

Artikel Penelitian

Bioremediasi dan Fitoremediasi Tanah Pertanian Tercemar Pestisida sebagai Upaya Pengelolaan Lahan Berkelanjutan

Studi Kasus: Desa Slemanan, Kec.Udanawu, Kab. Blitar

Eko Siswanto

Fakultas Pertanian dan Peternakan, Program Studi Agroteknologi, Universitas Islam Balitar, Kota Blitar, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 27 Desember 2025
Revisi Akhir: 13 Januari 2026
Diterbitkan *Online*: 14 Januari 2026

KATA KUNCI

Bioremediasi
Fitoremediasi
Kompos Organik
Pertanian Berkelanjutan
Residu Pestisida

KORESPONDENSI

Phone: +62 815-5582-4882
E-mail: ekosiswantolaskar96@gmail.com

A B S T R A K

Penggunaan pestisida secara intensif dalam sistem pertanian berkontribusi terhadap akumulasi residu kimia di dalam tanah yang berpotensi menurunkan kualitas lingkungan dan keberlanjutan lahan pertanian. Penelitian ini bertujuan menganalisis penerapan bioremediasi dan fitoremediasi sebagai upaya pengelolaan lahan pertanian berkelanjutan pada tanah tercemar pestisida di Desa Slemanan, Kecamatan Udanawu, Kabupaten Blitar. Metode penelitian menggunakan pendekatan observasional eksperimental melalui pengambilan sampel tanah pada lahan terpapar pestisida dan lahan pembanding. Bioremediasi in situ dilakukan dengan penambahan pupuk kompos organik untuk meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah, sedangkan fitoremediasi dievaluasi melalui identifikasi tanaman indigenous yang toleran terhadap kondisi tercemar. Analisis meliputi populasi mikroorganisme tanah menggunakan metode Total Plate Count (TPC), pengukuran sifat kimia tanah (pH, C-organik, dan N-organik), serta analisis residu pestisida menggunakan kromatografi gas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi kompos organik mampu meningkatkan populasi mikroorganisme tanah secara signifikan dan mempercepat penurunan residu pestisida hingga berada di bawah ambang batas aman (<0,003 ppm). Kondisi pH tanah relatif stabil pada kisaran netral, yang mendukung aktivitas mikroba pendegradasi. Selain itu, beberapa tanaman indigenous, terutama *Chromolaena odorata* L. dan *Vetiveria zizanioides* L., menunjukkan potensi sebagai agen fitoremediasi berdasarkan tingkat dominansi dan adaptasinya terhadap lahan tercemar. Integrasi bioremediasi dan fitoremediasi terbukti efektif dalam memulihkan kualitas tanah serta mendukung pengelolaan lahan pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk yang terus meningkat di Indonesia berimplikasi langsung pada meningkatnya kebutuhan pangan, sementara ketersediaan lahan pertanian mengalami penurunan akibat alih fungsi lahan dan urbanisasi. Kondisi ini mendorong intensifikasi pertanian melalui pemanfaatan berbagai sarana produksi, seperti alat dan mesin pertanian, pupuk, serta bahan kimia pertanian termasuk pestisida. Pestisida merupakan senyawa kimia, baik alami maupun sintesis, yang digunakan untuk mengendalikan organisme pengganggu tanaman guna menjaga stabilitas produksi pertanian. (Suryani et al., 2024)

Penggunaan pestisida secara intensif sering dipersepsikan sebagai strategi efektif dalam meningkatkan hasil panen, sehingga dapat mendorong ketergantungan petani terhadap aplikasi pestisida kimia secara berulang. Namun, sistem pertanian berbasis input kimia tinggi dalam jangka panjang berpotensi menyebabkan pencemaran lingkungan pada lahan

budidaya. Pestisida dapat berperan sebagai agen pencemar yang menyebar melalui tanah, air, dan udara, serta berdampak negatif terhadap organisme non-target, kesehatan manusia, dan kestabilan ekosistem pertanian (Ahmad et al., 2025).

Pestisida tergolong dalam kelompok *persistent organic pollutants* (POPs) yang memiliki sifat toksik, persisten, dan sulit terdegradasi secara alami di lingkungan. Karakteristik ini menyebabkan pestisida mampu bertahan dalam tanah dalam waktu lama serta berpotensi terakumulasi dalam jaringan organisme hidup melalui proses bioakumulasi. Akumulasi tersebut dapat menimbulkan efek kronis bagi makhluk hidup serta memperbesar risiko pencemaran rantai makanan dan degradasi kualitas lingkungan pertanian (Raffa & Chiampo, 2021).

Berbagai metode penanganan tanah tercemar pestisida telah dikembangkan, termasuk pendekatan fisik dan kimia. Namun, metode-metode tersebut umumnya membutuhkan biaya tinggi dan berpotensi menghasilkan residu sekunder yang dapat menimbulkan masalah lingkungan baru. Oleh karena itu, diperlukan alternatif teknologi yang lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan, salah satunya melalui penerapan teknologi remediasi berbasis biologi atau bioremediasi (Boudh, 2024).

Bioremediasi merupakan proses pemulihan lahan tercemar dengan memanfaatkan aktivitas biologis mikroorganisme atau tumbuhan untuk mendegradasi, menetralkan, atau mengurangi konsentrasi bahan pencemar hingga berada di bawah ambang batas yang diperkenankan. Dalam praktiknya, remediasi tanah dapat dilakukan melalui pendekatan *in situ* maupun *ex situ*, tergantung pada jenis dan tingkat cemaran, kondisi lingkungan, serta efektivitas metode yang diterapkan. Bioremediasi dan fitoremediasi dinilai memiliki keunggulan karena bersifat berkelanjutan, minim gangguan terhadap lahan, dan mendukung pemulihan fungsi ekosistem (Dhakal et al., 2025)

Sejalan dengan kebijakan lingkungan hidup di Indonesia, pemulihan lahan tercemar diatur melalui tahapan penghentian sumber pencemar, remediasi, rehabilitasi, dan restorasi fungsi lingkungan. Pendekatan berbasis biologi menjadi relevan untuk diterapkan pada lahan pertanian, mengingat karakteristiknya yang adaptif terhadap kondisi lapangan dan mendukung sistem pertanian berkelanjutan. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi dan analisis terhadap pengelolaan lahan pertanian, khususnya terkait penggunaan bahan organik dan penerapan teknik bioremediasi, guna menurunkan tingkat pencemaran tanah akibat penggunaan pestisida kimia (Randika et al., 2022)

Sejalan dengan permasalahan pencemaran tanah akibat penggunaan pestisida kimia secara intensif, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan bioremediasi dan fitoremediasi sebagai upaya pengelolaan lahan pertanian berkelanjutan. Penelitian difokuskan pada evaluasi kondisi lahan pertanian tercemar pestisida, peran pupuk kompos dalam meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah sebagai agen bioremediasi *in situ*, serta potensi tanaman indigenous sebagai agen fitoremediasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan model pengelolaan lahan pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

TINJAUAN PUSTAKA

Permasalahan Pencemaran Tanah

Pencemaran tanah dan air oleh senyawa organik dapat bersumber dari berbagai aktivitas, antara lain kegiatan industri, domestik, dan pertanian. Senyawa organik pencemar meliputi hidrokarbon aromatik, fenol, *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAH), serta hidrokarbon terklorinasi yang banyak ditemukan pada tanah dan air tanah tercemar. Di negara berkembang, sektor pertanian menjadi salah satu kontributor utama pencemaran tanah akibat penggunaan pestisida secara intensif dan berulang. Residu pestisida umumnya terdistribusi pada area yang luas dengan konsentrasi relatif rendah, namun bersifat persisten dan berpotensi menimbulkan dampak kronis terhadap organisme hidup. Pestisida termasuk dalam kelompok *persistent organic pollutants* (POPs) yang bersifat toksik, sulit terdegradasi, dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan, sehingga menurunkan kualitas lingkungan dan mengancam keberlanjutan sistem pertanian. Oleh karena itu, diperlukan strategi pengendalian dan pemulihan tanah tercemar yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya melalui teknologi remediasi tanah berbasis biologi (Raffa & Chiampo, 2021).

Selain berdampak terhadap kualitas tanah, pencemaran pestisida juga memengaruhi keseimbangan biologi tanah, khususnya penurunan keanekaragaman dan aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam siklus hara. Gangguan terhadap komunitas mikroba tanah dapat menurunkan kemampuan tanah dalam menyediakan unsur hara esensial bagi tanaman, sehingga berimplikasi pada penurunan produktivitas lahan dalam jangka panjang. Kondisi ini memperkuat

urgensi penerapan pendekatan pengelolaan tanah yang tidak hanya menurunkan residu pestisida, tetapi juga memulihkan fungsi biologis tanah secara menyeluruh (Raffa & Chiampo, 2021).

Bioremediasi

Bioremediasi merupakan pendekatan pengelolaan pencemaran lingkungan dengan memanfaatkan aktivitas organisme hidup, seperti bakteri, fungi, tanaman, atau enzim yang dihasilkannya, untuk mendegradasi atau mentransformasi polutan organik maupun anorganik menjadi senyawa yang kurang berbahaya atau berada di bawah ambang batas baku mutu lingkungan. Teknologi ini berkembang dari bidang bioteknologi lingkungan dan dinilai efektif karena memanfaatkan proses biologis alami. Selain relatif murah, bioremediasi dapat diterapkan langsung di lokasi tercemar (*in situ*) sehingga meminimalkan gangguan terhadap ekosistem dan aktivitas pertanian. Keunggulan utama bioremediasi terletak pada kemampuannya menyesuaikan dengan kondisi lingkungan setempat melalui pemanfaatan mikroorganisme indigenous yang telah beradaptasi dengan cemaran yang ada. Pendekatan ini dinilai lebih stabil dibandingkan introduksi mikroba asing karena mampu mengurangi risiko kegagalan proses degradasi akibat ketidaksesuaian lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan potensi biologis lokal menjadi prinsip penting dalam penerapan bioremediasi pada lahan pertanian tercemar pestisida (French et al., 2020).

Jenis dan Pendekatan Bioremediasi

Bioremediasi dapat diterapkan melalui pendekatan *in situ* maupun *ex situ*, bergantung pada luas lahan, tingkat pencemaran, dan karakteristik kontaminan. Pada lahan pertanian yang luas, pendekatan *ex situ* seringkali tidak efisien karena memerlukan pemindahan tanah dalam jumlah besar. Oleh sebab itu, penerapan bioremediasi *in situ* dengan penambahan bahan organik seperti pupuk kompos menjadi alternatif yang lebih aplikatif. Kompos berperan dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologis tanah, sekaligus menyediakan sumber nutrisi bagi mikroorganisme pendegradasi pestisida. Meskipun penggunaan pestisida dalam produksi hortikultura sulit dihindari, penerapan bioremediasi berbasis kompos terbukti mampu menurunkan residu pestisida serta memperbaiki kualitas lingkungan lahan pertanian (Ataikiru., 2023).

Dalam konteks pertanian berkelanjutan, bioremediasi *in situ* lebih direkomendasikan karena dapat diterapkan tanpa menghentikan aktivitas budidaya secara total. Integrasi bahan organik seperti kompos tidak hanya berfungsi sebagai sumber nutrisi bagi mikroorganisme pendegradasi, tetapi juga berkontribusi dalam meningkatkan kapasitas penyangga tanah terhadap cemaran kimia. Pendekatan ini menjadikan bioremediasi *in situ* lebih adaptif dan aplikatif bagi petani, khususnya pada lahan dengan intensitas penggunaan pestisida yang tinggi (Yu Yan Lau et al., 2023).

Berbagai bakteri tanah diketahui memiliki kemampuan bioakumulasi dan biotransformasi terhadap senyawa organik berbahaya seperti hidrokarbon, senyawa aromatik, dan pestisida melalui aktivitas metabolik dan enzimatisnya. Ringkasan jenis bakteri dan senyawa target bioremediasi yang dilaporkan dalam berbagai studi literatur disajikan pada Tabel 1 (Mishra et al., 2025; Ayalew Mekonnen et al., 2024).

Tabel 1. Bioakumulasi dan biotransformasi senyawa organik oleh bakteri.

Bakteri	Kimia Beracun
<i>Bacillus sp</i>	Cresol, fenol, aromatik, alkana rantai panjang
<i>Pseudomonas sp</i>	Benzen, antrasin, hidrokarbon, PCBs
<i>Flavobacterium sp</i>	Aromatik
<i>Azotobacter sp</i>	Aromatik
<i>Xanthomonas sp</i>	Hidrokarbon, Hidrokarbon polisiklik
<i>Nocardia sp</i>	Hidrokarbon
<i>Streptomyces sp</i>	Fenosiasetat, Hidrokarbon halogen, diazinon
<i>Mycobacterium sp</i>	Aromatik, hidrokarbon benzen bercabang, siklofarafin

Teknologi Bioremediasi

Secara umum, teknologi bioremediasi meliputi metode *ex situ* seperti *landfarming*, pengomposan, dan penggunaan bioreaktor, serta metode *in situ* yang dilakukan langsung pada lokasi tercemar. Metode *in situ* dinilai lebih sesuai untuk lahan pertanian karena tidak memerlukan pemindahan tanah, mengurangi risiko penyebaran kontaminan, dan lebih ekonomis. Pemilihan teknologi bioremediasi harus mempertimbangkan jenis polutan, kondisi tanah, ketersediaan mikroorganisme, serta faktor lingkungan yang memengaruhi proses biodegradasi (Vazquez et.al., 2024).

Keberhasilan penerapan teknologi bioremediasi sangat bergantung pada kesesuaian metode dengan karakteristik lahan dan jenis polutan. Pada lahan pertanian, pendekatan teknologi sederhana berbasis pengelolaan tanah dan bahan organik lebih mudah diadopsi dibandingkan teknologi berbiaya tinggi seperti bioreaktor. Oleh karena itu, strategi bioremediasi perlu dirancang secara kontekstual dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, dan sosial agar dapat diterapkan secara berkelanjutan oleh petani (Ivica Kisi, 2022).

Mekanisme Bioremediasi

Mekanisme bioremediasi melibatkan proses biologis yang mengurangi atau menghilangkan kontaminan melalui aktivitas metabolisme mikroorganisme dan interaksi dengan sistem perakaran tanaman. Mikroorganisme mampu menggunakan senyawa pencemar sebagai sumber karbon dan energi, sedangkan tanaman berperan dalam meningkatkan aktivitas mikroba di zona perakaran (*rhizosphere*). Faktor lingkungan seperti pH tanah, ketersediaan oksigen, dan nutrisi sangat memengaruhi efektivitas proses bioremediasi. Kondisi pH yang mendekati netral umumnya mendukung pertumbuhan mikroorganisme dan meningkatkan laju degradasi polutan (Freyle, et al., 2024).

Interaksi antara mikroorganisme dan tanaman di zona perakaran (*rhizosphere*) memiliki peran strategis dalam meningkatkan efisiensi bioremediasi. Eksudat akar dapat merangsang pertumbuhan mikroorganisme pendegradasi, sementara mikroba membantu meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Sinergi ini mempercepat proses degradasi pestisida serta mendukung pemulihan fungsi tanah secara biologis, sehingga mekanisme bioremediasi tidak berdiri sendiri, melainkan terintegrasi dalam sistem ekosistem tanah (Qudsia Saeed, et al., 2021)

Pemanfaatan Bioremediasi Sebagai Media Pendegradasi

Mikroorganisme tanah, khususnya bakteri, memiliki peran penting dalam pendegradasian residu pestisida dan hidrokarbon. Berbagai genus bakteri seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, dan *Mycobacterium* diketahui mampu melakukan bioakumulasi dan biotransformasi senyawa organik beracun. Aktivitas mikroba ini didukung oleh ketersediaan unsur hara mikro seperti Cr, Ca, Mg, Mn, Cu, Ni, dan Zn yang berfungsi sebagai kofaktor enzim dalam proses metabolisme dan reaksi redoks. Dengan demikian, optimalisasi kondisi tanah dan ketersediaan nutrisi menjadi faktor kunci keberhasilan bioremediasi. Efektivitas mikroorganisme sebagai agen pendegradasi pestisida sangat dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi dan kondisi lingkungan tanah. Penambahan bahan organik berfungsi sebagai sumber energi sekaligus memperbaiki habitat mikroba, sehingga meningkatkan laju biodegradasi pestisida. Dengan pengelolaan lingkungan tanah yang tepat, populasi mikroorganisme pendegradasi dapat berkembang secara optimal dan berkontribusi signifikan dalam menurunkan residu pestisida pada lahan pertanian (Yasir, 2025).

Tabel 2. Bakteri yang dapat mendegradasi logam berat

Bakteri	Kimia Beracun
<i>Bacillus sp</i>	Cu, Zn
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	U, Cu, Ni, Cr
<i>Aerococcus sp</i>	Pb, Cr, Cd
<i>Aeromonas sp</i>	Cr
<i>Rhodopseudomonas palustris</i>	Pb, Cr, Cd
<i>Citrobacter sp</i>	Cd, U, Pb

Bioremediasi berperan penting dalam mendegradasi, menghilangkan, mentransformasi, atau mendetoksifikasi berbagai bahan kimia berbahaya dan limbah fisik di lingkungan melalui aktivitas biologis bakteri, fungi, dan tumbuhan. Mikroorganisme yang terlibat bekerja melalui jalur enzimatik sebagai biokatalis yang memfasilitasi reaksi biokimia sehingga menurunkan konsentrasi polutan menjadi bentuk yang lebih stabil dan kurang toksik. Proses biodegradasi dapat berlangsung secara optimal apabila mikroorganisme memperoleh akses terhadap senyawa pencemar yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi dan nutrisi untuk pertumbuhan sel. Efektivitas bioremediasi dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain sifat kimia dan konsentrasi polutan, karakteristik fisikokimia lingkungan, serta ketersediaan nutrisi bagi mikroorganisme. Penurunan laju degradasi sering disebabkan oleh keterbatasan kontak antara mikroorganisme dan polutan, serta distribusi mikroba dan kontaminan yang tidak merata di dalam tanah. Oleh karena itu, pengendalian dan optimalisasi proses bioremediasi merupakan sistem yang kompleks yang dipengaruhi oleh keberadaan populasi mikroba pendegradasi, ketersediaan kontaminan, serta faktor lingkungan seperti jenis tanah, suhu, pH, ketersediaan oksigen atau akseptor elektron, dan nutrisi.

Faktor Penentu Bioremediasi

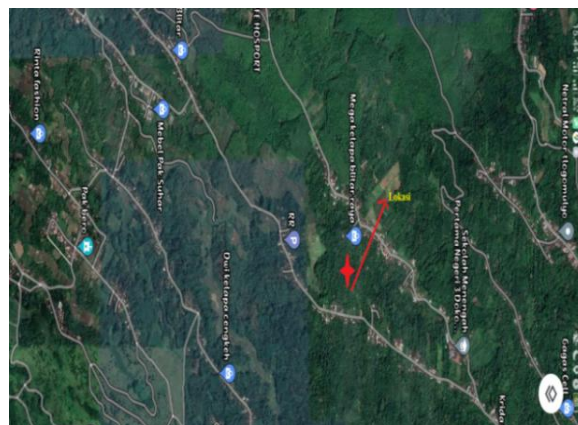
Beberapa faktor mempengaruhi efektivitas proses bioremediasi pada tanah yang terkontaminasi pestisida, di antaranya adalah komposisi dan aktivitas mikroba, ketersediaan nutrisi, serta kondisi lingkungan fisikokimia tanah. Mikroorganisme, terutama bakteri dan jamur tanah, bertindak sebagai agen biologis yang mendegradasi dan mentransformasi senyawa pestisida melalui reaksi enzimatik menjadi produk yang kurang berbahaya. Keberhasilan degradasi ini sangat dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara seperti karbon (C), nitrogen (N), dan fosfor (P) yang diperlukan mikroba untuk pertumbuhan dan aktivitas metabolik mereka. Selain itu, pH tanah, suhu, kadar oksigen, dan kelembapan tanah merupakan faktor lingkungan penting yang menentukan bioavailabilitas pestisida serta interaksi langsung antara mikroba dan polutan. Studi literatur juga menunjukkan bahwa optimalisasi kondisi lingkungan dan nutrisi dapat meningkatkan efisiensi degradasi pestisida oleh mikroorganisme yang spesifik, sehingga pendekatan bioremediasi dapat dilaksanakan secara lebih efektif di lahan pertanian yang tercemar (Daeli & Lase, 2025)

Fitoremediasi

Fitoremediasi merupakan teknik biologi yang menggunakan tanaman tertentu untuk mengakumulasi, menahan, atau mengubah kontaminan seperti residu pestisida di dalam tanah. Dalam proses ini, tanaman tidak hanya menyerap kontaminan melalui jaringan akar tetapi juga berkontribusi terhadap degradasi polutan melalui aktivitas enzimatik yang dilakukan oleh tanaman dan mikroba di rhizosfer (zona akar). Pendekatan ini terbukti lebih murah, ramah lingkungan, hemat energi, serta dapat diterapkan pada area lahan yang luas dibandingkan dengan teknik fisik atau kimia klasik. Misalnya, beberapa spesies tanaman dapat mentranslokasikan pestisida dari tanah ke jaringan vegetatifnya, sehingga membantu mengurangi konsentrasi pestisida di media tanah (Tarla dkk., 2020) (turn0search0). Selain itu, interaksi antara tanaman dan mikroba rhizosfer telah ditunjukkan mampu meningkatkan degradasi senyawa organik berbahaya termasuk residu pestisida, sehingga fitoremediasi menjadi pendekatan yang berpotensi mendukung pemulihan tanah pertanian secara berkelanjutan (Tarla, 2020).

METODOLOGI

Penelitian dilaksanakan pada lahan pertanian milik petani di Desa Slemanan, Kecamatan Udanawu, Kabupaten Blitar, Jawa Timur, pada bulan Desember 2025. Lokasi penelitian dipilih secara purposive berdasarkan intensitas penggunaan pestisida dalam sistem budidaya jagung yang dilakukan secara berulang. Secara fisiografis, lokasi penelitian berada pada ketinggian ± 123 meter di atas permukaan laut dan termasuk wilayah dataran rendah.



Gambar 1. Lokasi sampling tanah lahan petani jagung

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen lapangan (*field experiment*) dengan pendekatan bioremediasi in situ dan evaluasi potensi fitoremediasi. Penelitian bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan pupuk kompos organik terhadap dinamika populasi mikroorganisme tanah dan laju degradasi residu pestisida, serta mengidentifikasi tanaman *indigenous* yang berpotensi sebagai agen fitoremediasi pada lahan pertanian tercemar pestisida.

Lahan penelitian dibedakan menjadi dua perlakuan utama, yaitu: Lahan dengan aplikasi pupuk kompos organik, dan Lahan tanpa aplikasi kompos (kontrol). Pada masing-masing perlakuan, tanaman jagung disemprot pestisida Dithane M-

45 dengan tiga tingkat dosis, yaitu: 1,2 g/L/20 m² (dosis rendah); 2,4 g/L/20 m² (dosis sedang); dan 3,6 g/L/20 m² (dosis tinggi). Aplikasi pestisida dilakukan pada tanaman berumur satu bulan sesuai praktik petani setempat.

Pengambilan sampel tanah dilakukan pada dua tipe lahan, yaitu lahan pertanian yang terpapar pestisida dan lahan pembanding yang relatif bebas pestisida. Sampel tanah diambil secara komposit dari beberapa titik pengambilan pada setiap lahan dengan kedalaman 0–20 cm menggunakan cangkul dan cetok. Sampel dari masing-masing titik dicampur hingga homogen, kemudian dikeringanginkan dan ditimbang sebanyak ± 1 kg untuk keperluan analisis lebih lanjut.



Gambar 2. penimbangan sampel tanah lahan budidaya jagung



Gambar 3. Sampel tanah lahan budidaya jagung

Selain sampel tanah, dilakukan pula pengambilan dan identifikasi tanaman indigenous yang tumbuh dominan di sekitar lahan pertanian. Tanaman yang ditemukan diidentifikasi berdasarkan morfologi dan dicatat sebagai kandidat agen fitoremediasi berdasarkan tingkat dominansi dan toleransinya terhadap kondisi lahan tercemar.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi sampel tanah tercemar pestisida, tanah pembanding, pupuk kompos organik, serta tanaman indigenous yang ditemukan di sekitar lokasi penelitian. Peralatan yang digunakan antara lain cangkul, cetok, timbangan digital, ember, loyang plastik, peralatan gelas laboratorium, autoklaf, inkubator, dan peralatan analisis mikrobiologi serta kromatografi gas.

Analisis populasi mikroorganisme tanah dilakukan menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) pada media Plate Count Agar (PCA). Sampel tanah sebanyak 1 g diencerkan secara bertingkat menggunakan larutan NaCl fisiologis (0,9%) hingga pengenceran 10⁻⁶. Sebanyak 0,1 mL dari pengenceran 10⁻⁴ hingga 10⁻⁶ diinokulasikan pada media PCA dan diinkubasi pada suhu ruang selama 48 jam. Koloni mikroorganisme yang tumbuh dihitung pada cawan dengan jumlah koloni 30–300 untuk menentukan populasi mikroba tanah. Analisis residu pestisida dilakukan menggunakan metode kromatografi gas (GC) untuk mengetahui konsentrasi pestisida yang tersisa di dalam tanah. Selain itu, dilakukan pengukuran sifat kimia tanah meliputi pH tanah, kandungan C-organik, dan N-organik sebagai parameter pendukung dalam mengevaluasi efektivitas proses bioremediasi *in situ*.

Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan dinamika populasi mikroorganisme, perubahan sifat kimia tanah, serta penurunan konsentrasi residu pestisida pada berbagai perlakuan dan waktu pengamatan. Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi efektivitas bioremediasi berbasis kompos dan potensi tanaman indigenous sebagai agen fitoremediasi dalam mendukung pengelolaan lahan pertanian berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Umum Lahan Pertanian di desa Slemanan Udanawu Blitar

Secara umum, kondisi lahan pertanian di Desa Slemanan, Kecamatan Udanawu, Kabupaten Blitar menunjukkan bahwa praktik budidaya tanaman masih sangat bergantung pada penggunaan pestisida, baik dalam kegiatan pemeliharaan tanaman, pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT), maupun sanitasi lahan. Namun, dalam praktiknya, penggunaan pestisida oleh petani belum sepenuhnya menerapkan prinsip penggunaan pestisida yang tepat, khususnya konsep 6T yang meliputi ketepatan sasaran, mutu, jenis pestisida, waktu aplikasi, dosis atau konsentrasi formulasi, serta cara penggunaan.



Gambar 4. Peta lokasi pengambilan sampel (Desa Slemanan, Udanawu, Kab. Blitar)

Penggunaan pestisida yang tidak terkontrol berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, khususnya pada lahan budidaya pertanian. Salah satu dampak yang menjadi perhatian utama adalah terjadinya akumulasi residu pestisida dalam rantai makanan yang dapat mempengaruhi keberadaan organisme tingkat trofik tinggi, termasuk predator dan burung pemangsa. Selain dampak langsung tersebut, penggunaan pestisida juga dapat menurunkan populasi gulma, semak, dan serangga yang berperan sebagai sumber pakan bagi organisme tingkat atas, sehingga secara tidak langsung mengganggu keseimbangan ekosistem pertanian. Praktik penggunaan pestisida oleh petani di Desa Slemanan umumnya didasarkan pada pengalaman dan informasi yang berkembang di lingkungan sekitar. Petani cenderung memilih pestisida yang telah dikenal luas dan terbukti efektif dalam mengendalikan hama dan penyakit tanaman, namun juga terbuka untuk mencoba jenis pestisida baru yang direkomendasikan oleh sesama petani atau dipromosikan oleh distributor. Bagi sebagian besar petani, pengamatan terhadap keberhasilan penggunaan pestisida oleh petani lain menjadi sumber informasi utama dalam pengambilan keputusan. Aplikasi pestisida dilakukan sebagai langkah antisipatif terhadap risiko gagal panen akibat serangan organisme pengganggu tanaman (OPT), namun sering kali diterapkan secara rutin tanpa mempertimbangkan keberadaan hama di lapangan maupun ketepatan dosis yang dianjurkan.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa meskipun petani telah memiliki pengetahuan dasar mengenai konsep Pengendalian Hama Terpadu (PHT), tingginya risiko kegagalan panen, pengaruh lingkungan sosial, serta kebiasaan setempat menyebabkan penerapan prinsip pengendalian hama yang tepat belum dapat dilaksanakan secara optimal. Praktik ini secara tidak langsung berkontribusi terhadap akumulasi residu pestisida di dalam tanah dan memicu degradasi lahan pertanian. Di sisi lain, tanah merupakan sumber daya utama yang sangat penting bagi keberlanjutan usaha pertanian. Pemanfaatan lahan secara intensif tanpa diimbangi dengan upaya perbaikan dan pemulihan kualitas tanah dapat menyebabkan penurunan fungsi tanah, yang ditandai dengan berkurangnya kemampuan tanah dalam mendukung produktivitas pertanian secara berkelanjutan.



Gambar 5. Kondisi lahan bekas budidaya jagung di desa Slemanan Kec Udanawu Kab Blitar yang disemprot herbisida jenis Roundup

Penurunan kualitas tanah dan rendahnya produktivitas lahan pertanian dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain deforestasi, intensifikasi mekanisasi pertanian, pembakaran seresah tanaman dalam skala besar, penggunaan bahan kimia pertanian yang tidak sesuai prinsip 6T, serta penerapan sistem tanam monokultur. Salah satu input kimia yang berkontribusi signifikan terhadap degradasi tanah adalah pestisida, yang digunakan untuk mengendalikan organisme pengganggu tanaman. Setelah diaplikasikan, residu pestisida dapat terakumulasi pada tanaman, tanah, dan organisme tanah. Kondisi ini dipengaruhi oleh tingginya kandungan bahan organik pada lapisan tanah atas yang menyebabkan pestisida mudah teradsorpsi dan terikat kuat, sehingga menghambat proses penguapan.

Selain terakumulasi di dalam tanah, pestisida yang digunakan pada lahan pertanian berpotensi berpindah ke lingkungan perairan melalui sistem irigasi serta aliran permukaan (*runoff*), dan selanjutnya mencemari tanah di lokasi lain. Di dalam tanah, pestisida mengalami berbagai proses alamiah seperti adsorpsi, degradasi, dan transformasi kimia maupun biologis. Proses-proses tersebut dipengaruhi oleh sifat fisik dan kimia tanah, termasuk kelembaban, pH, dan suhu tanah, serta karakteristik pestisida, volatilitas, aktivitas mikroorganisme, dan kandungan senyawa kimia dalam tanah. Oleh karena itu, laju degradasi suatu pestisida sangat bergantung pada interaksi antara karakteristik tanah, aktivitas mikroorganisme, dan sifat intrinsik pestisida yang digunakan.

Degradasi Tanah Akibat Penggunaan Pestisida

Pemanfaatan lahan pertanian secara intensif tanpa disertai upaya perbaikan dan pemulihan kualitas tanah dapat menyebabkan degradasi tanah, yang ditandai dengan hilang atau menurunnya fungsi tanah sehingga kemampuan produktivitasnya ikut berkurang. Beberapa faktor utama yang berkontribusi terhadap degradasi dan rendahnya produktivitas tanah meliputi deforestasi, intensifikasi mekanisasi usaha tani, praktik pembakaran lahan, penggunaan bahan kimia pertanian yang berlebihan, serta sistem tanam monokultur. Kondisi lahan pertanian di Desa Slemanan saat ini menunjukkan kecenderungan penurunan produktivitas yang dipengaruhi oleh tingginya serangan organisme pengganggu tanaman (OPT) dan perubahan kondisi iklim. Situasi tersebut diduga berkaitan dengan menurunnya aktivitas mikroorganisme tanah akibat rendahnya masukan bahan organik. Praktik pertanian yang bergantung pada pupuk kimia dan pestisida secara terus-menerus, baik pada tahap pengolahan lahan, pemeliharaan tanaman, maupun pascapanen, berpotensi menurunkan kesuburan tanah dan berdampak pada produktivitas tanaman. Selain itu, praktik pembersihan lahan melalui pembakaran seresah atau sisa tanaman juga tidak dianjurkan karena dapat mempercepat kerusakan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah.



Gambar 6. Pembakaran seresah tanaman jagung pasca panen

Jenis tanah di Desa Slemanan diklasifikasikan sebagai tanah liat berpasir. Tanah dengan dominasi fraksi pasir umumnya memiliki pori-pori makro dalam jumlah besar sehingga bersifat sangat porous, sedangkan tanah berfraksi debu cenderung memiliki pori meso dengan tingkat porositas sedang, dan tanah berfraksi liat didominasi oleh pori mikro yang menyebabkan permeabilitas rendah. Tanah liat berpasir memiliki tekstur relatif kasar dengan daya ikat antarpartikel yang lemah serta tingkat kelengketan yang rendah akibat kandungan liat yang terbatas. Karakteristik tersebut menyebabkan kemampuan tanah dalam menahan air, mineral, dan unsur hara menjadi rendah, sehingga tingkat kesuburannya relatif terbatas. Oleh karena itu, upaya perbaikan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah melalui penambahan bahan organik menjadi penting untuk meningkatkan kapasitas simpan air, ketersediaan hara, serta mendukung aktivitas mikroorganisme tanah.

Mikroorganisme Pendegradasi Pestisida

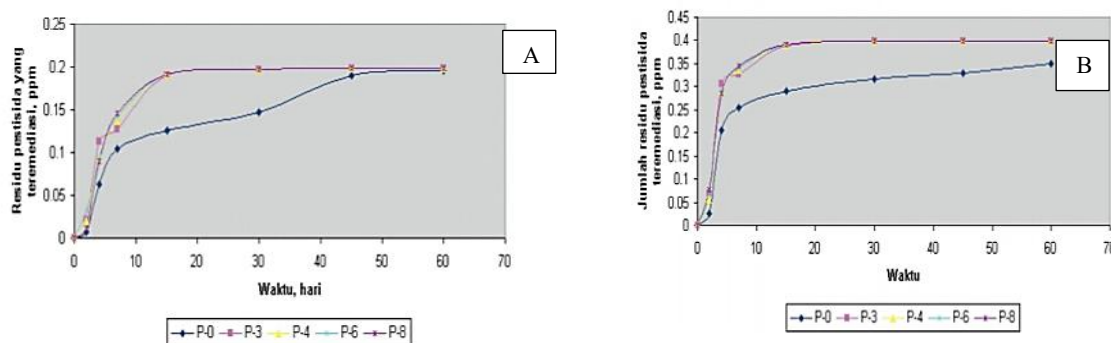
Mikroorganisme yang terdapat di dalam tanah berperan penting tidak hanya dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah tetapi juga dalam mengendalikan organisme pengganggu tanaman (OPT) serta memediasi degradasi residu pestisida. Komunitas mikroba tanah seperti bakteri, jamur, dan aktinomiset memainkan peran sentral dalam siklus nutrisi,

mempertahankan struktur tanah, serta mendukung pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme biokimia (Varghese et al., 2025). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa bakteri tanah spesifik mampu mendegradasi berbagai jenis pestisida aktif. Contohnya, strain *Serratia sarumani* telah diidentifikasi memiliki kemampuan biodegradasi terhadap beberapa bahan aktif pestisida seperti fludioxonil dan fenhexamid, yang divalidasi melalui analisis genomik dan kromatografi LC-MS/MS, menandakan potensi aplikasinya dalam pemulihan tanah yang tercemar pestisida (Sharma et al., 2025). Selain itu, isolat mikroba yang ditemui dalam penelitian mengenai laju degradasi organofosfat menunjukkan kemampuan degradasi mencapai lebih dari 75% pada pestisida seperti diazinon dalam media mineral dalam kurun waktu kurang dari dua minggu, mengindikasikan efektivitas mereka sebagai agen bioremediasi. Bukti lain memperlihatkan bahwa konsorsium bakteri dan fungi indigenous juga dapat meningkatkan degradasi pestisida sekaligus mendukung pertumbuhan tanaman pada lahan tercemar, menjadikan mikroba tanah sebagai komponen penting dalam strategi pemulihan lahan pertanian yang tercemar pestisida.

Penanggulangan Pencemaran tanah oleh Pestisida dengan Bioremediasi secara in situ

Upaya pengurangan tingkat kontaminasi pestisida pada lahan pertanian menjadi penting mengingat potensi residu pestisida untuk berpindah dari tanah ke tanaman pangan dan terakumulasi, sehingga berisiko terhadap kesehatan manusia melalui rantai konsumsi. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah bioremediasi, yaitu metode pemulihan tanah tercemar polutan khususnya pestisida melalui aktivitas mikroorganisme tanah maupun enzim yang dihasilkannya. Melalui proses bioremediasi, senyawa berbahaya dapat mengalami transformasi biologis menjadi senyawa yang kurang berbahaya atau tidak berbahaya bagi lingkungan.

Penerapan bioremediasi *in situ* dengan memanfaatkan pupuk kompos organik menjadi solusi yang relevan bagi petani di Desa Slemanan, mengingat ketersediaan bahan baku kompos yang melimpah dari aktivitas peternakan sapi dan kambing. Kompos organik tidak hanya berfungsi sebagai sumber bahan organik, tetapi juga sebagai media yang mendukung pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme pendegradasi pestisida, sehingga mampu mempercepat penurunan residu pestisida di dalam tanah. Hasil penelitian Miranda (2020) menunjukkan bahwa residu pestisida pada lahan hortikultura yang tidak diberi kompos mengalami proses remediasi yang lebih lambat dibandingkan lahan yang dipupuk dengan kompos. Pada lahan tanpa aplikasi kompos, waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan residu pestisida mencapai sekitar 45 hari, sedangkan pada lahan yang dipupuk dengan kompos waktu remediasi dapat dipersingkat hingga sekitar 7 hari.



Gambar 7. Akumulasi Residu Pestisida, A) Dosis Rendah, B) Dosis Tinggi

Lahan pertanian yang ditanami sayuran pada penelitian ini dibedakan menjadi dua perlakuan, yaitu lahan yang diberi pupuk kompos kotoran sapi dan lahan tanpa pemberian kompos sebagai kontrol. Pada saat tanaman berumur satu bulan, seluruh perlakuan disemprot pestisida Dithane M-45 dengan tiga tingkat dosis, yaitu 1,2 g/L/20 m² (dosis rendah), 2,4 g/L/20 m² (dosis sedang), dan 3,6 g/L/20 m² (dosis tinggi). Pengamatan dilakukan terhadap dinamika populasi bakteri dan kapang tanah pada kedalaman 0 cm, 0–5 cm, dan 5–10 cm, serta terhadap perubahan konsentrasi residu pestisida, kandungan C-organik, dan N-organik tanah.

Sampel tanah diambil secara berkala pada hari ke-0, 2, 4, 7, 15, 30, 45, dan 60 setelah aplikasi pestisida. Analisis populasi bakteri dilakukan menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) pada media *Plate Count Agar* (PCA). Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pemberian kompos organik secara nyata meningkatkan populasi mikroorganisme tanah dibandingkan dengan lahan tanpa kompos. Peningkatan populasi mikroba ini mengindikasikan bahwa bahan organik berperan sebagai sumber nutrisi dan energi bagi mikroorganisme pendegradasi residu pestisida. Penentuan residu pestisida dilakukan melalui analisis kromatografi gas, yang menunjukkan bahwa laju penurunan residu pestisida pada

lahan yang dipupuk kompos berlangsung lebih cepat dibandingkan lahan kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa proses bioremediasi *in situ* yang didukung oleh penambahan kompos mampu mempercepat degradasi Dithane M-45. Secara umum, efektivitas bioremediasi sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tanah, khususnya kandungan C/N rasio dan pH tanah.

Selama proses bioremediasi, nilai pH tanah relatif stabil dengan penyimpangan sebesar 0,22 dan berada pada kisaran 6,9–7,12, yang termasuk dalam kategori pH netral. Kondisi ini merupakan pH optimum bagi aktivitas mikroorganisme tanah dalam mendegradasi residu pestisida. Stabilitas pH tersebut menunjukkan bahwa proses bioremediasi *in situ* dengan penambahan kompos tidak menimbulkan gangguan signifikan terhadap keseimbangan kimia tanah. Pada ketiga tingkat dosis pestisida yang diaplikasikan, yaitu 1,2 g/L/20 m², 2,4 g/L/20 m², dan 3,6 g/L/20 m², terjadi peningkatan populasi mikroorganisme yang sejalan dengan penurunan konsentrasi residu pestisida. Pada hari ke-35 setelah aplikasi, residu pestisida yang terdeteksi berada pada kisaran 0,25–1,7%, dengan nilai konsentrasi akhir di bawah 0,003 ppm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa residu pestisida telah berada di bawah ambang batas yang ditetapkan, sehingga berpotensi aman bagi lingkungan dan produk hortikultura.

Hasil ini menegaskan bahwa penerapan bioremediasi *in situ* melalui pemanfaatan pupuk kompos organik efektif dalam menurunkan residu pestisida Dithane M-45 pada lahan hortikultura, sekaligus meningkatkan aktivitas biologis tanah. Pendekatan ini tidak hanya berperan dalam pemulihan kualitas tanah, tetapi juga mendukung sistem pertanian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Pemanfaatan Tanaman Indigenous Sebagai Fitoremediasi

Hasil pengamatan di lahan budidaya menunjukkan keberadaan sejumlah tumbuhan liar (*indigenous plants*) yang tumbuh di sekitar areal pertanian dan mendominasi lokasi penelitian. Identifikasi dilakukan terhadap jenis-jenis tumbuhan liar yang tumbuh secara alami dengan mempertimbangkan tingkat dominansi dan kemampuan adaptasinya terhadap kondisi lingkungan setempat. Toleransi dan ketahanan tanaman terhadap cemaran pestisida merupakan salah satu karakter penting yang dapat diamati secara ekologis dan dijadikan indikator awal potensi fitoremediasi.

Tanaman yang tumbuh di sekitar lahan budidaya dapat dikategorikan sebagai tanaman akumulator apabila memiliki kemampuan penyerapan cemaran yang tinggi, toleransi terhadap kondisi tercemar, serta kemampuan mentranslokasikan senyawa pencemar ke berbagai jaringan tanaman. Pada lokasi penelitian ditemukan sedikitnya delapan jenis tumbuhan liar yang mendominasi area sekitar lahan budidaya. Berdasarkan karakteristik pertumbuhan dan tingkat adaptasinya, tanaman-tanaman tersebut menunjukkan potensi untuk dimanfaatkan sebagai agen fitoremediasi.

Penentuan tingkat toleransi tanaman terhadap cemaran pestisida dilakukan melalui analisis Indeks Nilai Penting (INP), yang digunakan untuk menilai dominansi, frekuensi, dan kerapatan relatif masing-masing spesies. Nilai INP yang tinggi menunjukkan kemampuan tanaman dalam bertahan dan berkembang pada lingkungan yang terpapar pestisida, sehingga dapat dijadikan dasar dalam pemilihan tanaman akumulator potensial. Beberapa jenis tumbuhan liar (*indigenous*) yang ditemukan di sekitar lahan budidaya disajikan pada bagian berikutnya.

Tabel 3. Tanaman Indigenous yang ditemukan di area lahan budidaya desa Slemanan Kec. Udanawu Kab Blitar

No	Nama Latin	Nama Latin	Famili
1	Wedusan	<i>Ageratum conyzoides</i> , L	<i>Asteraceae</i>
2	Bayam Hutan	<i>Amaranthus</i> , spp	<i>Amarantaceae</i>
3	Lulangan	<i>Eleusine indica</i> , L.	<i>Poaceae</i>
4	Tempuyung	<i>Sonchus arvensis</i>	<i>Asteraceae</i>
5	Lamuran	<i>Sapindus mukorossi</i>	<i>Sapindaceae</i>
6	Rumput gajah	<i>Pennisetum purpureum</i>	<i>Gramineae</i>
7	Tapak liman	<i>Elephantopus scaber</i>	<i>Asteraceae</i>
8	Rumput Teki	<i>Cyperus rotundus</i> , L.	<i>Cyperaceae</i> .

Selain tanaman akumulator, berbagai spesies tanaman lain juga berpotensi dimanfaatkan sebagai agen fitoremediasi, khususnya melalui mekanisme fitostabilisasi. Kelompok tanaman seperti rumput-rumputan, semak, dan pohon dinilai efektif dalam menstabilkan tanah tercemar. Rumput liar mampu membentuk penutupan lahan dengan cepat sehingga berperan dalam mengurangi dispersi debu dan perpindahan kontaminan. Sementara itu, semak dan pohon membentuk kanopi yang luas serta sistem perakaran yang dalam, yang berfungsi menahan erosi dan meningkatkan stabilitas tanah

dalam jangka panjang. Selain fungsi fisik tersebut, keberadaan semak dan pohon juga berkontribusi terhadap peningkatan kesuburan tanah melalui akumulasi seresah, pengurangan cekaman air, serta perbaikan sifat fisik tanah.

Penggunaan Tanaman Chromolaena odorata L., dan Vetiveria zizanioides L. Sebagai Fitoremediasi

Chromolaena odorata L. dipilih sebagai salah satu tanaman fitoremediasi potensial untuk mengurangi kontaminasi pestisida di lahan pertanian karena sering ditemukan tumbuh liar di sekitar area budidaya, memiliki adaptasi ekologis yang kuat, dan mampu meningkatkan sifat kimia tanah melalui biomassa organiknya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa aplikasi *Chromolaena odorata* sebagai green manure dapat memperbaiki sifat kimia tanah seperti pH, total nitrogen, dan rasio C/N sehingga berkontribusi terhadap peningkatan kesuburan tanah yang terdegradasi. Meskipun penelitian langsung tentang kemampuan *Chromolaena odorata* untuk mendegradasi residu pestisida secara spesifik masih terbatas, potensi tanaman ini dalam meningkatkan struktur tanah dan menyediakan bahan organik yang mendukung aktivitas degradasi mikroba memberikan dasar ilmiah untuk mempertimbangkan penggunaannya dalam strategi fitoremediasi terpadu di lahan pertanian yang tercemar pestisida (Hafifah et al., 2025)

Selain itu, *Vetiveria zizanioides* (akar wangi) juga merupakan tanaman yang telah banyak dipelajari untuk fitoremediasi kontaminan tanah termasuk senyawa organik serta logam berat. Penelitian menunjukkan bahwa vetiver grass dapat mengakumulasi dan mentranslokasikan pestisida atrazin dari tanah dengan laju degradasi yang tinggi, di mana residu atrazin di rizosfer vetiver menurun jauh lebih cepat dibanding tanah tanpa tanaman (*Chrysopogon zizanioides* mampu mengurangi hingga 97,51% atrazin dalam 60 hari). Karakteristik *Vetiveria zizanioides* seperti sistem perakaran yang dalam, toleransi terhadap kondisi tanah ekstrem, dan kemampuan untuk mentransfer kontaminan ke akar dan bagian vegetatifnya menjadikannya tanaman yang efektif untuk fitoremediasi di lahan pertanian yang tercemar pestisida maupun kontaminan lainnya.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penggunaan pestisida secara intensif pada lahan pertanian di Desa Slemanan berpotensi menurunkan kualitas tanah melalui akumulasi residu pestisida dan penurunan aktivitas mikroorganisme tanah. Penerapan bioremediasi in situ berbasis pupuk kompos terbukti efektif meningkatkan aktivitas biologis tanah dan mempercepat degradasi residu pestisida hingga berada di bawah ambang batas aman, sementara tanaman indigenous seperti *Chromolaena odorata* L. dan *Vetiveria zizanioides* L. berpotensi mendukung proses fitoremediasi. Oleh karena itu, pengelolaan lahan pertanian disarankan mengintegrasikan bioremediasi–fitoremediasi dengan penggunaan bahan organik serta penerapan pestisida sesuai prinsip 6T guna mendukung keberlanjutan dan produktivitas lahan pertanian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada para petani di Desa Slemanan, Kecamatan Udanawu, Kabupaten Blitar atas kerja sama dan izin penggunaan lahan sebagai lokasi penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Fakultas Pertanian dan Peternakan Universitas Islam Balitar atas dukungan fasilitas dan pendampingan akademik selama pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alatassi, Gülperi, and Ömür Baysal. 2025. "Pesticide Degradation Capacity of a Novel Strain Belonging to *Serratia Sarumanii* with Its Genomic Profile." *Biodegradation* 36(3): 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10532-025-10144-2>.
- Ataikiru, Tega Lee-ann, and Chinyere Augusta. 2023. "Heliyon Enhanced Bioremediation of Pesticides Contaminated Soil Using Organic (Compost) and Inorganic (NPK) Fertilizers." *Heliyon* 9(12): e23133. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23133>.
- Ayalew Mekonnen, B. A., T. Assefa Aragaw, & M. B. Genet. (2024). Microbial bioremediation of soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Discover Soil*, 1, Article 9.
- Barciela, P. 2024. "In Situ and Ex Situ Bioremediation of Different Persistent Soil Pollutants as Agroecology Tool."

- Boudh, Siddharth, Shashank Tiwari, Chhatarpal Singh, and Jay Shankar Singh. 2024. "Lindane Degradation Potential of Methanotrophs and Soil Microbial Biomass from HCH Contaminated Sites." *Environmental Advances* 17(August): 100581. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100581>.
- Dhaifulloh, Ahmad Dhiyaul, Balqist Iqfirlana Khayumi, and Deul Tirtayuda. 2024. "Dampak Penggunaan Pestisida Kimia Terhadap Kualitas Tanah Dan Air Sungai Di Daerah Pertanian." 2(2).
- Dhakal, Gyanendra, and Srijana Thapa Magar. 2025. "Pesticide Degradation by Soil Bacteria : Mechanisms , Bioremediation Strategies , and Implications for Sustainable Agriculture." : 1–31.
- Dorthi Ester Junita Daeli, Natalia Krisitiani Lase. 2025. "Pemanfaatan Mikrobiologi Dalam Bioremediasi Tanah Pertanian Tercemar Pestisida : Kajian Literatur Universitas Nias , Indonesia." 2.
- French, Katherine E, Zhongrui Zhou, and Norman Terry. 2020. "Horizontal ' Gene Drives ' Harness Indigenous Bacteria for Bioremediation." *Scientific Reports*: 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72138-9>.
- Freyle, Nataly J Galan, Yani Aranguren Diaz, Susana L Ospina Maldonado, and Paula F Chapuel Aguillon. 2025. "Exploring Cadmium Bioaccumulation and Bioremediation Mechanisms and Related Genes in Soil Microorganisms : A Review." *Environmental Science and Pollution Research* 32(34): 20215–31. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36802-9>.
- Gunatilake, S K. 2022. "Bioremediation of Pesticide-Contaminated Soil : A Review on Indispensable Role of Soil Bacteria." 17(1): 19–43.
- Hrenovi, Jasna. 2022. "Bioremediation of Agriculture Soil Contaminated By."
- Jamin, Fitriah Suryani et al. 2024. "Penggunaan Pestisida Dalam Pertanian : Resiko Kesehatan Dan Alternatif Ramah Lingkungan Pesticide Use in Agriculture : Health Risks and Environmentally Friendly Alternatives." 7(11): 4151–59.
- Lau, Yu Yan, Erika Hernandes, Risky Ayu Kristanti, and Yureana Wijayanti. 2023. "Exploring the Potential of Composting for Bioremediation of Pesticides in Agricultural Sector." 3(1): 47–66.
- Mishra, T., Tiwari, P. B., Kanchan, S., & Kesheri, M. (2025). Advances in microbial bioremediation for effective wastewater treatment. *Water*, 17(22), 3196. <https://doi.org/10.3390/w17223196>
- Nazirah, Laila, and Muhammad Nazaruddin. 2025. "The Use of Chromolaena Odorata Green Manure to Improve Chemical Properties of Degraded Inceptisols and Growth and Yield of Peanut." 12(4): 8295–8303.
- Raffa, Carla Maria, and Fulvia Chiampo. 2021. "Bioremediation of Agricultural Soils Polluted with Pesticides : A Review."
- Saeed, Qudsia et al. 2021. "Rhizosphere Bacteria in Plant Growth Promotion , Biocontrol , and Bioremediation of Contaminated Sites : A Comprehensive Review of Effects and Mechanisms."
- Soil, Pesticide-contaminated et al. "Applied Sciences Phytoremediation and Bioremediation Of."
- Varghese, Diya Merlin, Michael Lie, and Risky Ayu Kristanti. 2025. "The Role of Microorganisms in the Degradation of Pesticides : A Sustainable Approach to Soil Remediation." 5(1): 34–52.
- Yasir, Muhammad, Abul Hossain, and Anubhav Pratap-singh. 2025. "Pesticide Degradation : Impacts on Soil Fertility and Nutrient Cycling."