

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Kajian Teori**

##### **2.1.1 E-Monograf**

Kata "monograf" berasal dari bahasa Yunani, yang terdiri dari dua kata, yaitu "mono" yang berarti tunggal, dan "graph" yang berarti menulis. Dengan demikian, monograf dapat diartikan sebagai tulisan yang fokus pada satu subjek atau topik tertentu. Monograf adalah bentuk penulisan yang ringkas dari laporan penelitian atau makalah yang membahas secara mendetail mengenai suatu subjek atau topik tertentu. Monograf sendiri merujuk pada buku yang membahas secara mendalam mengenai satu cabang ilmu atau topik yang spesifik (Fatmawati, 2020).

Monograf adalah istilah lain untuk buku yang digunakan untuk membedakannya dari terbitan berseri. Monograf mencakup satu topik atau sejumlah topik yang saling terkait, dan biasanya ditulis oleh satu penulis. Terbitan ini bersifat tunggal, diselesaikan dalam satu jilid, dan tidak diterbitkan secara berkelanjutan. Ruang lingkup monograf mencakup satu hal dalam satu bidang ilmu, dan penulisannya mengikuti kaidah penulisan ilmiah yang lengkap, mencakup rumusan masalah, pemecahan masalah, dukungan teori terkini, kesimpulan, dan daftar pustaka. Monograf umumnya diterbitkan sebagai buku referensi (Arifah, 2017). Buku monograf adalah sebuah karya tulis ilmiah yang

disusun oleh seorang ahli atau spesialis dalam bidang tertentu. Buku ini membahas satu topik secara mendalam dalam suatu disiplin ilmu sesuai dengan kompetensi penulis. Sebuah buku monograf biasanya mencakup rumusan masalah yang mengandung elemen kebaruan, metodologi untuk menyelesaikan masalah, dukungan data atau teori terkini yang relevan dan komprehensif, serta disertai dengan kesimpulan dan daftar pustaka (Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, 2021).

Monograf adalah karya tulis yang membahas satu subjek atau topik tertentu. Sebagai sebuah karya ilmiah dalam bentuk buku, monograf hanya fokus pada satu isu atau hal dalam suatu disiplin ilmu. Monograf memiliki kelebihan kriteria karya ilmiah yang lengkap, antara lain dengan adanya rumusan masalah yang mengandung unsur kebaruan (novelty), dukungan data atau teori terkini yang jelas dan komprehensif, serta dilengkapi dengan ilustrasi, contoh, atau studi kasus yang didasarkan pada kajian literatur yang memadai (Lembaga Penelitian Universitas Trisakti. 2022). Monograf mempunyai kekurangan yaitu keterbatasannya dalam membahas hanya satu topik secara mendalam, sehingga kurang cocok bagi pembaca yang membutuhkan informasi dari berbagai sudut pandang atau topik lainnya. Monograf dapat menjadi kurang relevan seiring waktu, terutama pada bidang yang cepat berkembang seperti teknologi atau sains. Monograf juga bersifat statis

dan minim interaktivitas, sehingga kurang menarik dibandingkan media pembelajaran digital.

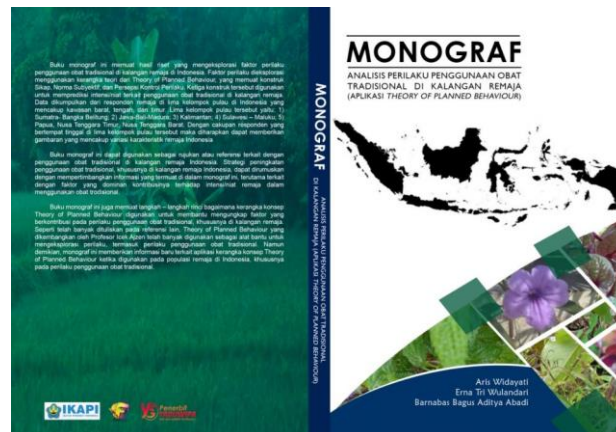
### 2.1.2 *E*-Monograf Berbasis Riset

*E*- Monograf berbasis riset adalah buku digital yang disusun berdasarkan hasil penelitian, yang bertujuan untuk mendokumentasikan, menyebarluaskan, dan memanfaatkan temuan penelitian secara lebih luas. Buku ini berfungsi sebagai sumber pendidikan yang dirancang oleh peneliti untuk meningkatkan kemampuan ilmiah mahasiswa sekaligus memenuhi standar pembelajaran. *E*-Monograf berbasis riset menyajikan materi dan data yang didasarkan pada hasil penelitian.

*E*-monograf berbasis riset memiliki keunggulan, yaitu memberikan peluang bagi peserta didik untuk melatih keterampilan seperti melakukan pengamatan, merumuskan hipotesis, mengumpulkan serta menganalisis data, dan menarik kesimpulan. Selain itu, modul berbasis riset juga memiliki manfaat lain, yakni kontennya lebih berkualitas karena didasarkan pada penelitian, serta mampu meningkatkan keterlibatan aktif peserta didik dalam proses pembelajaran (Pujiati et al., 2018). Dengan tambahan pengayaan dari hasil penelitian, monograf juga berpotensi ditingkatkan statusnya menjadi buku referensi. Buku ini kemudian dapat berperan sebagai sumber literatur untuk penelitian lain serta menjadi materi ajar bagi guru dan siswa (Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, 2021). Kekurangan dari *e*-monograf berbasis riset adalah

ketergantungan pada perangkat digital, seperti *handphone* atau komputer, yang dapat menjadi hambatan bagi pengguna yang tidak memiliki akses ke teknologi tersebut. Selain itu, jika *e-monograf* tidak dapat diunduh, pengguna membutuhkan koneksi internet yang stabil, yang sering menjadi tantangan di daerah dengan akses jaringan terbatas. Oleh karena itu, kekurangan ini perlu dipertimbangkan agar penggunaan *e-monograf* dapat lebih efektif dan efisien.

Penggunaan *e-monograf* dalam pembelajaran bioteknologi memberikan pendekatan baru yang efektif dalam menyampaikan materi tentang kapang. *E-Monograf* dilengkapi dengan gambar berwarna, mampu menyampaikan informasi secara jelas dan mendetail. Selain itu, monograf juga mendorong peserta didik untuk berpikir kreatif dalam menafsirkan gambar yang disajikan (Sutanto et al, 2020). *E-Monograf* berbasis riset mendukung pencapaian kompetensi pembelajaran Bioteknologi, terutama dalam penerapannya pada kehidupan sehari-hari. *E-Monograf* ini memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, serta fleksibel dalam penggunaannya (Pratondo et al., 2018).



Gambar 2.1 Contoh *E-Monograf*  
Sumber: Widiyanti et al, 2022

### 2.1.3 Biodegradasi Pestisida *Chlorpyrifos*

Tanah terbentuk melalui pelapukan fisik dan kimiawi pada batuan dan pelapukan fisik terdiri dari dua jenis. Jenis pertama adalah penghancuran yang disebabkan oleh proses pembasahan dan pengeringan yang terus-menerus, atau oleh pengaruh salju dan es. Jenis kedua adalah pengikisan yang disebabkan oleh air, angin, atau sungai es (*glacier*). Proses-proses ini menghasilkan partikel dari ukuran kecil hingga besar, namun komposisinya tetap sama dengan batuan asalnya. Sedangkan pelapukan kimiawi membutuhkan air, oksigen, dan karbon dioksida, yang mengubah kandungan mineral pada batuan menjadi mineral lain yang memiliki sifat yang sangat berbeda (Arrofiq et al., 2016).

Bidang pertanian, tanah didefinisikan sebagai media untuk pertumbuhan tanaman. Tanah terbentuk dari hasil pelapukan batuan yang bercampur dengan sisa-sisa bahan organik dan organisme, baik tumbuhan maupun hewan, yang hidup di atas atau di dalamnya. Selain

itu, tanah juga mengandung air dan udara. Air dalam tanah berasal dari air hujan yang diserap dan disimpan oleh tanah sehingga tidak langsung mengalir ke tempat lain. Proses pembentukan tanah melibatkan pencampuran bahan mineral dan organik, yang menghasilkan lapisan-lapisan tanah atau horizon. Secara umum, tanah adalah kumpulan elemen alami di permukaan bumi yang tersusun dalam horizon-horizon, terdiri dari bahan mineral, organik, air, dan udara, serta berfungsi sebagai media pertumbuhan tanaman (Arifin et al., 2019).

Pencemaran tanah adalah kondisi di mana bahan pencemar, seperti bahan kimia buatan manusia, zat lainnya, atau organisme, masuk ke dalam tanah dan mengubah kondisi lingkungan tanah yang alami. Faktor lain yang memicu pencemaran tanah antara lain kebocoran limbah cair, bahan kimia industri, fasilitas komersial, fasilitas kesehatan, penggunaan pestisida, zat kimia, limbah rumah tangga, limbah pabrik, atau air limbah dari tempat pembuangan sampah. Penelitian terkait pencemaran tanah di sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) telah banyak dilakukan, dan hasilnya menunjukkan adanya pencemaran logam berat dalam tanah, yang tentunya sangat berbahaya bagi kesehatan (Widia Gusti et al., 2022). Tanah dianggap tercemar jika terjadi perubahan dalam tatanan lingkungan tanah tersebut, sehingga berbeda secara signifikan dari kondisi aslinya, akibat masuknya zat atau benda asing. Secara umum, setiap jenis tanah yang tercemar

memerlukan bahan kimia yang berbeda untuk mengurangi sifat toksisitasnya.

Penggunaan pupuk anorganik, pestisida, dan insektisida sering kali menyebabkan kematian berbagai organisme tanah, seperti serangga dan hewan kecil. Akibatnya, hewan yang lebih besar yang bergantung pada hewan kecil sebagai bagian dari rantai makanan juga terdampak negatif. Sisa residu dan racun dari bahan-bahan tersebut dapat terbawa oleh air hujan dan, seiring waktu, bermuara ke badan air, sehingga mencemari sumber air. Pestisida yang ada di tanah dan air dapat diserap oleh tanaman melalui akar, lalu terakumulasi di batang, daun, dan buah. Proses metabolisme kimiawi pestisida memengaruhi seberapa cepat racun dan pencemar masuk ke dalam tanaman (Siahaan & Restiaty, 2021).

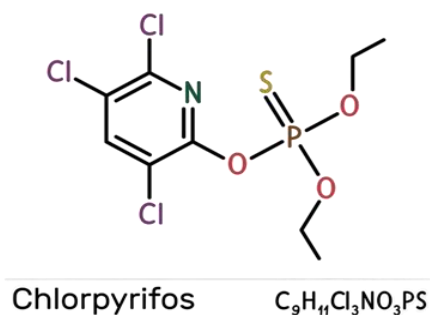
Pestisida merupakan zat kimia, bahan lain, atau organisme mikro seperti mikroba dan virus yang digunakan untuk mengendalikan atau mencegah hama dan penyakit yang dapat merusak tanaman, bagian tanaman, maupun hasil pertanian. Karena sifatnya yang beracun dan kurang stabil di alam, penggunaan pestisida secara berlebihan dapat menimbulkan dampak buruk bagi kesehatan petani serta lingkungan (Asiaka et al, 2022). Sistem pertanian yang mengandalkan bahan berenergi tinggi seperti pestisida kimia dapat memicu pencemaran, terutama di lingkungan pertanian. Pestisida dapat menjadi sumber polusi yang menyebar melalui udara, air, atau tanah, dan dapat

memberikan dampak langsung pada makhluk hidup maupun lingkungan sekitarnya (Sinambela, B. R., 2024). Menurut Setiawan dan Bernik (2019), akumulasi residu pestisida dapat mencemari lahan pertanian. Jika residu tersebut masuk ke dalam rantai makanan, sifat toksik dari pestisida dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, seperti kanker, mutasi genetik, kelahiran bayi cacat, serta CAIDS (*Chemically Acquired Deficiency Syndrome*), dan lainnya.

*Chlorpyrifos* merupakan pestisida yang paling banyak digunakan oleh petani senyawa insektisida yang memiliki spektrum aktivitas luas terhadap berbagai jenis serangga. Namun, senyawa ini juga diketahui memiliki tingkat toksisitas yang tinggi terhadap mamalia. *Chlorpyrifos* sering kali meninggalkan jejak residu yang signifikan di tanah pertanian. Residu ini cenderung bertahan dalam tanah, yang dapat memengaruhi kualitas tanah dan ekosistem sekitarnya. Akumulasi *chlorpyrifos* di lingkungan pertanian menunjukkan bahwa bahan kimia ini memiliki potensi untuk memberikan dampak jangka panjang terhadap kesehatan tanah dan organisme yang hidup di dalamnya.

*Chlorpyrifos* merupakan salah satu jenis pestisida organofosfat yang paling umum digunakan dan efektif dalam mengendalikan organisme pengganggu tanaman (Ardiwinata et al, 2021). Penggunaan *chlorpyrifos* yang tidak sesuai dengan petunjuk dan dilakukan secara terus-menerus dapat menyebabkan residu pestisida terakumulasi di

tanah, tanaman, bahkan air tanah. Residu ini dapat menurunkan kualitas o (Nurhidayanti et al, 2021).



Gambar 2.2 Struktur Senyawa *Chlorpyrifos*

Sumber: (Bacsica et al, 2022)

*Chlorpyrifos* merupakan senyawa yang tergolong cukup beracun, dengan nilai LD50 oral berkisar antara 135-163 mg/kg untuk tikus dan 500 mg/kg untuk marmot. Insektisida ini termasuk dalam kelompok organofosfat yang bersifat non-sistemik, bekerja melalui kontak langsung dengan kulit, tertelan, atau terhirup melalui saluran pernapasan. Komponen-komponen utama chlorpyrifos antara lain adalah cincin trichloropyridinyl, gugus fosforotioat, serta gugus etil ester. Bagian utama dari struktur aromatik chlorpyrifos adalah cincin pyridin, yaitu struktur aromatik beranggota enam dengan satu atom nitrogen sebagai substituent. Gugus trichloropyridinyl juga menjadi prekursor senyawa hasil degradasi yang penting, yaitu 3,5,6-trichloro-2-pyridinol (TCP), yang tetap bersifat toksik dan resisten terhadap degradasi lebih lanjut (Anwar et al., 2009; Racke, 1993). Gugus fosforotioat terdiri dari atom

fosfor (P), satu atom sulfur (S) membentuk ikatan P=S, dua gugus ester etil (OCH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>), satu gugus oksigen (O) yang menghubungkan cincin pyridyl.

Gugus ini merupakan inti aktif biologis yang menghambat enzim asetilkolinesterase (AChE) pada serangga, menyebabkan kematian akibat gangguan transmisi sinyal saraf (Eaton et al., 2008). Gugus ini juga menjadi target utama dalam proses biodegradasi mikroba, karena relatif mudah diputus oleh enzim seperti esterase (Xu et al., 2008). Dua gugus -OCH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub> yang terikat pada atom fosfor memberikan kelarutan dalam lemak dan mempermudah penetrasi ke dalam jaringan organisme. Gugus ini juga merupakan pintu awal degradasi biologis, karena dapat dihidrolisis oleh mikroorganisme melalui reaksi enzimatik (Singh & Walker, 2006).

Aplikasinya pada bibit dan tanaman dilakukan melalui penyemprotan, baik secara langsung maupun tidak langsung. *Chlorpyrifos* banyak digunakan untuk mengendalikan berbagai jenis hama, termasuk lalat dan nyamuk (baik dalam bentuk larva maupun dewasa), hama pertanian, hama rumah tangga seperti kecoa (*Blattellidae*), lalat rumah (*Muscidae*), rayap (*Isoptera*), serta larva yang hidup di air (Sulaeman et al., 2016). Di Indonesia, penggunaan insektisida *chlorpyrifos* masih sering digunakan dalam budidaya tanaman sayuran dan pertanian adalah Postrin, Sankill dan Rindo-505. Penggunaannya yang luas dapat dibuktikan dengan keberadaan

residu *chlorpyrifos* yang terdeteksi pada berbagai komponen lingkungan, termasuk tanah, air, dan tanaman. Residu tersebut menunjukkan bahwa praktik penggunaan insektisida ini belum sepenuhnya terkendali dan terus memberikan dampak pada ekosistem pertanian. Keberadaan residu ini juga menjadi indikasi bahwa *chlorpyrifos* tidak sepenuhnya terurai di lingkungan, sehingga berpotensi memengaruhi kualitas tanah, air, dan tanaman dalam jangka waktu yang lebih panjang.



Gambar 2.3 Merek Dagang Pestisida *Chlorpyrifos* di Madiun  
Sumber: (Asterindo, 2023)

#### 2.1.4 Potensi Kapang Indigeous Pendegradasi Pestisida Secara Makroskopis dan Mikroskopis

Kapang adalah jenis mikroorganisme yang memiliki potensi besar untuk tumbuh di berbagai lingkungan, terutama pada permukaan benda atau material. Kapang mampu beradaptasi dan penyebaran kapang di area tersebut sering kali dipengaruhi oleh pergerakan udara di sekitarnya. Spora kapang yang ringan dapat dengan mudah terbawa oleh hembusan angin atau udara, sehingga menyebar ke berbagai tempat.

Akibatnya, spora tersebut dapat menempel dan berkembang biak pada permukaan benda-benda tertentu yang mendukung pertumbuhannya (Mahardhika et al., 2022). Kapang tidak dapat berkembang biak di udara, tetapi mampu tumbuh dengan optimal pada permukaan atau substrat tertentu.

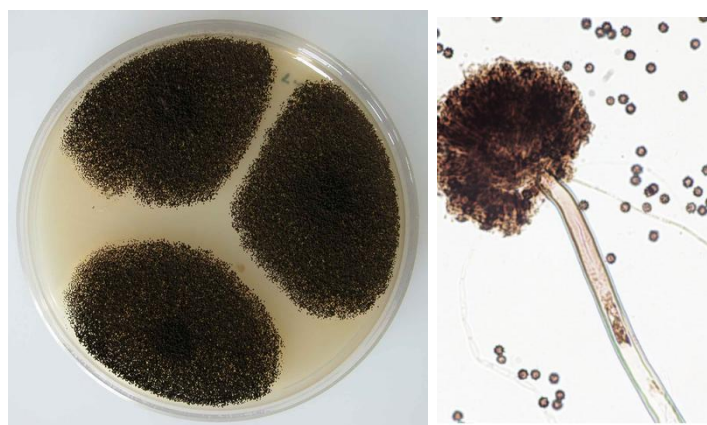
Kapang diketahui mampu menghasilkan beragam enzim, termasuk laccase, lignin peroksidase, dan peroksidase. Selain itu, sejumlah spesies jamur berfilamen memiliki kemampuan untuk menghasilkan mikotoksin, yaitu senyawa beracun yang menjadi fokus perhatian para ilmuwan. Hal ini disebabkan oleh potensi mikotoksin sebagai ancaman serius terhadap kesehatan manusia dan lingkungan, sehingga topik ini kerap menjadi subjek penelitian mendalam dalam komunitas ilmiah (Diyah et al., 2024). Terdapat beberapa jenis kapang indigenous mendegradasi pestisida yaitu genus *Aspergillus*, *Trichoderma* dan *Penicillium*.

a. Genus *Aspergillus*

Genus *Aspergillus* merupakan salah satu kelompok jamur yang paling signifikan, karena kemampuannya dalam mensintesis metabolit sekunder yang bersifat toksik (Ehrampoush et al., 2017). Khususnya, *Aspergillus niger* diketahui mampu menghasilkan berbagai enzim seperti selulase, hemiselulase, lignase, dan pektinase, yang berperan penting dalam proses degradasi senyawa aromatik (Liu, 2021) (Fareed et al., 2017). *Aspergillus niger* adalah

jenis jamur yang memiliki kemampuan menghasilkan enzim amilase ketika ditumbuhkan pada media seperti ampas tahu. Ampas tahu ini dapat dimanfaatkan sebagai substrat untuk memproduksi enzim hidrolisis yang berperan penting dalam meningkatkan kualitas nutrisi pada pakan ternak. Kapang memiliki potensi besar dalam menguraikan selulosa. Beberapa di antaranya adalah kapang dari genus *Rhizopus*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Trichoderma*, *Penicillium* dan *Fusarium*.

1. Genus *Aspergillus niger* secara khusus telah diketahui memiliki kemampuan yang signifikan dalam mendegradasi selulosa, yang dibuktikan melalui nilai indeks selulolitik yang tinggi. Hal ini menunjukkan potensi besar kedua genus tersebut dalam proses penguraian selulosa untuk berbagai aplikasi bioteknologi (Andi et al, 2022).

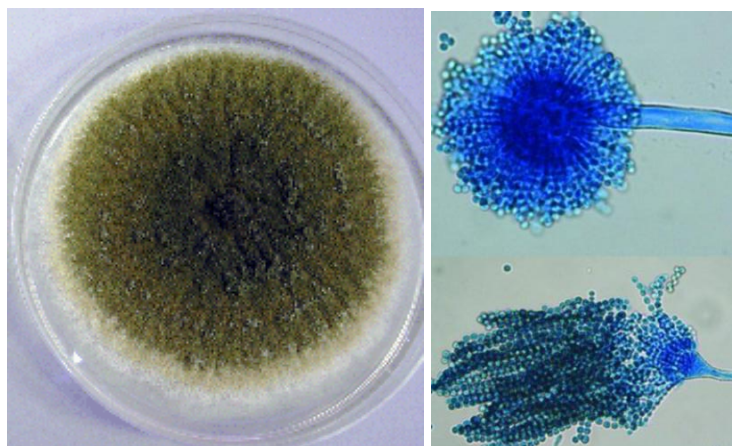


Gambar 2.4 Kapang *Aspergillus niger*

Sumber: (Faith, 2019)

2. *Aspergillus flavus* menunjukkan kemampuan adaptif yang menonjol terhadap keberadaan pestisida organofosfat seperti

*chlorpyrifos*. Ketika diinkubasi dalam medium yang mengandung senyawa tersebut, kapang ini mengalami peningkatan laju pertumbuhan yang cukup signifikan. Hal ini menandakan bahwa *A. flavus* tidak hanya memiliki toleransi terhadap tekanan kimia dari *chlorpyrifos*, tetapi juga mampu memanfaatkannya sebagai sumber karbon alternatif atau menginduksi ekspresi enzim-enzim tertentu yang berperan dalam proses detoksifikasi. Aktivasi jalur metabolik atau enzimatik ini menjadi indikasi kuat bahwa *A. flavus* memiliki potensi besar sebagai agen biodegradasi yang dapat diandalkan untuk aplikasi bioremediasi tanah atau lingkungan yang terkontaminasi pestisida (Barberis, Carranza, Magnoli, Benito, et al., 2019).



Gambar 2.5 Kapang *Aspergillus flavus*  
Sumber: (Safika, 2018)

b. Genus *Trichoderma*

*Trichoderma* adalah jenis jamur yang dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan patogen tanaman, sekaligus mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman di lahan yang terdegradasi. Jamur ini memiliki kemampuan untuk mendegradasi berbagai substrat heterogen di tanah, memberikan respons positif terhadap tanaman inang, dan menghasilkan enzim yang dapat memperbaiki kualitas nutrisi tanah serta mendukung pertumbuhan tanaman (Pradana, 2023).

1. *Trichoderma asperellum* adalah spesies mikoparasit yang telah dikenal luas dan sering dimanfaatkan karena kemampuannya menghambat pertumbuhan patogen tanaman. Spesies ini mampu menghasilkan spora dalam jumlah besar dengan pertumbuhan yang cepat. Spora yang dihasilkan kaya akan enzim pengurai karbohidrat (CAZymes) yang sangat aktif serta mengandung metabolit sekunder penting. *T. asperellum* memiliki sistem multi-enzim yang menjadikannya salah satu agen mikroba andal. Kemampuannya telah terbukti melalui pengeluaran enzim glikosil hidrolase (GHs) dalam kondisi budidaya tertentu, seperti ketika ditumbuhkan pada substrat selulosa atau ampas tebu. Selain itu, *T. asperellum* menunjukkan potensi besar sebagai penghasil enzim dengan keragaman hemiselulase dan  $\beta$ -glukosidase yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesies lain. Keunggulan ini

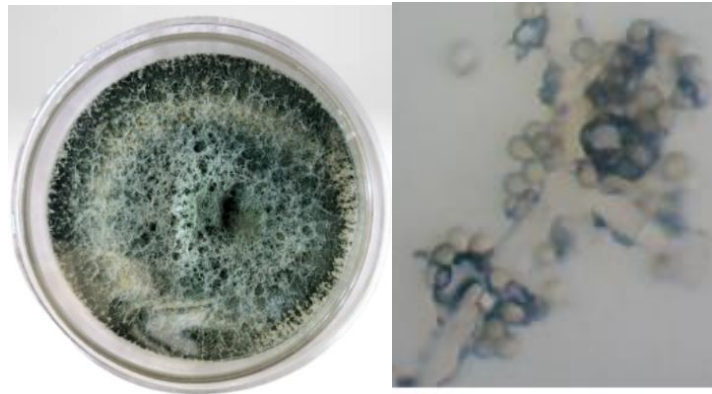
menjadikannya pilihan yang menjanjikan untuk berbagai aplikasi dalam bidang bioteknologi dan pertanian (Hikmah, 2023).



Gambar 2.6 Kapang *Trichoderma sp*  
Sumber: (Cristian et al, 2019)

2. *Trichoderma harzianum* merupakan salah satu kapang antagonis yang tidak hanya berperan sebagai agen hayati dalam pengendalian patogen tanaman, tetapi juga menunjukkan potensi signifikan dalam bidang bioremediasi lingkungan, terutama dalam proses degradasi pestisida organofosfat seperti *chlorpyrifos*. Kemampuan *T. harzianum* dalam menurunkan kadar residu *chlorpyrifos* pada tanah tercemar diduga berkaitan erat dengan aktivitas sejumlah enzim biodegradasi yang dihasilkannya. Enzim-enzim seperti fosfatase, esterase, dan berbagai enzim oksidatif berperan dalam memutus ikatan kimia pestisida, baik pada gugus ester maupun gugus fosfat, sehingga mempercepat detoksifikasi senyawa berbahaya tersebut. Proses ini tidak hanya mengurangi toksisitas, tetapi juga meningkatkan

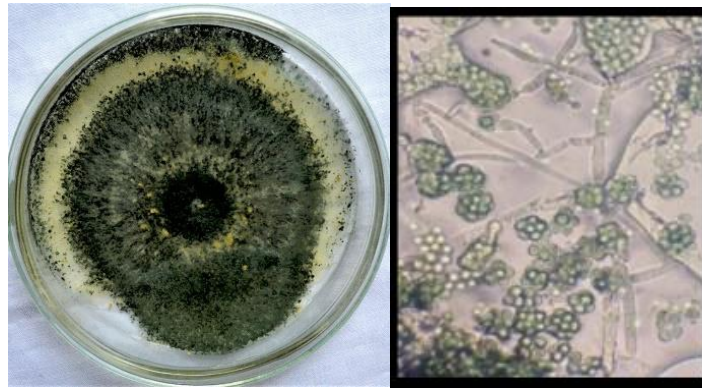
keamanan lingkungan secara keseluruhan (Soesanto et al., 2022).



Gambar 2.7 Kapang *Trichoderma harzianum*  
Sumber: (Subhadip et al, 2023)

3. *Trichoderma viride* merupakan salah satu kapang tanah yang dikenal memiliki kapabilitas dalam proses biodegradasi senyawa xenobiotik, termasuk pestisida organofosfat seperti *chlorpyrifos*. Aplikasi *T. viride* pada tanah yang terkontaminasi telah terbukti secara signifikan menurunkan residu *chlorpyrifos*. Selain itu, penelitian juga menunjukkan adanya peningkatan aktivitas enzim fosfatase tanah secara signifikan pada perlakuan dengan kapang ini, yang bahkan mencapai tingkat tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa *T. viride* tidak hanya berperan secara langsung dalam dekomposisi senyawa pestisida, tetapi juga merangsang pelepasan ion fosfat melalui pemutusan gugus fosfat dari struktur molekul *chlorpyrifos*. Peningkatan aktivitas fosfatase tersebut menjadi indikator penting bahwa proses degradasi

sedang berlangsung secara aktif di lingkungan tanah (Arya et al, 2023).



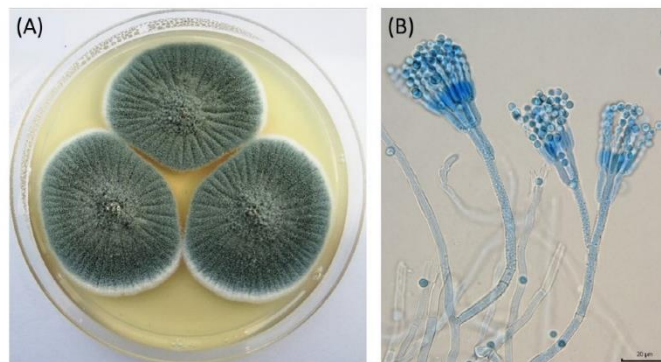
Gambar 2.8 Kapang *Trichoderma viride*

Sumber: (Subhadip et al, 2023)

c. Genus *Penicillium*

*Penicillium* memiliki koloni berwarna putih dengan tekstur halus. Konidiofor *Penicillium* sp. tumbuh tegak dari miselium dan bercabang membentuk struktur yang disebut fialid. Fialid adalah bagian tempat terbentuknya konidia yang tersusun dalam rantai memanjang. Konidia *Penicillium* sp. berbentuk bulat hingga memanjang dan tersusun membentuk rantai (Pratiwi, 2020). Genus *Penicillium* adalah jamur yang bersifat antagonis dan memiliki kemampuan menghasilkan antibiotik yang berkontribusi pada ketahanan tanaman. Jamur ini melepaskan zat beracun berupa kristal citrinin ( $C_{13}H_{14}O_5$ ). *Penicillium* sp memiliki peran penting dalam lingkungan alami, khususnya dalam produksi makanan dan obat-obatan. Salah satu hasilnya yang terkenal adalah penisilin, antibiotik yang efektif dalam membunuh atau menghambat pertumbuhan berbagai jenis bakteri (Dian, 2020). *Penicillium* sp. mampu

menguraikan lignin dan selulosa, bersifat termotoleran, serta memiliki kemampuan adaptasi yang baik di lingkungan tercemar. *Penicillium citrinum* juga dapat melarutkan fosfat yang tidak larut dan menghasilkan *Indole Acetic Acid* (IAA). Oleh karena itu, *Penicillium* ini dapat dimanfaatkan untuk melarutkan fosfat organik (Pratiwi, 2020).



Gambar 2.9 Kapang *Penicillium*  
Sumber: (Esa et al, 2022)

#### d. Genus *Fusarium*

*Fusarium* merupakan genus jamur berfilamen yang tergolong dalam divisi *Ascomycota* dan termasuk dalam famili *Nectriaceae*. Genus ini memiliki penyebaran yang luas di berbagai habitat, seperti tanah, jaringan tanaman, dan ekosistem perairan. Selain dikenal sebagai kapang yang bersifat patogen maupun saprofit, *Fusarium* juga mampu mensintesis beragam metabolit sekunder, termasuk senyawa toksik seperti mikotoksin, yang berpotensi membahayakan kesehatan tanaman, hewan, maupun manusia.

1. *Fusarium solani* merupakan salah satu spesies dari genus *Fusarium* yang dikenal memiliki kemampuan dalam memecah senyawa organik kompleks. Spesies ini juga mampu mendegradasi gas metana, menunjukkan adanya jalur metabolik yang kompleks dan fleksibel, serta kemampuannya beradaptasi terhadap senyawa xenobiotik. Berdasarkan karakteristik tersebut, *F. solani* memiliki potensi yang menjanjikan sebagai agen biodegradasi untuk menguraikan residu pestisida (Fauriah et al., 2021).



Gambar 2.10 Kapang *Fusarium solani*  
Sumber: (Rachel Brown, 2021)

#### 2.1.5 Mekanisme Kapang Mendegradasi Pestisida

Pada tanah yang tercemar, beberapa mikroba telah mengembangkan mekanisme khusus untuk memanfaatkan pestisida dengan gugus fungsi serupa, yang kemudian dapat dimanfaatkan sebagai sumber karbon, nitrogen, atau fosfor (Li et al., 2022). Oleh karena itu, enzim-enzim yang berperan dalam jalur degradasi pestisida ini menjadi sangat penting dalam proses degradasi biologis. Proses ini bertujuan

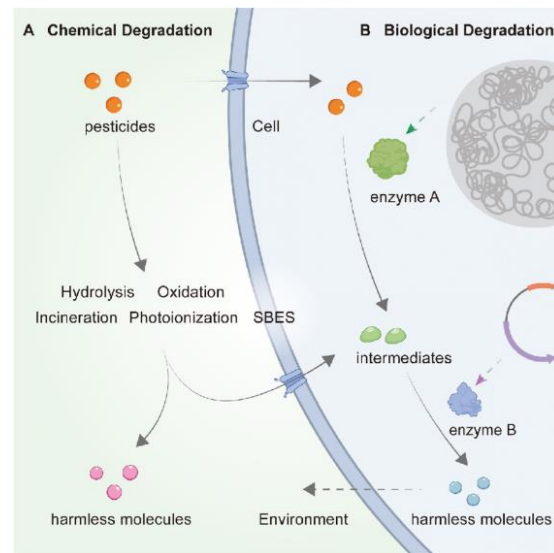
untuk mengurai pestisida melalui jalur katalitik yang direkayasa ulang dalam mikroorganisme. Metode degradasi kimia dapat dikombinasikan dengan metode biologis untuk meningkatkan efisiensi. Sebagai contoh, penggabungan fotokatalisis berbasis TiO<sub>2</sub> dengan metode biodegradasi dapat meningkatkan efisiensi degradasi imidakloprid hingga 94,6% (Sharma et al., 2020). Dalam beberapa kasus, degradasi dapat dilakukan dalam lingkungan bebas sel. Dengan memastikan kondisi pH dan suhu yang sesuai, biokatalis seperti His6-OPH dapat diimobilisasi pada berbagai material pembawa untuk menguraikan berbagai polutan air yang mengandung pestisida (Aslanli et al., 2023).

Pada degradasi biologis juga telah berkembang melalui penggunaan kultur campuran berbagai mikroorganisme dengan fungsi degradatif yang beragam. Sebagai contoh, sejumlah mikroorganisme telah diidentifikasi mampu menguraikan imidakloprid, yang merupakan salah satu pestisida berbasis nitrogen organik (Ruomeng et al., 2023). Metode degradasi biologis memiliki keterbatasan, seperti dekomposisi yang tidak sempurna dan ketidaksesuaian antara berbagai modul degradasi biologis. Namun, penelitian sebelumnya telah membuka peluang untuk pengembangan metode biologi sintetis, yang dapat mengatasi kendala berupa budidaya mikroorganisme yang kompleks, kelimpahan rendah, serta kemampuan yang terbatas pada satu fungsi saja.

Pestisida terdiri dari molekul organik dengan gugus fungsi tertentu yang dapat diuraikan melalui proses kimia. Insinerasi merupakan metode yang sederhana namun cukup kasar untuk menghilangkan residu pestisida dalam air limbah. Pada suhu tinggi, sekitar 1000 °C, dengan ketersediaan oksigen yang memadai, pestisida yang sulit menguap seperti metomil dapat terurai. Namun, pada pestisida yang mudah menguap, proses insinerasi dapat menghasilkan senyawa organik serta karbon dioksida (Lin et al., 2020) (Wang et al., 2022). Hidrolisis adalah salah satu metode degradasi kimia konvensional yang mudah diterapkan. Pestisida seperti organofosfor, organoklorin, dan organonitrogen umumnya mengandung heteroatom yang dapat terurai melalui proses hidrolisis dalam kondisi basa, dengan senyawa logam bertindak sebagai katalis heterogen (Ruomeng et al., 2023).

Pada degradasi kimia, tanah yang terkontaminasi biasanya menjalani tahap awal, seperti pengenceran atau pengaturan parameter spesifik, untuk mempermudah pengolahan lebih lanjut. Proses ini dirancang untuk menghasilkan senyawa antara yang memiliki toksisitas lebih rendah dibandingkan dengan senyawa awalnya, sehingga lebih aman bagi lingkungan. Metode degradasi kimia sering kali dipadukan dengan teknik pengolahan fisik, seperti filtrasi, pengendapan, atau pengeringan, untuk meningkatkan efektivitasnya dan menghasilkan hasil akhir yang lebih memuaskan. Pendekatan kombinasi ini memberikan solusi yang menyeluruh untuk pengolahan limbah pestisida, sehingga

potensi dampak negatif terhadap lingkungan dapat diminimalkan secara lebih signifikan (Sur & Sathiavelu, 2022).

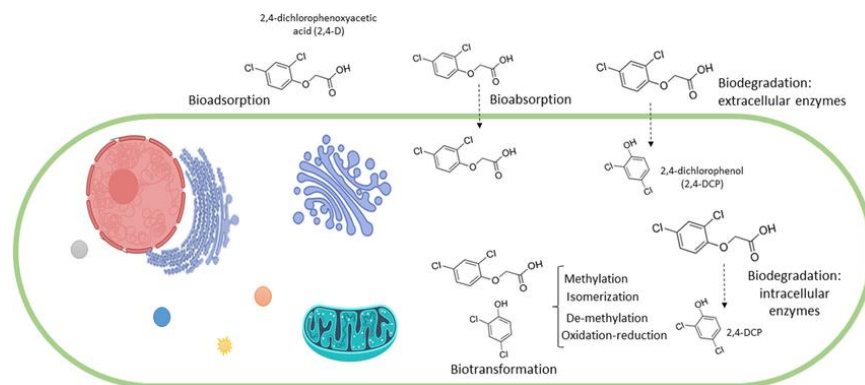


Gambar 2.11 Degradasi Kimia dan Biologi  
Sumber: (Siru et al, 2023)

Biodegradasi polimer melibatkan serangkaian tahap yang saling terkait dan berlangsung secara bertahap. Proses ini dimulai dengan penempelan mikroorganisme pada permukaan polimer. Sifat permukaan polimer memainkan peran penting dalam tahap ini, di mana permukaan yang bersifat hidrofilik lebih mudah mendukung adhesi mikroorganisme. Setelah berhasil melekat, mikroorganisme memanfaatkan polimer sebagai sumber karbon utama untuk mendukung pertumbuhan dan aktivitas metaboliknya. Tahapan berikutnya adalah degradasi awal atau primer. Pada tahap ini, mikroorganisme melepaskan enzim ekstraseluler yang berfungsi memecah rantai panjang polimer menjadi fragmen-fragmen yang lebih kecil. Hasil dari proses ini adalah senyawa dengan

berat molekul rendah, seperti oligomer, dimer, atau monomer. Fragmen-fragmen kecil ini menjadi lebih mudah diolah dan digunakan oleh mikroorganisme sebagai sumber karbon dan energi (Alshehrei, 2017).

Selanjutnya, senyawa dengan berat molekul *chlorpyrifos* dapat berdifusi masuk ke dalam sel mikroorganisme. Di dalam sel, fragmen-fragmen tersebut diolah lebih lanjut melalui proses metabolisme untuk menghasilkan energi serta komponen-komponen penyusun yang diperlukan oleh mikroorganisme. Dengan demikian, proses biodegradasi polimer tidak hanya mengurangi ukuran molekul polimer secara fisik, tetapi juga mengubahnya menjadi sumber nutrisi yang dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme untuk menunjang kelangsungan hidup dan bereproduksi (Alshehrei, 2017).



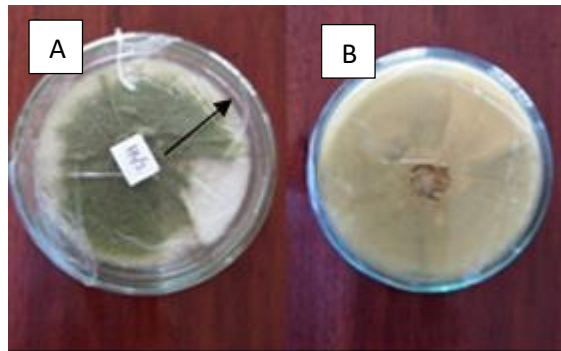
Gambar 2.12 Mekanisme Degradasi oleh Kapang  
Sumber: (Karen et al, 2023)

## 2.1.6 Karakteristik Kapang Pendegradasi

### 2.1.6.1 Identifikasi Makroskopis

Pengamatan makroskopis adalah metode observasi yang dilakukan secara langsung menggunakan indera penglihatan tanpa bantuan alat pembesar seperti mikroskop. Metode ini melibatkan penggambaran rinci berbagai karakteristik koloni, termasuk warna, tekstur, ukuran diameter, serta adanya pola atau warna khas pada media tempat koloni tumbuh. Identifikasi fungi dapat dilakukan berdasarkan pengamatan morfologi, baik pada tingkat koloni maupun sel. Morfologi koloni mencakup sejumlah aspek, seperti warna yang menunjukkan pigmen tertentu, bentuk yang menggambarkan pola atau kontur secara keseluruhan, elevasi atau ketinggian koloni dari permukaan media, tepi koloni yang dapat berbentuk rata, bergelombang, atau tidak beraturan, dan tekstur yang bisa halus, kasar, berbulu, atau berlendir. Sementara itu, pengamatan pada morfologi sel melibatkan analisis bentuk sel yang bervariasi dari bulat, lonjong, hingga berbentuk filamen, ukuran sel yang diukur berdasarkan diameternya, keberadaan pseudohifa yang menyerupai struktur filamen semu, serta ascospore, yaitu spora yang terbentuk di dalam askus sebagai bagian dari siklus hidup fungi tertentu. Kombinasi dari pengamatan makroskopis dan analisis morfologi sel secara menyeluruh memungkinkan proses identifikasi fungi

menjadi lebih tepat dan mendetail. Keanekaragaman fungi serta peranannya dalam berbagai bidang, seperti ekologi, pertanian, industri, dan kesehatan (Arifatul, 2020).



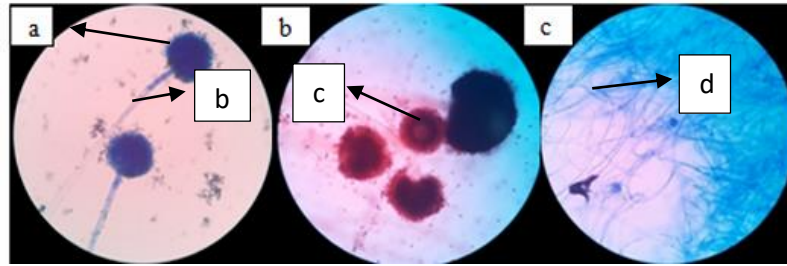
Gambar 2. 13 Karakteristik Makroskopis Kapang  
Keterangan: A. Tampak depan, B. Tampak Belakang  
Sumber: (Lindawati, 2019)

#### 2.1.6.2 Identifikasi Mikroskopik

Pengamatan mikroskopis adalah metode observasi yang dilakukan dengan menggunakan mikroskop sebagai alat bantu untuk melihat struktur yang tidak dapat diamati secara langsung dengan mata telanjang. Metode ini melibatkan deskripsi rinci berbagai karakteristik mikroskopis fungi, yang mencakup banyak aspek penting. Beberapa hal yang diamati dalam pengamatan ini meliputi ada atau tidaknya sekat pada hifa, warna hifa, sifat dinding hifa, diameter hifa, serta warna dan panjang konidiofor. Selain itu, diamati pula apakah konidiofor bercabang atau tidak, serta apakah dinding konidiofor halus atau kasar. Pengamatan juga mencakup vesikula, yaitu struktur membulat pada ujung konidiofor, warna fialida, ukuran fialida, bentuk fialida, serta

warna konidia. Tidak kalah penting, pengamatan meliputi diameter konidia, sifat dinding konidia apakah halus atau kasar, serta keberadaan struktur tambahan seperti makrokonidia, mikrokonidia, dan klamidospora. Seluruh karakteristik ini memberikan informasi yang sangat spesifik mengenai struktur fungi yang diamati (Arifatul, 2020).

Pengamatan morfologi sel bertujuan untuk memahami berbagai karakteristik seluler fungi secara lebih mendalam. Analisis ini mencakup bentuk sel, ukuran sel, pola pertunasan, keberadaan atau ketidakhadiran pseudohifa, keberadaan hifa sejati, dan bentuk reproduksi yang digunakan oleh fungi tersebut. Dengan menilai seluruh aspek ini, pengamatan mikroskopis memberikan informasi yang sangat detail dan akurat, sehingga sangat membantu dalam proses identifikasi dan klasifikasi fungi. Metode ini tidak hanya penting untuk memahami struktur fungi pada tingkat mikroskopis, tetapi juga memberikan wawasan mendalam mengenai pola pertumbuhan, reproduksi, dan adaptasi fungi dalam berbagai lingkungan. Analisis mikroskopis memainkan peran yang sangat penting dalam studi mikrobiologi, baik untuk penelitian dasar maupun aplikasi dalam bidang kesehatan, pertanian, dan industri (Arifatul, 2020).



Gambar 2. 14 Karakteristik Mikroskopis Kapang  
 Keterangan: a) konidiofor b) konidia c) vesikel d) hifa bersekat  
 Sumber: (Rahayu, 2019)

## 2.2 Kajian Penelitian Yang Relevan

Fungi diketahui mampu menghasilkan berbagai enzim, seperti laccase, lignin peroksidase, dan mangan peroksidase (Diyah et al., 2024). Kemampuan sejumlah spesies kapang berfilamen dalam menghasilkan mikotoksin telah menjadi perhatian serius di kalangan ilmuwan karena potensi dampaknya terhadap kesehatan. Salah satu genus fungi yang penting adalah *Aspergillus*, karena mampu melakukan biosintesis metabolit sekunder yang bersifat toksik (Lappa et al., 2017). Fungi dari genus *Aspergillus sp.* menunjukkan kemampuan tinggi dalam mendegradasi pestisida pada media pertanian. Spesies ini juga sering ditemukan selama proses isolasi jamur, yang mengindikasikan perannya yang signifikan dalam mendegradasi bahan-bahan pencemar di lingkungan (Naeemah et al, 2023).

Genus *Trichoderma* adalah jenis kapang yang dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan patogen tanaman, sekaligus mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman di lahan yang terdegradasi. Jamur ini memiliki kemampuan untuk mendegradasi berbagai substrat heterogen di tanah, memberikan respons positif terhadap tanaman inang, dan menghasilkan enzim

yang dapat memperbaiki kualitas nutrisi tanah serta mendukung pertumbuhan tanaman (Pradana, 2023).

Tabel 2.1 Kapang Pendegradasi Pestisida

Spesies	Metode	Hasil	Pestisida	Ref
<i>Aspergillus niger</i> ARIFCC 1055	HPLC, FTIR dan GC/MS	Degradasi diazinon 45 %	Diazinon	(Ebadi et al., 2022) (Gaber et al., 2020) (Wu et al., 2021)
<i>Aspergillus fumigatus</i>		Degradasi diazinon 76,4%		
<i>Aspergillus niger</i>		90% degradasi diazinon (20 mg/L) dalam 2 jam.		
<i>Aspergillus terreus</i> PDB-B	GC/MS	Significant biodegradation of cypermethrin period 24 days	Cypermethrin	(Kannan et al., 2024)
<i>Aspergillus niger</i> KACC 45093		Degradasi yang cepat dengan waktu paruh (half-life) sekitar 0,6 hari	Fenazaquin	(Kim et al., 2016)
<i>Aspergillus niger</i> AN 400	HPLC	Meningkatkan penghilangan ATZ sebesar 30%.	Atrazine	(Marinho et al., 2017)
<i>Aspergillus niger</i> MRU01		Mampu menghilangkan sekitar 87% dari dimethoate dan 78% dari malathion	Malathion	(Mohapatra, 2023)
<i>Aspergillus niger</i>		<i>Aspergillus niger</i> , which showed high biodegradation rates of 95% and 90.5%	<i>Chlorpyrifos</i>	(Ewida, 2023) (Barberis, Carranza, Magnoli,

<i>Aspergillus Niger (AM 1, AM 2, GM 3)</i>		Konsentrasi atrazine yang lebih tinggi (10 dan 20 mg/l).		Benito, et al., 2019b) (Sabogal-Vargas et al., 2023)
<i>Trichoderma asperellum</i>		Mendegradasi 90% setelah 24–48 jam inkubasi dengan klorpirifos (500 mg/L) [4		
<i>Aspergillus niger VCRAM - 2</i>		Mampu mengurangi lebih dari 90% pestisida	Pyrethroid	(Ramya & Vasudevan, 2020)
<i>Trichoderma rifaii</i>		Dapat mendegradasi 46.4% removal	Cyproconazole	(Escudero-Leyva et al., 2022)
<i>Aspergillus niger</i>	Fotokatalisis	43,67% degradasi pada konsentrasi 20 ppm dalam waktu 30 menit.	Sipermetrin	(Oktaviana, 2023)
<i>Trichoderma asperellum F1020</i>	PCR/HPLC	Dapat mendegradasi hydrocarbon 45%	Hydrocarbon	(Daccò et al., 2020)

### 2.3 Kerangka Berpikir

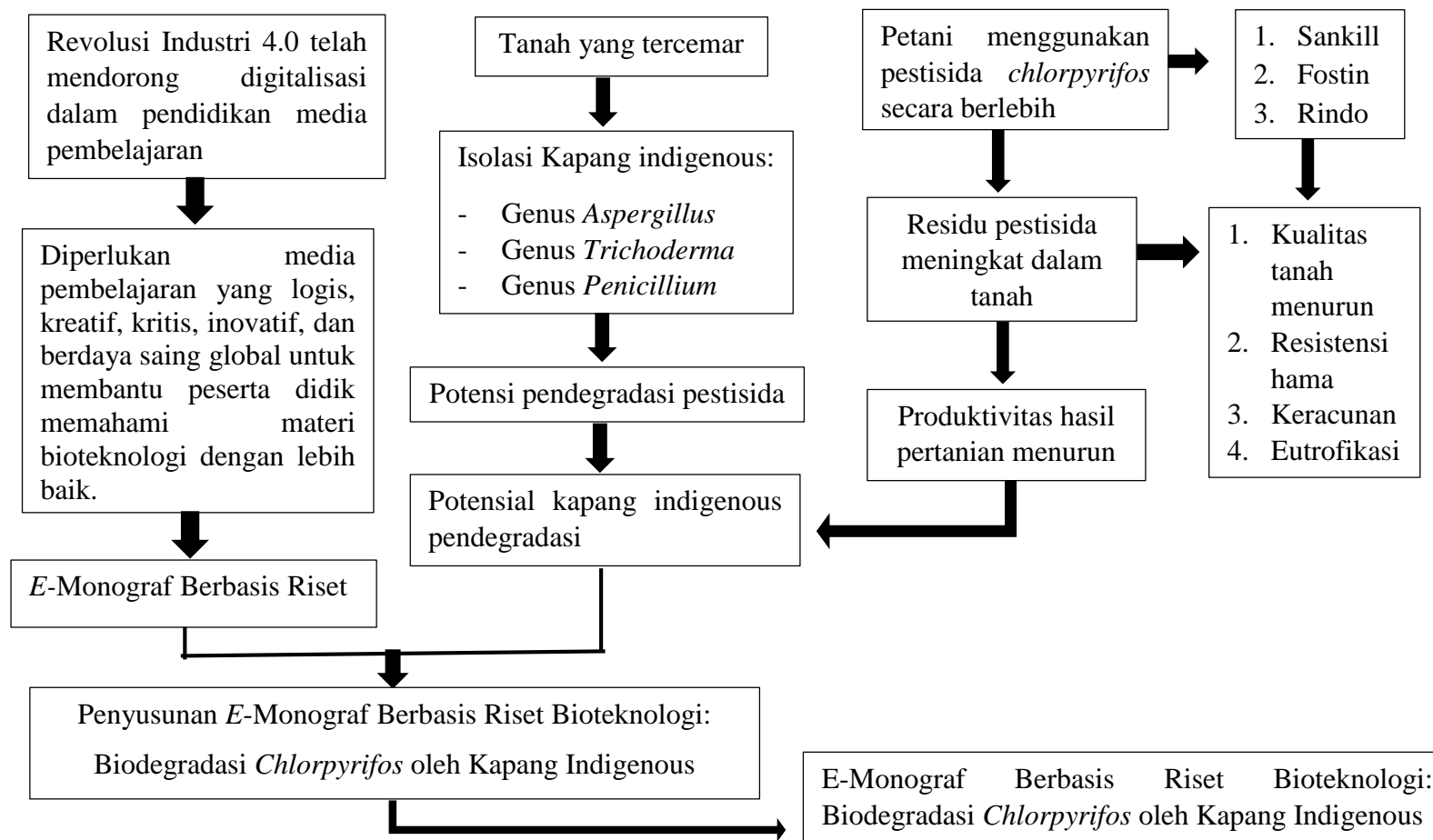
Dunia pendidikan dalam kondisi ini menuntut para pendidik untuk menghadirkan sumber belajar yang tidak hanya digital, tetapi juga berbasis riset guna mendukung proses pembelajaran yang aktif, kontekstual, dan bermakna. Salah satu media pembelajaran digital yang relevan dengan kebutuhan tersebut adalah e-monograf. E-monograf merupakan buku digital yang dikembangkan dari hasil penelitian, dirancang untuk menjadi sumber pembelajaran yang mendalam dan terstruktur. Dalam konteks pendidikan

bioteknologi, salah satu topik yang menarik dan penting untuk diangkat adalah pemanfaatan kapang indigenous dalam proses biodegradasi pestisida. Berbagai jenis kapang yang ditemukan di lingkungan sekitar memiliki potensi besar sebagai agen hayati dalam menguraikan senyawa kimia berbahaya, seperti pestisida. Selain itu, kapang juga sangat relevan dijadikan bahan ajar karena dapat memperkaya pengetahuan peserta didik mengenai mikroorganisme.

Di sisi lain, permasalahan lingkungan akibat penggunaan pestisida yang berlebihan, khususnya *chlorpyrifos*, menjadi isu serius dalam dunia pertanian Indonesia. *Chlorpyrifos* merupakan salah satu jenis pestisida yang masih banyak digunakan untuk pengendalian hama tanaman. Untuk mengatasi hal tersebut, biodegradasi telah diakui sebagai salah satu metode paling efektif dan ramah lingkungan dalam mengurangi kontaminasi pestisida. Metode ini mampu memperbaiki kualitas tanah sekaligus mencegah pencemaran air (Colín-Luna, 2020).

Berdasarkan hal tersebut, penyusunan e-monograf berbasis riset yang mengangkat potensi kapang indigenous sebagai agen biodegradasi tidak hanya menjadi sarana edukatif, tetapi juga sebagai bentuk kontribusi nyata pendidikan dalam mendukung solusi terhadap permasalahan lingkungan. Dengan demikian, peserta didik dapat memahami penerapan bioteknologi secara langsung, kontekstual, dan relevan dengan tantangan masa kini.

Kerangka berpikir dapat dilihat melalui bagan berikut ini :



Gambar 2.15 Diagram Kerangka Berpikir