

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **A. Kajian Teori**

##### **1. E-Monograf Berbasis Riset**

Dalam bahasa Yunani, kata "mono" dan "graph" berarti "tunggal", dan "graph" berarti "menulis". Oleh karena itu, menulis pada satu subjek disebut monograf. Monograf adalah buku yang berisi tulisan tentang sub bidang ilmu tertentu (Fatmawati, 2020). Buku monograf adalah kumpulan tulisan ilmiah yang ditulis oleh seorang ahli atau spesialis di bidang tertentu. Buku monograf hanya membahas satu topik dalam satu bidang ilmu kompetensi penulis (Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, 2021).

Monograf adalah sebutan lain untuk buku, yang dapat digunakan untuk membedakannya dari terbitan berseri. Monograf biasanya ditulis oleh satu orang dan berisikan satu atau lebih topik (subjek) materi yang relevan (Qurniani, 2017). Monograf adalah terbitan tunggal yang terdiri dari satu jilid dan tidak berulang. Salah satu istilah untuk buku adalah monografi, yang digunakan untuk membedakan terbitan. Monograf dapat dibuat sebagai hasil dari penelitian kajian literasi atau penelitian eksperimen. Isi monograf harus memenuhi syarat-syarat karya ilmiah yang utuh, seperti rumusan masalah, metodologi pemecahan masalah, kesimpulan, daftar pustaka, dan dukungan teori yang lengkap dan jelas. Monograf merupakan penulisan (mengarang, uraian) tentang suatu aspek ilmu atau masalah tertentu. Buku monograf hanya berisi satu materi dan tidak berubah. Selain

itu, monograf ini dibuat dengan tujuan tertentu. Monograf digunakan sebagai pegangan materi pembelajaran. Buku monograf dapat juga digunakan sebagai buku pegangan siswa. Buku monograf juga dapat menjadi buku referensi jika hasil penelitian menjadi lebih kaya. Buku tersebut akan berfungsi sebagai sumber literatur untuk penelitian tambahan, serta sebagai materi ajar untuk dosen dan siswa. Salah satu sumber belajar yang mampu mendukung pembelajaran siswa adalah monografi. Sumber belajar dapat dibagi menjadi dua kategori: media cetak dan elektronik. Monograf sendiri merupakan salah satu sumber belajar berbasis media cetak. Lingkungan juga merupakan salah satu sumber belajar yang dapat membantu siswa belajar (Amiyati et al., 2020; Khusnani et al., 2020).

E-Monograf berbasis riset adalah sumber pendidikan yang dibuat oleh peneliti untuk meningkatkan sifat ilmiah mahasiswa dan memenuhi standar pembelajaran. Dalam mata kuliah bioteknologi, indikator pembelajaran dirancang untuk memungkinkan mahasiswa menerapkan ilmu dasar biologi dengan teknologi terapan untuk membandingkannya dengan fenomena alam (Muspiroh, 2015).

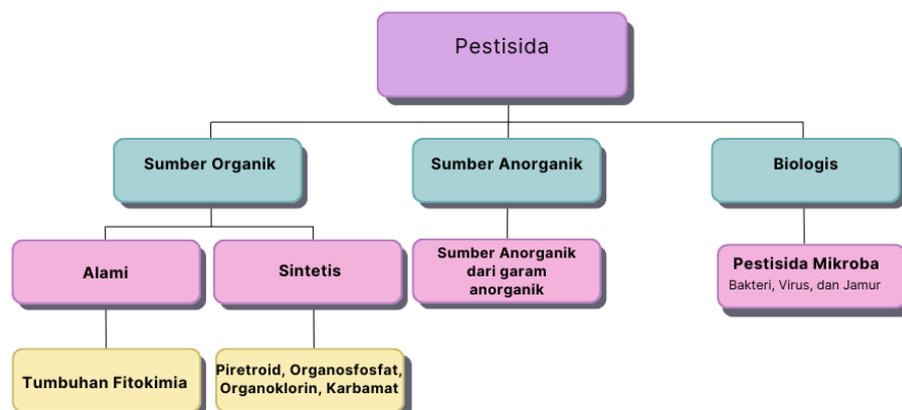
## 2. Tanah Tercemar Residu Pestisida

Tanah adalah bagian dari sistem kehidupan yang kompleks, di mana berbagai organisme melakukan berbagai fungsi untuk melakukan berbagai proses penting bagi kehidupan. Dalam aktivitas biologi, mikroba dan fauna tanah bekerja sama untuk melakukan berbagai proses metabolisme (Anaduaka et al., 2023). Sayuran yang dihasilkan dipengaruhi oleh kualitas

tanah, termasuk apakah mereka bebas dari pencemaran yang disebabkan oleh residu pestisida.

Pencemaran tanah terjadi ketika tanah terkontaminasi oleh zat-zat yang dapat membahayakan lingkungan dan makhluk hidup di dalamnya. Pestisida yang disemprotkan juga dapat bereaksi dengan senyawa lain menjadi senyawa yang lebih kompleks dan sulit dikenali. Jika senyawa baru ini menjadi lebih toksik, maka itu akan menjadi bahaya bagi lingkungan, termasuk bagi manusia. Ada kemungkinan bahwa sisa pestisida ada pada produk pertanian karena pestisida digunakan langsung pada tanaman.

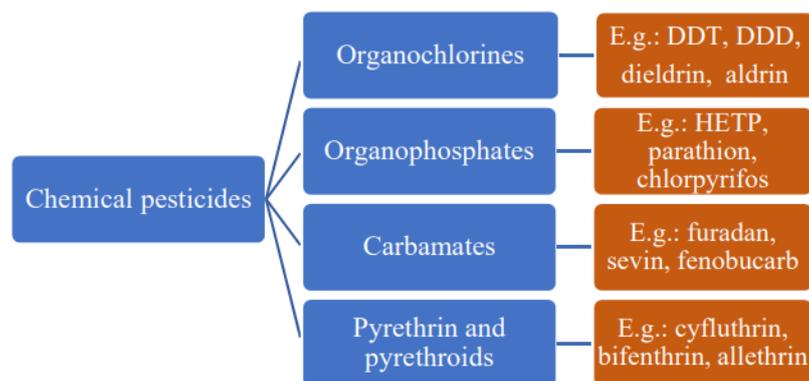
Pestisida adalah kumpulan bahan kimia yang digunakan untuk mengendalikan hama dan gulma atau rumput liar. Hama seperti jamur, serangga, siput, dan hewan pengerat adalah organisme sasaran pestisida karena sebagian besar bahan aktif dalam pestisida tidak memiliki efek toksik spesifik, tetapi menyerang target, organisme lain, manusia, lingkungan, dan seluruh ekosistem (Díaz-López et al., 2021).



Gambar 2. 1 Klasifikasi Pestisida Berdasarkan Asalnya

Sumber : (Abubakar et al., 2019)

Pestisida dapat dikategorikan menjadi insektisida, akarisisida, moluskisida, rodentisida, nematisida, kapangsida, bakterisida, herbisida, algisika, piskisida, avisida, repelen, atraktan, ZPT atau bahan yang mengatur pertumbuhan tanaman, dan plant activator yang digunakan untuk meningkatkan kekebalan tumbuhan. Selain itu, berdasarkan jenis bahan kimia yang membentuknya, ia dapat diklasifikasikan menjadi: amonium sulfamat, sulfur, amonium fosfida, seng fosfida, talium sulfat, hidrokarbon berklor, organofosfat, karbamat, formamidin, dan piretroid (Juanda, 2020).



Gambar 2. 2 Klasifikasi Pestisida Kimia

Sumber : (Raffa, 2022)

Karbamat adalah sumber senyawa yang berasal dari asam karbamat. Struktur kimianya ditunjukkan oleh gugus amino yang terikat pada gugus ester. Normalnya, R1 dan R2 adalah radikal organik atau hidrogen. Jika R2 adalah hidrogen, target dapat dipahami dengan mempertimbangkan gugus fungsi R1. Insektisida, ketika R1 memiliki gugus metil; herbisida, ketika R1 memiliki kelompok aromatik; atau fungisida, ketika R1 memiliki bagian benzimidazol (Raffa, 2022).

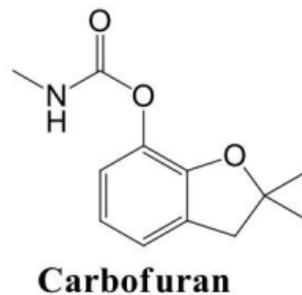
Karbamat juga digunakan sebagai biosida untuk produk industri dan rumah tangga untuk mengendalikan hama rumah tangga. Ada banyak pestisida karbamat, termasuk aldicarb, carbofuran, fenoxycarb, carbaryl, ethienocarb, dan fenobucarb. Karena statusnya sebagai organofosfat, karbamat menghentikan aktivitas asetilkolinesterase. Akibatnya, toksisitasnya memengaruhi sistem saraf (Raffa, 2022). Karena pestisida karbamat menghambat dan menginduksi kematian sel pembunuh alami (NK) manusia dan limfosit T sitotoksik, yang membentuk pertahanan tumor, paparan pestisida karbamat meningkatkan risiko limfoma non-Hodgkin pada manusia.

Di Indonesia, penggunaan pestisida golongan karbamat juga banyak digunakan dalam pertanian. Karbofuran, atau 2,3-dihydro-2,2-dimethyl-7-benzofuranol Nmethylcarbamate, adalah pestisida yang digunakan untuk mengendalikan hama, gulma, dan serangga di berbagai jenis sayuran, buah-buahan, dan tanaman. Dengan tingkat kelarutan tinggi 322 mg/L pada suhu 25 °C, ini menyebabkan tanaman menjadi rusak (Dhanasekara et al., 2015; Siampiringue et al., 2015).



Gambar 2. 3 Pestisida Karbofuran di Pasaran

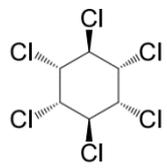
Nama dagang karbofuran termasuk Furadan, Bay 70143, Carbodan, Carbosip, Chinofur, Curaterr, D 1221, ENT 27164, Furacarb, Kenafuran, Pilarfuron, Rampart, Nex, dan Yaltox. Pestisida karbofuran dapat menimbulkan masalah signifikan bagi lingkungan, terutama pada tanah karena meninggalkan residu (Mwevura et al., 2021).

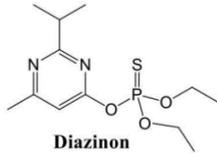
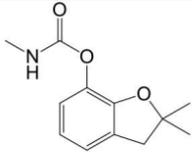
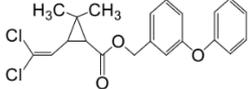


Gambar 2. 4 Struktur Senyawa Karbofuran

Meningkatnya penggunaan karbofuran menimbulkan ancaman bagi ekosistem tanah. Berdasarkan jurnal penelitian menyatakan bahwa penggunaan karbofuran dapat meningkatkan tingkat kematian pada hewan lain dan membahayakan lingkungan (Saquib et al., 2021).

**Tabel 2. 1 Struktur pestisida yang sering digunakan**

Jenis Pestisida	Deskripsi	Contoh	Struktur Kimia
Organoklorin	Salah satu pestisida yang paling awal dibuat dan tersebar luas dalam praktik pertanian adalah pestisida organoklorin. Pestisida jenis ini meninggalkan residu yang tahan lama di lingkungan.	Lindane	 <p style="text-align: center;"><b>Lindane</b></p>
Organofosfat	Pestisida organofosfat, yang	Diazinon	

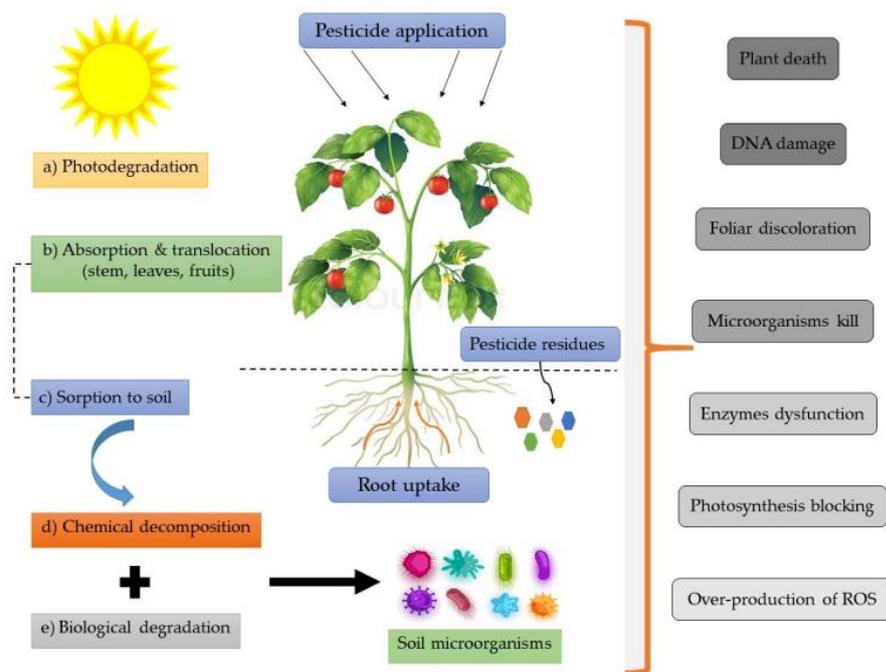
	berasal dari turunan asam fosfat, digunakan sebagai pengganti organoklorin karena kurang toksis dan lebih tahan lama.		 <p style="text-align: center;"><b>Diazinon</b></p>
Karbamat	Asam karbamat, yang memiliki cara kerja mirip dengan organofosfat, adalah bahan dasar pestisida karbamat.	Karbofuran	 <p style="text-align: center;"><b>Carbofuran</b></p>
Piretroid	Pestisida piretroid, yang dibuat dari asam pietroat, dianggap memiliki risiko lingkungan yang lebih rendah.	Permetrin	 <p style="text-align: center;"><b>Permethrin</b></p>

Sumber : (Rasool et al., 2022)

### 3. Proses Akumulasi Pestisida dalam Tanah

Pestisida termasuk kedalam jenis *Persistent Organic Pollutants* (POPs) (Thakur & Pathania, 2019). POPs sangat beracun, dan pengangkutan dan bioakumulasi POPs di jaringan organisme disebut biomagnifikasi. Karena biomagnifikasi dan bioakumulasi, konsentrasi POPs meningkat di jaringan organisme di ujung atas rantai trofik dibandingkan di lingkungan. POPs adalah senyawa organik nonpolar yang tidak larut dalam air dan hidrofobik. Fakta bahwa POP hidrofobik larut dalam lemak menunjukkan bahwa mereka bertanggung jawab atas bioakumulasi dan keberlanjutannya di lingkungan. Ini menumpuk di jaringan lemak organisme karena sifatnya yang lipofilik, yang ditunjukkan oleh proses bioakumulasi dan biomagnifikasi POP. Ini memiliki efek toksik kronis dan akut pada berbagai organisme, termasuk manusia. Memiliki

kelarutan lipid yang sangat rendah atau tinggi memungkinkan mereka terakumulasi secara hayati di jaringan tubuh. Mereka juga sangat berbahaya dan semivolatil, yang memungkinkan mereka bergerak jauh di atmosfer sebelum pengendapan. Orang mempertahankan POP seperti PCB dan HCB di jaringan lemaknya. Meskipun pestisida dan POP lainnya tidak dapat dihilangkan secara permanen dari lingkungan, mereka terus menyebar melalui tanah, udara, dan air (Carlsson et al., 2016; Chiesa et al., 2016; Thakur & Pathania, 2019).



Gambar 2. 5 Jalur Mekanistik Toksisitas Pestisida Pada Tanah dan Tanaman (Alengebawy et al., 2021)

Proses transformasi pestisida ini akan dimulai dengan perakaran yang diabsorpsi oleh mineral-mineral tanah, yang kemudian mengalami degradasi biologis dan kimiawi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Pestisida yang digunakan pada tanaman akan menguap ke atmosfer, atau

volatilisasi, kemudian terurai, dibuang, dan dibuang. Pestisida yang tidak dapat terurai secara biologis dan kimiawi masuk ke dalam air tanah dan meninggalkan residu toksik dalam air run-off (Anaduaka et al., 2023).

#### 4. Mikroorganisme Indigenus Pendegradasi Residu Pestisida

Kelompok mikroorganisme kapang dan bakteri yang dikenal sebagai mikroorganisme indigenus berasal dari ekosistem aslinya. Karena kemampuan mereka untuk menghasilkan enzim ekstraseluler, mikroorganisme ini secara alami berfungsi sebagai bioremediator. Namun, penelitian menunjukkan bahwa pasokan nutrisi dan populasi mikroba tidak mencukupi, yang menyebabkan kurangnya akses ke daerah yang terkontaminasi dan menghambat proses pemulihan alami. Polutan dapat memengaruhi struktur mikroorganisme asli, tetapi beberapa mikroorganisme asli di tanah dapat menyesuaikan diri dan beradaptasi dengan kondisi yang terganggu, bermetabolisme dengan polutan (Zafra et al., 2016).

Beberapa jenis kapang, yang dikenal sebagai kapang indigenus, dapat bertahan hidup di berbagai lingkungan, seperti lingkungan yang tercemar oleh xenobiotik. Kapang ini memiliki kemampuan untuk menghancurkan senyawa organik dan menggunakannya sebagai sumber nutrisi untuk metabolisme (Sari & Anitasari, 2022).

#### 5. Teknologi Menurunkan Residu Pestisida di Lahan Pertanian

##### a. Penggunaan Bahan Organik

Dalam menentukan kesuburan tanah, bahan organik memainkan peran yang kompleks. Dengan menggunakan bahan organik, kapasitas tukar kation (KTK) tanah dapat ditingkatkan karena bahan organik dapat menyerap senyawa bahan aktif yang terdapat pada pestisida. Selain itu, bahan organik berkontribusi pada penurunan kadar pestisida secara nonbiologis, yaitu dengan mengabsorbi pestisida dalam tanah (Kusumarini et al., 2020).

Apabila bahan organik ditambahkan ke tanah yang tercemar, populasi mikroba dapat membantu mengubah residu pestisida menjadi nutrisi tanah. Hasil penelitian (Kusumarini et al., 2020) menunjukkan bahwa aplikasi bahan organik menyerap hara tanaman lebih banyak daripada tanpa aplikasi bahan organik dengan dosis paparan pestisida yang sama, tetapi tanah yang tidak terpapar pestisida menyerap hara paling banyak.

Terutama di lahan sayuran dan sawah tadah hujan, penggunaan bahan organik limbah pertanian seperti pupuk kandang sapi dan ayam telah digunakan sejak lama. Pada proses perombakan mikrobiologis, kadar insektisida akan meningkat seiring dengan kadar bahan organik tanah.

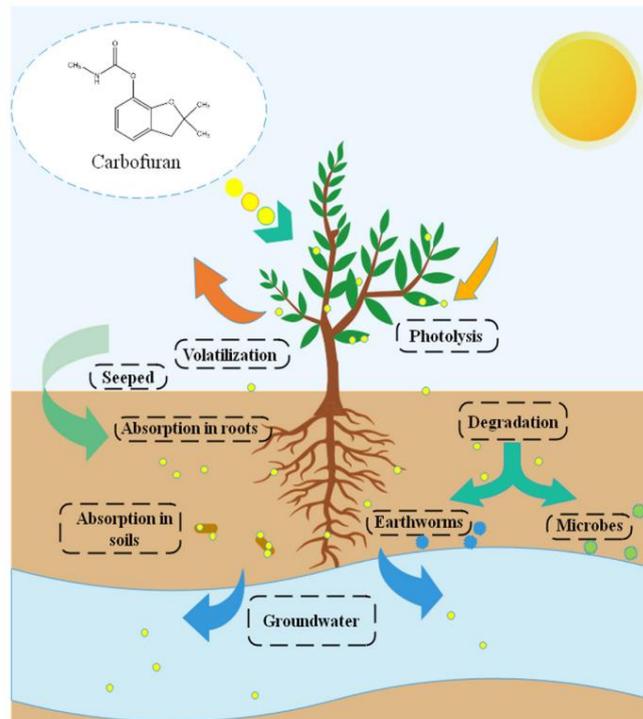
b. Fotodegradasi

Proses perubahan molekul yang disebabkan oleh penyinaran dikenal sebagai fotodegradasi. Istilah ini biasanya digunakan untuk menggambarkan campuran sinar matahari dan udara yang menyebabkan

oksidasi dan hidrolisis. Proses abiotik yang disebut fotodegradasi terjadi ketika molekul pencemar dipecahkan oleh penyerapan energi cahaya. Namun, proses ini lebih sulit dilakukan di dalam tanah karena kandungannya heterogen dan dipengaruhi oleh sifat-sifat tanah. Akibatnya, sangat jarang penelitian yang melibatkan degradasi pestisida menggunakan fotodegradasi, karena fotodegradasi lebih efisien dengan partikel berukuran besar dan area spesifik yang tinggi karena dapat mendorong difusi cahaya. Reaksi seperti hidrolisis, oksidasi, reduksi, dehidrogenasi, dehalogenasi, dekarboksilasi, dan kondensasi adalah contoh fotodegradasi kimia dan biologis (Raffa, 2022).

c. Bioremediasi

Pemanfaatan mikroorganisme untuk menangani pencemaran dikenal sebagai bioremediasi. Menurut Habibah (2019) remediasi didefinisikan sebagai proses mencuci air dan tanah dari zat berbahaya seperti hidrokarbon, poliaromatik hidrokarbon (PAH), polutan organik yang bertahan lama (POP), logam berat, pestisida, dan lain-lain. Untuk memperbaiki lingkungan tercemar, metode biologis—juga dikenal sebagai bio-remediasi—telah dipilih lebih sering karena efek samping dan biaya operasional.



Gambar 2. 6 Nasib Lingkungan dari Karbofuran

Sumber : (Mishra et al., 2020)

Untuk mengurangi efek negatif dari penggunaan pestisida kimia, terutama yang mengandung turunan karbamat (termasuk karbofuran), ada berbagai metode yang dapat digunakan. Salah satu metode teknik remediasi yang digunakan untuk mengatasi tanah tercemar adalah bioremediasi, yang menggunakan aktivitas mikroorganisme untuk mengurangi tingkat polutan yang ada di tanah. Metode ini bergantung pada aktivitas bakteri, yang dapat memengaruhi pertumbuhan mikroba dan kecepatan degradasinya. Teknik ini telah banyak digunakan oleh berbagai negara yang kondisi tanahnya tercemar. Karena kemampuan untuk mengurangi kontaminan yang cukup besar, mudah digunakan, dan ekonomis, teknik ini sering digunakan (Alfiansyah et al., 2023).

Penggunaan mikroba untuk detoksifikasi, degradasi, dan penghilangan zat beracun dari tanah dan air yang terkontaminasi telah muncul sebagai teknik yang efektif untuk membersihkan lingkungan yang tercemar. Ini menunjukkan bahwa bioremediasi menggunakan mikroorganisme dapat menurunkan kadar hidrokarbon yang terkandung dalam tanah akibat residu pestisida (Anggreini, 2019).

d. Bioremediasi dan Pengaruhnya Terhadap Kualitas Tanah

Proses perbaikan tanah dari kondisi yang tercemar oleh pencemaran lingkungan sampai ke kondisi normal dikenal sebagai remediasi. Salah satu cara yang lebih ramah lingkungan untuk melakukan remediasi adalah dengan menggunakan mikroorganisme, seperti kapang lokal, untuk memperbaiki lingkungan yang tercemar. Proses ini dikenal sebagai bioremediasi.

Penggunaan mikroorganisme untuk mengurangi polutan di lingkungan disebut bioremediasi. Ini terjadi ketika enzim mengubah struktur kimia polutan beracun dengan bantuan mikroorganisme (bakteri, kapang, tanaman atau pemanfaatan enzimnya). Ini dapat terjadi secara in-situ maupun eks-situ (Naibaho et al., 2020). Reaksi alam yang dipengaruhi oleh berbagai faktor terhadap sisa pestisida yang tertinggal di dalam tanah mempengaruhi kecepatan degradasi pestisida tertentu. Reaksi ini bergantung pada sifat fisik tanah, mikroorganisme di dalamnya, dan karakteristik pestisida. Banyak penelitian telah melihat bagaimana pestisida didegradasi melalui berbagai jenis teknik

fisikokimia, seperti plasma, pelepasan permukaan fase gas, adsorpsi fisik, kavitasi hidrodinamik, dan nanopartikel (Zhang et al., 2021). Namun, metode-metode ini tidak ekonomis dan sulit diterapkan di wilayah yang sangat terkontaminasi. Akibatnya, bioremediasi, proses degradasi pestisida, telah menjadi metode yang kuat dan menarik untuk memecahkan masalah paparan pestisida berbahaya.

**Tabel 2. 2 Potensi Kapang Dalam Mendegradasi Pestisida**

Spesies	Metode	Hasil (Senyawa Terdegradasi)	Referensi
<i>Jamur pelapuk putih</i>	Karakteristik	Jamur pelapuk putih memiliki kemampuan untuk menghancurkan insektisida karbofuran.	(Chanif et al., 2015)
<i>Aspergillus sydowii</i>	HPLC	Penelitian ini mencoba biodegradasi pestisida organofosfat seperti klorpirifos, metil parathion, dan profenofos dengan menggunakan kapang <i>Aspergillus sydowii</i> CBMAI 935 sebagai biokatalis. Penemuan ini menekankan metilasi berbagai senyawa fenolik dan menunjukkan potensi mikroorganisme ini untuk proses	(A et al., 2021)

		biokatalitik dalam reaksi yang biasanya menggunakan senyawa beracun.	
<i>Okrobaktrums p., Stenotrofom onassp., Lactobacillus brevis, Serratia marcescens, Aspergillus niger, Rhodotorula glutini, Dan Rhodotorula rubra</i>	Fisikokimia	<i>Aspergillus niger</i> MK640786 secara efektif mengurangi diazinon dan mencapai tingkat degradasi 82% dalam kondisi inkubasi 30°C, konsentrasi awal 25 mg/L, nilai pH 5 dan waktu inkubasi 7 hari.	(Wu et al., 2021)
<i>Aspergillus niger</i>	GC-MS Analysis	<i>Aspergillus niger</i> MK640786 berhasil mereduksi diazinon pada kondisi optimal sebagai berikut: suhu 30°C, konsentrasi awal 25 mg/l, pH 5 dan dalam waktu 7 hari inkubasi.	(Hamad, 2020)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	GC-MS Analysis	Jumlah diazinon yang didegradasi oleh <i>Saccharomyces cerevisia</i> mencapai 85,23%	(Sadeghi et al., 2019)
<i>Aspergillus sp</i>	<i>In Vitro Screening</i>	Strain yang diisolasi dari tanah yang terpapar pestisida bertahan secara in vitro GP dosis tinggi (500 mM), dan berhasil menggunakan	(Aluffi et al., 2020)

		herbisida sebagai sumber nitrogen dan fosfor.	
<i>Candida pseudolambica</i>	HPLC Analysis	Selama 24 jam, tingkat degradasi diazinon mencapai 34%.	(Ebadi et al., 2022)

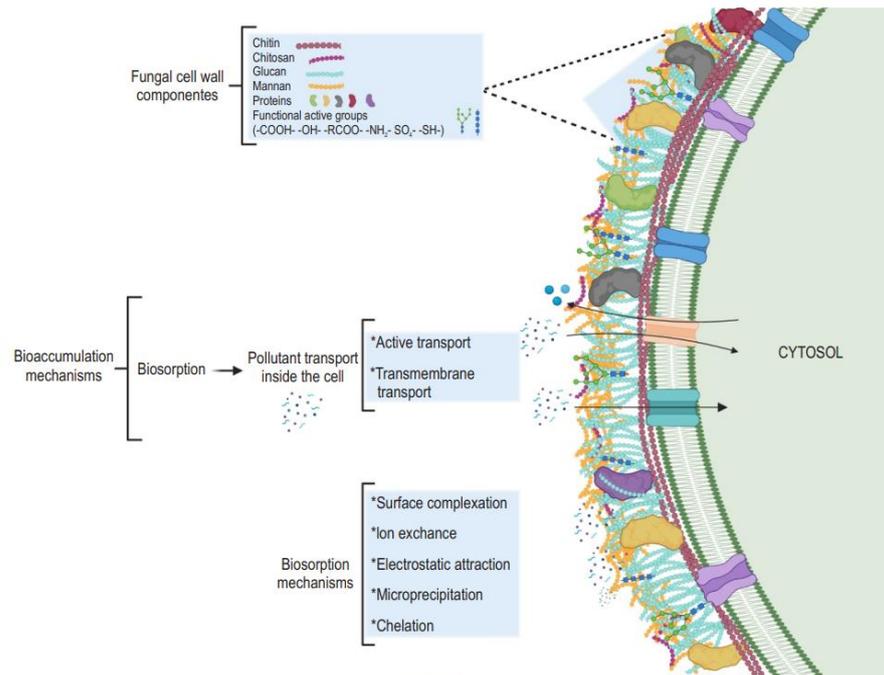
Menurut beberapa penelitian yang telah disebutkan, kapang dapat berfungsi dengan baik sebagai agen biodegradasi untuk lahan yang tercemar pestisida. Penelitian juga menemukan bahwa kapang memiliki kemampuan untuk menangani faktor lingkungan tertentu, seperti toksisitas senyawa persisten organik dan logam berat, yang dapat membatasi atau mencegah biodegradasi oleh bakteri.

e. Mekanisme degradasi pestisida oleh kapang

Mekanisme detoksifikasi lahan yang tercemar residu pestisida melibatkan berbagai strategi seperti biosorpsi, biomineralisasi, bioakumulasi, biointraseluler, presipitasi ekstraseluler dan biotransformasi dengan keterlibatan berbagai jalur pensinyalan.

Biosorpsi adalah proses fisika-kimia yang terlibat dalam penyerapan zat kimia di dalam/pada matriks/permukaan biologis. Sebagai salah satu proses dalam bioremediasi, biosorpsi memainkan peran penting dalam menghilangkan PAH. Proses biosorpsi dapat terjadi karena adanya material biologis yang disebut biosorben dan adanya larutan yang mengandung logam berat dengan afinitas yang tinggi

sehingga mudah terikat dengan biosorben. Pada peristiwa biosorpsi pada jamur, perpindahan logam melewati membran sel menghasilkan akumulasi intraseluler yang bergantung pada metabolisme sel (Heltina & Indriani, 2012; Ratnawati et al., 2010).



Gambar 2. 7 Mekanisme Degradasi Pestisida

Sumber: (M. Bibbins-Martínez, 2021)

Selain itu, biosorben seperti jamur memiliki banyak keunggulan dalam proses biosorpsi karena mereka murah, ramah lingkungan, dan tersebar luas di alam. Mereka memiliki banyak gugus fungsi (-OH, -NH, -COOH, dan seterusnya), dan permukaan mereka menyediakan banyak situs di mana ion logam dapat terikat. Dengan jamur pelapuk putihnya, *Phanerochaete chrysosporium* (*P. chrysosporium*) dapat mendegradasi berbagai xenobiotik. Namun, ia juga berhasil menghilangkan logam berat melalui biosorpsi (Gopal et al., 2002).

Mekanisme degradasi pestisida oleh kapang selanjutnya juga dapat dilakukan melalui metode bioakumulasi. Bioakumulasi dianggap sebagai proses aktif (Ardal, 2014) karena biomassa hidup digunakan dalam proses ini untuk mendetoksifikasi limbah. Dalam proses ini, biomassa menyerap zat melalui permukaan dan serapan nutrisi (Al-Homaidan et al., 2018). Senyawa kemudian terakumulasi atau dimetabolisme menurut jenis biomassa. Hal ini juga dapat didefinisikan sebagai proses di mana polutan organik dan anorganik, yaitu, logam berat dan pestisida, nitrat, sulfat, dan fosfat ditransfer di dalam sel-sel organisme hidup dan dikeluarkan dari larutan berair (Mustafa et al., 2021).

f. Mikoenzim yang berperan dalam biodegradasi

Proses biodegradasi jamur terjadi secara ekstraseluler dalam dua tahap: aksi sistem hidrolitik dan sistem lignolitik. Proses oksidatif kompleks, ekstraseluler non-spesifik terjadi di sistem lignolitik, dan sistem enzimatik sangat kuat dan memiliki kondisi nutrisi terbatas. Mekanisme ini memiliki kemampuan untuk menghancurkan senyawa lignolitik, pewarna, dan beberapa pencemar lingkungan yang mikroorganisme lain tidak dapat menghancurkan.

Sebagian besar jamur saprofit memperoleh nutrisinya dari bahan selulosa di sekitarnya, oleh karena itu sebagian besar sel jamur mengandung enzim lignoselulolitik seperti lakase, selulase, dan  $\beta$ -glukosidase lignin peroksidase. Kemampuan jamur untuk menghasilkan

berbagai jenis limbah ditingkatkan oleh mekanisme enzimatik yang bervariasi ini. Enzim jamur kompatibel, efisien, dan dapat digunakan pada berbagai sektor seperti pengobatan, industri, bioremediasi, dan aplikasi pertanian. Baik intraseluler maupun ekstraseluler, sel jamur melakukan aktivitas enzimatik. Melalui proses hidrolisis substrat, jamur dapat menghasilkan banyak enzim ekstraseluler yang diperlukan untuk biokonversi berbagai substrat. Enzim ekstraseluler juga melindungi jamur dari zat berbahaya. Enzim ekstraseluler seperti lakase dan peroksidase telah digunakan untuk menghapus xenobiotik dan zat fenolik berbahaya dari industri lingkungan dan air limbah. Untuk memperbaiki lingkungan tercemar, hidrolase, dehalogenase, transferase, dan oksidoreduktase adalah kelompok enzimatik yang paling jelas (El-Gendi et al., 2022; Rao et al., 2010).

## 6. Karakterisasi Kapang Pendegradasi

### a. Pengamatan Makroskopis

Kapang terdiri dari filamen panjang bercabang yang disebut hifa. Massa hifa kusut yang terlihat dengan mata telanjang disebut miselium. *Rhizopus oryzae* adalah jamur tempe. Hifa monositik (memiliki inti) dan senositik (tidak memiliki inti) dibedakan secara mikroskopis berdasarkan morfologinya. Kapang yang tidak memiliki septum baru akan membuat septum jika kapang tersebut membentuk struktur untuk melindunginya dari kondisi yang tidak menguntungkan, seperti klamidospora. Anastomosis pada titik temu atau titik sentuh cabang-cabang hifa

menyebabkan pembentukan miselium. Anastomis memperluas sistem hifa menjadi jala yang disebut miselium untuk menyerap nutrisi dari substrat, dan kedua, menyatukan hifa yang terpisah (Kurniawati, 2017).

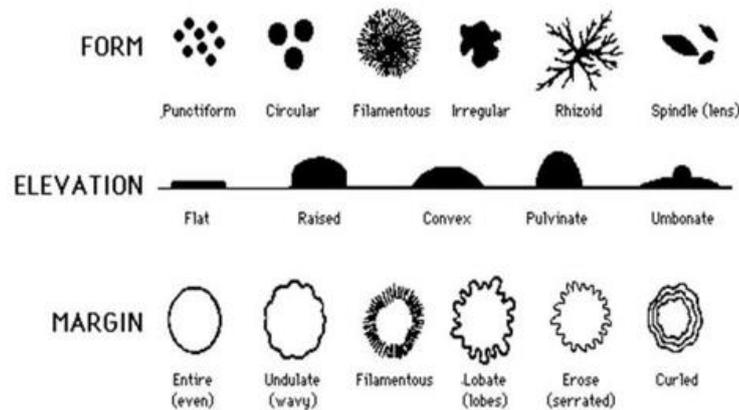
Dalam kondisi terendam, jamur berfilamen menunjukkan dua pertumbuhan miselia yang khas secara morfologi: pelet atau bentuk miselium bebas. Berbagai kondisi persiapan, seperti ukuran, sifat inokulum, komposisi medium, pH, suhu, rpm, volume, tegangan geser, dan variabilitas genetik, memengaruhi morfologi ini. Panjang hifa, panjang total miselium, diameter miselium, jumlah ujung, laju ekstensi ujung, unit pertumbuhan hifa, dan frekuensi percabangan adalah atribut yang biasanya digunakan untuk menggambarkan morfologi jamur. Parameter seperti luas, kekompakan, keliling, sirkularitas, dan kekasaran telah digunakan untuk menggambarkan pelet dan agregat jamur, tetapi identifikasi parameter morfologi baru diperlukan untuk membedakan pertumbuhan dengan lebih akurat (de Souza & Kamat, 2018).

Karakter koloni, seperti warna dan permukaannya, garis radial dari pusat ke tepinya, dan lingkaran konsentris, digunakan untuk menentukan ciri makroskopisnya (Putu et al., 2019).

Mikroorganisme apabila ditumbuhkan pada bermacam – macam jenis media, maka mengembangkan perbedaan dalam penampakan makroskopis dalam pertumbuhannya. Perbedaan – perbedaan ini disebut karakteristik kultur, dan digunakan sebagai dasar untuk memisahkan mikroorganisme ke dalam kelompok – kelompok taksonominya.

Mikroorganisme tersebut di terminasi dengan menumbuhkannya pada media nutrient agar miring ditabung reaksi dan media nutrient agar datar dicawan petri, nutrient broth, dan nutrient gelatin. Pola pertumbuhan kapang pada media dapat dievaluasi secara : Pertumbuhan pada nutrient agar plate.

Koloni kapang yang diisolasi pada media padat cenderung membentuk pola pertumbuhan jenis tertentu yang dicatat sebagai ciri koloninya. Koloni yang terlihat adalah kumpulan sel yang terlihat tumbuh dari satu sel induk. Fitur utama yang dilihat antara lain ukuran, bentuk, warna, tekstur, ketinggian. Ini adalah ciri-ciri utama suatu koloni yang tanpanya identifikasi tidak mungkin dilakukan (Anoushka Mapari, Ayesha Karmali, Anisha Aroskar, Ashlyn Rodrigues, 2019).



Gambar 2. 8 Karakteristik koloni standar untuk identifikasi

Sumber : (Anoushka Mapari, Ayesha Karmali, Anisha Aroskar, Ashlyn Rodrigues, 2019)

b. Pengamatan Mikroskopis

Pengamatan mikroskopis dilakukan dengan mengambil biakan murni jamur menggunakan jarum preparat secara aseptis dan meletakkannya di atas permukaan kaca objek. Untuk membantu mengamati struktur mikroskopisnya, pewarna lactophenol cotton blue digunakan setelah preparat ditutup dengan cover kaca dan diamati di bawah mikroskop dengan perbesaran 400X (Putu et al., 2019).

Metode kultur slide digunakan untuk memeriksa isolat kapang secara mikroskopis. Pemeriksaan ini mencakup morfologi spora, warna, bentuk, ornamen atau tekstur dinding, ukuran, pembentukan konidia, dan atribut lainnya yang terkait seperti pola phialide dan konidiasi (Larasati et al., 2021).

### c. Pengamatan Molekuler

#### 1) Analisis Molekuler

Analisis kapang secara molekuler dilakukan melalui PCR, yang mengamplifikasi DNA target. Kary B. Mullis pertama kali mengembangkan metode enzimatik untuk mengamplifikasi DNA secara *in vitro*, yang dikenal sebagai PCR. Analisis dilakukan menggunakan metode PCR melalui tiga tahap utama oleh enzim DNA polimerase: denaturasi, annealing, dan ekstensi. Amplimer, sepasang primer oligonukleotida khusus, digunakan untuk membuat penanda dengan untai DNA target dari ujung 5' ke ujung 3' dan mengamplifikasi urutan yang diinginkan. Selain itu, ion magnesium ( $Mg^{2+}$ ) diperlukan untuk mengaktifkan enzim polimerase, dan komponen deoxynucleoside

triphosphate (dNTP) yang akan menempel pada ujung 3' primer selama proses pemanjangan. Hasil amplifikasi DNA kemudian digunakan untuk sekuensi dan pensejajaran sekuen DNA menggunakan software Bioedit, dan analisis dilakukan menggunakan program BLAST pada NCBI dengan data dari GenBank. Daerah ITS adalah daerah non-coding di antara rDNA fungi konservatif. Daerah ini sangat berbeda antar genus atau spesies fungi. Primer universal ITS digunakan untuk mengamplifikasi wilayah internal transcribed spacer (ITS), yang merupakan daerah konservatif di kingdom fungi. DNA barcoding digunakan untuk mengidentifikasi kapang (Suryani, 2021).

## 2) Analisis Filogenetik

Analisis filogenetik digunakan untuk menggambarkan hubungan historis suatu organisme atau sekuen molekul dalam pohon filogenetik. Ini adalah pendekatan logis untuk memprediksi dan membandingkan informasi genetik, individu, populasi, dan spesies serta hubungannya selama proses evolusi. Sebuah pohon filogenetik terdiri dari akar, node, dan cabang. Cabang pohon filogenetik yang berdekatan dapat menunjukkan kedekatan evolusi antar spesies. Tergantung pada urutan gen, posisi urutan, model evolusi yang digunakan, dan teknik penyimpulan sejarah, estimasi filogenetik dapat berbeda. Kesalahan dalam analisis data terstruktur filogenetik dapat disebabkan oleh kesalahan dalam inferensi filogenetik (Suryani, 2021).

## B. Kajian Penelitian Yang Relevan

Dalam proses bioremediasi, mikroorganismenya dikembangkan untuk menghilangkan atau mengubah bahan kimia berbahaya menjadi senyawa yang tidak beracun (Verasoundarapandian et al., 2022). Jamur memiliki kemungkinan lebih besar untuk melakukan bioremediasi dibandingkan dengan bakteri karena mereka dapat menangani faktor lingkungan tertentu, seperti toksisitas senyawa persisten organik dan logam berat, yang dapat membatasi atau mencegah biodegradasi bakteri (Noman et al., 2019). Seperti yang ditunjukkan oleh penelitian yang dilakukan oleh (Pinto et al., 2012), kapang spesies *Lentinula edodes* memiliki kemampuan untuk mendegradasi dan memiliki kemampuan yang luar biasa untuk menghancurkan pestisida seperti difenoconazole dan pendimetalin. Bahkan penelitian (Nykiel-Szymańska et al., 2020) menemukan bahwa kapang *Trichoderma* spp dapat mengubah dan mengeluarkan herbisida chloroacetanilide yang umum, seperti alachlor hingga 80-99% dan metolachlor hingga 40-79%. Senyawa lain, seperti pestisida terklorinasi (OCPs), dapat berpartisipasi dalam proses mycoremediasi melalui mekanisme seperti deklorinasi reduktif, dehidroklorinasi, oksidasi, dan isomerisasi molekul induk (Banerjee & Chandra Mandal, 2020).

**Tabel 2. 3 State Of The Art Kapang Pendegradasi Pestisida**

Spesies	Mekanisme	Hasil Senyawa (Terdegradasi)	Referensi
<i>Aspergillus sydowii</i> CBMAI 935	Biodegradasi	Memiliki kemampuan untuk menghancurkan residu profenofos	(Soares et al., 2021)

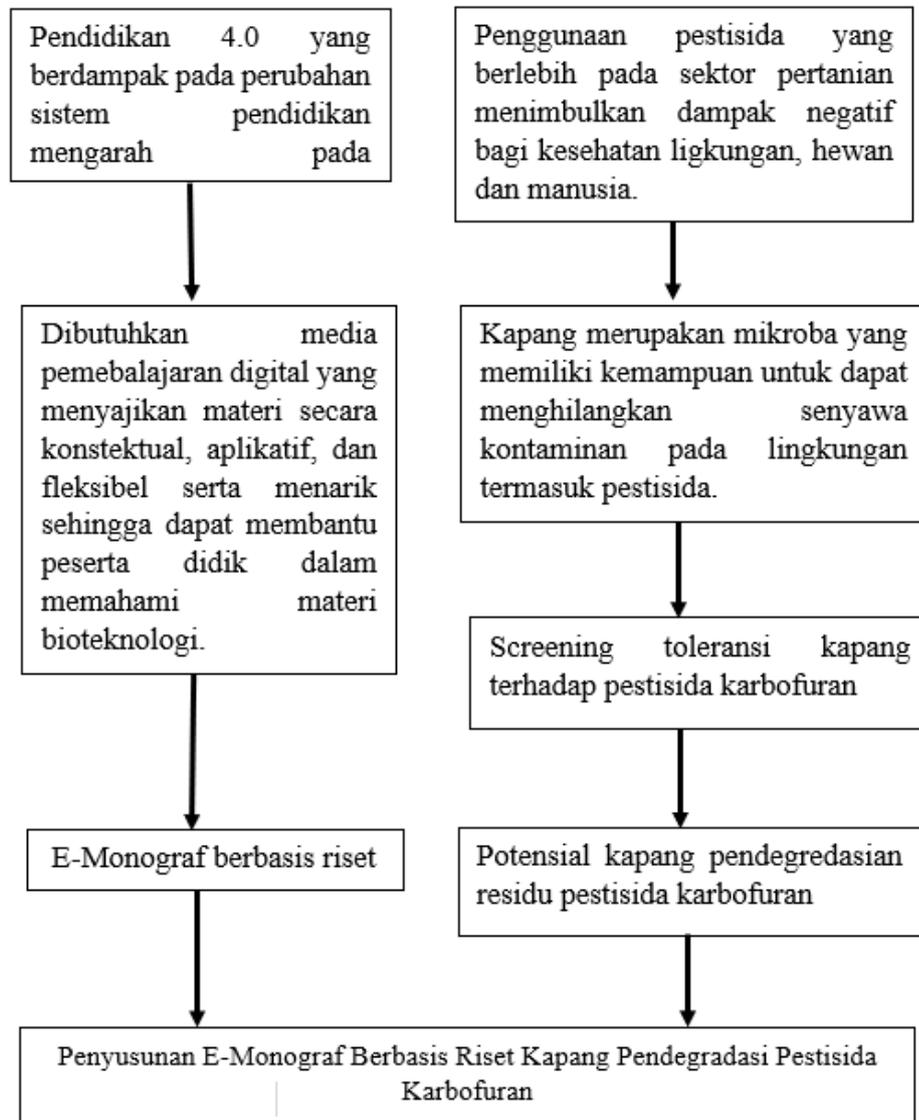
		sebesar 52% dalam 20 hari.	
<i>Trichoderma harzianum</i>	Biodegradasi	Dalam 10 hari inkubasi, residu profenofos dapat dikurangi sebesar 56.37	(TM & Masmali, 2016)
<i>Eurotium cristatum</i> ET1	Bioremediasi	Mampu mengurangi kandungan sipermetrin melalui transformasinya menjadi 3-PBA, yang kemudian dimetabolisme menjadi fenol dan katekol. Akibatnya, strain ini dapat digunakan untuk bioremediasi lingkungan yang terkontaminasi pestisida.	(Hu et al., 2019)
<i>Aspergillus niger</i> YAT strain	Biodegradasi	Strain ini dapat mengurangi kadar sipermetrin sebanyak 54,83 persen ( $\beta$ -CY; 50 mg L <sup>-1</sup> ) dan asam 3-fenoksibenzoat sebanyak 100 % (3-PBA; 100 mg L <sup>-1</sup> ) dalam 22 jam.	(Deng et al., 2015)
<i>Aspergillus niger</i>	Biodegradasi	Strain ini mampu menurunkan kadar diazinon menjadi 78,22% setelah inkubasi 10 hari.	(Abdel-Fattah Mostafa et al., 2022)
<i>B. antennata</i>	Biodegradasi	Strain biodegradable yang paling efektif	(Abdel-Fattah Mostafa et al., 2022)

		dengan disipasi tertinggi yaitu 83,88%.	
--	--	---	--

### C. Kerangka Berpikir

Industri 4.0 berdampak pada digitalisasi pendidikan, untuk itu pendidik dituntut untuk menyediakan sumber belajar berbasis teknologi informasi untuk memfasilitasi proses pembelajaran. Adapun yang menjadi bagian dari media pembelajaran digital adalah e-monograf. E-Monograf merupakan salah satu alat pembelajaran yang paling umum digunakan untuk mengukur tingkat pembelajaran siswa. E-Monograf yang dapat memvisualisasikan gambar berwarna dapat memberikan kesan dan pemahaman yang jelas dari pendidik ke peserta didik tentang materi yang disampaikan, memberikan pemahaman yang jelas tentang materi ajar yang dialami oleh peserta didik, sehingga mereka dapat lebih mudah memahami materi melalui gambar. Salah satu mata kuliah, bioteknologi, dapat menggunakan e-monograf berbasis riset sebagai sumber dan alat pembelajaran.

Adapun kerangka berpikir dapat dilihat melalui bagan berikut ini:



Gambar 2. 9 Bagan Kerangka Berpikir