

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Kajian Teori

1. Monograf

Monograf adalah jenis karya tulis ilmiah yang disajikan secara runtut dan mendalam, serta disusun berdasarkan hasil riset atau telaah ilmiah yang dapat dipertanggungjawabkan. Umumnya, monograf ditulis oleh individu yang memiliki keahlian khusus dan pengalaman yang cukup dalam bidang keilmuan tertentu. Dalam penulisannya, monograf tidak hanya memuat informasi atau data, tetapi juga menyertakan analisis kritis, penilaian objektif, serta gagasan atau temuan baru yang berkaitan dengan topik yang dikaji. Isi dari monograf berfokus pada satu tema atau persoalan tertentu, yang dibahas secara detail dan menyeluruh melalui pendekatan keilmuan yang relevan (Lubis, 2023).

Monograf berasal dari Bahasa Yunani, yang terdiri dari dua kata, yaitu “*mono*” yang memiliki arti tunggal atau satu, dan “*graph*” yang berarti tulisan atau menulis. Dengan demikian, monograf dapat diartikan sebagai tulisan yang membahas satu topik tertentu secara mendalam. Umumnya, monograf adalah sebuah buku yang fokus pembahasannya terbatas pada satu bidang ilmu atau subbidang ilmu tertentu secara spesifik dan terperinci (Fatmawati, 2020).

Tidak seperti buku teks atau referensi umum yang biasanya membahas beragam topik dalam satu bidang ilmu secara luas dan bersifat deskriptif, monograf justru fokus pada satu topik khusus yang dikaji secara mendalam. Dengan pendekatan ini, penulis dapat menyajikan teori, data, dan hasil analisis

secara lebih detail, terstruktur, dan menyeluruh, sehingga pembaca bisa memahami permasalahan yang dibahas secara lebih komprehensif. Keunggulan utama monograf terletak pada kekuatan analisis serta kelengkapan informasi yang disampaikan, karena penulis dapat memusatkan perhatian secara penuh pada satu permasalahan penting tanpa harus terbagi oleh topik lain yang tidak relevan.

Monograf memiliki peran penting sebagai media untuk mempublikasikan hasil penelitian orisinal atau temuan ilmiah baru yang belum banyak diungkap dalam karya ilmiah lain. Karena isinya yang mendalam dan fokus, monograf sering dijadikan sebagai sumber acuan utama dalam penelitian lanjutan, pengembangan teori baru, maupun dalam proses perumusan kebijakan berbasis data ilmiah. Di lingkungan perguruan tinggi, penyusunan monograf juga dianggap sebagai bentuk kontribusi akademik yang bernilai, karena selain menunjukkan kemampuan berpikir kritis dan penguasaan materi oleh penulisnya, monograf juga membantu memperkaya dan memperluas khazanah literatur ilmiah yang tersedia (Maghfira, 2023).

2. Monograf Berbasis Riset

Monograf berbasis riset merupakan salah satu bentuk karya tulis ilmiah yang disusun dalam format buku, dengan fokus utama pada satu tema atau isu tertentu yang dikaji secara mendalam berdasarkan hasil penelitian yang dirancang secara sistematis. Tidak seperti buku ajar atau referensi umum yang biasanya membahas banyak topik dalam satu bidang ilmu secara luas, monograf

justru menyoroiti satu permasalahan khusus dan menganalisisnya dari berbagai sudut pandang ilmiah (Amiyati et al., 2020).

Monograf berbasis riset perlu menyertakan unsur kebaruan atau novelty, yaitu adanya temuan, pendekatan, atau cara pandang baru dalam membahas suatu masalah. Elemen inilah yang membuat monograf berbeda dari karya ilmiah lain yang hanya merangkum atau mengompilasi informasi yang sudah ada (Fatmawati, 2020). Dalam penulisan monograf, informasi yang disajikan biasanya berasal dari hasil penelitian asli, baik melalui percobaan di laboratorium, studi lapangan, maupun metode kualitatif seperti observasi mendalam dan studi kasus. Setiap tahapan dalam proses pengumpulan hingga analisis data dijelaskan secara rinci agar pembaca bisa memahami serta menilai keabsahan dan keandalan hasil yang disampaikan.

Dalam dunia perguruan tinggi dan kegiatan riset akademik, monograf berbasis riset memiliki peran penting sebagai salah satu bentuk publikasi ilmiah yang strategis. Banyak perguruan tinggi menganjurkan baik dosen maupun mahasiswa untuk menulis monograf sebagai bentuk nyata kontribusi mereka terhadap perkembangan ilmu pengetahuan (Gusmiatun, 2024). Bagi penulisnya, penyusunan monograf menjadi bukti kemampuan dalam merancang dan melaksanakan penelitian, sekaligus menunjukkan keterampilan dalam merumuskan argumen ilmiah dan menyusun pemikiran secara runtut. Lebih dari sekadar media penyampaian data, monograf juga mencerminkan kepedulian dan keberpihakan ilmuwan terhadap pemecahan persoalan nyata di masyarakat melalui pendekatan ilmiah yang didukung oleh data yang valid (Novia, 2019).

Tujuan dari penulisan monograf berbasis riset adalah memberikan sumbangan yang berarti bagi pengembangan ilmu pengetahuan melalui penyajian informasi baru yang relevan, mendalam, dan sesuai konteks. Selain memperkaya referensi ilmiah yang tersedia, monograf juga menjadi media penting dalam mendokumentasikan hasil riset agar dapat dimanfaatkan oleh kalangan akademisi, praktisi, maupun pembuat kebijakan. Oleh sebab itu, monograf tidak hanya berfungsi sebagai sarana publikasi ilmiah, tetapi juga sebagai jembatan yang menghubungkan hasil penelitian dengan penerapannya di dunia nyata (Fatmawati, 2020).

Dalam bidang terapan seperti bioteknologi, lingkungan, pendidikan, dan kesehatan, monograf memiliki peran penting karena mampu menyajikan informasi terbaru yang bisa langsung digunakan dalam praktik. Karena itu, penting bagi para peneliti untuk membiasakan diri menulis dan menerbitkan monograf sebagai bagian dari proses penelitian dan publikasi ilmiah. Tidak hanya meningkatkan reputasi akademik penulis, monograf juga menambah jumlah referensi ilmiah berkualitas yang sesuai dengan kebutuhan masyarakat Indonesia. Di tengah arus globalisasi ilmu pengetahuan dan tuntutan akan inovasi, karya monograf yang didasarkan pada riset semakin dibutuhkan dan memiliki relevansi tinggi. Melalui penerbitan monograf, peneliti berkontribusi nyata dalam membangun lingkungan ilmiah yang produktif, bermanfaat, dan berkelanjutan.



Gambar 2. 1 Tampilan Monograf (Nasution, 2022)

3. Peran kapang film Ascomycota

Ascomycota adalah salah satu divisi utama dalam kingdom Fungi yang memiliki peranan penting secara ekologis maupun ekonomis. Divisi ini sering disebut sebagai sac fungi karena dalam reproduksi seksualnya terbentuk askospora di dalam askus, yaitu struktur mirip kantung. Anggotanya sangat beragam, mulai dari jamur uniseluler seperti *Saccharomyces* hingga jamur multiseluler yang membentuk miselium kompleks dan tubuh buah, seperti *Aspergillus* dan *Trichoderma*. Ascomycota dapat ditemukan di berbagai habitat, termasuk tanah, material organik yang membusuk, serta sebagai parasit atau simbiosis pada tumbuhan dan organisme lain.

Secara ekologis, Ascomycota memiliki peran penting dalam menguraikan bahan organik kompleks seperti selulosa dan lignin menjadi senyawa sederhana, sehingga mendukung kelangsungan siklus hara di lingkungan. Beberapa spesies juga menjalin simbiosis mutualisme dengan akar tanaman, seperti pada mikoriza, yang membantu meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi. Di bidang ekonomi dan bioteknologi, Ascomycota dimanfaatkan sebagai agen hayati untuk

mengendalikan hama serta penyakit tanaman, dan sebagai penghasil metabolit sekunder bernilai tinggi, seperti antibiotik, enzim, dan asam organik.

Filum (divisi) jamur yang berperan sebagai agen bioremediator utama meliputi:

a. Ascomycota

Ascomycota, yang dikenal juga sebagai jamur kantung, merupakan divisi terbesar dalam kingdom Fungi dan terkenal karena kemampuannya dalam melakukan biodegradasi. Kelompok jamur ini memproduksi berbagai enzim seperti laccase, peroksidase, dan nitrilase yang berperan penting dalam pemecahan senyawa organik kompleks serta polutan, termasuk herbisida, pestisida, dan senyawa berbasis nitril (Kurniati, 2020). Beberapa genus yang umum dimanfaatkan dalam proses biodegradasi dari kelompok ini antara lain *Aspergillus*, *Penicillium*, dan *Fusarium*. Melalui aktivitas enzimatiknya, jamur-jamur tersebut mampu mengubah senyawa beracun menjadi bentuk yang lebih sederhana dan tidak membahayakan lingkungan.

b. Basidiomycota

Basidiomycota merupakan kelompok jamur yang umumnya dikenal melalui bentuk tubuh buahnya, seperti jamur payung. Beberapa spesies dalam divisi ini menunjukkan potensi tinggi dalam proses biodegradasi, khususnya dalam memecah lignin dan senyawa aromatik yang tergolong sulit terurai. Kemampuan tersebut didukung oleh produksi enzim seperti lignin peroksidase dan mangan peroksidase, yang memainkan peran penting dalam degradasi bahan organik dan berbagai polutan. Di antara jamur

Basidiomycota yang sering dimanfaatkan dalam bioremediasi adalah *Phanerochaete chrysosporium* dan *Pleurotus ostreatus*, karena efektivitasnya dalam mengolah limbah berbasis senyawa kompleks (Stella et al., 2017).

c. Deuteromycota

Deuteromycota, yang dikenal sebagai fungi imperfecti atau jamur tidak sempurna, merupakan kelompok jamur yang berkembang biak secara aseksual melalui pembentukan konidia atau hifa khusus yang disebut konidiofor (Pujiati, 2022). Walaupun secara taksonomi banyak spesies yang sebelumnya tergolong Deuteromycota telah direklasifikasi ke dalam Ascomycota, kelompok jamur ini tetap dikenal karena reproduksi aseksualnya yang cepat serta peranannya sebagai saprofit dalam penguraian bahan organik. Genus seperti *Aspergillus* dan *Fusarium*, yang dulunya termasuk dalam Deuteromycota namun kini diklasifikasikan sebagai bagian dari Ascomycota, tetap memiliki kontribusi signifikan dalam proses biodegradasi limbah organik maupun polutan lingkungan.

d. Zygomycota

Kelas jamur ini memiliki tiga tipe hifa yang berbeda, yakni stolon yang tumbuh menyebar di permukaan substrat, rizoid yang menembus ke dalam substrat menyerupai akar, serta sporangiofor yang tumbuh ke atas dan berfungsi membentuk sporangium (Pujiati, 2022). Zygomycota dikenal berperan sebagai pengurai bahan organik. Beberapa anggotanya, seperti *Rhizopus*, menunjukkan potensi dalam mendekomposisi senyawa organik maupun limbah hasil pertanian. Meskipun demikian, kontribusinya dalam

proses bioremediasi masih relatif terbatas jika dibandingkan dengan peran dominan yang dimiliki oleh Ascomycota dan Basidiomycota.

4. Ascomycota sebagai agen biodegradasi

Ascomycota memiliki peran penting sebagai agen biodegradasi dalam menguraikan senyawa organik kompleks, termasuk polutan berbahaya seperti herbisida, pestisida, dan limbah industri. Jamur dari filum ini menjalankan proses biodegradasi melalui aktivitas enzimatik, dengan menghasilkan enzim ekstraseluler seperti oksidase, peroksidase, laccase, serta berbagai enzim hidrolitik. Enzim-enzim tersebut memungkinkan Ascomycota memecah senyawa sulit terurai, seperti senyawa aromatik, nitril, dan zat beracun lainnya, menjadi bentuk yang lebih sederhana dan ramah lingkungan.

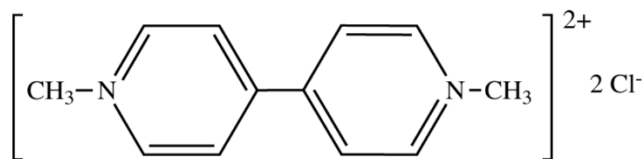
Salah satu kelebihan Ascomycota dalam proses biodegradasi adalah kemampuannya untuk bertahan dan berkembang di berbagai kondisi lingkungan, termasuk area yang terkontaminasi zat beracun dalam konsentrasi tinggi. Contohnya, beberapa spesies seperti *Aspergillus* dan *Fusarium* mampu mendegradasi senyawa nitril menjadi amida dan asam karboksilat melalui kerja enzim nitrilase dan amidase. Transformasi ini tidak hanya menurunkan tingkat toksisitas, tetapi juga mengubah senyawa tersebut menjadi bentuk yang dapat kembali digunakan dalam siklus biogeokimia. Selain itu, Ascomycota juga berkontribusi dalam degradasi herbisida seperti paraquat diklorida dengan memodifikasi struktur kimianya melalui reaksi oksidasi dan hidrolisis. Dengan cara ini, jamur Ascomycota membantu menurunkan akumulasi residu herbisida

di tanah dan perairan, sehingga mencegah pencemaran lingkungan dan risiko kesehatan bagi organisme lain (Marlinda et al., 2018).

5. Paraquat Diklorida

Herbisida adalah senyawa kimia yang dimanfaatkan untuk mengendalikan gulma, termasuk rumput liar, atau menghambat pertumbuhan tanaman pengganggu pada lahan budidaya (Widowati et al., 2017). Herbisida dapat mengganggu berbagai proses vital dalam tumbuhan, seperti pembelahan sel, perkembangan jaringan, pembentukan klorofil, fotosintesis, respirasi, metabolisme nitrogen, serta aktivitas enzim yang penting untuk kelangsungan hidup tanaman. Zat ini berasal dari metabolit, ekstrak, atau bagian tubuh suatu organisme. Selain bersifat toksik terhadap gulma atau tanaman pengganggu, herbisida juga bisa memberikan dampak beracun pada tanaman utama.

Paraquat diklorida adalah senyawa kimia sintetis yang banyak digunakan dalam pertanian untuk mengendalikan gulma. Sebagai herbisida kontak, paraquat bekerja dengan merusak jaringan tanaman pada bagian yang terkena semprotan. Cara kerjanya melibatkan pembentukan radikal bebas yang menyebabkan peroksidasi lipid, yang pada akhirnya merusak dan membunuh jaringan tanaman. Senyawa ini memiliki struktur kimia berupa garam kuartener dengan rumus molekul $C_{12}H_{14}Cl_2N_2$ dan nama kimia (1,1'-dimetil-4,4'-bipyridium ion) diklorida anion ini telah banyak digunakan di berbagai daerah pertanian (Fajriati et al., 2020) (Pizzutti et al., 2016).



Gambar 2. 2 Struktur senyawa paraquat diklorida (Arfi et al., 2017)

Paraquat biasanya dijual dalam bentuk cairan pekat yang harus dicampur dengan air sebelum diaplikasikan ke tanaman. Keunggulan utama paraquat adalah kemampuannya untuk menghambat pertumbuhan gulma dengan sangat cepat, sehingga sering digunakan untuk membersihkan lahan sebelum penanaman. Namun, karena sifatnya yang tidak selektif, paraquat juga bisa merusak tanaman utama jika terkena langsung (Pujiswanto et al., 2020). Oleh karena itu, aplikasi paraquat harus dilakukan dengan hati-hati. Paraquat efektif untuk membasmi berbagai jenis gulma daun lebar dan rumput di lahan pertanian, perkebunan, maupun industri (Ardiwinata et al., 2019).

Konsentrasi paraquat diklorida yang ditemukan di lahan pertanian di Indonesia umumnya berada dalam kisaran 0,15 hingga 14,44 ppm (mg/kg berat kering tanah), tergantung pada intensitas penggunaan dan kondisi lingkungan setempat. Di lapangan, herbisida ini biasanya diaplikasikan dengan dosis antara 0,2 hingga 2 kg bahan aktif per hektar. Jika dihitung berdasarkan interaksi dengan tanah, dosis tersebut dapat menghasilkan konsentrasi sekitar 0,1 hingga 50 ppm di zona perakaran atau lapisan atas tanah, tergantung pada tekstur tanah, kandungan bahan organik, dan curah hujan yang terjadi setelah aplikasi (Singh et al., 2018). Paraquat dikenal sangat reaktif terhadap partikel tanah, terutama fraksi liat dan bahan organik, sehingga cenderung terikat kuat di permukaan dan

tidak mudah tercuci ke lapisan tanah yang lebih dalam atau ke air tanah. Meskipun demikian, jika konsentrasi paraquat di tanah melebihi 1 ppm dalam jangka panjang, hal ini dapat mengganggu keseimbangan biologis tanah, seperti menurunkan populasi dan aktivitas mikroorganisme, menghambat kerja enzim tanah, serta memperlambat proses dekomposisi bahan organik. Bahkan, pada konsentrasi di atas 5 ppm, dampak toksik menjadi lebih nyata, dengan gangguan terhadap organisme non-target seperti cacing tanah dan mikroba fungsional lainnya yang berperan dalam menjaga kesuburan tanah. Oleh karena itu, meskipun penggunaannya masih dalam batas rekomendasi, akumulasi residu paraquat perlu diawasi secara ketat agar tidak merusak keberlanjutan ekosistem tanah (E. C et al., 2024).

Meskipun sangat ampuh dalam mengendalikan gulma, paraquat diklorida dikenal sebagai salah satu herbisida yang paling berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Paparan terhadap senyawa ini, baik melalui kulit, pernapasan, atau konsumsi, dapat merusak organ-organ penting seperti paru-paru, ginjal, dan hati (Ardiwinata et al., 2019). Bahkan dosis yang kecil pun bisa mematikan jika tertelan, karena paraquat sulit diolah oleh tubuh dan cepat menyebar ke seluruh bagian tubuh. Gejala keracunan akibat paraquat biasanya meliputi mual, muntah, nyeri perut, kesulitan bernapas, dan bisa berujung pada kematian jika tidak segera ditangani. Di negara-negara maju seperti Uni Eropa dan Amerika Serikat, penggunaan paraquat sudah dilarang karena risikonya yang sangat besar dibandingkan dengan manfaatnya (Silva et al., 2024). Namun, di negara-negara berkembang, termasuk Indonesia, paraquat masih banyak digunakan karena

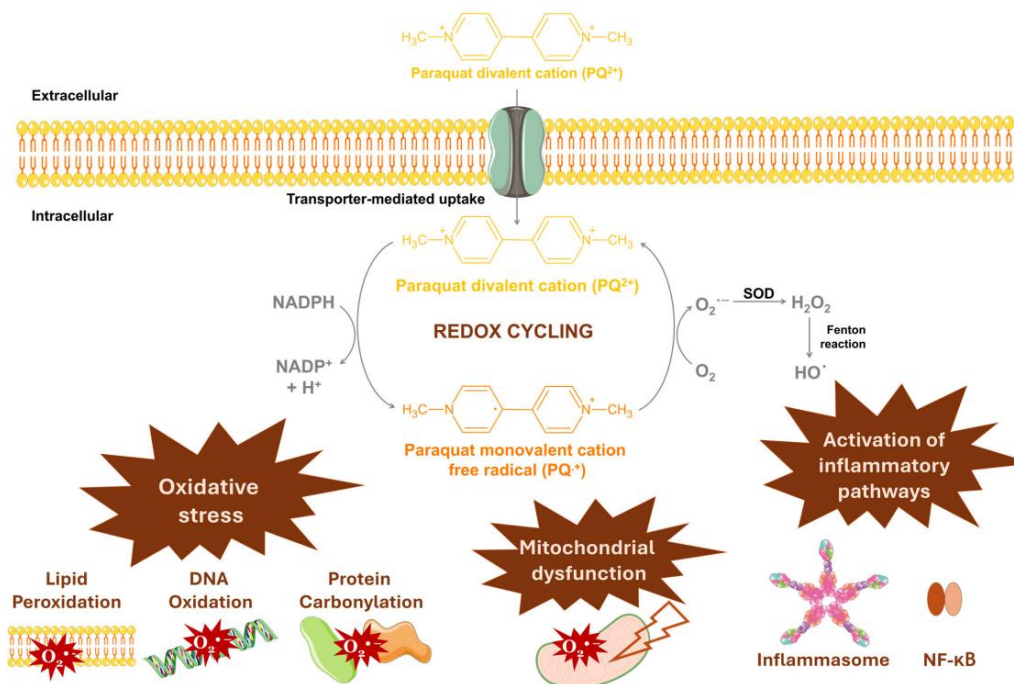
harganya yang terjangkau dan belum ada alternatif yang lebih efektif dalam mengendalikan gulma.

Dampak penggunaan paraquat terhadap lingkungan juga tidak kalah serius dibandingkan dampaknya terhadap kesehatan manusia. Setelah digunakan, paraquat dapat diserap ke dalam tanah dan menempel erat pada partikel-partikel tanah, terutama pada tanah liat (Y.C. Wong et al., 2021). Meskipun sulit larut dalam air tanah, senyawa ini tetap bisa aktif dalam tanah selama berbulan-bulan, tergantung pada kondisi pH, kelembaban, dan jenis tanahnya. Selain itu, paraquat bisa terbawa oleh aliran air hujan menuju sungai dan danau, yang berisiko mencemari ekosistem perairan.

Toksisitas paraquat ini terjadi melalui mekanisme yang disebut redox cycling, yaitu proses berulang dari reaksi reduksi dan oksidasi yang menghasilkan spesies oksigen reaktif (Reactive Oxygen Species/ROS) dalam jumlah besar (C. L. Huang et al., 2016). Dalam bentuk ion divalen (PQ^{2+}), paraquat masuk ke dalam sel melalui sistem transport aktif, kemudian mengalami reduksi oleh donor elektron seperti NADPH menjadi radikal monovalen ($PQ^{\bullet+}$). Radikal ini akan bereaksi dengan oksigen (O_2) sehingga membentuk anion superoksida (O_2^-). Anion tersebut kemudian dikonversi menjadi hidrogen peroksida (H_2O_2) oleh enzim superoksida dismutase (SOD), dan pada akhirnya menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet OH$) melalui reaksi Fenton, yang sangat merusak bagi komponen seluler (Silva et al., 2024).

Penumpukan ROS memicu stres oksidatif yang dapat merusak berbagai komponen sel, termasuk lipid, protein, dan DNA. Kerusakan lipid akibat

peroksidasi akan mengganggu kestabilan membran sel, sedangkan oksidasi pada DNA berpotensi menimbulkan mutasi genetik serta mengaktifkan jalur yang memicu apoptosis. Selain itu, ROS juga menyebabkan karbonilasi protein yang mengubah struktur dan fungsi protein penting dalam sel. Mitokondria merupakan salah satu organel yang paling rentan terhadap kerusakan akibat stres oksidatif. Kerusakan pada mitokondria ditandai dengan hilangnya potensial membran, gangguan dalam produksi ATP, dan pelepasan sitokrom c yang kemudian mengaktifkan enzim kaspase, sehingga mendorong proses apoptosis atau kematian sel terprogram. ROS juga memiliki peran penting dalam mengaktifkan jalur inflamasi di dalam sel (Gao et al., 2020). Proses ini melibatkan aktivasi inflammasom serta faktor transkripsi nuklir NF- κ B (*nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells*), yang kemudian meningkatkan ekspresi gen-gen proinflamasi. Hal ini menyebabkan pelepasan sitokin inflamasi seperti TNF- α dan IL-1 β , yang memperburuk kondisi patologis (Chen et al., 2021). Gabungan antara stres oksidatif, kerusakan mitokondria, dan peradangan menjadi faktor utama yang menyebabkan toksisitas sistemik paraquat, terutama menyerang organ-organ vital seperti paru-paru, ginjal, dan hati.



Gambar 2. 3 Mekanisme umum toksisitas paraquat (Silva et al., 2024)

Penggunaan paraquat harus dilakukan dengan memperhatikan prinsip pertanian berkelanjutan. Penggunaan yang berlebihan dan tidak terkendali dapat menyebabkan penumpukan residu yang membahayakan lingkungan dan kesehatan manusia. Untuk itu, penting untuk melakukan pemantauan residu dan studi toksikologi secara rutin. Selain itu, metode pertanian konservasi dan rotasi tanaman juga dapat membantu mengurangi populasi gulma tanpa perlu bergantung pada herbisida kimia.

Meskipun memiliki berbagai keunggulan dan risiko, herbisida paraquat diklorida tetap menjadi isu penting dalam studi pertanian dan lingkungan. Penggunaan paraquat harus dilakukan secara bijaksana, dengan memperhatikan dosis, frekuensi, dan teknik aplikasi yang tepat. Selain itu, penting untuk terus

mendukung penelitian tentang cara menetralkan paraquat di lingkungan, salah satunya melalui biodegradasi oleh mikroorganisme.



Gambar 2. 4 Merek herbisida mengandung paraquat

6. Mikroorganisme Pendegradasi

Mikroorganisme pendegradasi herbisida, seperti bakteri, kapang, dan jamur, memiliki kemampuan untuk menguraikan senyawa herbisida menjadi bagian-bagian yang lebih sederhana dan tidak membahayakan lingkungan. Proses biodegradasi ini sangat penting untuk mengurangi dampak negatif dari penggunaan herbisida kimia dalam pertanian. Senyawa kimia yang terdapat dalam herbisida, seperti paraquat, glifosat, dan atrazin, sering kali sulit untuk terurai secara alami, sehingga dapat menumpuk di tanah dan air, yang berpotensi mencemari ekosistem (Moneke et al., 2015). Oleh karena itu, mikroorganisme yang dapat mendegradasi herbisida menjadi solusi yang lebih ramah lingkungan untuk mengatasi masalah ini.

Beberapa jenis bakteri diketahui memiliki kemampuan luar biasa untuk mengurai senyawa herbisida. Sebagai contoh, bakteri *Pseudomonas putida* dan *Bacillus subtilis* dapat menguraikan berbagai jenis herbisida dengan menggunakan enzim khusus yang dapat memecah struktur kimia kompleks dalam senyawa tersebut. Enzim seperti oksidase, peroksidase, dan hidrolase berperan penting dalam proses biodegradasi ini. Bakteri ini dapat bertahan hidup di lingkungan yang terkontaminasi herbisida dan mengubah senyawa berbahaya tersebut menjadi senyawa yang lebih ramah lingkungan, seperti karbon dioksida, air, atau senyawa lain yang tidak berbahaya (Ramírez et al., 2023).

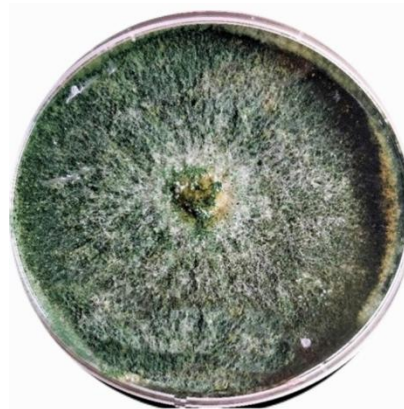
Selain bakteri, kapang juga memainkan peran penting dalam proses biodegradasi herbisida. Beberapa jenis kapang, seperti *Trichoderma asperellum*, *Fusarium spp.*, dan *Aspergillus niger*, terbukti efektif dalam mengurai senyawa kimia yang terkandung dalam herbisida. Kapang ini bekerja dengan menghasilkan enzim seperti peroksidase, laccase, dan ligninase yang berfungsi untuk memecah bahan kimia organik yang kompleks. Sebagai contoh, *Aspergillus niger* mampu mengurai berbagai senyawa organik beracun melalui proses oksidasi yang membantu memecah molekul-molekul besar menjadi bentuk yang lebih sederhana dan aman (Sidquni et al., 2023). Keunggulan kapang terletak pada kemampuannya untuk bertahan hidup dalam kondisi lingkungan yang keras, seperti tanah tercemar atau tergenang air, serta kemampuan tumbuh yang cepat. Dengan kemampuannya mengurai senyawa organik berbahaya, kapang, termasuk *Aspergillus niger*, berperan penting dalam memulihkan kualitas tanah dan air yang tercemar oleh herbisida.

Kapang dari filum Ascomycota yang memiliki potensi dalam mendegradasi paraquat, seperti *Trichoderma asperellum* dan *Aspergillus niger*.

a. *Trichoderma asperellum*

Berikut ini klasifikasi ilmiah *Trichoderma asperellum* secara lengkap:

Kingdom : Fungi
Divisi/filum : Ascomycota
Kelas : Sordariomycetes
Ordo : Hypocreales
Famili : Hypocreaceae
Genus : *Trichoderma*
Spesies : *Trichoderma asperellum*



Gambar 2. 5 Kapang *Trichoderma asperellum* (Sood et al., 2023)

Trichoderma asperellum merupakan kapang mikroskopis yang umum dijumpai di tanah, terutama di sekitar akar tanaman (daerah rhizosfer). Kapang ini memiliki peran penting dalam bidang bioteknologi dan pertanian karena kemampuannya bertindak sebagai agen hayati (bioagen) yang mampu mengendalikan penyakit tanaman. Secara luas, *T. asperellum* dikenal sebagai

kapang yang efektif dalam menekan berbagai patogen tanaman melalui beberapa mekanisme, di antaranya menyerang langsung jamur patogen (mikoparasitisme), bersaing memperebutkan ruang dan nutrisi di tanah, serta menghasilkan senyawa metabolit yang bersifat antimikroba (Lila et al., 2023), (Lamdo, 2024).

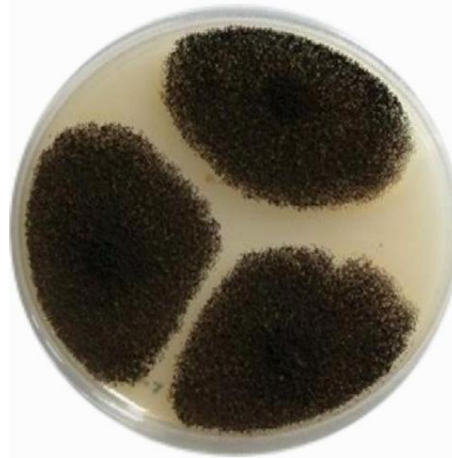
Kapang ini memiliki sifat antagonistik yang kuat karena mampu menghasilkan enzim seperti kitinase dan glukonase, yang berperan dalam merusak dinding sel patogen. Selain itu, *T. asperellum* juga dapat menghasilkan antibiotik alami yang bersifat racun bagi patogen tetapi tetap aman bagi tanaman dan lingkungan. Kemampuan bioremediasi dari *Trichoderma* yang bekerja melalui mekanisme seperti bioakumulasi, biosorpsi, biovolatilisasi, serta remediasi fitobial pada tanah yang tercemar, terus dikaji dan dikembangkan sebagai upaya untuk mengurangi pencemaran lingkungan (Doo et al., 2023). Dengan berbagai keunggulan tersebut, kapang ini menjadi salah satu pilihan utama dalam pengendalian hayati yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

b. *Aspergillus niger*

Berikut ini klasifikasi ilmiah *Aspergillus niger* secara lengkap:

Kingdom : Fungi
Divisi/filum : Ascomycota
Kelas : Eurotiomycetes
Ordo : Eurotiales
Famili : Trichocomaceae
Genus : *Aspergillus*

Spesies : *Aspergillus niger*



Gambar 2. 6 Kapang *Aspergillus niger* (Abbas et al., 2021)

Aspergillus niger merupakan salah satu spesies kapang dari genus *Aspergillus* yang banyak ditemukan di lingkungan tropis dan subtropis. Kapang ini termasuk dalam kelompok saprofit dan tergolong divisi *Ascomycota*. Ia dikenal memiliki laju pertumbuhan yang cepat serta mampu beradaptasi pada berbagai jenis bahan organik, seperti tanah, sisa-sisa tumbuhan, dan materi organik yang mengalami pembusukan. Dari segi morfologi, *A. niger* membentuk koloni berwarna hitam pekat dengan hifa hialin bersekat serta kepala konidia berbentuk bulat seperti sikat, yang menghasilkan spora kecil dan mudah menyebar lewat udara (Abbas et al., 2021). Dalam ekosistem tanah, keberadaan kapang ini berperan penting dalam proses penguraian bahan organik serta menjaga keseimbangan mikroorganisme. Di bidang bioteknologi, *A. niger* dikenal luas sebagai penghasil enzim-enzim penting seperti amilase,

glukoamilase, dan pektinase, serta senyawa metabolit sekunder seperti asam sitrat (Mufarrikha et al., 2015).

7. Biodegradasi Herbisida Paraquat Diklorida

Biodegradasi paraquat diklorida adalah proses alami atau hasil rekayasa biologis yang melibatkan mikroorganisme untuk memecah senyawa paraquat menjadi bentuk yang lebih sederhana, tidak beracun, dan lebih aman bagi lingkungan. Proses ini menjadi solusi penting dalam mengatasi pencemaran tanah akibat penggunaan herbisida sintetis secara berlebihan, terutama paraquat yang dikenal sangat berbahaya bagi organisme tanah dan air (Sakiah et al., 2021). Karena strukturnya yang kompleks dan sulit terurai secara alami, diperlukan mikroorganisme tertentu yang memiliki enzim khusus untuk membantu penguraian senyawa ini. Melalui biodegradasi, kadar paraquat di lingkungan dapat ditekan, sekaligus mengurangi risiko kerusakan pada ekosistem. Dalam proses ini, mikroorganisme memanfaatkan paraquat sebagai sumber energi atau karbon, dan memecahnya dengan bantuan enzim seperti peroksidase, laccase, dan superoksida dismutase. Efektivitas dan kecepatan penguraian tergantung pada berbagai faktor, seperti jenis mikroorganisme yang digunakan, pH tanah, suhu, kandungan paraquat, serta kondisi lingkungan tempat proses berlangsung (Eryah, 2021).

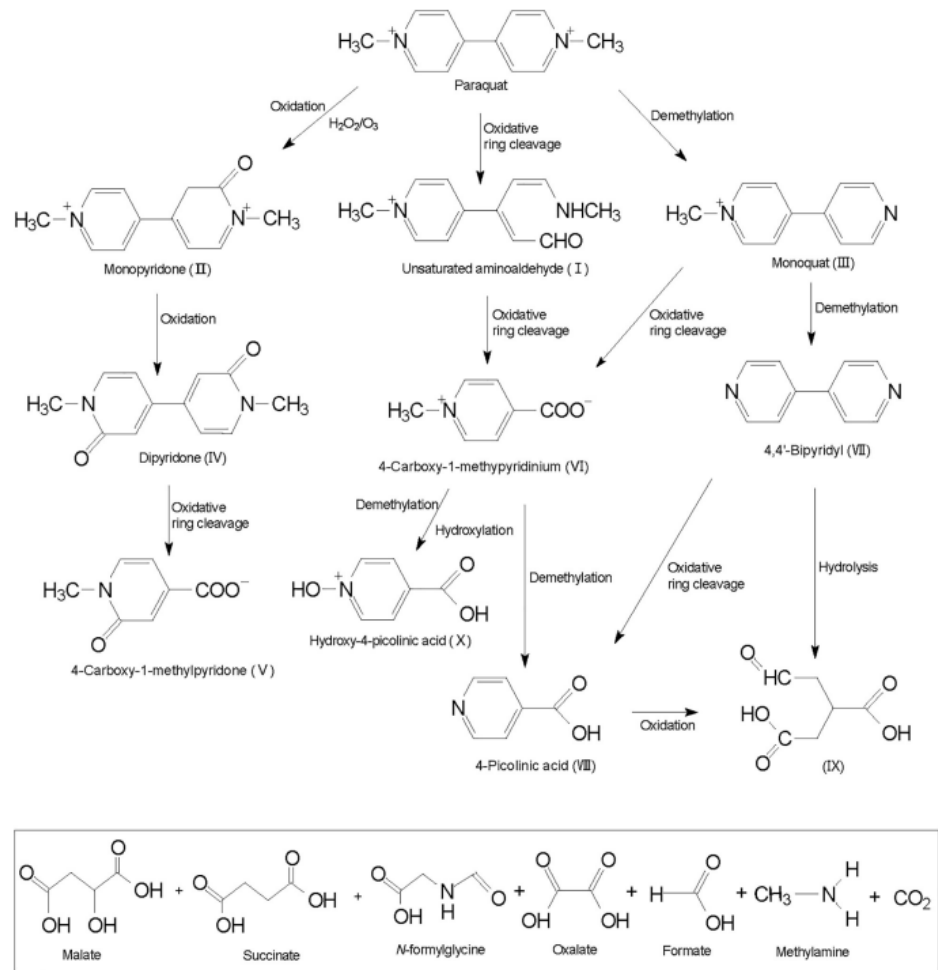
Kapang memiliki kemampuan luar biasa dalam mendegradasi berbagai jenis herbisida melalui mekanisme biokimia yang kompleks. Tahapan enzimatik dan non-enzimatik yang terintegrasi menjadi dasar proses degradasi herbisida oleh kapang. Molekul herbisida dapat diubah menjadi senyawa yang lebih

sederhana dan kurang beracun berkat enzim ekstraseluler dan intraseluler yang dihasilkan kapang, yang berperan memecah ikatan kimia dalam herbisida (Susilowati et al., 2020). Kapang mampu mengembangkan kemampuan degradasi terhadap berbagai herbisida dengan struktur kimia berbeda karena sistem enzimnya yang beragam dan adaptif. Selama proses evolusi, kapang telah mengembangkan jalur metabolisme khusus yang memungkinkannya memanfaatkan herbisida sebagai sumber karbon, nitrogen, dan energi untuk mendukung pertumbuhannya.

Degradasi paraquat, proses penguraian senyawa ini berlangsung melalui berbagai reaksi kimia yang saling berkesinambungan, termasuk oksidasi, demetilasi, pembelahan cincin aromatik, hidroksilasi, serta hidrolisis (Kumar, 2020). Senyawa paraquat pada tahap awal mengalami oksidasi membentuk monopyridone dan dipyridone, yang kemudian dikonversi menjadi 4-karboksil-1-metilpiridone melalui reaksi pembukaan cincin aromatik dan penambahan gugus karboksil. Jalur lain menunjukkan konversi paraquat menjadi monoquat dan senyawa perantara seperti unsaturated aminodialdehyde serta 4-karboksil-1-metilpiridinium, yang kemudian menjalani proses demetilasi dan hidroksilasi hingga menghasilkan senyawa hidroksi-4-pikolinat. Selain itu, beberapa lintasan degradasi mencakup pembentukan senyawa seperti 4,4'-bipiridil dan asam pikolinat yang selanjutnya dioksidasi menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana (Y. Huang et al., 2019).

Hasil akhir dari proses ini berupa molekul-molekul kecil yang tidak bersifat toksik, seperti malat, suksinat, oksalat, format, N-formilglisin,

metilamin, serta karbon dioksida. Proses degradasi ini menunjukkan bagaimana mikroorganisme berperan aktif dalam menguraikan paraquat menjadi bentuk yang lebih aman bagi lingkungan.



Gambar 2. 7 Mekanisme degradasi paraquat (Yaohua, 2019)

8. Metabolit Paraquat diklorida

Metabolit dari paraquat diklorida merupakan senyawa antara yang terbentuk selama proses degradasi biologis maupun non-biologis terhadap struktur kimia paraquat. Paraquat sendiri adalah senyawa 1,1'-dimetil-4,4'-bipyridinium diklorida yang mengandung dua cincin piridil identik dan

bermuatan positif. Dalam proses biodegradasi oleh mikroorganisme seperti kapang, paraquat pertama-tama mengalami reaksi reduksi yang menghasilkan bentuk radikal ($PQ\bullet^+$). Radikal ini sangat reaktif dan dapat memulai proses transformasi molekuler lebih lanjut. Salah satu tahapan awal yang umum terjadi adalah dealkilasi, yaitu pelepasan gugus metil dari struktur paraquat, menghasilkan senyawa monometil paraquat. Reaksi berikutnya dapat melibatkan pemecahan ikatan pada cincin bipyridil, yang menghasilkan metabolit seperti 4-karboksil-1-metilpiridinium. Selain itu, senyawa sederhana seperti metilamina juga dapat terbentuk melalui dealkilasi lanjutan (Silva et al., 2024).

Tahap berikutnya melibatkan pembelahan cincin aromatik oleh enzim oksidatif seperti laccase, peroksidase, dan monooxygenase, yang biasanya dihasilkan oleh mikroorganisme seperti kapang dari filum Ascomycota. Proses ini menghasilkan senyawa antara berupa asam karboksilat sederhana seperti formiat, oksalat, dan suksinat. Senyawa-senyawa tersebut dapat dimasukkan ke dalam siklus metabolisme sel mikroba seperti siklus Krebs, yang pada akhirnya mengubahnya menjadi senyawa akhir yang tidak beracun, yaitu karbon dioksida (CO_2), amonia (NH_3), dan air (H_2O). Oleh karena itu, metabolit paraquat mencerminkan proses transformasi bertahap dari senyawa toksik menjadi bentuk yang aman bagi lingkungan (Y. Huang et al., 2019).

B. Kajian Penelitian yang relevan

Penelitian tentang kemampuan mikroorganisme, terutama kapang dan bakteri, dalam mendegradasi senyawa pencemar seperti herbisida mengalami perkembangan pesat dalam beberapa dekade terakhir. Paraquat diklorida menjadi perhatian utama karena sifatnya yang toksik dan penggunaannya yang luas, sehingga mendorong pengembangan bioremediasi berbasis mikroba. Kajian-kajian sebelumnya menjadi rujukan penting karena tidak hanya menunjukkan potensi mikroba dalam detoksifikasi paraquat, tetapi juga mengungkap faktor utama yang memengaruhi efektivitas biodegradasi, seperti konsentrasi senyawa, waktu inkubasi, dan metode analisis.

Tabel 2. 1 Penelitian yang Relevan

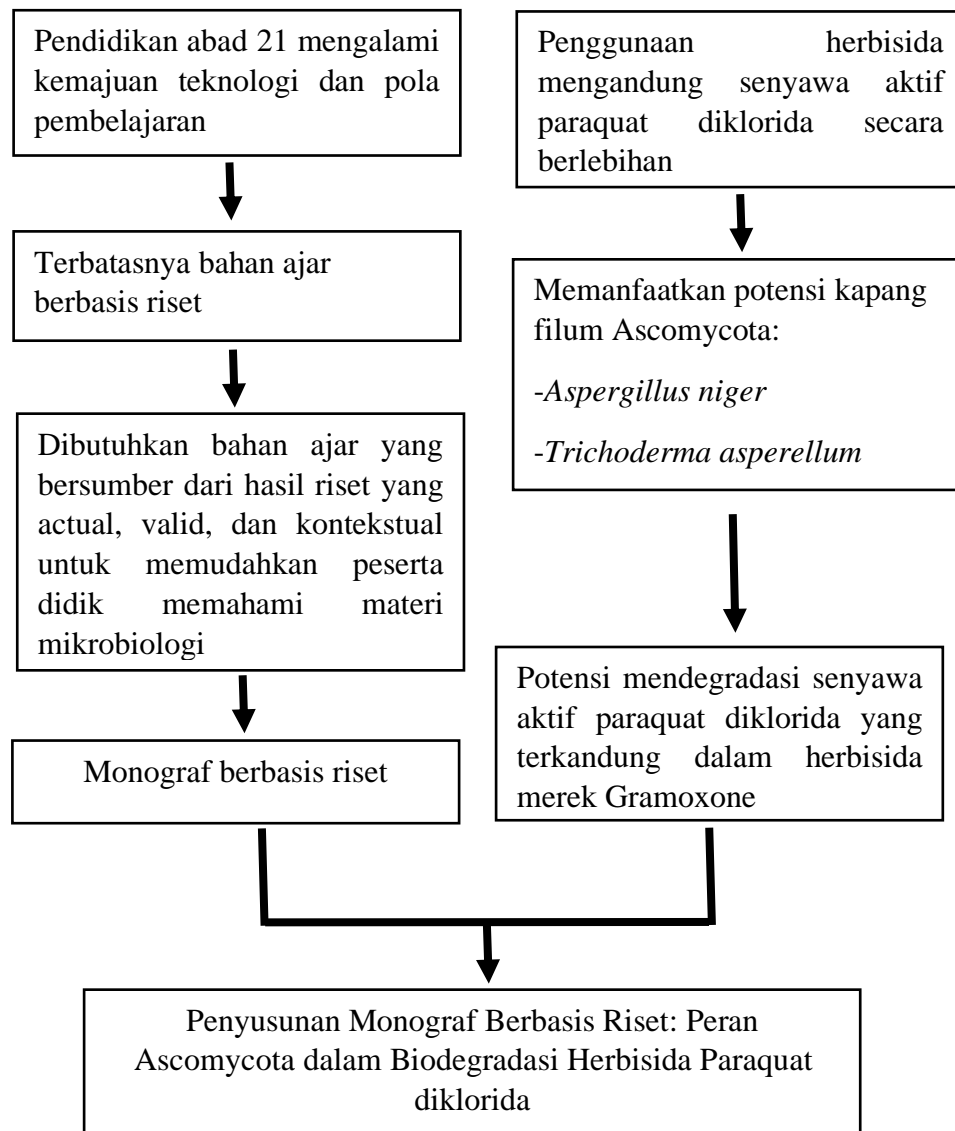
Mikroorganisme	Metode	Herbisida	Hasil	Ref
<i>Aspergillus niger</i>	Biodegradasi	Paraquat diklorida	<i>A.niger</i> mendegradasi herbisida paraquat pada konsentrasi 0,10% di hari ke-5	(Andy, 2017)
<i>Acinetobacter sp</i>	GC-MS		<i>Acinetobacter sp</i> mendegradasi paraquat sebesar 76,4%	(Eryah, 2021)
<i>Morganella sp.</i>	Screening isolate and Optical Density (OD)		<i>Morganella sp.</i> Mampu mendegradasi paraquat pada konsentrasi 400mg/L setelah 72 jam.	(Haruna et al., 2021)
<i>Achromobacter sp,</i>			<i>Achromobacter sp,</i> dapat	(AliyuTukur, 2023)

	HPLC		mendegradasi paraquat pada konsentrasi 276 mg/L setelah 48 jam.	
<i>Aspergillus parasiticus</i>		Isoproturon	<i>A.paracitus</i> mengurai 100% pada 20 mgL-1 setelah 5 hari	(Vroumsia et al., 2016)
<i>Ensifer meliloti</i>		Paraquat diklorida	<i>Ensifer meliloti</i> mampu bertahan dalam media yang mengandung paraquat pada konsentrasi 1400 ppm	(Widowati et al., 2017)
<i>Trichoderma sp.</i>	<i>In vitro</i>	Paraquat diklorida	<i>Trichoderma sp.</i> Mengurai paraquat pada konsentrasi 1500 ppm	(Majid et al., 2015)
<i>Rigidoporus sp. FMD21</i>	18S rRNA gene sequences	2,4-dichlorophen oxyacetic	<i>Rigidoporus sp.</i> FMD21 secara efektif mendegradasi 2,4-D setelah 6 hari	(T. L. A. Nguyen et al., 2022)
<i>Aspergillus niger</i>	Bioaugmentasi	Atrazine	<i>Aspergillus niger</i> menghasilkan biodegradasi atrazin sekitar 84% dalam 15 hari	(Olu-Arotiowa et al., 2019)
<i>Aspergillus niger</i>	GC-MS (<i>Gass chromatograp hy-mass spectroscopy</i>)	Clodinafop-propargyl	<i>Aspergillus niger</i> mendegradasi herbisida Clodinafop-propargyl hingga 96%.	(Farah Abd-Alrazzaq Abd. et al., 2023)
<i>Trichoderma sp.</i>		Topramezone	<i>Trichoderma sp.</i>	(Choudhury et al., 2019)

	LC-MS (<i>Liquid chromatography-mass spectroscopy</i>)		mendegradasi 85% topramezone dalam 30 hari.	
<i>Umbelopsis isabellina</i>		2,4-dichlorophen oxyacetic (2,4-D)	<i>Umbelopsis isabellina</i> mendegradasi 98% senyawa 2,4-D setelah 5 hari	(Nykiel-Szymańska et al., 2018)
<i>Trichoderma inhamatum</i>	<i>In vitro</i>	Glifosfat	Hasil penelitian menunjukkan bahwa <i>T. inhamatum</i> dapat tumbuh pada media dengan konsentrasi glifosfat 1,0 dan 10,0 mg/l.	(Kunanbayev, 2019)

C. Kerangka berpikir

Pendidikan abad 21 telah mengalami kemajuan teknologi dan pola pembelajaran, karena itu Pendidikan memerlukan bahan ajar bersumber dari hasil riset yang aktual, valid, dan kontekstual untuk memudahkan peserta didik dalam memahami materi mikrobiologi. Terutama dalam pemanfaatan mikroorganisme yaitu kapang dari filum Ascomycota sebagai agen biodegradasi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Hasil riset seperti studi tentang kemampuan *Aspergillus niger* dan *Trichoderma asperellum* dalam mendegradasi senyawa toksik seperti paraquat diklorida dapat memberikan wawasan aplikatif kepada peserta didik mengenai solusi bioteknologi terhadap permasalahan lingkungan. Selain itu, bahan ajar berbasis riset ini juga mampu menumbuhkan keterampilan berpikir kritis, analitis, dan kreatif yang selaras dengan tuntutan kompetensi abad 21.



Gambar 2. 8 Kerangka berpikir