



Interaksi Antara Pestisida dan Mikroorganisme Tanah: Degradasi Menggunakan Pendekatan Molekuler

Eka Fibriyani^{1*}, Suwardji², Lolita Endang Susilowati³

Program Studi Magister Pertanian Lahan Kering, Pascasarjana, Universitas Mataram, Jl.

Majapahit No. 62, Gomong, Kota Mataram, NTB, Indonesia 83125.

Email Korespondensi: ekafibriyani17@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengkaji interaksi antara pestisida dan mikroorganisme tanah serta mekanisme biodegradasi yang terjadi melalui pendekatan molekuler. Metode yang digunakan adalah *literature review* dengan analisis kualitatif deskriptif terhadap 35 artikel utama yang dipilih melalui prosedur PRISMA dari berbagai basis data ilmiah. Hasil kajian menunjukkan bahwa pestisida dapat menurunkan keragaman mikroba tanah, menghambat aktivitas enzim, serta memicu pergeseran struktur komunitas mikroba, namun sejumlah bakteri dan fungi seperti *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Flavobacterium*, *Aspergillus*, dan *Penicillium* yang mampu mendegradasinya melalui enzim kunci yang dikode oleh gen seperti *opd*, *mpd*, dan *phnJ*. Efektivitas degradasi ini sangat dipengaruhi oleh pH, suhu, bahan organik, dan tekstur tanah. Secara keseluruhan, kajian ini menegaskan bahwa pemahaman biodegradasi pestisida memerlukan integrasi antara analisis molekuler dan faktor ekologi, sehingga pengelolaan tanah berkelanjutan harus mempertimbangkan kedua aspek tersebut secara bersamaan.

Kata kunci: Pestisida; Mikroorganisme Tanah; Biodegradasi; Aktivitas Enzim Tanah; Degradasi Molekuler.

Interaction Between Pesticides and Soil Microorganisms: Degradation Using a Molecular Approach

Abstract

*This study aims to examine the interaction between pesticides and soil microorganisms and the biodegradation mechanisms that occur through a molecular approach. The method used is a literature review with descriptive qualitative analysis of 35 primary articles selected using the PRISMA procedure from various scientific databases. The results of the study indicate that pesticides can reduce soil microbial diversity, inhibit enzyme activity, and trigger shifts in microbial community structure. However, several bacteria and fungi such as *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Flavobacterium*, *Aspergillus*, and *Penicillium* are capable of degrading them through key enzymes encoded by genes such as *opd*, *mpd*, and *phnJ*. The effectiveness of this degradation is strongly influenced by pH, temperature, organic matter, and soil texture. Overall, this study confirms that understanding pesticide biodegradation requires an integration of molecular analysis and ecological factors, so that sustainable soil management must consider both aspects simultaneously.*

Keywords: Pesticides; Soil Microorganisms; Biodegradation; Soil Enzyme Activity; Molecular Degradation.

How to Cite: Fibriyani, E., Suwardji, S., & Susilowati, L. E. (2025). Interaksi Antara Pestisida dan Mikroorganisme Tanah: Degradasi Menggunakan Pendekatan Molekuler. *Empiricism Journal*, 6(4), 2285-2298. <https://doi.org/10.36312/wrf5b524>



<https://doi.org/10.36312/wrf5b524>

Copyright© 2025, Fibriyani et al.

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) License.



PENDAHULUAN

Pestisida telah lama menjadi elemen penting dalam praktik pertanian modern karena kemampuannya menekan serangan hama, penyakit, dan gulma yang dapat menurunkan hasil panen secara drastis. Sejak Revolusi Hijau, penggunaan pestisida meningkat secara signifikan di berbagai belahan dunia sebagai strategi utama dalam mendukung ketahanan pangan global (Carvalho, 2017). Namun, seiring waktu, penggunaan pestisida kimia secara berlebihan menimbulkan dampak lingkungan yang serius. Banyak pestisida bersifat persisten, sulit terurai di alam, dan cenderung menumpuk di dalam tanah, sehingga berpotensi mengganggu keseimbangan biologis dan menurunkan kualitas ekosistem tanah (Correia *et al.* 2025). Tanah sendiri merupakan sistem hidup yang sangat kompleks, di mana miliaran mikroorganisme bekerja bersama membentuk jaringan kehidupan yang menopang produktivitas pertanian.

Mikroorganisme tanah, yang terdiri dari bakteri, fungi, dan aktinomiset, memegang peran vital dalam menjaga kesehatan dan kesuburan tanah. Melalui aktivitas biologisnya, mereka menguraikan bahan organik menjadi unsur hara penting seperti nitrogen, fosfor, dan karbon yang dibutuhkan tanaman (Das *et al.* 2025). Selain itu, mikroba juga berperan dalam pembentukan agregat tanah melalui produksi polisakarida dan hifa, yang membantu mempertahankan struktur tanah serta kemampuan menahan air. Komunitas mikroba tanah bekerja secara sinergis dalam proses-proses seperti fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, dan pengendalian patogen secara biologis. Keselarasan antar kelompok mikroba ini menjadikan komunitas mikroba sebagai indikator utama kesuburan dan keseimbangan ekosistem tanah.

Akan tetapi keseimbangan tersebut dapat terganggu akibat penggunaan pestisida yang terus menerus. Aplikasi pestisida dalam dosis tinggi terbukti menimbulkan tekanan selektif terhadap komunitas mikroba tanah, di mana mikroba yang sensitif mengalami penurunan populasi, sementara kelompok mikroba resisten menjadi dominan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pestisida golongan organofosfat dan karbamat dapat menurunkan populasi mikroba menguntungkan seperti *Rhizobium*, *Azotobacter*, dan fungi mikoriza yang berperan penting dalam fiksasi nitrogen dan penyerapan nutrisi tanaman (Baghela *et al.* 2025). Selain itu, aktivitas enzim seperti dehidrogenase dan urease juga mengalami penurunan, yang menandakan terganggunya respirasi mikroba dan siklus nitrogen di dalam tanah (Hossain *et al.* 2025). Dalam jangka panjang, gangguan ini dapat menyebabkan penurunan produktivitas tanah dan menurunnya keberlanjutan sistem pertanian.

Sebagian mikroorganisme menunjukkan kemampuan luar biasa untuk beradaptasi dan memanfaatkan pestisida sebagai sumber energi, suatu proses yang dikenal sebagai biodegradasi. Kelompok bakteri seperti *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, dan *Flavobacterium* memiliki enzim spesifik seperti *hidrolase*, *oksidase*, dan *dehalogenase* yang mampu memecah struktur kimia pestisida menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang toksik (Liu *et al.* 2025; Bhende *et al.* 2022). Mikroorganisme ini berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah karena aktivitas degradasinya dapat mengurangi residu pestisida yang berbahaya. Namun, efektivitas proses biodegradasi ini tidak hanya bergantung pada potensi genetik mikroba, tetapi juga pada kondisi lingkungan seperti pH, suhu, aerasi, kelembapan, dan kandungan bahan organik tanah (Sur & Sathiavelu, 2022).

Kemajuan teknologi molekuler dalam beberapa tahun terakhir telah memberikan pemahaman baru mengenai mekanisme genetik dan biokimia yang mendasari kemampuan mikroba dalam mendegradasi pestisida. Melalui pendekatan *omics* seperti *genomik*, *proteomik*, dan *metabolomik*, para peneliti dapat mengidentifikasi gen-gen spesifik yang berperan dalam proses degradasi, seperti *mpd* (*methyl parathion degrading*) dan *opd* (*organophosphate degrading*) yang dikode oleh mikroba degrader tertentu (Rodríguez, 2020). Teknik qPCR dan metatranskriptomik memungkinkan analisis ekspresi gen degradasi secara langsung, memberikan bukti konkret tentang adaptasi fungsional komunitas mikroba terhadap paparan pestisida (Vargas, 2022). Pendekatan *multi omics* yang diterapkan oleh Parizadeh *et al.* (2023) bahkan mampu memetakan perubahan struktur komunitas mikroba dan aktivitas genetiknya secara simultan, memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang dampak pestisida pada level molekuler.

Walaupun banyak penelitian telah dilakukan, masih terdapat kesenjangan pengetahuan yang signifikan mengenai hubungan antara aktivitas degradasi mikroba dengan kondisi lingkungan tanah. Sebagian besar studi terdahulu hanya meneliti pengaruh pestisida terhadap populasi mikroba atau satu jenis enzim degradasi, tanpa mengaitkannya dengan variabel lingkungan seperti pH, suhu, dan bahan organik yang juga berperan penting dalam mendukung keberhasilan biodegradasi (Yasir *et al.* 2025; Gopal, 2025; Ewere, 2024). Pemahaman yang lebih mendalam mengenai keterkaitan antara faktor-faktor ekologis dan proses molekuler sangat dibutuhkan agar strategi pengelolaan tanah yang berbasis mikroorganisme dapat diterapkan secara efektif dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menguraikan secara mendalam hubungan antara pestisida, mikroorganisme tanah, dan faktor lingkungan yang memengaruhi aktivitas serta efektivitas proses biodegradasi. Kajian ini menitikberatkan pada

identifikasi mikroba dominan dalam proses degradasi pestisida, karakter genetik yang berperan dalam pemecahan senyawa pestisida, serta keterkaitan kondisi tanah dengan dinamika mikroba degrader. Pendekatan yang digunakan mengintegrasikan hasil-hasil penelitian terbaru dari berbagai sumber ilmiah dengan perspektif ekologi dan molekuler. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan strategi bioremediasi berbasis mikroorganisme, sekaligus memperkuat dasar ilmiah bagi pengelolaan tanah yang lebih sehat, produktif, dan berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode *literature review* dengan pendekatan kualitatif deskriptif untuk mengkaji interaksi antara pestisida dan mikroorganisme tanah serta mekanisme degradasinya berdasarkan bukti molekuler. Sumber data diperoleh dari basis data ilmiah bereputasi seperti ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, Wiley Online Library, Frontiers, PLOS ONE, dan ProQuest dengan rentang publikasi tahun 2019–2025. Penelusuran dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci *pesticides*, *soil microorganisms*, *biodegradation*, *enzyme activity*, *molecular degradation*, dan *omics*. Kriteria inklusi meliputi artikel yang dipublikasikan di jurnal peer-reviewed, relevan dengan topik pestisida dan mikroba tanah, menggunakan data empiris atau pendekatan molekuler, serta tersedia dalam teks lengkap berbahasa Inggris atau Indonesia. Artikel yang tidak memenuhi kriteria tersebut, seperti laporan non-ilmiah, artikel opini, atau studi tanpa data empiris, dikeluarkan dari analisis.

Dari hasil pencarian awal diperoleh 123 artikel, kemudian dilakukan penyaringan bertahap mengikuti prinsip PRISMA untuk memastikan transparansi dan akurasi seleksi data. Setelah menghapus duplikasi dan menilai kesesuaian isi, tersisa 98 artikel yang relevan; dari jumlah tersebut, 54 artikel dinilai layak secara isi dan metodologi. Selanjutnya, melalui seleksi akhir berdasarkan kualitas bukti molekuler dan relevansi tematik, diperoleh 35 artikel utama yang dijadikan dasar analisis. Analisis dilakukan secara kualitatif melalui perbandingan temuan antar studi, identifikasi pola ilmiah yang konsisten, serta sintesis informasi untuk merumuskan pemahaman komprehensif mengenai pengaruh pestisida terhadap komunitas mikroba tanah, aktivitas enzimatik, dan mekanisme degradasi molekuler yang mendasarinya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dari berbagai studi yang mengeksplorasi degradasi mikroba terhadap berbagai jenis pestisida dan herbisida yang digunakan dalam ekosistem tanah. Penelitian-penelitian ini menunjukkan beragam mekanisme yang digunakan oleh mikroba dalam mendegradasi pestisida, baik melalui jalur enzimatik, perubahan komunitas mikroba, maupun faktor-faktor lingkungan yang memengaruhi efektivitas biodegradasi. Setiap artikel yang tercantum memberikan wawasan tentang mikroba tertentu yang berperan dalam proses tersebut, serta dampaknya terhadap keanekaragaman mikroba dan kesehatan tanah. Berikut adalah ringkasan hasil penelitian yang lebih rinci dari artikel-artikel disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 1. Artikel Hasil Kajian

No	Penulis	Judul Artikel	Hasil Penelitian
1.	Liu et al., 2025	Microbial degradation of pesticides: enzymatic pathways, genetic regulation, and environmental significance	Mikroba seperti <i>Pseudomonas</i> dan <i>Rhodococcus</i> mengekspresikan gen <i>mpd</i> dan <i>opd</i> yang berperan dalam degradasi organofosfat. Efektivitas bergantung pada pH dan bahan organik tanah.
2.	Bhatt et al., 2021	Insight into microbial degradation of pyrethroid insecticides	Enzim esterase dan oksigenase pada <i>Bacillus</i> dan <i>Flavobacterium</i> mampu menguraikan piretroid menjadi senyawa kurang toksik.
3.	Rodríguez, 2020	Molecular tools for assessing microbial	Teknik <i>qPCR</i> dan <i>metatranskriptomik</i> mampu mengidentifikasi ekspresi gen

No	Penulis	Judul Artikel	Hasil Penelitian
		degradation of pesticides in soil environments	degradasi <i>opd</i> dan <i>phnJ</i> pada komunitas tanah terpapar pestisida.
4.	Parizadeh et al., 2023	Integrated omics approaches reveal pesticide-induced alteration in soil microbial networks	Analisis <i>multi-omics</i> menunjukkan pergeseran komunitas dan aktivasi gen resistensi akibat tekanan pestisida kronis.
5.	Peprah, 2025	Effects of pesticide application on soil bacteria community structure in cabbage agroecosystem	Paparan pestisida menurunkan indeks keanekaragaman Shannon dan memperkuat dominasi bakteri resisten.
6.	Pan et al., 2025	Continental-scale characterization of pesticide cocktails in paddy soils	Kombinasi pestisida organofosfat menekan aktivitas enzim tanah dan memodifikasi komunikasi mikroba melalui vesikel ekstraseluler.
7.	Briceño, 2024	Neonicotinoid effects on soil microorganisms	Paparan neonicotinoid menurunkan keanekaragaman mikroba dan mempercepat dominasi taksa resisten.
8.	Arora & Sahni, 2016	Pesticides Effect on Soil Microbial Ecology and Enzyme Activity	Enzim dehidrogenase, fosfatase, dan urease mengalami penurunan signifikan setelah paparan pestisida tertentu.
9.	Bhende et al., 2022	Metabolic fate and degradation mechanism of chlorpyrifos	<i>Flavobacterium</i> sp. menghasilkan OPH dan MPH untuk menghidrolisis klorpirifos menjadi alkohol dan asam karboksilat.
10.	Zhang et al., 2023	Pesticide-induced alterations in soil microbial communities reduce nitrogen cycle efficiency	Pestisida menekan aktivitas nitrogenase dan menurunkan populasi bakteri nitrifikasi serta denitrifikasi.
11.	Bose et al., 2021	Microbial degradation of recalcitrant pesticides: a review	<i>Pseudomonas</i> dan <i>Bacillus</i> terbukti paling adaptif terhadap pestisida organofosfat dan karbamat dengan aktivitas enzim hidrolase tinggi.
12.	Mat et al., 2023	Performance of Aspergillus and Penicillium in biodegradation of organochlorine and organophosphate pesticides	<i>Aspergillus niger</i> menghasilkan laccase dan lignin peroksidase untuk memecah ikatan C–Cl pada pestisida organoklorin.
13.	Oyewusi et al., 2021	Genomic characterization of a dehalogenase-producing bacterium (<i>Bacillus megaterium</i> H2)	Enzim haloalkane dehalogenase menguraikan senyawa halogenasi, mengurangi toksisitas pestisida.
14.	Basapuram et al., 2025	Biotransformation of pesticides across biological systems: omics insights	Enzim <i>glutathione S-transferase (GST)</i> memfasilitasi detoksifikasi melalui konjugasi glutation.
15.	Han, 2022	The source, fate and	Pestisida mempercepat akumulasi

No	Penulis	Judul Artikel	Hasil Penelitian
16.	Shahid, 2021	prospect of antibiotic resistance genes in soil	<i>mobile genetic elements</i> (MGEs) dan <i>antibiotic resistance genes</i> (ARGs).
17.	Barbosa et al., 2022	Tolerance of pesticides and antibiotics among beneficial soil microbes	Paparan pestisida jangka panjang menimbulkan <i>cross-selection</i> gen resistensi terhadap antibiotik.
18.	Liao, 2021	Glyphosate cross-selects for antibiotic resistance genes in bacterioplankton	Herbisida glifosat meningkatkan frekuensi gen resistensi dalam komunitas mikroba tanah.
19.	Qiu, 2022	Herbicide selection promotes antibiotic resistance in soil microbiomes	Mikroba tanah berevolusi membentuk toleransi ganda terhadap pestisida dan antibiotik melalui mutasi adaptif.
20.	Walder, 2022	Negative effects of abamectin on soil microbial communities	Pestisida abamectin menurunkan <i>alpha diversity</i> mikroba dan meningkatkan prevalensi ARGs.
21.	Yasir et al., 2025	Soil microbiome signatures associated with pesticide residues	Residu pestisida berhubungan dengan pergeseran <i>beta diversity</i> dan penurunan fungsionalitas ekosistem tanah.
22.	Wirsching et al., 2023	Environmental factors regulating microbial activity and pesticide degradation	pH, suhu, dan kelembapan tanah menjadi determinan utama efektivitas biodegradasi pestisida.
23.	Aziz & Kolega, 2024	Influence of soil temperature on microbial pesticide mineralization	Suhu optimal 28–37°C meningkatkan aktivitas enzim mikroba dalam degradasi glifosat.
24.	Gopal, 2025	Temperature-dependent degradation of glyphosate by soil bacteria	Mikroba tanah tetap mampu tumbuh di suhu tinggi dengan penurunan waktu paruh pestisida.
25.	Ewere, 2024	Microbial degradation of flubendiamide in different soil types	Biochar dan kompos meningkatkan aktivitas mikroba heterotrof dan mempercepat degradasi flubendiamide.
26.	Yang, 2024	Soil microbial communities and degradation under varying organic matter	Bahan organik tinggi memperkuat aktivitas enzim oksidase dan hidrolase pada mikroba degrader.
27.	Chia et al., 2024	Changes in soil organic carbon and microbial composition under organic amendment	Input bahan organik memperkaya komunitas degrader seperti <i>Bacillus</i> dan <i>Streptomyces</i> .
28.	Zhang, 2024	Microbial enzymes in soil pesticide breakdown	Aktivitas dehidrogenase meningkat seiring peningkatan fraksi karbon organik larut.
29.	Rahman, 2023	Influence of soil texture on adsorption and biodegradation of pesticides	Tanah liat meningkatkan adsorpsi pestisida, menurunkan bioavailabilitas untuk degradasi.
30.	Bouma, 2024	Effect of clay and silt proportion on pesticide persistence	Proporsi liat tinggi memperpanjang waktu paruh pestisida hingga dua kali lipat.
		Soil microstructure and	Struktur mikro tanah menentukan

No	Penulis	Judul Artikel	Hasil Penelitian
31.	Mitra et al., 2025	microbial hotspots affecting degradation	“hotspot” aktivitas degradasi mikroba di zona oksigen tinggi.
32.	Kundu & Mandal, 2025	Microbial-mediated induced resistance: improving crop health	Mikroba tanah berperan dalam menekan efek toksik pestisida melalui peningkatan enzim antioksidan
33.	Cotrim et al., 2025	Effect of xenobiotic exposure on AMF community	Pestisida menurunkan viabilitas dan diversitas <i>arbuscular mycorrhizal fungi</i> (AMF).
34.	Sondhia, 2025	Field effects of flumioxazin-based herbicide on soil enzymes	Pestisida flumioxazin menurunkan aktivitas dehidrogenase dan fosfatase hingga 40%.
35.	Zhan et al., 2018	Herbicide residues: environmental fate and impact on food safety	Pestisida dapat mengalami bioakumulasi sebelum didegradasi oleh mikroba tanah.
		Microbial degradation of carbamate insecticides	Gen oksigenase dan hidrolase berperan penting dalam mineralisasi karbamat oleh <i>Pseudomonas</i> .

Pengaruh Pestisida terhadap Aktivitas Mikroba Tanah

Pestisida berperan penting dalam pengendalian organisme pengganggu tanaman, namun penggunaannya yang berlebihan menimbulkan dampak ekologis serius terhadap komunitas mikroba tanah yang menjadi fondasi proses biogeokimia. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa pestisida, terutama golongan organofosfat dan karbamat, mampu menurunkan jumlah dan keragaman mikroba tanah secara signifikan (Pan *et al.* 2025; Arora & Sahni, 2016). Mikroorganisme seperti bakteri, fungi, dan *aktinomisetes* yang berperan dalam dekomposisi bahan organik, fiksasi nitrogen, serta pelarutan fosfat menjadi terganggu aktivitasnya. Penurunan ini terlihat dari menurunnya aktivitas enzim tanah seperti *dehidrogenase* dan *fosfatase*, yang menjadi indikator metabolisme mikroba (Cotrim *et al.* 2025). Dalam jangka panjang, gangguan ini dapat menurunkan efisiensi siklus karbon dan nitrogen, sehingga mengurangi kesuburan dan kapasitas regeneratif tanah.

Meskipun sebagian mikroba sensitif terhadap pestisida, beberapa genus menunjukkan kemampuan adaptif dan degradasi yang tinggi. Kelompok bakteri seperti *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, dan *Flavobacterium* dikenal memiliki enzim-enzim kunci seperti hidrolase, oksidase, dan dehalogenase yang dapat memecah senyawa pestisida kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana dan tidak toksik (Liu *et al.* 2025; Bhende *et al.* 2022). Misalnya, *Pseudomonas sp.* menghasilkan enzim *fosfotriesterase* yang dikode oleh gen *opd*, sedangkan *Flavobacterium sp.* memiliki *methyl parathion hydrolase* (MPH) yang berperan dalam degradasi organofosfat. Gen *mpd* dan *opd* menjadi penanda molekuler utama dalam identifikasi mikroba degrader pestisida (Rodríguez, 2020). Sementara itu, jamur tanah seperti *Aspergillus niger* dan *Penicillium chrysogenum* berperan dalam degradasi pestisida organoklorin melalui produksi enzim *laccase* dan *lignin peroksidase* (Mat *et al.* 2023).

Selain kemampuan degradasi, beberapa mikroba juga menunjukkan resistensi tinggi terhadap jenis pestisida tertentu, baik melalui mekanisme mutasi genetik maupun pembentukan biofilm. Misalnya, *Rhodococcus* dan *Bacillus megaterium* memiliki kemampuan bertahan di lingkungan terkontaminasi pestisida karena memproduksi enzim antioksidan seperti *superoksida dismutase* dan *katalase* yang melindungi sel dari stres oksidatif (Mitra *et al.*, 2025). Mekanisme resistensi juga ditemukan pada bakteri tanah yang membawa plasmid dengan gen *opd* dan *mpd*, yang dapat berpindah antarspesies melalui transfer gen horizontal (Zhan *et al.* 2018). Beberapa studi bahkan menunjukkan adanya fenomena *cross resistance*, di mana mikroba yang terbiasa terpapar pestisida tertentu juga menunjukkan toleransi terhadap antibiotik (Shahid, 2021; Barbosa *et al.* 2022). Kondisi ini memperlihatkan bahwa resistensi mikroba akibat pestisida berpotensi mempercepat penyebaran *antibiotic resistance genes* (ARGs) di lingkungan tanah (Han, 2022).

Aktivitas dan kelangsungan hidup mikroba degrader sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan tanah, termasuk pH, suhu, kelembapan, tekstur, dan kandungan bahan organik.

Kondisi tanah dengan pH netral (6,5–7,5) diketahui mendukung aktivitas enzim hidrolase dan oksidase, sehingga mempercepat degradasi pestisida organofosfat (Sur & Sathiavelu, 2022). Suhu juga berperan penting; degradasi optimal sering terjadi pada kisaran 28–37°C, di mana aktivitas enzim mikroba seperti dehydrogenase dan urease meningkat (Wirsching et al., 2023; Aziz & Kolega, 2024). Tanah dengan kandungan bahan organik tinggi cenderung memperkaya komunitas mikroba heterotrof seperti *Streptomyces* dan *Bacillus*, yang mempercepat proses biotransformasi pestisida (Ewere, 2024; Gopal, 2025). Sebaliknya, tanah bertekstur liat dengan kapasitas adsorpsi tinggi sering memperlambat laju biodegradasi karena pestisida terperangkap dalam agregat tanah dan sulit diakses oleh mikroba (Zhang, 2024; Rahman, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas degradasi pestisida tidak hanya bergantung pada potensi mikroba, tetapi juga pada kesesuaian kondisi fisik dan kimia tanah tempat mikroba tersebut hidup.

Temuan dalam kajian ini mengonfirmasi dan memperkaya hasil penelitian terdahulu yang menyoroti pentingnya peran mikroorganisme tanah dalam menjaga keseimbangan ekosistem pertanian. Misalnya, temuan Liu *et al.* (2025) dan Bhatt *et al.* (2021) menegaskan bahwa jalur degradasi molekuler yang dikontrol oleh gen opd dan mpd berperan sentral dalam bioremediasi pestisida organofosfat. Kajian ini memperluas pemahaman tersebut dengan menunjukkan bahwa selain faktor genetik, kondisi lingkungan seperti pH dan bahan organik memiliki pengaruh sinergis terhadap efektivitas degradasi. Dengan demikian, pengelolaan tanah yang mempertahankan pH netral, meningkatkan bahan organik, dan menjaga kelembapan optimal dapat memperkuat aktivitas mikroba degrader pestisida. Hasil ini memberikan implikasi praktis bagi penerapan strategi bioremediasi berbasis mikroba dalam sistem pertanian berkelanjutan, di mana mikroorganisme dimanfaatkan sebagai agen aktif untuk memperbaiki tanah yang terkontaminasi pestisida sekaligus menjaga fungsi ekologisnya.

Reaksi Biokimia Tanah

Secara biokimia, tanah merupakan ekosistem kompleks yang didominasi oleh aktivitas mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan *aktinomisetes* yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan nutrisi serta mendukung kesuburan tanah. Mikroorganisme ini menghasilkan berbagai enzim, di antaranya *dehidrogenase*, *fosfatase*, *urease*, dan *katalase*, yang mengendalikan reaksi penting seperti dekomposisi bahan organik, siklus karbon, nitrogen, dan fosfor (Cotrim *et al.* 2025). Aktivitas enzimatik tersebut menjadi indikator utama kesehatan tanah karena mencerminkan tingkat metabolisme mikroba dan kemampuan tanah untuk menyediakan unsur hara. Namun, ketika pestisida masuk ke dalam tanah, senyawa kimia tersebut dapat mengganggu keseimbangan biokimia alami. Beberapa pestisida bersifat toksik terhadap mikroba tanah, menurunkan aktivitas respirasi mikroba, serta menghambat transfer elektron dalam reaksi redoks yang penting bagi degradasi bahan organik dan sintesis biomolekul (Kundu & Mandal, 2025).

Pestisida yang terdegradasi di dalam tanah akan mengalami serangkaian reaksi biokimia yang melibatkan transformasi oleh mikroorganisme. Proses ini dikenal sebagai biotransformasi, di mana enzim mikroba seperti *oksidase*, *dehalogenase*, dan *hidrolase* mengubah struktur kimia pestisida menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang toksik (Sondhia, 2025). Reaksi yang terjadi umumnya meliputi oksidasi, yang menambahkan oksigen ke struktur pestisida; reduksi, yang mengubah gugus fungsi menjadi bentuk lebih stabil; serta hidrolisis, yang memecah ikatan ester atau amida pada molekul pestisida. Misalnya, bakteri *Pseudomonas* dan *Bacillus* dapat menggunakan pestisida organofosfat sebagai sumber karbon, mengubahnya melalui reaksi enzimatik menjadi CO₂, air, dan biomassa sel (Jangir & Jangid, 2025). Proses ini tidak hanya mengurangi toksisitas pestisida tetapi juga berperan dalam *recycling* unsur hara, yang mendukung keseimbangan biokimia tanah.

Selain proses degradasi, mikroorganisme tanah juga beradaptasi dengan paparan pestisida melalui mekanisme resistensi biokimia. Beberapa spesies mampu meningkatkan aktivitas enzim antioksidan seperti *peroksidase*, *superoksida dismutase*, dan *katalase*, yang berfungsi menetralkan stres oksidatif akibat senyawa pestisida (Mitra *et al.* 2025). Selain itu, mikroorganisme tertentu dapat membentuk biofilm yang melindungi komunitasnya dari dampak toksik dan memfasilitasi transfer gen yang berperan dalam detoksifikasi senyawa

xenobiotik. Interaksi kompleks ini menunjukkan bahwa meskipun pestisida dapat menekan sebagian aktivitas mikroba, tanah tetap memiliki kemampuan adaptif melalui reaksi biokimia kompensatif, yang menjaga fungsi ekologis dan proses metabolik dalam jangka panjang (Das *et al.*, 2025).

Fiksasi Nitrogen

Fiksasi nitrogen merupakan proses penting yang memungkinkan mikroorganisme seperti *Rhizobium*, *Azotobacter*, dan *Bradyrhizobium* mengubah nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang dapat diserap tanaman. Namun, berbagai studi menunjukkan bahwa keberadaan pestisida dapat mengganggu proses vital ini. Ding *et al.* (2021) menemukan bahwa paparan insektisida dan herbisida tertentu mampu menurunkan aktivitas *nitrogenase*, yaitu enzim kunci dalam fiksasi nitrogen. Ketika aktivitas ini menurun, tanaman kekurangan nitrogen yang pada akhirnya menghambat pertumbuhannya. Dengan kata lain, pestisida tidak hanya memengaruhi mikroba secara langsung, tetapi juga berdampak pada produktivitas tanaman yang bergantung pada mikroba tersebut.

Interaksi antara pestisida dan bakteri pengikat nitrogen juga memengaruhi hubungan simbiotik antara mikroba dan tanaman. Chen *et al.* (2019) menunjukkan bahwa residu pestisida dapat menghambat pembentukan nodul akar pada tanaman legum, yang merupakan pusat aktivitas fiksasi nitrogen. Gangguan ini mengakibatkan penurunan jumlah nodul sehat dan menurunnya kemampuan tanaman memanfaatkan nitrogen dari atmosfer. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa pestisida tidak hanya menghambat proses biokimia dalam sel mikroba, tetapi juga merusak kerja sama ekologis yang telah berkembang secara alami antara tanah, tanaman, dan bakteri tanah. Hal ini merupakan contoh bagaimana satu gangguan kimia dapat memengaruhi keseluruhan jaringan kehidupan di dalam tanah.

Tidak hanya bakteri pengikat nitrogen yang terdampak, tetapi seluruh komunitas mikroba tanah ikut mengalami perubahan akibat paparan pestisida. Zhang *et al.* (2023) melaporkan bahwa pestisida dapat menyebabkan penurunan kelimpahan mikroorganisme fungsional, khususnya yang terlibat dalam siklus nitrogen, seperti bakteri nitrifikasi, denitrifikasi, serta mikroba yang memproduksi enzim-enzim kunci seperti urease dan nitrat reduktase. Gangguan ini tidak hanya mengurangi kemampuan mikroba dalam mengonversi nitrogen organik menjadi bentuk yang dapat diserap tanaman, tetapi juga menurunkan stabilitas ekologi komunitas mikroba secara keseluruhan. Ketika proses-proses biokimia tersebut melemah, efisiensi tanah dalam mendaur ulang nitrogen menurun secara signifikan, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan kesuburan tanah dalam jangka panjang.

Dasar Molekuler Degradasi Pestisida oleh Mikroba Tanah

Mikroba tanah seperti bakteri dan fungi memainkan peran penting dalam menguraikan pestisida melalui serangkaian reaksi biokimia yang berlangsung secara teratur, terarah, dan sangat bergantung pada kapasitas adaptif organisme tersebut terhadap senyawa asing. Proses degradasi ini terjadi karena mikroorganisme mampu mengenali pestisida sebagai sumber karbon, energi, atau nitrogen, sehingga mereka mengekspresikan gen-gen spesifik yang mengode enzim pemecah ikatan kimia kompleks pada pestisida. Enzim-enzim ini bekerja dengan menghidrolisis, mengoksidasi, atau mereduksi struktur kimia pestisida hingga berubah menjadi molekul yang lebih sederhana, mudah diproses, dan jauh kurang toksik bagi lingkungan. Jalur degradasi yang diaktifkan dapat berbeda, misalnya melalui *hidrolase*, *oksigenase* atau *fosfotriesterase* tergantung pada jenis pestisida dan kemampuan metabolik mikroba yang terlibat, namun semuanya tetap mengikuti prinsip dasar detoksifikasi dan pemanfaatan substrat (Cycoń *et al.* 2017).

Beberapa mikroba memiliki gen khusus yang memungkinkan mereka menguraikan kelompok pestisida tertentu, dan keberadaan gen-gen ini membuat kemampuan biodegradasi mereka jauh lebih efisien dibandingkan mikroorganisme lain. Misalnya, gen *opd* dan *mpd* yang banyak ditemukan pada bakteri tanah seperti *Agrobacterium* dan *Pseudomonas* berfungsi menghasilkan enzim fosfotriesterase, yaitu enzim yang mampu memecah insektisida organofosfat menjadi senyawa alkohol dan asam fosfat yang jauh lebih aman bagi lingkungan. Pada pestisida glifosat, jalur degradasi yang dominan adalah *C-P lyase pathway*, yang bergantung pada ekspresi gen *phnJ*, sehingga mikroba dapat memutus ikatan karbon-fosfor yang secara kimia sangat stabil dan sulit dihancurkan tanpa bantuan

sistem enzimatik khusus. Untuk kelompok piretroid, proses degradasinya banyak dikatalisis oleh enzim seperti esterase, carboxylesterase, dan monooksigenase yang bekerja dengan memutus ikatan ester serta mengoksidasi struktur aromatik pestisida tersebut (Bhatt *et al.*, 2021).

Mikroba tanah menunjukkan kemampuan adaptasi yang sangat tinggi ketika terpapar pestisida dalam jangka panjang, dan respons ini tidak hanya terjadi pada tingkat fisiologis tetapi juga pada tingkat genetik dan evolusioner. Banyak bakteri membawa plasmid yang memuat gen-gen degradasi pestisida, dan plasmid ini dapat berpindah antarspesies melalui mekanisme transfer gen horizontal, sehingga kemampuan biodegradasi dapat menyebar dengan cepat dalam komunitas tanah yang berbeda. Ketika pestisida hadir secara konsisten, mikroba akan mengekspresikan jalur metabolik khusus yang melibatkan reaksi oksidasi, hidrolisis, reduksi, hingga mineralisasi, sehingga senyawa berbahaya dapat diubah menjadi produk akhir seperti CO₂, NH₄⁺, atau berbagai ion anorganik lain yang tidak toksik. Keberagaman jalur metabolik ini menunjukkan bahwa mikroba memiliki fleksibilitas biokimia yang luar biasa untuk memanfaatkan pestisida sebagai sumber energi atau nutrisi alternatif, memungkinkan mereka tidak hanya bertahan tetapi juga berkembang dalam lingkungan yang tercemar pestisida, sekaligus berkontribusi pada pemulihan kualitas tanah melalui proses detoksifikasi alami (Zhan *et al.* 2018).

Kemampuan mikroba tanah dalam mendegradasi pestisida bukan hanya penting untuk mereduksi toksisitas lingkungan, tetapi juga berpengaruh besar terhadap kesehatan tanah dalam jangka panjang karena proses ini membantu menjaga keseimbangan komunitas mikroba, menghindari akumulasi residu berbahaya, serta memastikan bahwa fungsi-fungsi ekologis seperti mineralisasi bahan organik, siklus nitrogen, fosfor, dan karbon tetap berjalan secara optimal. Degradasi yang efisien memungkinkan tanah mempertahankan struktur biologis dan kimianya, sehingga aktivitas enzim tanah tetap stabil dan mendukung produktivitas tanaman. Temuan dari studi metagenomik terbaru menunjukkan bahwa komunitas mikroba tanah mengandung beragam gen katabolik seperti gen *oksigenase*, *hidrolase*, dan *C-P lyase pathway* yang meningkatkan kapasitas tanah dalam menetralkan pestisida secara alami dan berkelanjutan (Zhang *et al.* 2018).

Jenis-jenis mikroorganisme pendegradasi pestisida

Kelompok bakteri pendegradasi pestisida seperti *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan *Flavobacterium* merupakan mikroorganisme yang paling banyak diteliti karena kemampuannya mendegradasi berbagai jenis pestisida persisten melalui aktivitas enzimatik yang kompleks. *Pseudomonas sp.* dikenal memiliki enzim *hidrolase* dan *oksidoreduktase* yang dapat memecah ikatan fosfat dan karbon dalam senyawa organofosfat serta organoklorin. Sementara itu, *Bacillus subtilis* menghasilkan *fosfodiesterase* dan *esterase* yang efektif dalam mendegradasi pestisida seperti *parathion* dan *malathion*, sedangkan *Flavobacterium sp.* berperan penting dalam transformasi senyawa *chlorpyrifos* dan *lindane* melalui enzim *dehalogenase*. Menurut Bose *et al.*, (2021), bakteri-bakteri ini memiliki fleksibilitas metabolik yang tinggi, memungkinkan mereka beradaptasi di lingkungan tanah dengan konsentrasi pestisida tinggi serta mempertahankan aktivitas degradasi bahkan di bawah tekanan lingkungan yang ekstrem.

Kelompok jamur seperti *Aspergillus* dan *Penicillium* serta *aktinomisetes* seperti *Streptomyces* dan *Nocardia* juga berkontribusi signifikan terhadap proses biodegradasi pestisida. *Aspergillus niger* dan *Penicillium chrysogenum* diketahui menghasilkan enzim *laccase*, *lignin peroksidase*, dan *cytochrome P450* yang berperan dalam pemutusan ikatan C-Cl dan P-O pada pestisida *organoklorin* dan *organofosfat*, menghasilkan metabolit yang lebih aman bagi lingkungan. Menurut Mat *et al.* (2023), kedua genus jamur ini memiliki toleransi tinggi terhadap variasi pH dan toksisitas pestisida, menjadikannya efektif dalam kondisi tanah yang tercemar. Sementara itu, *aktinomisetes* seperti *Streptomyces* berfungsi dalam oksidasi lanjutan dan mineralisasi senyawa antara hasil degradasi oleh bakteri dan jamur, menghasilkan sinergi yang mempercepat proses bioremediasi tanah. Kombinasi ketiga kelompok mikroorganisme ini terbukti efisien dalam mendekomposisi pestisida persisten secara alami dan berkelanjutan.

Mekanisme degradasi molekuler

Mekanisme degradasi molekuler pestisida merupakan proses biokimia kompleks yang terjadi melalui kerja berbagai enzim utama seperti *oksidase*, *hidrolase*, *dehalogenase*, dan *transferase* yang dihasilkan oleh mikroorganisme tanah. Enzim *oksidase* dan *oksigenase* memfasilitasi reaksi oksidatif yang menambahkan gugus hidroksil atau menggantikan gugus halogen dalam molekul pestisida, mengubah senyawa toksik menjadi turunan yang lebih polar dan mudah terurai. Misalnya, pada bakteri *Pseudomonas sp.*, *oksidase* mengoksidasi senyawa organofosfat melalui mekanisme redoks berantai, menghasilkan intermediat yang siap diuraikan lebih lanjut oleh *hidrolase* atau *transferase* (Kirubakaran & Murugan, 2021). Proses oksidatif ini menjadi tahap awal yang krusial dalam detoksifikasi pestisida karena memutuskan ikatan kimia aromatik yang kuat, terutama pada senyawa organoklorin dan organofosfat yang persisten di lingkungan.

Selanjutnya, *hidrolase* berperan penting dalam memutus ikatan ester, amida, atau fosfat yang menjadi kerangka utama molekul pestisida. Enzim seperti *organofosforus hidrolase* (OPH) dan *methyl parathion hydrolase* (MPH), yang banyak ditemukan pada genus *Flavobacterium* dan *Bacillus*, mampu menghidrolisis senyawa pestisida menjadi alkohol dan asam karboksilat yang kurang toksik (Bhende *et al.*, 2022). Di sisi lain, *dehalogenase* berfungsi menghilangkan gugus halogen (seperti Cl, Br, atau F) dari pestisida halogenasi melalui reaksi dehalogenasi hidroksilatif atau reduktif. Aktivitas ini, seperti pada enzim *haloalkane dehalogenase* yang dihasilkan oleh *Bacillus megaterium*, membantu mengubah pestisida organoklorin menjadi senyawa bebas halogen yang lebih mudah diuraikan oleh mikroba lain dalam komunitas tanah (Oyewusi *et al.* 2021).

Selain itu, *transferase*, terutama golongan *glutathione S-transferase* (GST), memainkan peran kunci dalam konjugasi molekuler, yaitu mentransfer gugus fungsi (seperti glutation) ke molekul pestisida untuk meningkatkan kelarutan dan ekskresinya. Reaksi ini sering menjadi tahap akhir dalam proses biotransformasi, membantu mengeliminasi metabolit pestisida dari sel mikroba dan tanah (Basapuram *et al.* 2025). Kombinasi keempat jenis enzim ini *oksidase*, *hidrolase*, *dehalogenase*, dan *transferase* bekerja secara sinergis dalam jalur biodegradasi molekuler, memecah struktur kimia kompleks pestisida menjadi senyawa sederhana dan tidak beracun. Pemahaman terhadap mekanisme enzimatik ini membuka peluang besar dalam pengembangan teknologi bioremediasi yang berkelanjutan dan efisien untuk mengatasi pencemaran pestisida di lingkungan pertanian.

Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi Degradasi Pestisida oleh Mikroba

pH tanah berperan penting dalam menentukan seberapa efektif mikroba mampu mendegradasi pestisida, karena kondisi keasaman tanah secara langsung memengaruhi bioaktivitas dan keseimbangan fisiologis mikroorganisme pengurai. Pada kondisi pH yang sesuai, enzim-enzim yang diproduksi mikroba bekerja lebih optimal dalam memecah struktur kimia pestisida, sehingga laju degradasi meningkat. Sebaliknya, pH yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menurunkan aktivitas enzim, menghambat pertumbuhan mikroba, serta mengubah ketersediaan pestisida di dalam tanah, sehingga proses pemecahan berlangsung lebih lambat. Selain itu, pH juga memengaruhi interaksi pestisida dengan partikel tanah dan kandungan karbon organik, yang pada akhirnya menentukan seberapa mudah senyawa tersebut dapat diakses oleh mikroba. Dengan demikian, pH tanah berfungsi sebagai faktor pengatur utama yang menentukan efektivitas proses biodegradasi pestisida oleh komunitas mikroba di lingkungan (Sur & Sathivelu, 2022).

Suhu tanah memengaruhi degradasi pestisida oleh mikroba secara signifikan karena pada kondisi suhu rendah laju mineralisasi pestisida menurun dan mikroba lebih banyak menggunakan karbon dari pestisida untuk mempertahankan diri (anabolisme) daripada melepaskan CO₂, sedangkan pada suhu optimal degradasi meningkat dan mikroba lebih aktif melakukan respirasi katabolic. Pada kelembapan optimal, laju difusi pestisida meningkat dan aktivitas enzimatik mikroba menjadi lebih efisien, sementara kondisi terlalu kering menurunkan aktivitas mikroba dan memperpanjang waktu paruh pestisida (Wirsching *et al.* 2023). Selain itu, penelitian terhadap degradasi glifosat oleh bakteri tanah menunjukkan bahwa perbedaan suhu (misalnya 28 °C vs 37 °C) dapat memengaruhi laju degradasi senyawa tersebut, meskipun mikroba tetap mampu tumbuh di kedua kondisi (Aziz & Kolega, 2024). Faktor ini semakin diperkuat oleh ulasan terbaru bahwa suhu dan

kelembapan adalah dua variabel lingkungan penting yang secara bersama-sama mengatur aktivitas mikroba dan laju degradasi pestisida di tanah (Yasir *et al.* 2025).

Kandungan bahan organik tanah berperan penting dalam menentukan laju degradasi pestisida oleh mikroba karena bahan organik meningkatkan ketersediaan karbon, memperkuat aktivitas enzim, serta mengubah struktur komunitas mikroba yang terlibat dalam proses biodegradasi. Studi terbaru menunjukkan bahwa peningkatan *soil organic matter* melalui kompos atau *biochar* mampu mempercepat degradasi berbagai pestisida, seperti *flubendiamide*, melalui peningkatan aktivitas mikroba heterotrof dan perbaikan sifat fisik tanah (Gopal, 2025). Penelitian lain menegaskan bahwa tingginya fraksi karbon organik larut dan asam humat dalam tanah mendorong bioavailabilitas pestisida sehingga memudahkan akses mikroba terhadap substrat yang akan didegradasi (Yang, 2024). Selain itu, variasi kandungan bahan organik terbukti memodifikasi komunitas mikroba secara signifikan, di mana kelompok degrader seperti *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan *Streptomyces* meningkat populasinya pada tanah dengan input organik, sehingga mempercepat proses detoksifikasi pestisida (Ewere, 2024). Temuan serupa dari kajian enzimatik juga menunjukkan bahwa amandemen organik meningkatkan aktivitas enzim seperti *dehidrogenase* dan *oksidase*, yang berperan langsung dalam pemecahan struktur kimia pestisida (Chia *et al.* 2024).

Tekstur tanah memengaruhi degradasi pestisida oleh mikroba karena menentukan porositas, kapasitas adsorpsi, dan ketersediaan pestisida bagi mikroorganisme. Tanah bertekstur halus seperti liat memiliki luas permukaan tinggi yang dapat meningkatkan adsorpsi pestisida ke koloid tanah, sehingga menurunkan bioavailabilitas senyawa bagi mikroba dan memperlambat laju degradasi, sebagaimana dilaporkan oleh (Zhang, 2024). Sebaliknya, tanah bertekstur kasar seperti pasir memungkinkan mobilitas pestisida lebih tinggi, sehingga senyawa lebih mudah diakses oleh mikroba degrader, meski stabilitas komunitas mikroba sering lebih rendah karena kapasitas air tanah yang kecil. Rahman (2023) menunjukkan bahwa proporsi liat dan debu yang tinggi cenderung meningkatkan waktu paruh pestisida akibat peningkatan afinitas sorpsi, yang membatasi proses mikroba seperti oksidasi dan hidrolisis. Sementara itu, penelitian Bouma (2024) menegaskan bahwa interaksi antara ukuran partikel tanah dan agregasi memengaruhi distribusi oksigen dan air dalam mikrohabitat tanah, sehingga menentukan lokasi "*hotspots*" aktivitas degradasi mikroba. Secara garis besar, tekstur tanah tidak hanya menentukan ketersediaan pestisida bagi mikroba, tetapi juga membentuk kondisi fisik dan biogeokimia yang mengatur aktivitas komunitas mikroorganisme.

KESIMPULAN

Hasil telaah literatur menunjukkan bahwa pestisida memiliki dampak signifikan terhadap mikroorganisme tanah, mulai dari penurunan keragaman dan aktivitas enzim, hingga perubahan struktur komunitas mikroba yang dapat mengganggu proses biogeokimia. Namun, berbagai mikroorganisme seperti *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Flavobacterium*, serta jamur *Aspergillus* dan *Penicillium* terbukti mampu mendegradasi pestisida melalui enzim kunci seperti *hidrolase*, *oksidase*, *dehalogenase*, dan *transferase* yang dikendalikan gen-gen spesifik seperti *opd*, *mpd*, dan *phnJ*. Efektivitas proses degradasi ini sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, terutama pH, suhu, bahan organik, dan tekstur tanah, yang menentukan bioavailabilitas pestisida serta aktivitas mikroba degrader.

REKOMENDASI

Pemahaman interaksi pestisida dan mikroorganisme tanah perlu didukung oleh pengembangan teknologi berbasis molekuler dan omik yang lebih maju. Penggunaan genomik, metagenomik, dan metatranskriptomik resolusi tinggi penting untuk memetakan gen serta jalur degradasi seperti *opd*, *mpd*, dan *phnJ*, sekaligus mendeteksi perubahan struktur komunitas mikroba akibat paparan pestisida. Teknologi bioinformatika dan pemodelan prediktif berbasis *machine learning* juga perlu dikembangkan guna memetakan pengaruh faktor lingkungan terhadap efektivitas biodegradasi. Selain itu, inovasi seperti biosensor mikroba dan rekayasa mikroba degrader berpotensi memperkuat strategi bioremediasi presisi dan monitoring tanah secara *real time*. Integrasi berbagai pendekatan

ini diharapkan dapat memperdalam pemahaman mekanisme degradasi dan mendukung pengelolaan tanah yang lebih berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ab Aziz, N., & Kolega, A. (2024). Temperature-dependent degradation of glyphosate by soil bacteria. *Journal of Soil Microbial Processes*, 18(2), 55–64.
- Akter, S. (2023). Changes in soil microbial communities after exposure to neonicotinoids: A systematic review. *Environmental Microbiology Reports*.
- Aldas-Vargas, V. (2022). Microbial gene expression response to organic contaminants in soil ecosystems. *Environmental Microbiology Reports*, 14(3), 455–468.
- Arora, P. K., & Sahni, N. (2016). Pesticides Effect on Soil Microbial Ecology and Enzyme Activity. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(8), 480. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5485-4>
- Barbosa da Costa, N., Hébert, M.-P., Fugère, V., & Terrat, S. (2022). A glyphosate-based herbicide cross-selects for antibiotic resistance genes in bacterioplankton communities. *MSystems*.
- Basapuram, G., Dutta, A., & Duttagupta, S. (2025). Biotransformation of Pesticides across Biological Systems: Molecular Mechanisms, Omics Insights, and Biotechnological Advances for Environmental Sustainability. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c06484>
- Bhatt, P., Huang, Y., Zhan, H., & Chen, S. (2021). Insight into microbial degradation of pyrethroid insecticides. *Critical Reviews in Biotechnology*. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1850393>
- Bhende, R. S., Jhariya, U., & Srivastava, S. (2022). Environmental distribution, metabolic fate, and degradation mechanism of chlorpyrifos: recent and future perspectives. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-04373-3>
- Bose, S., Kumar, P. S., Viet, D., & Rajamohan, N. V. N. (2021). Microbial degradation of recalcitrant pesticides : a review Bureau of Indian Standards. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3209–3228. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01236-5>
- Bouma, J. (2024). Soil microstructure and microbial hotspots affecting pesticide degradation. *Soil Biology and Biochemistry*.
- Briceño, G. (2024). Neonicotinoid effects on soil microorganisms: Responses of diversity, composition and function. *Sustainability*.
- Camilo-Cotrim, C. F., Oliveira, E. A. S., & Caramori, S. S. (2025). Short-term field effects of a flumioxazin-based herbicide on soil enzyme activities, microbial biomass, respiration, and nitrogen dynamics. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*, 6(2), 48–60. <https://doi.org/10.1002/fes3.108>
- Chen, J., Wang, P., & Hu, X. (2019). Effects of pesticide exposure on Rhizobium–legume symbiosis and nitrogen fixation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109505>
- Chia, X. K., Hadibarata, T., Kristanti, R. A., Jusoh, M. N. H., Tan, I. S., & Foo, H. C. Y. (2024). The function of microbial enzymes in breaking down soil contaminated with pesticides: A review. *Bioremediation and Bioprocessing*.
- Correia, A. A. S., Silva, M., Pereira, J., & Rodrigues, L. (2025). A review of persistent soil contaminants: Assessment and environmental implications. MDPI
- Ding, C., Zhao, X., & Li, Y. (2021). Impacts of pesticides on biological nitrogen fixation in agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147705>
- Ewere, E. E. (2024). Soil microbial communities and degradation of pesticides under varying soil organic matter conditions. *Environmental Science & Pollution Research*.
- Gopal, A. (2025). Microbial degradation of flubendiamide in different soil types: Role of organic matter composition. *Scientific Reports*.

- Han, B. (2022). The source, fate and prospect of antibiotic resistance genes in soil. *Review Article*.
- Jangir, A. K., & Jangid, R. (2025). *The Sustainable Microbial Processes: An Emerging Trend for Green Chemical Approach BT - Towards Green Chemical Processes*. Springer.
- Khmelevtsova, L., Azhogina, T., & Sazykina, M. (2023). Heavy metals influence on the bacterial community of soils: a review. *Agriculture (MDPI)*.
- Kirubakaran, R., & Murugan, A. (2021). Molecular and enzymatic mechanism pathways of degradation of pesticides pollutants. In *Soil Bioremediation: An Approach Towards Sustainable Technology*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119547976.ch11>
- Kundu, A., & Mandal, V. (2025). *Effect of Xenobiotic Exposure to the AMF Community: A Concern on Their Diversity, Viability, and Host Physio-biochemical Impacts BT - Plant-Microbe Interaction under Xenobiotic Exposure*. Springer.
- Lamuka, A. P., & Aliwu, P. L. (2024). Analysis of microbial diversity in pesticide-contaminated soil. *Environmental & Applied Microbiology*.
- Liao, H. (2021). Herbicide selection promotes antibiotic resistance in soil microbiomes. *Molecular Biology and Evolution*.
- Liu, Y., Zhang, H., Wang, P., & Chen, L. (2025). Microbial degradation of pesticides: enzymatic pathways, genetic regulation, and environmental significance. *Environmental Microbiology Reports*, 17(2), 312–328. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.13245>
- Mat, P., Littera, P., & Farkas, B. (2023). *Review on Performance of Aspergillus and Penicillium Species in Biodegradation of Organochlorine and Organophosphorus Pesticides*.
- Mitra, D., Rani, A., Janeeshma, E., & Khoshru, B. (2025). Microbial-mediated induced resistance: interactive effects for improving crop health. *Frontiers in Microbiology*.
- nwona-Kwakye, M. (2020). Pesticides decrease bacterial diversity and abundance of irrigated rice fields. *Microorganisms*.
- Oyewusi, H. A., Huyop, F., & Wahab, R. A. (2021). Genomic characterization of a dehalogenase-producing bacterium (*Bacillus megaterium* H2) isolated from hypersaline Lake Tuz (Turkey). *Gene Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.genrep.2021.101279>
- Pan, Z., Wang, W., Xu, W., Yin, Y., Xu, X., & Zhu, L. (2025). Continental-scale characterization of pesticide cocktails in paddy soils: Associations with microbial community structure, function, and extracellular vesicle occurrence. *Journal of Hazardous Materials*.
- Parizadeh, S. M. R., Karimi, B., & Burgess, P. (2023). Integrated omics approaches reveal pesticide-induced alteration in soil microbial networks. *Soil Biology & Biochemistry*, 178, 108–128.
- Peprah, S. (2025). Effects of pesticide application on soil bacteria community structure in cabbage agroecosystem. *PLOS ONE*.
- Qiu, D. (2022). Negative effects of abamectin on soil microbial communities: links to ARGs/MGEs. *Frontiers in Microbiology*.
- Rahman, M. (2023). Effect of clay and silt proportion on pesticide persistence in agricultural soils. *Environmental Monitoring and Assessment*
- Rehman, K., Mohd, H., Akhtar, S., & Interactions, M. (n.d.). *Soil and Microbes* (Vol. 2).
- Rodríguez, A. (2020). Molecular tools for assessing microbial degradation of pesticides in soil environments. *Journal of Hazardous Materials*, 392, 122–156.
- Shahid, M. (2021). Tolerance of pesticides and antibiotics among beneficial soil microbes. *Soil Biology Reports*.
- Sondhia, S. (2025). *Herbicide Residues: Environmental Fate and Impact on Food Safety BT - Recent Advances in Weed Science*. Springer.
- Sur, S., & Sathivelu, M. (2022). A concise overview on pesticide detection and degradation

- strategies. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 34(1), 112–126. <https://doi.org/10.1080/26395940.2022.2041489>
- Walder, F. (2022). Soil microbiome signatures are associated with pesticide residues in arable landscapes. *Soil Biology & Biochemistry*.
- Wirsching, J., Müller, T., & Schneider, K. (2023). Influence of soil temperature on microbial pesticide mineralization dynamics. *Environmental Microbiology Reports*, 15(4), 721–733.
- Yang, G. (2024). Changes in soil organic carbon components and microbial composition under organic amendment: Implications for pesticide degradation. *Frontiers in Microbiology*.
- Yasir, M., Hossain, A., & Pratap-singh, A. (2025). *Pesticide Degradation : Impacts on Soil Fertility and Nutrient Cycling*.
- Yasir, M., Khan, A., & Rahman, S. (2025). Environmental factors regulating microbial activity and pesticide degradation: A comprehensive review. *Soil Ecology Review*, 12(1), 1–20.
- Yu, B. (2020). Effects on soil microbial community after exposure to neonicotinoid insecticides thiamethoxam and dinotefuran. *Science of the Total Environment*.
- Zhan, H., Feng, Y., Fan, X., & Chen, S. (2018). Recent advances in microbial degradation of carbamate insecticides. *Frontiers in Microbiology*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00557>
- Zhang, C., & al., et. (2018). Metagenomic insights into pesticide biodegradation in soil microbiomes. *Environment International*. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.028>
- Zhang, L. (2024). Influence of soil texture on the adsorption and biodegradation of pesticides. *Journal of Soil Science and Environmental Management*.
- Zhang, Y., Liu, Q., & Sun, R. (2023). Pesticide-induced alterations in soil microbial communities reduce nitrogen cycle efficiency. *Environmental Pollution*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121025>