

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Kajian Teori

1. *E-book* Berbasis Riset

Paradigma pendidikan abad ke-21 mensyaratkan pendidikan untuk menjamin peserta didik mempunyai keterampilan berpikir tingkat tinggi, yaitu keterampilan penalaran pemecahan masalah, keterampilan system, keterampilan kritis, dan keterampilan kreatif, sehingga peserta didik mampu menghadapi tantangan pendidikan di masa depan (Wahyuni & Rahayu, 2021). Saat ini pendidikan telah beralih ke arah digitalisasi pembelajaran yang tercermin melalui penggunaan media pembelajaran berbasis teknologi informasi. Salah satu media pembelajaran mahasiswa yang saat ini sedang dikembangkan untuk memungkinkan perkembangan teknologi dan komunikasi interaktif pengguna adalah buku digital atau *e-book* (Mentari et al., 2018). *E-book* memiliki beberapa keunggulan diantaranya mudah dibawa, tidak berat, efisien, efektif, hemat biaya, dan hemat kertas (Yusnimar, 2014).

E-book adalah publikasi yang terdiri dari teks, gambar, dan suara, diterbitkan dalam bentuk digital yang dapat dibaca di computer atau perangkat elektronik lainnya (seperti android atau tablet) (Mentari et al., 2018). *E-book* dapat berisi teks tertulis, gambar, animasi, video, music, efek suara, narasi audio yang direkam, matery hyperlink, fitur Bahasa atau kamus, dan tingkat interaktivitas (Nadhifah, 2022). *E-book* juga banyak digunakan sebagai

koleksi perpustakaan akademik digital karena dapat menyediakan sumber belajar yang efisien bagi siswa, menghemat tempat, memberikan akses yang luas, dan dapat menyesuaikan dengan kebiasaan belajar siswa, terutama dalam hal penggunaan media pembelajaran digital (Casselden & Pears, 2020).

E-book memberi pengguna alat yang efisien dan efektif untuk belajar dan mengajar. Dalam beberapa dekade terakhir, penelitian terkait e-book juga menarik perhatian para peneliti. Menurut Web of Science (WoS), tren publikasi penelitian e-book secara bertahap meningkat selama beberapa dekade terakhir (Tang, 2021). Pendidik yang menggunakan *e-book* sebagai alat pengajaran dapat membangun strategi belajar bahkan pada anak usia dini (Connor et al., 2019).

Pembelajaran di perguruan tinggi umumnya berbasis masalah, sehingga diperlukan inovasi baru untuk mendukung proses pembelajaran. Pembelajaran berbasis masalah bertujuan untuk meningkatkan kemampuan belajar siswa melalui stimulus berupa masalah kontekstual (Ismail, 2018). Peningkatan keterampilan belajar mahasiswa dapat dioptimalkan dengan penggunaan media yang dikembangkan menjadi *e-book* berbasis riset sebagai inovasi media pembelajaran. *E-book* berbasis riset memiliki kemampuan untuk memperluas dan memperdalam materi pembelajaran kontekstual. Pembelajaran kontekstual adalah pendekatan pendidikan yang bertujuan untuk mendorong mahasiswa untuk memahami makna pelajaran dengan mengaitkannya dengan konteks kehidupan sehari-hari (konteks sosial,

kultural, dan pribadi) sehingga mahasiswa memiliki pengetahuan dan keterampilan yang dapat diterapkan dalam berbagai konteks (Muhartini et al., 2023; Kartika, 2016). *E-book* yang dikembangkan melalui penelitian dapat mencakup prinsip-prinsip dasar dan metodologi selama proses penelitian, sehingga mempermudah pemahaman materi oleh peserta didik (Sukoco et al., 2016).

Pengembangan *e-book* berbasis riset memiliki dampak yang cukup besar pada kemampuan berpikir kreatif mahasiswa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebanyak 64% mahasiswa berpikir sangat kreatif, 23% mahasiswa berpikir kreatif, dan 13% mahasiswa cukup kreatif. Berdasarkan hasil penelitian tersebut menunjukkan secara presentasi 87% mahasiswa dikelas mampu berpikir kreatif setelah melakukan pembelajaran menggunakan media pembelajaran *e-book* (Mentari et al., 2018).

2. Tanah Tercemar Residu Pestisida

a. Dampak pestisida pada tanah

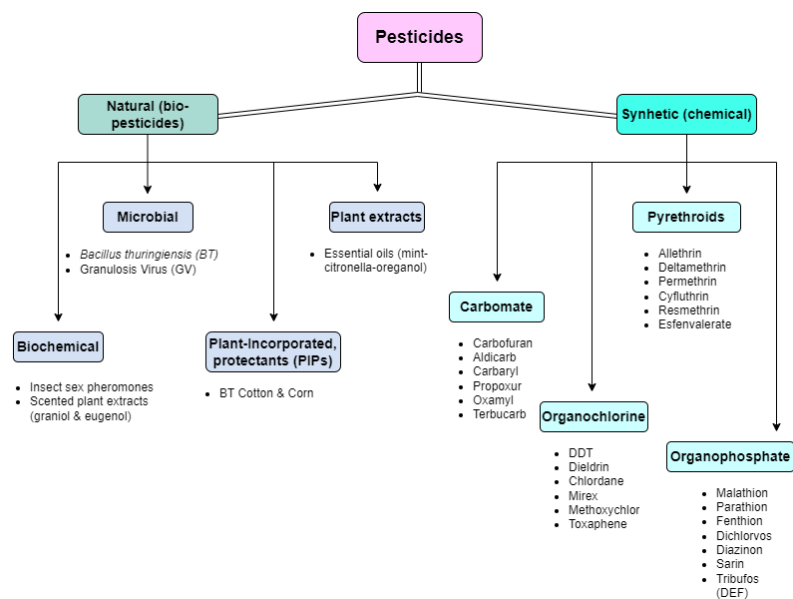
Tanah merupakan komponen ekosistem yang kompleks mencakup beragam organisme yang memiliki fungsi berbeda untuk melakukan berbagai proses penting dalam kehidupan. Kolaborasi antara mikroba dan fauna saling bersinergi dalam mengatur berbagai aktivitas metabolisme yang disebut dengan aktivitas biologi (Anaduaka et al., 2023). Kualitas tanah berdampak pada sayuran yang sedang dibudidayakan, termasuk bebas dari pencemaran akibat residu pestisida.

Pencemaran tanah adalah keadaan dimana masuknya bahan kimia ke dalam tanah dan menyebabkan perubahan kondisi tanah. Apabila zat berbahaya mencemari permukaan tanah, maka zat tersebut dapat menguap, tersapu air hujan dan masuk ke dalam tanah. Pencemaran yang masuk ke dalam tanah kemudian mengendap sebagai zat kimia berbahaya di dalam tanah. Kehadiran zat berbahaya di dalam tanah dapat mempengaruhi manusia secara langsung ketika bersentuhan atau dapat mencemari air tanah dan udara di atasnya (Supriatna et al., 2021). Pencemaran tanah disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya yaitu penggunaan pestisida yang meninggalkan residu dalam tanah.

Pestisida merupakan kategori bahan kimia yang digunakan untuk mengendalikan hama dan gulma. Organisme target pestisida biasanya seperti jamur, serangga, siput, dan hewan pengerat. Hal ini dikarenakan sebagian besar komponen aktif yang terdapat dalam pestisida tidak memiliki efek toksik yang spesifik, sehingga mempengaruhi tidak hanya spesies target yang dituju tetapi juga organisme non-target, termasuk manusia dan lingkungan serta seluruh ekosistem (Díaz-López et al., 2021).

Pestisida dan produk degradasinya dapat berinteraksi satu sama lain untuk menghasilkan efek sinergis, netral, atau antagonis, yang berdampak pada sifat kimia dan biologi tanah baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang (Sun et al., 2018). Berdasarkan jurnal penelitian

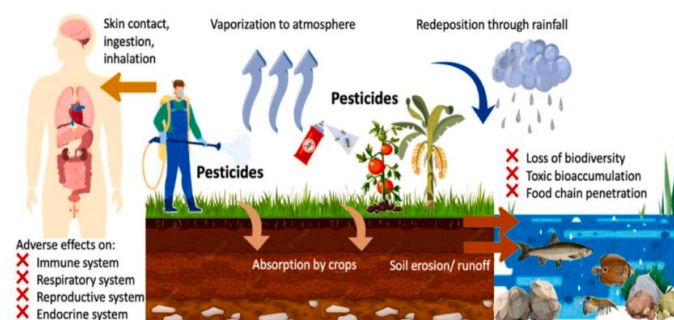
yang dilakukan oleh (Bastida et al., 2015; Díaz-López et al., 2019; Silva et al., 2019) pada tanah yang tercemar pestisida, komunitas mikroba telah mengalami pergeseran dan perubahan ini dapat berdampak pada kesuburan tanah karena mikroba berpartisipasi dalam siklus hara dan kesuburan tanah.



Gambar 2.1 Klasifikasi pestisida (Ansari et al., 2021)

Pestisida memiliki dampak positif dan dampak negatif ketika digunakan. Dampak positif yang diperoleh yaitu terbebasnya dari hama yang mengganggu tanaman, sedangkan dampak negatifnya antara lain pestisida yang disemprotkan tidak seluruhnya mengenai tanaman akan tetapi 80% pestisida yang disemprotkan akan jatuh ke tanah. Hal ini menyebabkan penurunan unsur hara dalam tanah, pH tanah menjadi meningkat karena seringnya penyemprotan kimia, akibatnya

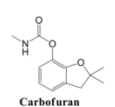
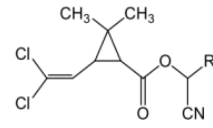
berkurangnya kesuburan tanah. Begitu juga dengan air di sekitar sawah, biasanya sisa-sisa penyemprotan tersebut jatuh ke sungai dan terbawa oleh air sehingga akan berdampak terhadap hewan-hewan air seperti ikan dan burung (Sinambela, 2024).



Gambar 2.2 Dampak penggunaan pestisida (Dehghani et al., 2024)

Tabel 2.1. Struktur Pestisida yang sering digunakan

Jenis Pestisida	Deskripsi	Contoh	Struktur Kimia
Organoklorin	Pestisida organoklorin merupakan pestisida yang paling awal diproduksi dan tersebar luas dalam praktik pertanian. Pestisida jenis ini memiliki efek residu yang tahan lama di lingkungan.	DDT (Dichlorodiph enyltrichloroet hane)	 <chem>ClC1=CC=C(C=C1)C(Cl)(Cl)C2=CC=C(Cl)C=C2</chem>
Organofosfat	Pestisida organofosfat merupakan pestisida turunan asam fosfat digunakan sebagai pengganti organoklorin karena memiliki tingkat toksistas dan persistensi lebih rendah.	Diazinon	 <chem>CC(C)C1=CN=C(C=C1)OP(=S)(OCC)OCC</chem>

Karbamat	Pestisida karbamat terbuat dari asam karbamat yang memiliki cara kerja sama dengan organofosfat.	Karbofuran	 Carbofuran
Piretroid	Pestisida piretroid terbuat dari asam pietroat dan dinilai memiliki risiko lebih rendah bagi lingkungan.	Sipermetrin	 Cypermethrin

Sumber: (Rasool et al., 2022)

b. Penggunaan pestisida pada pertanian

Sekitar 2 juta ton pestisida digunakan setiap tahun di seluruh dunia untuk meningkatkan produktivitas hasil panen, dengan presentase penggunaan sebesar 47,5% herbisida, 29,5% insektisida, 17,5% fungisida, dan sisanya adalah 5,5 % (Sharma et al., 2021). Indonesia sebagai negara dengan aktivitas pertanian yang tinggi berdampak pada penggunaan pestisida secara meluas. Berdasarkan (Ditjen Sarpras Kemtan, 2024) sampai Desember 2022, jumlah pupuk yang terdaftar dan diizinkan oleh Menteri Pertanian tahun 2016-2022 mencapai 1.446 merek pupuk organik dan 2.784 merek pupuk an-organik. Jumlah pestisida terdaftar yang izin tetapnya masih berlaku sampai dengan Desember 2022 sudah mencapai 3.411 formulasi untuk pertanian dan kehutanan dan 384 formulasi untuk pestisida rumah tangga dan pengendalian vektor penyakit manusia. Sedangkan berdasarkan laporan organisasi internasional seperti Organisasi Pangan dan Pertanian Perserikatan Bangsa-Bangsa telah

memberikan peringatan tentang polusi pestisida. Faktanya, beberapa pestisida mengakibatkan efek kesehatan yang serius, seperti kanker, gangguan endokrin, dan toksisitas reproduksi. Beberapa jenis pestisida bersifat persisten, bioakumulatif dan beracun terhadap manusia dan lingkungan, bahkan pada konsentrasi rendah (Beltrán-Flores et al., 2021).

3. Pestisida Sipermetrin

Sipermetrin merupakan jenis pestisida yang banyak digunakan dalam aplikasi pertanian skala besar. Sipermetrin adalah pestisida piretroid sintetis yang biasa digunakan di bidang pertanian dan pengendalian hama, yang menimbulkan risiko lingkungan dan kesehatan karena tingkat toksisitasnya yang tinggi dan dampaknya yang merusak ekosistem (Kansal et al., 2023). Sipermetrin adalah piretroid generasi keempat, stabil terhadap cahaya, dan sangat aktif (Jin et al., 2023). Sipermetrin memiliki sifat penyebab kanker dan karsinogenik dan dapat menghasilkan senyawa aktif endocannabinoid seperti asam 3-fenoksibenzoat dan aktivitas estrogenik. Sipermetrin tidak larut dalam air, dan memiliki kecenderungan yang kuat untuk menyerap partikel tanah yang menyebabkan degradasi tanah permukaan dan mikroba (Ramzan et al., 2022). Pada konsentrasi yang relatif rendah, sipermetrin dapat menyebabkan beragam efek buruk pada organisme non-target, termasuk ikan, hewan invertebrata air, lebah dan penyerbuk lainnya, dan organisme tanah (Costa et al., 2024).

Sipermetrin bekerja dengan cara mencegah gerbang ion saluran natrium menutup selama repolarisasi pada membran sel saraf. Dosis rendah dari insektisida ini menyebabkan hiperaktif, sementara pada konsentrasi tinggi menyebabkan kelumpuhan dan kematian. Sifat lipofilik dari sipermetrin berkaitan dengan kecenderungan akumulasi dalam darah, kulit, lemak tubuh, hati, perapian, otak, ginjal, ovarium, dan kelenjar adrenal. Zat biosida ini juga telah terbukti mengganggu perilaku kromosom selama pembelahan sel dan menghambat pembelahan sel sehat (Ayhan et al., 2024).



Gambar 2.3 Pestisida Sipermetrin di Pasaran

4. Karakterisasi Kapang

Karakterisasi adalah suatu kegiatan untuk mengidentifikasi kapang berdasarkan karakter-karakter yang dimilikinya. Karakterisasi dapat dilakukan dengan pengamatan struktur makroskopis, mikroskopis, dan molekuler kapang. Karakterisasi secara makroskopis dilakukan dengan pengamatan secara langsung kapang yang berada di media agar dalam cawan petri, meliputi warna dan tekstur (Moensaku et al., 2021). Sedangkan, karakterisasi secara mikroskopis dilakukan dengan pengamatan melalui

mikroskop, adapun yang diamati adalah konidia, bentuk spora, dan hifa (Sine & Soetarto, 2018).

5. Kapang Sebagai Agen Biodegradator

Studi tentang degradasi pestisida mikroba sebagian besar berpusat pada bakteri, dengan beberapa penelitian juga menunjukkan kemampuan kapang untuk memecah pestisida (Ellegaard-Jensen et al., 2013). Kapang akan berasosiasi dengan mikroorganisme lain, terutama tanaman dan dapat memainkan peran kunci dalam memulihkan tanah, air, dan udara yang tercemar oleh polutan (Gupta et al., 2018). Kapang merupakan kelompok organisme yang menghasilkan beragam enzim dan metabolit (seperti asam organik, eksopolisakarida, dll.). Kapang potensial menjadi transformator utama atau mediator untuk bioremediasi yang efektif karena aktivitas biokatalitiknya dan memiliki senyawa aktif yang bersifat *xenobiotic* (Sarker et al., 2021). Bioremediasi dapat menjadi alternatif yang layak dalam kasus kontaminasi pestisida. Dalam bioremediasi, mikroorganisme dikembangkan untuk menghilangkan atau mengubah bahan kimia berbahaya menjadi senyawa yang tidak beracun (Verasoundarapandian et al., 2022). Kapang memiliki berbagai enzim spesifisitas rendah termasuk ekstraseluler (peroksidase, fenol oksidase, dan lakase) dan intraseluler (sitokrom P450 monooksigenase, dan enzim nitroreduktase) yang mampu mendegradasi berbagai polutan di lingkungan (Germain et al., 2021).

Tabel 2 2. *State of the art* biodegradasi pestisida oleh kapang

Spesies	Pestisida	Metode	Hasil	Referensi
<i>Aspergillus terreus</i>	Klorpirifos	GC-MS system	<i>Aspergillus terreus</i> mampu mendegradasi 75.59% dari 2000 µg / l CPF dalam 1 minggu	(Elzakey et al., 2023)
<i>Aspergillus niger</i> Tiegh 8285	Benzonitrile	Central Composite Design (CCD)	<i>A. niger</i> Tiegh 8285 terbukti menjadi agen bioremediasi yang menjanjikan untuk benzonitril	(Mituishi et al., 2022)
<i>Trichoderma</i> sp.	Propineb	Eksplorasi jamur pada tanah tercemar fungisida propineb	<i>Trichoderma</i> sp. memiliki kemampuan yang baik dalam menghambat toksisitas fungisida berbahan aktif propineb	(Mahendra et al., 2022)
<i>Trametes versicolor</i>	Malathion, Acetamiprid, dan Imidacloprid	UPLC digabungkan dengan HRMS Studi eksplorasi enzimatik	<i>Trametes versicolor</i> mendegradasi malation sepenuhnya dalam 48 jam. Persentase degradasi asetamiprid dan imidacloprid adalah 20% dan 64,7%.	(Levio-Raiman et al., 2021)
<i>Lecanicillium</i> sp.	Klorpirifos	Rancangan Acak Lengkap dengan 5 perlakuan dan 5 kali ulangan	<i>Lecanicillium</i> sp. mampu beradaptasi dan mendegradasi insektisida klorpirifos pada media SDAY dengan konsentrasi 0 ppm, 2000 ppm, 4000 ppm, 6000 ppm, dan 8000 ppm.	(Zhafran & Afandhi, 2022)
<i>Aspergillus niger</i> (MK640786)	Diazinon	GC-MS analysis	Mampu mendegradasi diazinon sebanyak 82% dalam waktu 7 hari.	(Hamad, 2020)

Strain kapang, terutama spesies *Aspergillus* dan *Penicillium*, telah menunjukkan potensi yang luar biasa dalam mendegradasi pestisida organoklorin dan organofosfat seperti endosulfan, lindane, klorpirifos, dan metil parathion, dengan tingkat aktivitas degradasi yang tinggi dan toleransi terhadap pestisida (Matúš et al., 2023). Bahkan studi (Nykiel-Szymańska et al., 2020) menemukan bahwa kapang *Trichoderma* spp dapat mengubah dan menghilangkan herbisida chloroacetanilide yang populer, seperti alachlor hingga 80–99% dan metolachlor hingga 40–79%.

Merujuk pada penelitian yang telah disebutkan, kapang dapat membantu memperbaiki lahan yang tercemar pestisida dan herbisida. Selain itu, disebutkan bahwa jamur memiliki potensi lebih besar untuk melakukan bioremediasi dibandingkan dengan bakteri karena mereka dapat menangani faktor lingkungan tertentu, seperti toksisitas logam berat dan senyawa persisten organik, yang dapat membatasi atau mencegah biodegradasi bakteri.

6. Mekanisme Biodegradasi Pestisida

Bioremediasi adalah proses dimana polutan berbahaya diubah menjadi senyawa tidak beracun oleh organisme hidup. Bioremediasi menggunakan mikroba dalam penanganan tanah yang tercemar residu pestisida, salah satunya yaitu dengan proses biodegradasi (Zhang et al., 2020). Proses ini memanfaatkan enzim mikroorganisme yang efektif dalam penguraian senyawa pestisida menjadi molekul yang lebih rendah (Pino & Peñuela, 2011).

Fase metabolisme pestisida di dalam tanah terbagi atas tiga fase, yaitu:

1) Fase I, pestisida akan diubah menjadi produk yang lebih larut dalam air dan terjadi perubahan tingkat toksisitas yang lebih rendah dari induknya melalui oksidasi, reduksi atau hidrolisis; 2) Fase II, pestisida akan terkonjugasi dengan asam amino atau gula untuk meningkatkan kelarutan air dan mengurangi toksisitas dari pestisida induk; 3) Fase III, pestisida akan diubah menjadi metabolit sekunder yang tidak beracun, misalnya hidrolase mengkatalisis beberapa kelas biokimia utama pestisida melalui ikatan karbon-halida, ester dan ikatan peptida (Clausen et al., 2002; Scott et al., 2008).

Proses yang terlibat dalam biodegradasi yaitu oksidasi, hidrolisis, alkilasi dan dealkilasi. Mikroorganisme pendegradasi organofosfat umumnya melalui hidrolisis P-O alkil dan ikatan aril dengan fungsi enzim seperti *carboxylesterases*, *hydrolase*, *phosphatase* dan *phosphotriesteras*.

7. Enzim yang Terlibat dalam Biodegradasi Pestisida

Proses biodegradasi oleh jamur terjadi secara ekstra-seluler melalui dua langkah yaitu oleh aksi sistem hidrolitik dan sistem lignolitik. Sistem hidrolitik menghasilkan hidrolase yang bertanggung jawab untuk degradasi makromolekul zat melalui tindakan oksidatif, sedangkan pada sistem lignolitik terjadi proses oksidatif kompleks, ekstraseluler non-spesifik, sistem enzimatik sangat kuat dan berada di bawah kondisi nutrisi terbatas. Mekanisme ini mampu mendegradasi senyawa lignolitik, pewarna dan

beberapa pencemar lingkungan yang tidak dapat didegradasi oleh yang mikroorganismenya lain.

Sebagian besar jamur merupakan jamur saprofit yang memperoleh nutrisinya dari bahan selulosa di sekitarnya, oleh karena itu enzim lignoselulolitik sangat dicirikan di sebagian besar sel jamur, termasuk selulase, β -glukosidase lignin peroksidase, dan lakase. Mekanisme enzimatik yang beragam ini meningkatkan kemampuan jamur untuk tumbuh beragam limbah. Enzim jamur kompatibel, efisien, dan dapat digunakan pada berbagai sektor seperti pengobatan, industri, bioremediasi, dan aplikasi pertanian.

Sel jamur memiliki aktivitas enzimatik intraseluler dan ekstraseluler. Jamur dianggap komposer alami yang dapat menghasilkan sejumlah besar enzim ekstraseluler yang dibutuhkan untuk biokonversi berbagai substrat. Enzim ekstraseluler berperan dalam perlindungan jamur terhadap senyawa berbahaya yang melalui proses hidrolisis substrat. Enzim ekstraseluler seperti lakase dan peroksidase telah diteliti untuk degradasi xenobiotik dan penghilangan komponen fenolik berbahaya dari industri lingkungan dan air limbah. Kelas enzimatik yang paling representatif dalam perbaikan lingkungan tercemar adalah hidrolase, dehalogenase, transferase, dan oksidoreduktase (El-Gendi et al., 2022; Rao et al., 2010).

B. Kajian Penelitian yang Relevan

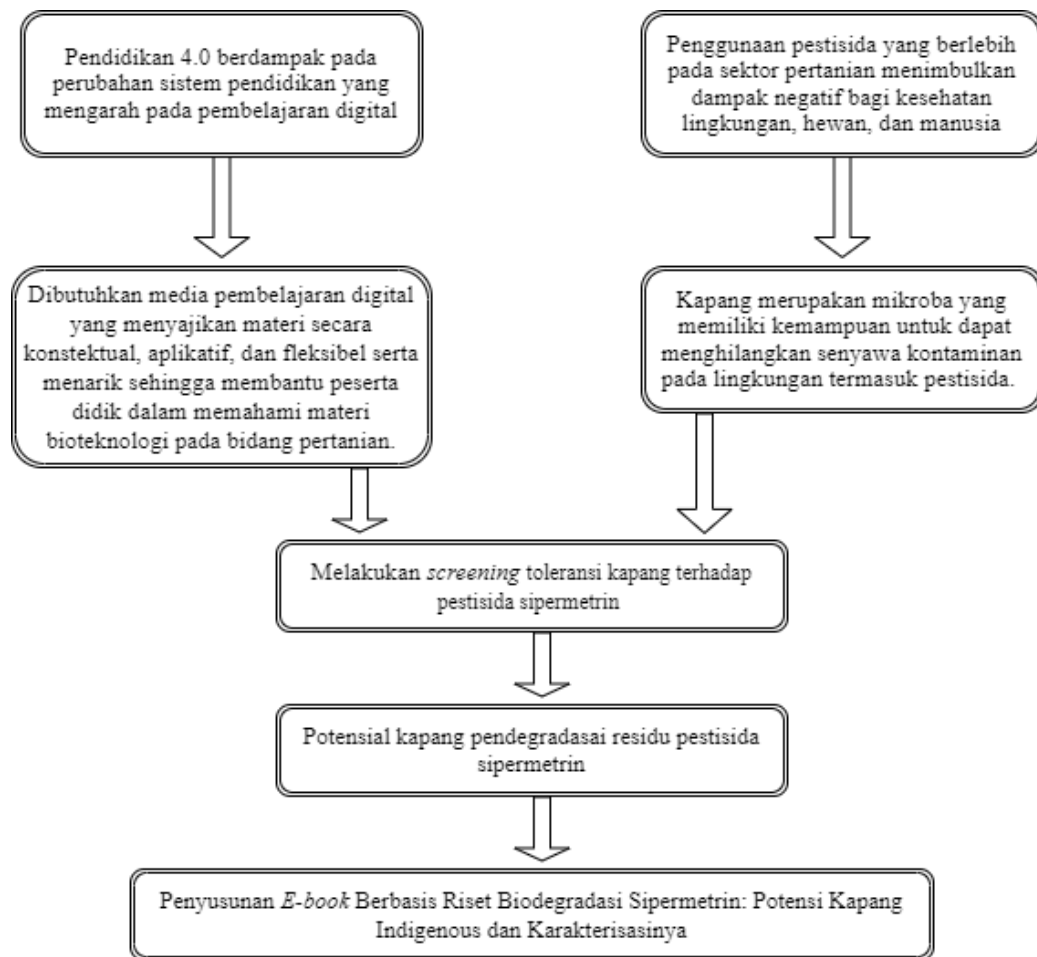
1. Mikroorganismenya diadaptasi dalam bioremediasi, yang bertujuan untuk menghilangkan atau mengubah zat kimia yang berbahaya menjadi senyawa tidak beracun (Verasoundarapandian et al., 2022).
2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Akhtar et al., 2020; Bhadouria et al., 2020; Kaur & Balomajumder, 2020; Kumar et al., 2021) membuktikan bahwa kapang indigenous yang paling berhasil diisolasi dari tanah tercemar residu pestisida berasal dari genus *Aspergillus* dan genus *Fusarium*. Strain *Fusarium sp.*, *Aspergillus sp.*, *Mikrosphaeropsis sp* dapat digunakan untuk bioremediasi pestisida.
3. Jamur memiliki potensi lebih untuk aplikasi bioremediasi dibandingkan dengan bakteri karena kemampuannya untuk mengatasi faktor lingkungan tertentu seperti toksisitas senyawa persisten organik serta logam berat yang mungkin membatasi atau mencegah biodegradasi oleh bakteri (Noman et al., 2019).

C. Kerangka Berpikir

Industri 4.0 mempengaruhi digitalisasi sektor pendidikan, mengharuskan pendidik menyediakan sumber belajar yang berakar pada teknologi informasi untuk memfasilitasi berjalannya pembelajaran. Teknologi pembelajaran dapat berupa media pembelajaran digital dengan menggunakan *e-book*. *E-book* adalah sumber belajar digital yang interaktif, dimana pesan atau informasi dapat disajikan

dengan lebih menarik dan beragam dalam bentuk kombinasi teks, gambar, animasi, audio, dan video agar materi pembelajaran yang disajikan dapat menarik serta mempermudah mahasiswa dalam mempelajarinya. Oleh karena itu, untuk mendukung pembelajaran yang sistematis, kontekstual, dan peningkatan ilmu sains, e-book berbasis riset perlu dikembangkan. Bioteknologi dalam bidang pertanian merupakan salah satu mata kuliah yang dapat menggunakan *e-book* berbasis riset sebagai sumber dan media pembelajaran.

E-book berbasis riset pada mata kuliah bioteknologi pada bidang pertanian dapat disusun berdasarkan permasalahan pertanian yang sedang terjadi saat ini. Masalah utama yang dihadapi dalam sektor pertanian saat ini adalah penanganan efek negatif penggunaan pestisida yang berlebih. Untuk itu dibutuhkan penanganan yang tepat tanpa menimbulkan efek samping bagi lingkungan dan manusia. Memanfaatkan mikroba tanah sebagai biodegradator adalah salah satu cara yang dapat dilakukan. Bukan hanya bakteri, ternyata kapang juga memiliki kemampuan dalam mendegradasi kontaminan berbahaya termasuk pestisida. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian terkini untuk menguji potensi kapang indigenous sebagai agen biodegradator pestisida pada tanah. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai bahan penyusun *e-book* berbasis riset biodegradasi sipermetrin: potensi kapang indigenous dan karakterisasinya untuk mendukung proses pembelajaran berbasis projek ataupun pada mata kuliah bioteknologi bidang pertanian. Adapun kerangka berpikir dapat dilihat melalui bagan pada halaman.



Gambar 2.4 Bagan Kerangka Berpikir