanjutan dalam bioremediasi tanah tercemar karena adanya sinergi metabolik dan stabilitas ekologis yang lebih baik dibandingkan penggunaan isolat tunggal. Keberhasilan bioremediasi sangat dipengaruhi oleh optimasi faktor lingkungan seperti pH, suhu, dan ketersediaan nutrisi yang mendukung aktivitas mikroba.

Keterbatasan tinjauan ini terletak pada perbedaan desain penelitian, lokasi, dan jenis polutan antar studi, sehingga generalisasi hasil perlu dilakukan secara hati-hati. Oleh karena itu, penerapan bioremediasi di lapangan disarankan menggunakan mikroorganisme yang stabil dan aman secara ekologis serta sesuai dengan karakter polutan dan kondisi tanah setempat. Penelitian selanjutnya perlu dilakukan secara lebih terstandar, termasuk pengujian stabilitas inokulum jangka panjang, interaksi dengan mikrobiota indigenous, dan evaluasi keamanan ekosistem tanah sebelum implementasi skala luas.

DAFTAR REFERENSI

- Afifah, N., Hidayaturochman, F., & Ihsani, T. A. (2025). Comparison of effectiveness of genetically engineered microbes and natural microbes in bioremediation of environmental pollutants: A literature review. *Biodiverse: Jurnal Biodiversitas dan Bioteknologi*, 2(1), 1–10.
- Calvina, B. A., Ardiana, D. A., Azzahra, S. C., Santosa, R. N., Miladya, F. N., & Anwar, Z. N. (2024). Bioremediasi cemaran tanah menggunakan biostimulant (Bioremediation of soil contamination using biostimulants). *Camellia*, 3(2), 192–204.
- Chakraborty, S., Talukdar, A., Dey, S., & Bhattacharya, S. (2025). *Role of fungi, bacteria and microalgae in bioremediation of emerging pollutants with special reference to pesticides, heavy metals and pharmaceuticals* (Vol. 3). Springer International Publishing.
- Chandel, R., Singh, L., Khan, N. A., & Thakur, S. (2025). Microbial remediation of microplastic-contaminated soil, focusing on mechanisms, benefits, and research gaps. *NPJ Emerging Contaminants*, 1(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s44454-025-00014-0>

- Daeli, D. E. J., & Lase, N. K. (2025). Pemanfaatan mikrobiologi dalam bioremediasi tanah pertanian tercemar pestisida: Kajian literatur. *Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian dan Teknologi dalam Ilmu Tanaman*, 2(1), 37–52. <https://doi.org/10.62951/hidroponik.v2i1.223>
- El-Baz, A. F., Shetaia, Y. M., Abdelghani, D. Y., Abou-Taleb, K. A., El-Sayed, A. S. A., & Abaza, A. A. (2025). Microbial bioremediation of contaminated soil. *Environmental Science and Engineering*, 256(1), 33–74. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76886-6_2
- Elshafei, A. M., & Mansour, R. (2024). Microbial bioremediation of soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Discover Soil*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00004-5>
- Fahmy, M. A., Salem, S. H., El-Fattah, H. I. A., Akl, B. A., Fayed, M., Maher, M., Aioub, A. A., & Sitohy, M. (2024). Insights into the role of hexa-bacterial consortium for bioremediation of soil contaminated with chlorantraniliprole. *Environmental Sciences Europe*, 36(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-024-01008-2>
- Ghazali, M., Nurhayati, Suripto, Sukenti, K., & Julisaniah, N. I. (2021). Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 9(1), 63–71. <https://e-journal.undikma.ac.id/index.php/bioscientist>
- Hakim, G. L., Prasetya, A., Mulyono, P., & Petrus, H. T. B. M. (2025). Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 16(2), 90–96.
- Koushal, S., Kanagalabavi, A. C., Kumar, A., Arya, D., Nehul, J. N., Panigrahi, C. K., Haloi, D., Chauhan, N., & Muhilan, G. (2025). Bioremediation of soil pollution: An effective approach for sustainable agriculture. *International Journal of Plant & Soil Science*, 37(1), 400–410. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2025/v37i15282>
- Lestari, A. C., & Meitiniarti, V. I. (2023). Kemampuan *Microbacterium* sp. strain SpR3 dan isolat RT-9 pada bahan pembawa untuk mereduksi Cr(VI) di tanah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(4), 735–739. <https://doi.org/10.14710/jil.21.4.735-739>
- Li, Q., Liu, J., & Gadd, G. M. (2020). Fungal bioremediation of soil co-contaminated with petroleum hydrocarbons and toxic metals. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(21), 8999–9008. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10854-y>
- Maglione, G., Zinno, P., Tropea, A., Mussagy, C. U., Dufossé, L., Giuffrida, D., & Mondello, A. (2024). Microbes' role in environmental pollution and remediation: A bioeconomy focus approach. *AIMS Microbiology*, 10(3), 723–755. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2024033>

- Mendoza-Burguete, Y., Pérez-Rea, M. L., Ledesma-García, J., Campos-Guillén, J., Ramos-López, M. A., Guzmán, C., & Rodríguez-Morales, J. A. (2023). Global situation of bioremediation of leachate-contaminated soils by treatment with microorganisms: A systematic review. *Microorganisms*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/microorganisms11040857>
- Michael-Igolima, U., Abbey, S. J., & Ifelebuegu, A. O. (2022). A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils. *Environmental Advances*, 9, 100319. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100319>
- Ningombam, L., Mana, T., Pradhan, S., Apum, G., & Singh, Y. D. (2025). Fungal bioremediation in environmental pollution and recent strategies. *Discover Environment*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00267-x>
- Oro, C. E. D., Puton, B. M. S., Venquiaruto, L. D., Dallago, R. M., & Tres, M. V. (2024). Effective microbial strategies to remediate contaminated agricultural soils and conserve functions. *Agronomy*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy14112637>
- Panjaitan, E., & Sidauruk, L. (2024). Pemanfaatan biochar dan konsorsium bakteri pada remediasi tanah tercemar logam berat dan pengaruhnya terhadap hasil tanaman sawi (*Brassica juncea* L.). *Agrotekma: Jurnal Agroteknologi dan Ilmu Pertanian*, 8(1), 46–55. <https://doi.org/10.31289/agr.v8i1.10627>
- Pujiati, Pujiati, Sholikhah, O. H., Utami, S., Fatimah, Fatimah, Ramadhan, R., & Ni'matuzahroh, N. (2025). Bioremediation of profenofos-contaminated soil using bio-slurry, exogenous, and indigenous microorganism formulation from Puntukdoro farmland, Indonesia. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*, 5(2), 584–602. <https://doi.org/10.47352/JMANS.2774-3047.265>
- Purnomo, Y. S., & Dhiningrum, G. K. (2023). Bioremediasi lahan tercemar pestisida dengan cara pengomposan di perkebunan apel Batu. *Insolgi: Jurnal Sains dan Teknologi*, 2(3), 419–429. <https://doi.org/10.55123/insolgi.v2i3.1839>
- Puspitasari, D. J., & Khaeruddin. (2016). Kajian bioremediasi pada tanah tercemar pestisida. *Kovalen*, 2(3), 98–106. https://doi.org/10.4307/jsee.64.1_66
- Putri, Y. A., & Cintamulya, I. (2020). Pengendalian pencemaran tanah akibat pestisida melalui teknik bioremediasi. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, 5(2), 275–280. <http://prosiding.unirow.ac.id/index.php/SNasPPM>

- Raffa, C. M., & Chiampo, F. (2021). Bioremediation of agricultural soils polluted with pesticides: A review. *Bioengineering*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/bioengineering8070092>
- Rahmah, Y. P. (2022). Bantul bersama dalam pengendalian kerusakan tanah. *Jurnal Riset Daerah*, 22(3), 4263–4279. <https://doi.org/10.64730/jrdbantul.v22i3.79>
- Suryawan, Y. I., Ramdani, G., Pebriansyah, W., & Nabila, M. F. (2025). Pemantauan remediasi tanah hasil pembakaran. *J-Central*, 3(1), 19–26.
- Tang, K. H. D. (2025). Microplastics in soil: Uncovering their hidden chemical implications. *Tropical Aquatic and Soil Pollution*, 5(1), 88–109. <https://doi.org/10.53623/tasp.v5i1.703>
- Wang, F., Fang, L., & Shi, Z. (2024). Bioremediation of contaminated soil by fungi: A call for research. *Journal of Fungi*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/jof10100684>
- Zafira, Z. (2021). Bioremediasi sebagai alternatif pengembalian fungsi tanah yang tercemar minyak bumi. *Jurnal Jaring SainTek*, 3(2), 67–74. <https://doi.org/10.31599/jaringsaintek.v3i2.456>