

Pemanfaatan Mikrobiologi dalam Bioremediasi Tanah Pertanian Tercemar Pestisida : Kajian Literatur

Dorthi Ester Junita Daeli^{1*}, Natalia Krisitiani Lase²

^{1,2} Universitas Nias, Indonesia

Alamat : Jalan Yos Sudarso No. 118/E-S, Ombolata Ulu, Gunungsitoli, Kota Gunungsitoli,
Sumatera Utara 22812, Indonesia

Correspondence author : dorthiester@gmail.com *

Abstract, *Soil pollution is a global problem with anthropological and natural sources. Pesticides are chemical compounds used to eradicate pests. Pesticides are chemical or biological agents that can weaken, paralyze, and kill pests. According to a report by FAO (2021), global pesticide use reaches more than 4 million tons per year, with Asia accounting for nearly 50% of total consumption. In Indonesia, data from the Ministry of Agriculture (2022) shows that pesticide use increased by 15% in the last decade. Unfortunately, the intensive and uncontrolled use of pesticides has triggered the accumulation of harmful residues in the soil, creating a serious threat to soil, environmental, and human health. The purpose of this study was to determine how the utilization of microbiology in the bioremediation of agricultural soil polluted with pesticides. The method in this journal article uses a library study (library research), namely a method with data collection by understanding and studying theories from various literatures related to the research. The results show that soil bioremediation to reduce pesticides in agricultural soils can be done by utilizing specific or local microorganisms (bacteria and fungi), or enzymatic degradation. Although in laboratory scale, many findings on soil bioremediation are available in the literature, only few data on real scale activities can be found.*

Keywords: *Microbiology, Bioremediation, pesticides, agricultural soil*

Abstrak, Pencemaran tanah merupakan masalah global yang bersumber dari sumber-sumber antropologis dan alami. Pestisida adalah senyawa kimia yang digunakan untuk membasmi hama. Pestisida merupakan bahan kimia atau biologis yang dapat melemahkan, melumpuhkan, dan membunuh hama. Menurut laporan FAO (2021), penggunaan pestisida global mencapai lebih dari 4 juta ton per tahun, dengan Asia menyumbang hampir 50% dari total konsumsi. Di Indonesia, data Kementerian Pertanian (2022) menunjukkan bahwa penggunaan pestisida meningkat sebesar 15% dalam dekade terakhir. Sayangnya, penggunaan pestisida secara intensif dan tidak terkendali telah memicu akumulasi residu berbahaya di tanah, menciptakan ancaman serius bagi kesehatan tanah, lingkungan, dan manusia. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui bagaimana pemanfaatan mikrobiologi dalam bioremediasi tanah pertanian tercemar pestisida. Metode pada artikel jurnal ini menggunakan studi pustaka (library research) yaitu metode dengan pengumpulan data dengan cara memahami dan mempelajari teori-teori dari berbagai literatur yang berhubungan dengan penelitian tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bioremediasi tanah untuk mengurangi pestisida pada tanah pertanian dapat dilakukan dengan memanfaatkan mikroorganisme spesifik atau lokal (bakteri dan jamur), atau degradasi enzimatis. Meskipun dalam skala laboratorium, banyak temuan tentang bioremediasi tanah tersedia dalam literatur, hanya sedikit data tentang aktivitas skala nyata yang dapat ditemukan.

Kata Kunci: Mikrobiologi, Bioremediasi, pestisida, tanah pertanian

1. PENDAHULUAN

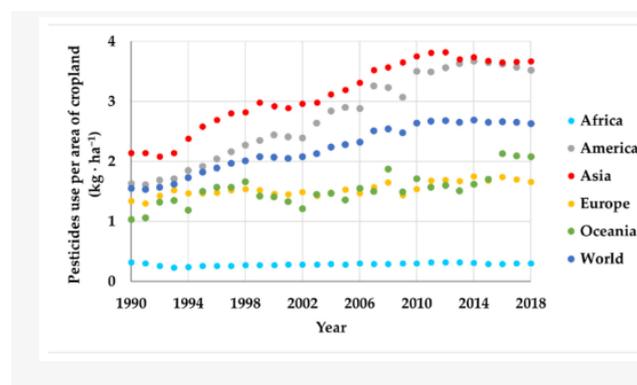
Pencemaran tanah merupakan masalah global yang bersumber dari sumber-sumber antropologis dan alami. Urbanisasi, industrialisasi, dan peningkatan permintaan pangan telah membutuhkan penggunaan senyawa, zat, dan agen kimia, yang selama bertahun-tahun telah menyebabkan penyebaran dan akumulasi polutan di lingkungan. Polutan umum yang ada di

tanah adalah logam berat, hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH), atau pestisida (Mirsal, 2008).

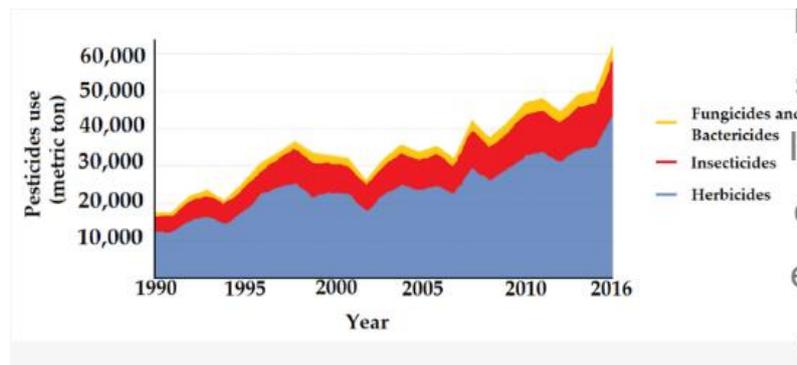
Pestisida adalah senyawa kimia yang digunakan untuk membasmi hama. Pestisida merupakan bahan kimia atau biologis yang dapat melemahkan, melumpuhkan, dan membunuh hama. Berdasarkan jenis hama yang menjadi sasarannya, pestisida dapat dibagi menjadi beberapa kelompok, yaitu insektisida, herbisida, rodentisida, bakterisida, fungisida, dan larvasida.

Selama abad ke-19 dan ke-20, ekstrak dari tanaman, yaitu piretrin, digunakan sebagai insektisida, fungisida, dan herbisida. Peningkatan penggunaan pestisida terjadi dengan kimia sintetis selama tahun 1930-an. Dalam periode ini, bahan kimia anorganik seperti senyawa arsenik dan sulfur diterapkan untuk perlindungan tanaman. Racun arsenik berakibat fatal bagi serangga, sedangkan sulfur digunakan sebagai fungisida. Pada awal Perang Dunia Kedua, banyak pestisida disintesis, terutama bahan kimia organik, seperti diklorodifeniltrikloroetana (DDT), aldrin, dan dieldrin digunakan sebagai insektisida, sedangkan asam 2-metil-4-klorofenoksiasetat (MCPA) dan asam 2,4-diklorofenoksiasetat (2,4-D) digunakan sebagai herbisida (Matthews, 2018).

Sejak tahun 1990 hingga 2018, tercatat jumlah pestisida yang digunakan oleh seluruh negara di dunia, terutama di Asia dan Amerika. Jumlah rata-rata dunia telah meningkat dari 1,55 kg·ha⁻¹ pada tahun 1990 menjadi 2,63 kg·ha⁻¹ pada tahun 2018, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Dilihat dari jenisnya, fungisida dan bakterisida lebih banyak digunakan dibandingkan dengan yang lainnya (Gambar 2).



Gambar 1. Penggunaan Pestisida Per Luas Lahan Pertanian (Data dari FAOSTAT)



Gambar 2. Penggunaan pestisida dari tahun 1990 hingga 2016 (Data dari FAOSTAT)

Menurut laporan FAO (2021), penggunaan pestisida global mencapai lebih dari 4 juta ton per tahun, dengan Asia menyumbang hampir 50% dari total konsumsi. Di Indonesia, data Kementerian Pertanian (2022) menunjukkan bahwa penggunaan pestisida meningkat sebesar 15% dalam dekade terakhir. Sayangnya, penggunaan pestisida secara intensif dan tidak terkendali telah memicu akumulasi residu berbahaya di tanah, menciptakan ancaman serius bagi kesehatan tanah, lingkungan, dan manusia.

Ketika pestisida digunakan, sebagian dari pestisida tersebut akan tetap berada di dalam tanah, dan akumulasi pestisida tersebut akan memengaruhi mikroorganisme yang hidup di sana. Paparan pada manusia dapat terjadi melalui konsumsi air dan makanan yang terkontaminasi pestisida, menghirup udara yang terkontaminasi pestisida, dan secara langsung melalui penggunaan di tempat kerja, pertanian, dan rumah tangga. Pestisida dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui jalur kulit, mulut, mata, dan pernapasan (Kim et al., 2017). Toksisitas pestisida bergantung pada sifat elektronik dan struktur molekul, dosis, dan waktu paparan (Hamadache et al., 2016).

Karena alasan-alasan ini, konsentrasi residu pestisida yang ada di dalam tanah harus dikurangi, dan teknik-teknik remediasi yang efektif harus digunakan untuk melakukan ini. Metode yang ramah lingkungan, hemat biaya, dan cukup efisien adalah bioremediasi, yang merupakan alternatif untuk pendekatan yang lebih mahal dan beracun, seperti metode kimia dan fisik. Dalam biodegradasi, penghilangan dapat dicapai dengan memanfaatkan aktivitas mikroba mikroorganisme. Mikroorganisme, terutama bakteri (Doolotkeldieva et al., 2018) atau jamur (Erguven, 2018) mengubah pestisida menjadi senyawa yang kurang kompleks, CO₂, air, oksida, atau garam mineral, yang dapat digunakan sebagai sumber karbon, mineral, dan energi. Dalam reaksi-reaksi ini, enzim memiliki peran penting karena mereka bertindak sebagai katalis (Senko et al., 2017).

Terdapat anaerobik berdasarkan jenis mikroorganismenya. Selain itu, teknik bioremediasi dapat dibagi menjadi tiga kategori tergantung pada lokasi remediasi dilakukan, yaitu *in situ*, *ex situ*, atau *on-site*.

Dalam pendekatan *in situ*, penanganan dilakukan di zona terkontaminasi, dan biasanya, prosesnya aerobik. Teknik *in situ* yang utama adalah atenuasi alami, bioaugmentasi, biostimulasi, bioventing, dan biosparging. Dalam metode *ex situ*, tanah terkontaminasi dipindahkan dari lokasi yang tercemar dan diangkut ke tempat lain untuk penanganan. Bioreaktor, pengomposan, pertanian lahan, dan biopiles adalah penanganan *ex situ*. Pendekatan di lokasi terdiri dari penanganan tanah tercemar di lokasi sekitar, yaitu tanah dipindahkan dari posisi semula tetapi dibersihkan di lingkungan sekitar tanpa dampak apa pun akibat pengangkutannya. Pendekatan sistematis yang mengintegrasikan pengetahuan mikrobiologi, teknologi modern, dan pemahaman lokal menjadi kunci dalam mengoptimalkan potensi bioremediasi. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi mikrobiologi dalam bioremediasi tanah pertanian tercemar pestisida dengan fokus pada efikasi, tantangan, dan peluang implementasi di berbagai kondisi agronomis. Dengan pendekatan berbasis literatur yang komprehensif, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam mendukung pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan.

2. METODE

Metode pada artikel jurnal ini menggunakan studi pustaka (*library research*) yaitu metode dengan pengumpulan data dengan cara memahami dan mempelajari teori-teori dari berbagai literatur yang berhubungan dengan penelitian tersebut. Suatu tinjauan literatur atau biasa disebut (*literatur review*) dari penelitian terdahulu sangat berperan untuk membentuk suatu kerangka berfikir didalam penelitian ini.

Jadi suatu pengertian metode penelitian dijelaskan (Nazir,1988) baik dari jenis kualitatif (Hennink et al, 2020) dan maupun jenis kuantitatif (Mertens & McLaughlin 2004) hanya saja sebagai pembatasnya, penulisan ini lebih berfokus pada jenis kualitatif dengan melalui studi pustaka. Dalam penyusunan digunakan metode studi dokumen dengan instrumen berupa kamera dan perangkat computer serta jaringan internet.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bioremediasi mengurangi kontaminasi pestisida pada tanah pertanian melalui proses biodegradasi melalui aktivitas metabolisme mikroorganismenya. Ini adalah perawatan yang

efisien, hemat biaya, dan ramah lingkungan.

Selama proses bioremediasi, mikroorganisme menggunakan pestisida sebagai kosubstrat dalam reaksi metabolisme mereka bersama dengan nutrisi lain, sehingga menghilangkannya dari lingkungan. Efisiensi proses ini bergantung pada karakteristik pestisida, seperti distribusinya, bioavailabilitasnya, dan persistensinya di dalam tanah. Ketersediaan pestisida bagi mikroorganisme perlu ditingkatkan: hal ini dipengaruhi secara negatif oleh adhesi pestisida ke partikel tanah dan kelarutannya dalam air yang rendah (Ortiz-Hernández, 2014). Selain itu, karakteristik tanah dan kondisi lingkungan, seperti pH, kadar air, keanekaragaman mikroba, dan suhu, memengaruhi kemanjuran bioremediasi.

Mekanisme Degradasi Mikroba

Selama proses biodegradasi, pestisida diubah menjadi produk degradasi atau dimineralisasi sepenuhnya oleh mikroorganisme, yang menggunakan senyawa polutan sebagai nutrisi untuk reaksi metabolisme mereka. Peran utama dalam mekanisme biotransformasi dilakukan oleh enzim, seperti hidrolase, peroksidase, dan oksigenase, yang memengaruhi dan mengkatalisis reaksi biokimia.

Proses degradasi pestisida dapat dibagi menjadi tiga fase, yang dapat diringkas sebagai berikut:

Fase 1: Pestisida diubah menjadi produk yang lebih larut dalam air dan kurang beracun melalui reaksi oksidasi, reduksi, atau hidrolisis.

Fase 2: Produk Fase-1 diubah menjadi gula dan asam amino, yang memiliki kelarutan air lebih tinggi dan toksisitas lebih rendah.

Fase 3: Konversi metabolit Fase-2 menjadi konjugat sekunder yang kurang beracun.

Mikroorganisme yang terlibat dalam proses degradasi adalah bakteri atau jamur, yang dapat menghasilkan enzim intra atau ekstraseluler. Waktu degradasi merupakan parameter relevan yang harus dinilai ketika aktivitas bioremediasi direncanakan. Biasanya waktu degradasi diinterpretasikan dengan model orde pertama (Khajezadeh, 2020) yang bergantung pada konsentrasi polutan di awal dan akhir proses. Pendekatan ini memiliki keterbatasan karena beberapa parameter mengkondisikan proses, seperti aktivitas mikroba, suhu, kadar air, ketersediaan, dan pelindian pestisida di dalam tanah (Soulas, 2001).

a. Degradasi Bakteri

Selama bertahun-tahun, beberapa galur bakteri telah diidentifikasi sebagai bakteri yang mampu mendegradasi pestisida yang terdapat di dalam tanah. Setiap bakteri memiliki kekhususan yang membuatnya sangat cocok untuk proses degradasi. Kondisi operasional, seperti suhu, pH, kadar air, dan jenis polutan, memengaruhi adaptasi, perkembangan, dan

peran galur bakteri. Selain itu, selama proses degradasi, metabolit dapat terbentuk dan menyebabkan masalah lingkungan tambahan, karena metabolit tersebut mungkin lebih sulit dihilangkan daripada senyawa aslinya, dan ini harus dianggap sebagai kekurangan. Sebagai contoh, klorpirifos, suatu organofosfat yang digunakan sebagai insektisida, dihidrolisis oleh mikroorganisme, dan produk degradasi utama dan utama adalah 3,5,6-trikloro-2-piridinol (TCP). TCP memiliki kelarutan air yang lebih besar daripada klorpirifos dan menyebabkan kontaminasi yang meluas di tanah dan lingkungan perairan. Beberapa mikroorganisme dapat mendegradasi pestisida dan metabolitnya dan di antaranya bakteri *Ochabactrum* sp. JAS2 mampu menghidrolisis kedua senyawa tersebut (Abraham dan Silambarasan, 2016).

Dalam banyak kasus, degradasi lebih mudah terjadi ketika konsorsium bakteri digunakan dibandingkan dengan menggunakan kultur murni yang terisolasi (Doolotkeldieva, 2021). Di alam, bakteri hidup berdampingan dan saling bergantung untuk kelangsungan hidup mereka. Dalam jalur metabolisme degradasi pestisida, setiap bakteri dapat menghasilkan metabolit yang dapat digunakan sebagai substrat oleh bakteri lain.

b. Degradasi Jamur

Tanah pertanian dihuni oleh banyak jamur, yang dapat dimanfaatkan untuk mendegradasi pestisida secara biologis. Kelas mikroorganisme ini meliputi ragi, jamur, dan jamur berfilamen. Degradasi jamur didorong oleh kapasitasnya untuk menghasilkan banyak enzim yang terlibat dalam proses degradasi (Oliveira, 2015). Mikroorganisme ini juga dapat memengaruhi sifat tanah, memodifikasi permeabilitas tanah, dan kemampuan pertukaran ion.

Jamur dapat menjadi pendegradasi yang lebih baik daripada bakteri karena karakteristiknya, seperti bioaktivitas spesifik, morfologi pertumbuhan, dan ketahanan tinggi bahkan pada konsentrasi polutan tinggi.

Pendekatan umum adalah menggunakan jamur dan bakteri untuk meningkatkan degradasi karena jamur dapat mengubah pestisida menjadi bentuk yang lebih mudah dan dapat diakses oleh bakteri (Purnomo et al., 2020).

c. Degradasi Enzimatik

Biodegradasi enzimatik disebabkan oleh enzim yang dihasilkan selama proses metabolisme mikroorganisme atau tanaman. Enzim adalah makromolekul biologis yang dapat mengkatalisis reaksi biokimia yang terlibat dalam degradasi pestisida. Molekul-molekul ini bertindak dalam laju reaksi dengan menurunkan energi aktivasi reaksi itu sendiri (Scott et al., 2008).

Reaksi metabolisme utama, di mana mereka terlibat, adalah oksidasi, hidrolisis, reduksi, dan konjugasi.

Oksidasi, yang merupakan langkah pertama degradasi pestisida, terdiri dari pemindahan elektron dari reduktan ke oksidan. Enzim oksigenase dan lakase mungkin terlibat dalam reaksi ini. Oksigenase mengkatalisis reaksi oksidasi dengan memasukkan satu atau dua molekul oksigen; lakase membelah cincin yang terdapat dalam senyawa aromatik dan mereduksi oksigen menjadi air serta menghasilkan radikal bebas. Selama reaksi, panas atau energi dihasilkan, dan digunakan oleh mikroorganisme untuk aktivitas metabolismenya.

Hidrolisis memungkinkan pembelahan ikatan substrat dengan menambahkan gugus hidrogen atau hidroksil dari molekul air. Dengan demikian, molekul pestisida terbagi menjadi senyawa rantai yang lebih kecil daripada yang asli. Enzim-enzim khas yang terlibat dalam jalur hidrolisis adalah lipase, esterase, dan selulase. Misalnya, Luo et al. (2018) telah mengidentifikasi dan mengkloning gen esterase dari *Rhodopseudomonas palustris* PSB-S yang mampu menguraikan beberapa piretroid sintetis, seperti fenpropathrin, dan menoleransi perubahan suhu dan pH. Enzim tersebut terlibat dalam langkah utama hidrolisis, yaitu pembelahan ikatan ester dalam senyawa fenpropathrin.

Reduksi memungkinkan transformasi melalui enzim reduktif (nitroreduktase).

Reaksi konjugasi dilakukan dengan menggunakan enzim yang sudah ada, dan merupakan ciri khas biodegradasi jamur. Reaksi ini melibatkan penambahan senyawa alami eksogen atau endogen untuk memfasilitasi mineralisasi pestisida. Proses ini mencakup reaksi seperti xyloxylation, alkilasi, asilasi, dan nitrosilasi.

Tabel 1 melaporkan beberapa mikroorganisme yang mampu mendegradasi pestisida yang digunakan secara luas

Tabel 1. Mikroorganisme yang mampu mendegradasi beberapa pestisida.

Target	Pestisida	Mikroorganisme
Serangga	Klorpirifos	<i>Ochrobactrum</i> sp. JAS2
	Sipermetrin	<i>Bakteri subtilis</i>
	DDT	<i>Fomitopsis pinicola</i> dan <i>Ralstonia pickettii</i>
	Deltametrin	<i>Bakteri Streptomyces rimosus</i>
	Fentopropatrin	<i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB-S
	Bahasa Inggris: Phorate	<i>Brevibacterium frigoritolerans</i> , <i>Bacillus aerophilus</i> dan <i>Pseudomonas fulva</i>
Herbal	Asetoklor	<i>Geoda Tolypocladium</i> dan <i>Cordyceps</i>
	Glifosat	Penyakit <i>Fusarium</i>
	Glifosat dan metabolitnya	<i>Bakteri Pseudomonas fluorescens</i>
Jamur	Penoxsulam	<i>Aspergillus flavus</i> dan <i>Aspergillus niger</i>
	Epoksikonazol dan fludioksonil	<i>Pseudomonas</i> , <i>Rhodobacter</i> , <i>Ochrobactrum</i> , <i>Comamonas</i> , <i>Hydrogenophaga</i> , <i>Azospirillum</i> , <i>Methylobacillus</i> , dan <i>Acinetobacter</i>
	Tebukonazol	<i>Serratia marcescens</i>

d. Mineralisasi

Proses mineralisasi memungkinkan degradasi pestisida menjadi bahan anorganik, yaitu karbon dioksida, garam, mineral, dan air. Mikroorganisme menggunakan senyawa pestisida sebagai sumber nutrisi.

Dalam kasus ini juga, degradasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti spesies mikroba, karakteristik tanah, dan jenis polutan. Laju mineralisasi bergantung pada konsentrasi komunitas mikroba; yaitu, penurunan populasi mikroba tidak mendorong degradasi (De Souza et al., 2017). Misalnya, klorotalonil (CTN), fungisida organoklorin, terdegradasi dalam CO₂, tetapi jika komunitas mikroba tanah berkurang, beberapa metabolit dapat terbentuk, yang lebih beracun, persisten, dan mobil daripada CTN itu sendiri. Hal ini disebabkan oleh tidak adanya kelompok yang secara aktif mendegradasi atau penurunan keanekaragaman hayati tanah yang menyebabkan aktivitas mikroba rendah.

Dalam mineralisasi glifosat, sifat-sifat tanah memengaruhi proses mineralisasi. Nguyen et al. (2018) telah menguji tanah pertanian, berbeda untuk beberapa parameter tanah, seperti tekstur tanah, kandungan bahan organik tanah, pH, dan ion-ion yang dapat dipertukarkan. Dengan analisis regresi univariat dan berganda, mereka telah menemukan parameter-parameter yang memengaruhi mineralisasi glifosat, yaitu: kapasitas tukar kation, ditentukan sebagai jumlah kation basa yang dapat dipertukarkan dan keasaman tukar (dinyatakan sebagai Al³⁺ dan H⁺); kation-kation basa yang dapat dipertukarkan (dinyatakan sebagai Ca²⁺); dan bentuk kalium yang tersedia, ditentukan oleh ekstraksi amonium laktat. Mineralisasi glifosat yang rendah pada tanah dengan keasaman yang dapat dipertukarkan yang tinggi dapat disebabkan oleh pembentukan ikatan kimia yang kuat dengan gugus asam karboksilat atau fosfonat dari glifosat itu sendiri, yang mengurangi bioavailabilitasnya, atau efek toksik dari aluminium yang dapat dipertukarkan terhadap mikroorganisme tanah.

e. Ko-Metabolisme

Ko-metabolisme adalah biotransformasi, melalui serangkaian reaksi, dari senyawa organik yang tidak digunakan untuk mendukung pertumbuhan mikroba. Pestisida diubah oleh mikroorganisme dan enzim menjadi senyawa yang berguna untuk transformasi biologis, kimia, dan fisik lainnya, dan akhirnya terdegradasi berkat efek sinergis ini (Hoagland et al., 2000).

Dalam proses ko-metabolisme, enzim yang terlibat dapat berupa: enzim hidrolitik (esterase, amidase, dan nitrilase); transferase (glutathione S-transferase dan glukosil transferase); oksidase (sitokrom P-450 dan peroksidase); reduktase (nitroreduktase dan dehalogenase reduktif).

Ma et al. (2014) telah mempelajari transformasi ko-metabolik imidakloprid (IMI), suatu insektisida, dengan menguji berbagai jenis substrat yang digunakan sebagai sumber energi: karbohidrat dan asam organik. *P. indica* CGMCC 6648 adalah bakteri yang diuji, mampu mendegradasi IMI melalui jalur hidroksilasi, dan membentuk dua metabolit: satu olefin dan 5-hidroksi IMI.

Aplikasi Remediasi Mikroba

Teknik bioremediasi dapat dilakukan secara *in situ*, *ex situ*, atau di tempat. Dalam pendekatan *in situ*, pengolahan dilakukan di zona terkontaminasi, dan biasanya prosesnya aerobik. Untuk itu, oksigen harus disediakan ke tanah. Teknik *in situ* yang utama adalah:

- Atenuasi alami, yang memanfaatkan mikroflora yang ada di tanah yang tercemar.
- Biostimulasi, di mana jumlah dan jenis nutrisi untuk merangsang dan meningkatkan pertumbuhan mikroorganisme asli dioptimalkan.
- Bioaugmentasi, yaitu penambahan jenis mikroba atau enzim ke dalam tanah yang tercemar.
- Bioventing, di mana oksigen dialirkan melalui zona tanah tak jenuh untuk merangsang pertumbuhan mikroorganisme asli yang mampu mendegradasi kontaminan.
- Biosparging, berdasarkan penyuntikan udara bertekanan ke dalam zona tanah jenuh untuk meningkatkan konsentrasi oksigen dan merangsang mikroorganisme untuk mendegradasi polutan.

Metode ini sangat efektif dan murah. Keuntungan utamanya adalah tanah yang tercemar tidak terkikis. Sebaliknya, dalam teknik *ex situ*, tanah yang terkontaminasi dipindahkan dari lokasi yang tercemar dan diangkut ke lokasi tempat pembersihan akan dilakukan. Teknik-teknik utamanya adalah:

- Bioreaktor, yang mengolah tanah yang terkontaminasi dengan air limbah untuk memperoleh bubur dan mendorong reaksi mikroba yang mampu menghilangkan polutan.
- Pengomposan, di mana tanah yang terkontaminasi dicampur dengan bahan tambahan untuk meningkatkan degradasi aerobik pestisida. Landfarming dan biopiles termasuk dalam teknik ini.

Dalam metode di lokasi, tanah dipindahkan dan diolah di area yang dekat dengan lokasi yang tercemar. Misalnya, pengolahan lahan pertanian juga dapat dilakukan di lokasi, sehingga mengurangi biaya operasi dibandingkan dengan pendekatan *ex situ*. Dalam semua proses bioremediasi, nutrisi, oksigen, pH, kadar air, dan suhu harus dikontrol untuk memaksimalkan efisiensi penghilangan.

a. Redaman Alami

Atenuasi alami adalah proses alami di mana polutan didegradasi oleh mikroorganisme asli yang ada di dalam tanah. Proses alami tersebut meliputi degradasi biologis, penguapan, dispersi, pengenceran, peluruhan radioaktif, dan penyerapan kontaminan ke dalam bahan organik dan mineral lempung di dalam tanah. Misalnya, Guerin (2005) menunjukkan bahwa endosulfan diol dan endosulfan sulfat, dua metabolit insektisida endosulfan, keduanya dimineralisasi melalui aktivitas mikroba yang ada di tanah yang terkontaminasi.

b. Biostimulasi

Proses biostimulasi terdiri dari penambahan nutrisi (nitrogen, fosfor, karbon, dan oksigen) untuk meningkatkan pertumbuhan mikroorganisme asli. Nutrisi ini penting bagi kehidupan mikroorganisme dan memungkinkan mereka memiliki energi, populasi mikroba, dan enzim untuk mendegradasi polutan.

Biasanya, nitrogen dan fosfor ditambahkan karena mereka merangsang biodegradasi dan meningkatkan keanekaragaman spesies mikroba. Betancur-Corredor et al. (2015) telah mempelajari degradasi DDT, DDD, dan DDE, merangsang populasi mikroba dan menambahkan surfaktan. Jumlah nutrisi yang diberikan harus tetap terkendali selama proses berlangsung, karena jumlah stimulan yang berkurang atau berlebihan dapat mengurangi aktivitas mikroba dan keanekaragamannya.

Bačmaga et al. (2019) telah mempelajari degradasi tebukonazol dalam tanah menggunakan proses biostimulasi. Tebukonazol memengaruhi aktivitas enzimatik dan proliferasi mikroba secara negatif; untuk ini, konsentrasinya dalam tanah harus dikurangi. Konsentrasi pestisida yang tinggi menyebabkan penurunan populasi mikroba. Uji eksperimental oleh penulis ini telah mengevaluasi efek dari dua zat biostimulasi yang berbeda (kompos dan kotoran burung) pada proses remediasi. Hasilnya menunjukkan bahwa kedua zat tersebut memiliki efek positif pada perkembangan mikroorganisme tanah dan aktivitas enzimatik. Degradasi tebukonazol lebih intens di tanah yang dipupuk dengan kotoran burung dibandingkan dengan kompos.

c. Bioaugmentasi

Proses bioaugmentasi melibatkan inokulasi konsorsium mikroba atau galur tunggal ke dalam tanah, dengan menambah keragaman mikroba. Dengan cara ini, mikroorganisme dengan kemampuan metabolisme spesifik mendorong proses biodegradasi.

Konsentrasi pestisida dalam tanah merupakan parameter yang mengkondisikan proses tersebut karena dosis pestisida yang tinggi menghambat fungsi vital mikroorganisme tanah. Doolotkeldieva et al. mempelajari degradasi bakteri pada tanah yang terkontaminasi pestisida

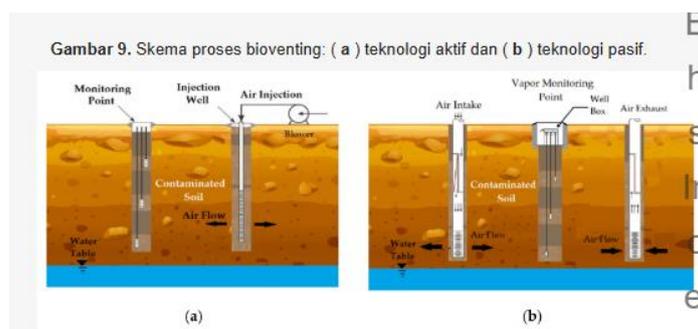
di zona pembuangan. Dalam studi pendahuluan Doolotkeldieva et al. (2018) menemukan bahwa beberapa strain bakteri terdapat dalam tanah yang dipelajari. Kemudian, mereka menguji degradasi aldrin, yaitu pestisida hidrokarbon terklorinasi yang terdifusi. Hasilnya menunjukkan bahwa strain bakteri dengan gen spesifik (sitokrom P450), yaitu *Pseudomonas fluorescens* dan *Bacillus polymyxa*, mampu mendegradasi aldrin dalam waktu yang relatif singkat. Pemilihan bakteri spesifik, optimalisasi kondisi tanah seperti suhu, pH, dan nutrisi yang tersedia di dalam tanah, digunakan untuk pengembangan uji eksperimental berikutnya. Secara khusus, mesocosmos didirikan dengan tanah yang terkontaminasi dengan beberapa pestisida dan diinokulasi dengan konsorsium mikroba (Doolotkeldieva et al., 2021).

Pada tanah yang terkontaminasi, konsentrasi pestisida dapat bervariasi pada kedalaman yang berbeda karena pestisida meresap ke bawah permukaan tanah dan teradsorpsi pada partikel tanah, sehingga membuatnya kurang dapat dimanfaatkan secara hayati. Odukkathil dan Vasudevan (2016) telah mengevaluasi perawatan bioaugmentasi dalam set uji eksperimental yang ditempatkan di kolom kaca dengan volume 4500 cm³. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi pestisida di tanah dasar tinggi, karena adanya pergerakan pestisida ke bawah selama rembesan air, sedangkan konsentrasi rendah di tanah tengah dapat disebabkan oleh aktivitas mikroba yang lebih tinggi yang mendukung degradasi.

d. Ventilasi biologis

Bioventing merupakan teknik bioremediasi in situ yang mendorong degradasi polutan organik yang terserap ke dalam tanah. Aktivitas mikroba ditingkatkan dengan memasukkan aliran udara atau oksigen, dan nutrisi ke dalam zona tanah tak jenuh melalui sumur yang dibangun khusus ke dalam tanah yang terkontaminasi. Ventilasi bersifat ringan, dan diperlukan untuk menyediakan satu-satunya oksigen yang dibutuhkan untuk mempertahankan aktivitas mikroba dan menghindari penguapan kontaminan.

Bioventing dapat dilakukan dalam mode aktif atau pasif, berkenaan dengan aerasi: dalam kasus pertama, udara dialirkan ke dalam tanah dengan blower, sedangkan, dalam metode pasif, pertukaran gas melalui sumur ventilasi hanya terjadi karena pengaruh tekanan atmosfer. Skema dari kedua metode aerasi ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema proses bioventing: (a) teknologi aktif dan (b) teknologi pasif.

e. Biosparging

Dalam teknik biosparging, proses biodegradasi terjadi dengan merangsang mikroorganisme asli melalui penyuntikan udara ke dalam air tanah untuk meningkatkan konsentrasi oksigen. Metode ini mirip dengan bioventing, kecuali bahwa dalam biosparging udara disuntikkan di zona jenuh. Hal ini dapat menyebabkan pergerakan ke atas senyawa organik volatil ke zona tak jenuh untuk mendorong biodegradasi. Dua parameter yang memengaruhi efektivitas proses tersebut adalah (1) permeabilitas tanah, yang menentukan ketersediaan hayati polutan bagi mikroorganisme, dan (2) biodegradabilitas polutan.

f. Pengomposan

Pengomposan merupakan salah satu pendekatan untuk bioremediasi pestisida. Pengomposan dilakukan dengan mencampur tanah yang terkontaminasi dengan bahan organik yang tidak berbahaya untuk meningkatkan perkembangan populasi bakteri dan/atau jamur yang dapat mendegradasi pestisida melalui jalur ko-metabolisme.

Pendekatan ini khususnya diindikasikan ketika konsentrasi pestisida rendah. Dalam pengomposan, bioaksesibilitas mikroba terhadap polutan sangat penting. Oleh karena itu, penting untuk mengendalikan kadar air, komposisi tanah, dan sifat-sifat bahan tambahan.

Di tanah yang terkontaminasi, biochar dapat digunakan sebagai amandemen untuk mempromosikan proses degradasi. Biochar adalah karbon hitam yang diproduksi oleh konversi termal biomassa dalam kondisi oksigen terbatas (gasifikasi) atau tanpa oksigen (pirolisis). Ini dicirikan oleh porositas tinggi dan luas permukaan yang besar; kedua sifat ini mempromosikan adsorpsi pestisida. Selain itu, biochar adalah sumber karbon yang merangsang aktivitas mikroba, mempromosikan biodegradasi. Telah dicatat bahwa aplikasi biochar meningkatkan kapasitas menahan air tanah dan memperbaiki kondisi aerasi di dalam tanah (Varjani et al., 2019). Sun et al. (2020) telah mempelajari aplikasinya untuk biodegradasi tebuconazole. Ini memungkinkan imobilisasi *Alcaligenes faecalis* WZ-2, strain bakteri yang terlibat dalam

proses degradasi.

Aplikasi di Lapangan

Saat ini, sedikit penelitian yang melaporkan informasi mengenai studi kasus nyata. Tabel 2 merangkum beberapa contoh. Sayangnya, temuan dan hasil remediasi skala besar biasanya tidak dipublikasikan atau dipublikasikan secara luas, sehingga membatasi pengetahuan tentang pengalaman pada kasus nyata. Situasi serupa terjadi pada biaya pembersihan

Tabel 2. Beberapa contoh studi kasus

Teknik Bioremediasi	Pestisida	Keterangan
Pertanian Lahan	Isomer heksaklorosikloheksana (HCH) (insektisida)	Tanah yang terkontaminasi dengan isomer HCH ($>5000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) yang berasal dari produksi lindane dipelajari di lapangan selama 11 bulan, dengan menyiapkan dua plot (masing-masing berukuran $2 \text{ m} \times 10 \text{ m}$). Isomer α - dan γ -HCH masing-masing berkurang sebesar 89 dan 82% dari konsentrasi awal. Konsentrasi isomer β yang paling persisten pada dasarnya tidak terpengaruh.
Bioaugmentasi	Myclobutanil, tetraconazole, dan flusilazole.	Uji coba eksperimental dilakukan pada petak kebun anggur. Pada tanaman, formulasi pestisida pertanian disemprotkan melalui daun. Setelah satu jam aplikasi pestisida, tanaman anggur disemprot dengan suspensi empat galur <i>Bacillus</i> DR-39, CS-126, TL-171, dan TS-204 diuji. Analisis residu sampel lapangan menunjukkan degradasi miklobutanil dan tetraconazol sebesar 87,4 dan $>99\%$, masing-masing, oleh galur DR-39, dan degradasi flusilazol sebesar 90,8% oleh galur CS-126 setelah 15-20 hari pengobatan.
Bioaugmentasi	DDT	Proses bioremediasi dipelajari di 12 plot percobaan, termasuk tanah rumah kaca dan tanah terbuka. Setiap plot (luas 6 m^2) diinokulasi dengan <i>Stenotrophomonas</i> sp. DDT-1 yang dilengkapi dengan bubuk ragi 2%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroorganisme ini efisien untuk degradasi DDT dan tidak berdampak buruk pada aktivitas mikroba tanah.
Biostimulasi	Pestisida organoklorin: toksafen; DDT; DDE; DDD; endosulfan II; γ -klordan; α -klordan; dieldrin.	Properti Borello adalah area seluas 14 hektar yang diolah dengan amandemen tanah untuk membantu bakteri asli memetabolisme pestisida. Untuk analisis, area tersebut dibagi menjadi beberapa zona dan di setiap zona, sampel tanah dikumpulkan dari empat kedalaman tanah (0,5, 1, 1,5, dan 2 kaki). Di akhir pengujian, OCP tidak terdeteksi; toksafena, DDT, dan DDE terdeteksi dalam satu sampel; dieldrin terdeteksi dalam lima sampel pada konsentrasi berkisar antara 1,2 hingga $1,8 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.
Biostimulasi	Pestisida organoklorin: toksafen; DDT; DDE; DDD; endosulfan II; γ -klordan; α -klordan; dieldrin.	Properti Mantegani adalah area seluas 0,8 hektar yang diolah dengan amandemen tanah untuk membantu bakteri asli memetabolisme pestisida. Konsentrasi DDT dan dieldrin yang tinggi ditemukan di sana. Setelah pengolahan, DDT terdegradasi hingga 97% dan dieldrin hingga 73%, sementara konsentrasi OCP lainnya berada di bawah target awal remediasi.

4. SIMPULAN

Pestisida adalah senyawa kimia yang digunakan untuk membasmi hama. Pestisida merupakan bahan kimia atau biologis yang dapat melemahkan, melumpuhkan, dan membunuh hama. Penggunaan pestisida dan produk perlindungan tanaman telah meningkat pesat, baik di negara maju maupun negara berkembang. Sayangnya, semua senyawa ini beracun dalam kadar yang berbeda-beda dan berdampak pada kesehatan manusia serta lingkungan. Selain itu, banyak di antaranya bersifat persisten; artinya, penguraiannya sangat terbatas dan berlangsung lama.

Bioremediasi tanah untuk menghilangkannya dapat dilakukan dengan memanfaatkan mikroorganisme spesifik atau lokal (bakteri dan jamur), atau degradasi enzimatik.

Meskipun dalam skala laboratorium, banyak temuan tentang bioremediasi tanah tersedia dalam literatur, hanya sedikit data tentang aktivitas skala nyata yang dapat ditemukan. Sayangnya, hal ini terutama disebabkan oleh buruknya kerja sama antara laboratorium

penelitian, pemerintah daerah yang memberlakukan pembersihan tanah tertentu, dan perusahaan yang terlibat dalam sektor bioremediasi di tanah yang tercemar pestisida. Akan lebih baik jika kerja sama ini semakin bersatu, untuk menyebarluaskan pengalaman dan hasil. Selain itu, data biaya juga masih kurang.

Sedangkan untuk polutan lainnya, jika diperlukan, penanggulangan pestisida harus mempertimbangkan karakteristik kimia dan toksikologi senyawa tersebut, tanpa mengabaikan peraturan perundang-undangan nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Abraham, J.; Silambarasan, S. (2016). Biodegradasi klorpirifos dan produk hidrolisisnya 3,5,6-trikloro-2-piridinol menggunakan bakteri baru *Ochrobactrum* sp. *JAS2: Usulan jalur metabolismenya*. *Pestic. Biochem. Physiol.* 126 , 13–21.
- Báčmaga, M.; Wyszowska, J.; Kucharski, J. (2019). Biostimulasi sebagai proses yang membantu degradasi tebuconazole di tanah. *J. Sedimen Tanah.* 19 , 3728–3741.
- Betancur-Corredor, B.; Pino, NJ; Cardona, S.; Penuela, GA. (2015). Evaluasi biostimulasi dan penambahan Tween 80 untuk bioremediasi tanah yang terkontaminasi DDT dalam jangka panjang. *J. Environ. Sci.* 28 , 101–109.
- De Souza, AJ; De Andrade, PAM; De Araújo Pereira, AP; Andreote, FD; Tornisielo, VL; Regitano, JB. (2017). Mineralisasi fungisida klorotalonil yang terkuras berasal dari hilangnya keragaman mikroba tanah. *Sci. Rep.* 7 , 14646.
- Doolotkeldieva, T.; Bobusheva, S.; Konurbaeva, M. (2021). Peningkatan Kondisi bagi Bakteri Aerobik yang Melakukan Degradasi Pestisida Usang di Tanah yang Tercemar. *Airsoil Water Res.* 14 .
- Doolotkeldieva, T.; Konurbaeva, M.; Bobusheva, S. (2018). Komunitas mikroba di tanah yang terkontaminasi pestisida di Kirgistan dan kemungkinan bioremediasi. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25 , 31848–31862.
- Erguven, GO. (2018). Perbandingan Beberapa Jamur Tanah dalam Bioremediasi Herbisida Acetochlor di Bawah Media Kultur yang Diaduk. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 100 , 570–575.
- Guerin, TF. (2005). Atenuasi alami metabolit pestisida terklorinasi dalam tanah. *Int. J. Environ. Stud.* 62 , 235–248.
- Hamadache, M.; Benkortbi, O.; Hanini, S.; Amrane, A.; Khaouane, L.; Si Moussa, C. (2016). Hubungan Struktur Aktivitas Kuantitatif untuk toksisitas oral akut pestisida pada tikus: Validasi, domain aplikasi, dan prediksi. *J. Hazard. Mater.* 303 , 28–40.
- Hennink, M., Hutter, I., & Bailey, A. (2020). *Qualitative research methods*. SAGE Publications Limited.
- Hoagland, RE; Zablutowicz, RM; Hall, JC. (2000). *Metabolisme Pestisida pada Tumbuhan*

dan Mikroorganisme: Tinjauan Umum. Dalam Biotransformasi Pestisida pada Tumbuhan dan Mikroorganisme ; Hall, JC, Hoagland, RE, Zablotowicz, RM, Ed.; Seri Simposium ACS; American Chemical Society: Washington, DC, hlm. 2–27.

- Khajezadeh, M.; Abbaszadeh-Goudarzi, K.; Pourghadamyari, H.; Kafilzadeh, F. (2020). Strain *Streptomyces rimosus* yang baru diisolasi yang mampu mendegradasi deltametrin sebagai pestisida di tanah pertanian. *J. Basic Microbiol.* 60 , 435–443.
- Kim, KH; Kabir, E.; Jahan, SA. (2017). Paparan pestisida dan dampaknya terhadap kesehatan manusia. *Sci. Total Environ.* 575 , 525–535.
- Luo, X.; Zhang, D.; Zhou, X.; Du, J.; Zhang, S.; Liu, Y. (2018). Kloning dan karakterisasi gen esterase pengurai pestisida piretroid, Est3385 , dari *Rhodopseudomonas palustris* PSB-S. *Sci. Rep.* 8 , 7384.
- Ma, Y.; Zhai, S.; Mao, SY; Sun, SL; Wang, Y.; Liu, ZH; Dai, YJ; Yuan, S. (2018). Transformasi ko-metabolik insektisida neonikotinoid imidakloprid oleh isolat tanah baru *Pseudoxanthomonas indica* CGMCC 6648. *J. Environ. Sci. Health Part B.* 49 , 661–670.
- Matthews, GA Sejarah Pestisida ; CABI: Boston, MA, AS, 2018; ISBN 9781786394873.
- Mertens, D. M., & McLaughlin, J. A. (2004). Quantitative research methods: Questions of impact. *Research and Evaluation Methods in Special Education*, 51–68.
- Mirsal, IA. (2008). *Soil Pollution Origin, Monitoring & Remediation* , edisi ke-2; Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg, Jerman, ISBN 9783540707752.
- Nazir, M. (1988). *Metode Penelitian*. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Nguyen, NK; Dörfler, U.; Welzl, G.; Munch, JC; Schroll, R.; Suhadolc, M. (2018). Variasi besar dalam mineralisasi glifosat di 21 tanah pertanian yang berbeda dijelaskan oleh sifat tanah. *Sci. Total Environ.* 627 , 544–552.
- Odukkathil, G.; Vasudevan, N. (2016). Residu endosulfan di permukaan dan bawah permukaan tanah pertanian dan bioremediasinya. *J. Environ. Manag.* 165 , 72–80.
- Oliveira, BR; Penetra, A.; Cardoso, VV; Benoliel, MJ; Barreto Crespo, MT; Samson, RA; Pereira, VJ. (2015). Biodegradasi pestisida menggunakan spesies jamur yang ditemukan di lingkungan perairan. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22 , 11781–11791.
- Ortiz-Hernández, ML; Rodríguez, A.; Sánchez-Salinas, E.; Castrejón-Godínez, ML. (2014). Bioremediasi Tanah yang Tercemar Pestisida: Pengalaman di Meksiko. Dalam *Bioremediasi di Amerika Latin: Penelitian dan Perspektif Terkini* ; Alvarez, A., Polti, MA, Ed.; Springer: Cham, Swiss. ISBN 9783319057385.
- Purnomo, AS; Sariwati, A.; Kamei, I. (2020). Interaksi sinergis konsorsium jamur busuk coklat *Fomitopsis pinicola* dan bakteri *Ralstonia pickettii* untuk biodegradasi DDT. *Heliyon*, 6 .
- Scott, C.; Pandey, G.; Hartley, CJ; Jackson, CJ; Cheesman, MJ; Taylor, MC; Pandey, R.; Khurana, JL; Teese, M.; Coppin, CW; dkk. (2008). Dasar enzimatik untuk bioremediasi pestisida. *Indian J. Microbiol.* 48 , 65–79.

- Senko, O.; Maslova, O.; Efremenko, E. (2017). Optimalisasi Penggunaan Biokatalis Enzimatik Berbasis 6 -OPH untuk Penghancuran Klorpirifos di Tanah. *Int. J. Environ. Res. Kesehatan Masyarakat* 14 , 1438.
- Soulas, G.; Lagacherie, B. (2001). Pemodelan degradasi mikroba pestisida dalam tanah. *Biol. Fertil. Soils*, 33 , 551–557.
- Sun, S.; Sidhu, V.; Rong, Y.; Zheng, Y. (2018). Polusi Pestisida di Tanah Pertanian dan Metode Pemulihan Berkelanjutan: Tinjauan. *Curr. Pollut. Rep.* 4 , 240–250.
- Varjani, S.; Kumar, G.; Rene, ER. (2019). Perkembangan dalam aplikasi biochar untuk remediasi pestisida: Pengetahuan terkini dan arah penelitian di masa mendatang. *J. Environ. Manag.* 232 , 505–513.