

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Tanaman Pisang

Pisang (*Musa acuminata* L.) merupakan salah satu tanaman dari suku *Musaceae* yang sering dijumpai di berbagai wilayah di Indonesia dan memiliki nilai ekonomi yang tinggi. Tanaman pisang termasuk komoditas hortikultura penting karena buahnya dapat dikonsumsi langsung maupun diolah menjadi berbagai produk makanan. Berdasarkan sifatnya, tanaman pisang dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu pisang liar yang umumnya memiliki biji dan tidak layak konsumsi secara ekonomi, serta pisang budidaya atau pisang komersial (umumnya triploid) yang tidak berbiji dan dikembangkan secara luas untuk konsumsi masyarakat. Pisang komersial memiliki berbagai kultivar unggul seperti pisang Cavendish, Raja, Ambon, dan Barangan, yang telah menjadi komoditas ekspor utama ke berbagai negara di Asia dan Timur Tengah. Keunggulan agronomis, nilai gizi tinggi, dan adaptabilitasnya yang luas menjadikan pisang sebagai salah satu komoditas strategis dalam mendukung ketahanan pangan nasional. Selain itu, seluruh bagian tanaman pisang seperti daun, batang, dan jantungnya juga memiliki potensi untuk dimanfaatkan dalam bidang pangan, pakan, dan industri. Menurut penelitian oleh (Handayani et al., 2022), pengembangan agribisnis pisang di Indonesia berkontribusi signifikan terhadap peningkatan pendapatan petani dan potensi ekspor buah tropis unggulan.

Pisang merupakan buah yang kaya sumber vitamin, mineral dan karbohidrat. Buah pisang mampu menyediakan energi 88 kkal, karbohidrat 23 g, protein 1,2 g, dan lemak 0,2 g dari 100 g pisang. Selain itu, Pisang mengandung vitamin A yang penting untuk penglihatan, kekebalan tubuh, pertumbuhan, dan reproduksi, serta kaya akan mineral seperti kalium, magnesium, fosfor, dan zat besi, vitamin C, dan serotonin yang berperan sebagai neurotransmitter bagi fungsi otak (Nuzula et al., 2024).

Klasifikasi ilmiah genus *Musa* semula dibuat oleh Linnaeus pada tahun 1753. Taksonomi tanaman pisang dalam taksonomi tumbuhan adalah sebagai berikut (Colla, 1820) :

Kingdom : Plantae
 Divisi : Spermatophyta
 Sub Divisi : Angiospermae
 Kelas : Monocotyledonae
 Ordo : Zingiberales
 Famili : Musaceae
 Genus : *Musa*
 Spesies : *Musa acuminata*

Tanaman pisang dapat tumbuh subur di daerah tropik dataran rendah dan dataran tinggi yang memiliki curah hujan lebih dari 1250 mm tiap tahun dan memiliki temperatur rata-rata 28 °C dengan pH tanah 4,5–7,5 (Sirait, 2018). Perakaran dari tanaman pisang berbentuk menyebar atau memiliki akar serabut dan dangkal di bawah permukaan tanah sehingga memungkinkan tanaman pisang untuk mendapatkan banyak molekul organik. Akar dapat tumbuh menuju bawah sampai kedalam 75–150 cm sedangkan akar yang berada di bagian samping bisa mencapai 4–5 m. Tanaman pisang pada umumnya memiliki tinggi batang mencapai 2–2,5 m, memiliki daun tegak berbentuk lanset memanjang serta tidak memiliki tulang-tulang pinggir yang menguatkan lembaran daun. Meskipun tampak seperti batang, bagian yang sering disebut sebagai "batang" pada tanaman pisang sebenarnya merupakan kumpulan pelepah daun yang tersusun rapat membentuk batang semu (pseudo-stem), bukan batang sejati seperti pada tanaman berkayu. Bunga tanaman pisang pada akhir pertumbuhan vegetatif, batang pisang menghasilkan pertumbuhan memanjang untuk membentuk rangkaian bunga (Fakhriani, 2015). Buah pisang berasal dari perkembangan masing-masing bunga pisang, memiliki panjang buah sekitar 16–20 cm, buah yang berwarna hijau ketika belum matang dan

kekuningan ketika telah matang, dan memiliki daging buah yang berwarna putih kekuningan (Arifki & Barliana, 2019).

2.1.2 Kultivar Pisang Cavendish di Indonesia

Indonesia dan Asia Tenggara diketahui merupakan pusat asal-usul dan keberagaman *Musa* di dunia. Asia Tenggara, termasuk Indonesia, memiliki kondisi lingkungan yang hangat, lembap, serta curah hujan tinggi yang sangat mendukung pertumbuhan tanaman pisang, sehingga ditemukan varietas tanaman pisang yang beragam dan tersebar di banyak daerah. Beberapa varietas lokal yang populer antara lain pisang kepok, pisang awak, pisang ambon, pisang tanduk, pisang monyet, pisang renjang, dan lain-lain (Sirait, 2018; Poerba et al., 2018). Pisang budidaya atau komersial yang ada saat ini merupakan hasil evolusi dari kedua jenis nenek moyang pisang liar berbiji, *M. acuminata* dan *M. balbisiana*. Kedua spesies ini melalui proses domestikasi dan hibridisasi alami maupun buatan hingga menghasilkan kultivar tanpa biji yang dikonsumsi luas.

Untuk wilayah Asia, Indonesia termasuk negara penghasil pisang terbesar menyumbang sekitar 50% dari total produksi pisang di Asia (Zulkifli et al., 2023). Lampung merupakan salah satu sentra produksi pisang utama di Indonesia yang memasok buah ke berbagai daerah nusantara. Produksi buah pisang di Provinsi Lampung terhitung mencapai 173.037 buah pada tahun 2020 dan 240.075 buah pada tahun 2021 (Badan Pusat Statistik Lampung 2021: 1). Peningkatan ini mencerminkan pentingnya pisang sebagai komoditas pertanian unggulan daerah. Di antara berbagai jenis pisang, Pisang Cavendish memiliki nilai ekonomi yang lebih tinggi karena paling sering dijual secara komersial, baik di pasar domestik maupun internasional (Jamaluddin et al., 2019). Pisang ini merupakan salah satu varietas yang paling banyak diekspor oleh Indonesia, terutama ke pasar Timur Tengah, Jepang, dan Tiongkok.

Tanaman pisang Cavendish memiliki habitus semak besar (herba tahunan) dengan daun yang agak merunduk dan tersusun spiral. Batang semu memiliki tinggi sekitar 1,41 m dan diameter 16,24 cm, yang terbentuk

dari pelepah daun yang saling melingkar rapat. Pangkal daun melancip pada kedua sisi, memperlihatkan ciri khas morfologi pisang kultivar. Buahnya berbentuk melengkung dengan ujung yang tumpul dan tersusun dalam tandan padat. Kulit buah yang telah matang berwarna hijau kekuningan, sedangkan daging buah matang berwarna kuning muda, bertekstur lembut, dan memiliki rasa manis. Pisang Cavendish dikenal adaptif terhadap berbagai kondisi lingkungan dan memiliki daya simpan yang relatif baik, sehingga mendukung keberhasilannya sebagai komoditas ekspor unggulan (Gambar 2.1).



Gambar 2. 1 Morfologi tanaman pisang cavendish. (A): Habitus tanaman; (B): Tandan buah; (C): Bentuk buah; (D): Pangkal daun
(Sumber: Poerba et al., 2018)

2.1.3 Penyakit Layu Fusarium

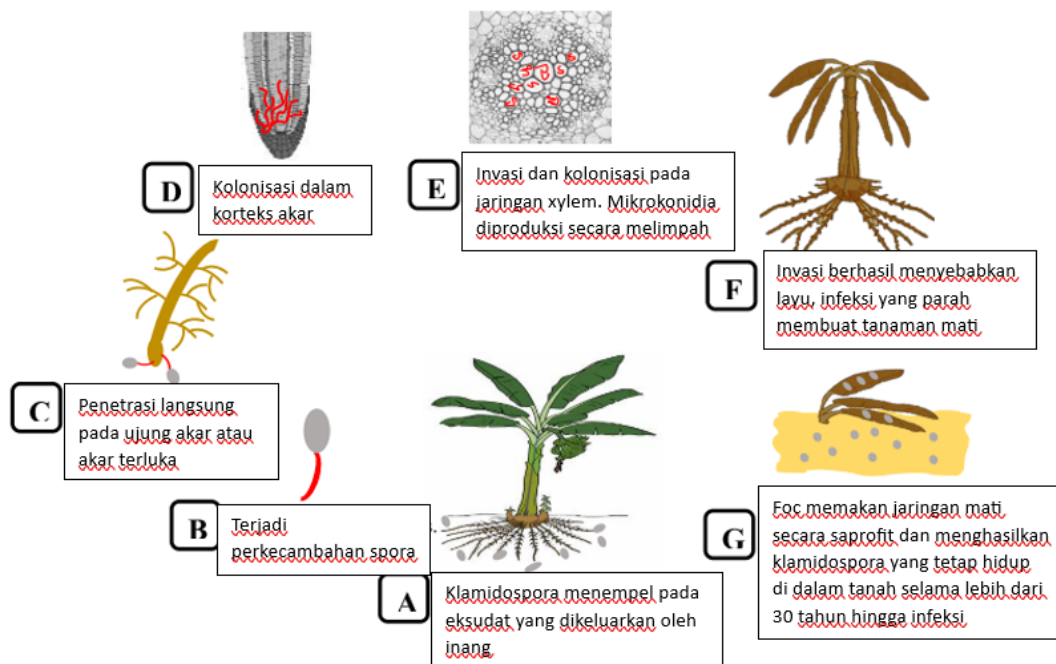
Indonesia memiliki nilai ekspor pisang *Cavendish* yang masih tergolong rendah apabila dibandingkan dengan negara ASEAN lainnya. Hal ini dikarenakan produktivitas dan pengembangan pisang *Cavendish* di Indonesia terkendala akibat serangan penyakit layu Fusarium (PLF). Sebagai contoh, sebanyak 1700 Ha lahan perkebunan pisang *cavendish* milik Nusantara Tropical Fruit (Lampung) mengalami kerusakan akibat adanya serangan *Foc* pada tahun 1995–2000, yang kemudian menyebar luas ke seluruh Indonesia pada tahun 2010. Thurston mengatakan bahwa PLF sudah menyerang pertanaman pisang di Indonesia sejak tahun 1984. Layu fusarium termasuk salah satu penyakit pada tanaman pisang yang paling merusak dan paling merugikan di dunia. Infeksi patogen ini menimbulkan bahaya dan ancaman terhadap penurunan produksi tanaman

(Martanti et al., 2015). Gejala yang ditumbulkan oleh PLF diantaranya daun bagian bawah (daun-daun tua) menguning dari bagian tepinya kemudian keseluruhan daun menguning dan layu, rebah pada pangkal tangkai daun (pelepah) (Gambar 2.2). Selain itu, jika bagian batang dibelah secara melintang atau membujur terlihat adanya bercak hitam hingga kemerahan, bonggol pisang berubah warna menjadi kecoklatan seperti busuk kering (Gambar 2.2C). Biasanya tanaman tidak akan berbuah dan akhirnya mati. Gejala PLF sering disalahartikan sebagai penyakit layu bakteri (*Blood Disease of Banana*), padahal gejala dan penyebabnya berbeda.

Penyakit PLF disebabkan oleh jamur patogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*) yang menginfeksi tanaman pisang dari dalam tanah. *Foc* termasuk patogen tular tanah dan dapat bertahan di dalam tanah hingga 30 tahun (Saptayanti, 2023). Patogen ini membentuk klamidospora dalam tanah sehingga penginfeksian *Foc* melalui akar lateral atau cabang-cabang pendek dari akar, kemudian melakukan penetrasi ke dalam jaringan pengangkutan dan berkembang luas di dalam xylem (Gambar 2.3). Hal ini menyebabkan pengendalian penyebaran penyakit tanaman layu *Fusarium* sulit untuk dilakukan. Terdapat kemungkinan bahwa beberapa sifat fisik, biokimia, dan biologi tanah mempengaruhi kecocokan dalam perkembangan PLF. Beberapa kultivar pisang Indonesia telah dipelajari dan dimanfaatkan dalam studi potensi ketahanannya terhadap serangan *Foc* ini (Martanti et al., 2015; Poerba et al., 2018; Sutanto et al., 2014).



Gambar 2. 2 Gejala penyakit akibat terserang PLF. (A): layu dan daun menguning; (B): nekrosis akar; (C): jaringan batang yang terserang PLF (Sumber: Saptayanti, 2023; Wong et al., 2019)



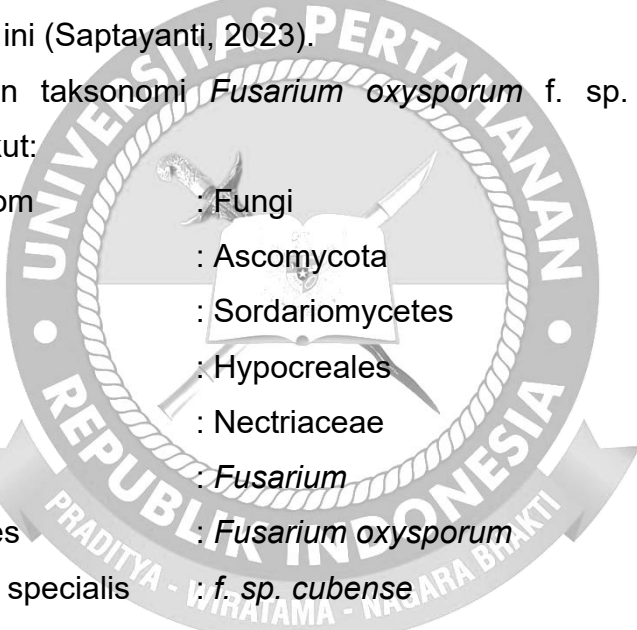
Gambar 2. 3 Mekanisme infeksi *Foc* pada tanaman pisang
(Sumber: Wong et al., 2019)

2.1.4 *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* (Foc)

Genus *Fusarium* diketahui untuk pertama kali sebagai *Fusisporium* oleh Link (1809). Genus *Fusarium* terdiri atas sekitar 70 spesies dan lebih dari 300 spesies belum diberi nama secara resmi. Anggota *Fusarium oxysporum* terdiri dari strain patogen dan nonpatogen. Terdapat pembagian menjadi bentuk khusus atau *formae speciales* (f. sp) pada strain kapang *Fusarium* patogen tanaman berdasarkan spesies tumbuhan yang diinfeksi. Hingga saat ini, diketahui terdapat sebanyak 150 *formae speciales* dari kapang *Fusarium oxysporum* (Fourie et al., 2011). Sebagian besar spesies yang tercatat umumnya bersifat patogenik terhadap tumbuhan maupun manusia (Nguvo & Gao, 2019). *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* (Foc) dibagi menjadi 4 ras patogen, yang diklasifikasikan menurut kemampuannya menyebabkan penyakit pada sekumpulan kultivar pisang yang berbesa. Ras 1 yang menghancurkan tanaman pisang pada epidemi 'Gros Michel' dan beberapa varietas lokal di Asia, 'Silk', 'Pome' AAB

dan 'Pisang Awak' ABB. Ras 2 menyerang pisang Bluggoe, pisang masak (ABB). Ras 3 menyerang *Heliconia* spp. (Pisang hias). Varian patogen yang baru, Tropical Race 4 (TR 4) merupakan ras paling ganas; banyak menyerang pisang Cavendish dan varietas lokal seperti pisang raja dikonfirmasi untuk pertama kalinya di luar Asia Tenggara, menyebar ke benua Afrika sehingga menjadi ancaman serius dalam budidaya tanaman pisang. Indonesia merupakan salah satu negara pertama yang terkena dampak TR4 ini (Saptayanti, 2023).

Adapun taksonomi *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*) sebagai berikut:



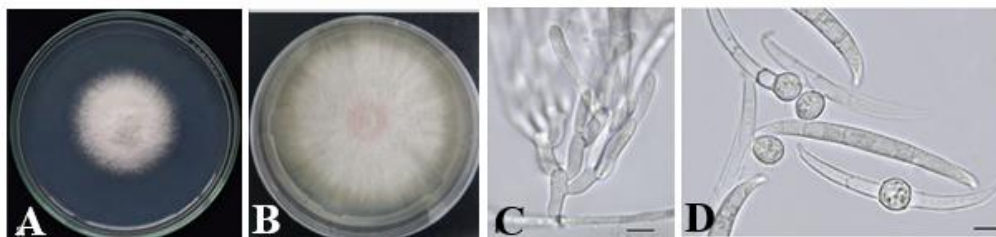
Kingdom	: Fungi
Divisi	: Ascomycota
Kelas	: Sordariomycetes
Ordo	: Hypocreales
Famili	: Nectriaceae
Genus	: <i>Fusarium</i>
Spesies	: <i>Fusarium oxysporum</i>
Forma specialis	: f. sp. <i>cubense</i>

Bentuk khusus atau *formae speciales cubense* (*Foc*) mengindikasikan bahwa patogen ini secara spesifik menyerang tanaman pisang (*Musa* spp.). Berdasarkan analisis molekuler dan studi filogenetik terbaru, diketahui bahwa *Foc* bukan merupakan kelompok monofiletik tunggal, melainkan terdiri atas beberapa garis keturunan yang secara independen berevolusi untuk menyerang pisang (Maryani et al., 2019; O'Donnell et al., 1998). Bahkan, varian TR4 yang sangat virulen baru-baru ini diusulkan untuk diklasifikasikan sebagai spesies tersendiri, yaitu *Fusarium odoratissimum*, berdasarkan perbedaan genomik dan sifat patogenisitasnya yang unik (Maryani et al., 2019).

Fusarium memiliki karakteristik koloni yang bervariasi baik dari segi warna, bentuk, tepi (margin), maupun teksturnya. Koloni *Fusarium* memiliki warna putih keunguan, oranye keputihan, atau putih kapas (Gambar 2.4).

Bentuk koloni dapat berupa tidak beraturan (*irregular*), teratur (*regular*), teratur dengan sektor (*regular sectored*), maupun teratur tanpa sektor (*regular non-sectored*). Margin koloni dapat berbentuk tidak beraturan (*irregular*), rata (*entire*), atau bergelombang. Tekstur koloni bervariasi antara berbulu (*cottony/floccose*) hingga rata (*flat*) (Nath et al., 2017).

Jamur *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*) diketahui mampu bertahan dan tumbuh pada berbagai kondisi lingkungan, dengan kisaran pH optimal antara 5 hingga 6, serta suhu pertumbuhan optimum berkisar 25–30 °C (Cruz et al., 2019). Sebagai patogen tular tanah, *Foc* mampu menginfeksi tanaman pisang dalam berbagai kondisi, terutama saat kelembaban tanah tinggi dan curah hujan meningkat, yang dapat mempercepat penyebaran spora dan proses infeksi akar tanaman (Zakqy et al., 2024).



Gambar 2. 4 *Fusarium oxysporum* TR-4. (A-B): Kultur pada medium PDA; (C): Percabangan konidiofor; (D); Klamidospora berkembang dari makrokonidium

(Sumber: Garcia-bastidas, 2022; Nani et al., 2023)

2.1.5 Potensi Mikroorganisme Sebagai Agen Biokontrol

Penggunaan mikroorganisme sebagai agen biokontrol didasarkan pada interaksi yang terjadi antara patogen dan mikroorganisme lainnya (Arwiyanto, 2014). Interaksi antar mikroorganisme di dalam tanah dapat bersifat menguntungkan (*sinergis*) maupun merugikan (*antagonis*) bagi tanaman (Yuhana, 2010). Interaksi *sinergis* terjadi ketika mikroorganisme bekerja sama tanpa saling bersaing dalam habitatnya. Di sisi lain, mikroorganisme juga dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme lain, seperti bakteri dengan cendawan patogen atau cendawan non patogen

dengan cendawan patogen (Aghna et al., 2019). Hal ini didukung melalui interaksi antagonis, yang melibatkan persaingan untuk mendapatkan ruang, udara, air, dan nutrisi. Sifat antagonisme bakteri yang mampu melawan pertumbuhan mikroorganisme patogen berpotensi untuk digunakan sebagai agen biokontrol untuk menekan penyakit pada tanaman. Dalam upaya pencegahan dan pengendalian penyakit, penggunaan bahan kimia seperti antibiotik, pestisida, dan zat kimia lainnya kini semakin dihindari. Hal ini disebabkan oleh kekhawatiran bahwa aplikasi bahan-bahan kimia tersebut dapat menyebabkan mikroorganisme patogen menjadi resisten, yang berpotensi menularkan sifat resistensi tersebut ke mikroorganisme lain. Selain itu, penggunaan bahan kimia dapat memberikan dampak negatif pada lahan pertanian, seperti penurunan kesuburan tanah, pencemaran air tanah, dan terganggunya keseimbangan mikroorganisme tanah, sehingga produknya tidak layak untuk dikonsumsi (Miranda et al., 2022).

Keuntungan menggunakan bakteri sebagai agen biokontrol antara lain karena bakteri mudah ditemukan di tanah, produksi massal bakteri lebih cepat dan lebih murah dibandingkan dengan mikroorganisme lain seperti jamur, serta tidak menyebabkan pencemaran lingkungan. Penggunaan agen biokontrol tidak hanya melindungi tanaman dari penyakit, tetapi juga mendukung pertumbuhan dengan meningkatkan populasi *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) di rizosfer, seperti pada pengendalian penyakit layu *Fusarium* pada pisang (Ahemad & Kibret, 2014; Mon et al., 2021; Newitt et al., 2019). Mikroorganisme sebagai agen biokontrol yang banyak dilaporkan adalah *Agrobacterium*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Trichoderma*, *Penicillium*, dan *Streptomyces*. Tabel 2.1 menunjukkan berbagai mikroorganisme yang telah di-isolasi dari beberapa bagian tanaman pisang untuk mengontrol PLF dalam beberapa tahun terakhir.

Tabel 2.1 Bakteri endofit yang digunakan pada pisang untuk mengendalikan PLF

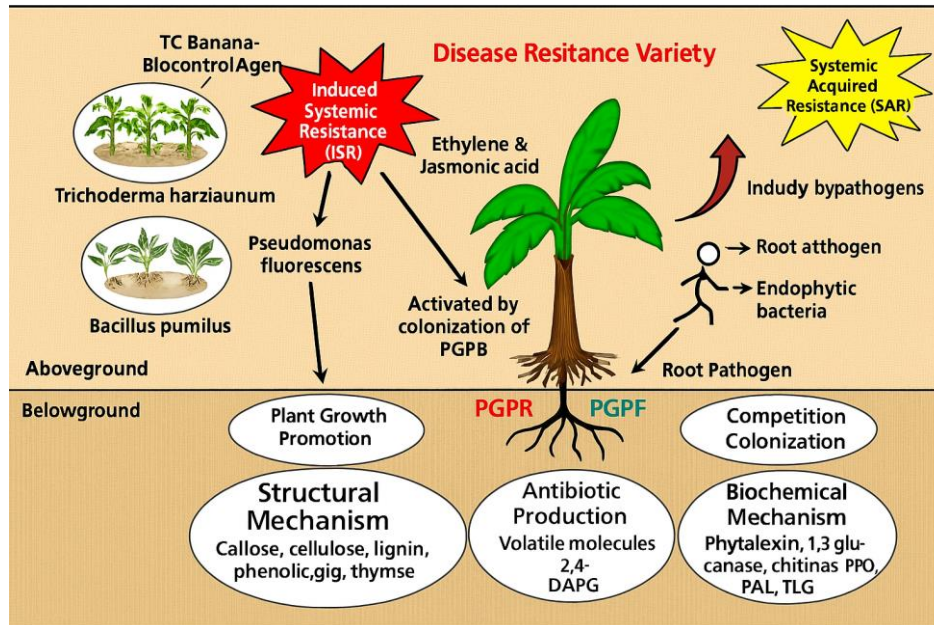
(Sumber: Mon et al., 2021)

No.	Bakteri Endofit	Asal Jaringan Isolasi	Referensi
1	<i>Streptomyces</i>	Permukaan steril akar	(Cao et al., 2005)
2	<i>Pseudomonas putida</i>		
3	<i>Achromobacter</i> sp		
4	<i>Rhizobium</i> sp	Akar dan jaringan umbi	(Raman & Muthukathan, 2015)
5	<i>Ochrobactrum</i> sp		
6	<i>Bacillus flexus</i>		
7	<i>B. cereus</i>		
8	<i>B. pumilus</i>		
9	<i>B. subtilis</i>		
10	<i>B. methlotrophicud</i>	Akar	(S. A. Souza et al., 2013)
11	<i>B. cereus</i>		
12	<i>Paenibacillus</i> sp		
13	<i>Klebsiella pneumoniae</i>		
14	<i>B. amyloliquefaciens</i>		
15	<i>B. subtilis</i> subsp <i>subtilis</i>	Fragmen Daun	(A. Souza et al., 2014)
16	<i>B. thuringiensis</i>		
17	<i>Pseudomonas</i> sp.	-	(Bubici et al., 2019)
18	<i>Trichoderma</i> sp.		

2.1.6 Mekanisme Antagonis Agen Biokontrol

Biokontrol merupakan salah satu metode alternatif dalam pengendalian hayati yang ramah lingkungan, efektif, ekonomis, serta bekerja secara spesifik terhadap target tanpa menimbulkan dampak negatif bagi kesehatan manusia maupun keseimbangan ekosistem. Biokontrol dilakukan dengan memanfaatkan mikroorganisme antagonis untuk menghambat atau menekan pertumbuhan organisme patogen melalui berbagai mekanisme, seperti infeksi langsung, kompetisi terhadap nutrisi dan ruang, atau produksi senyawa toksik seperti antibiotik dan enzim lisis (Le Hesran et al., 2019). Pemahaman terhadap mekanisme kerja antagonis dari bakteri endofit sangat penting, tidak hanya untuk efektivitas pengendalian penyakit, tetapi juga untuk menilai potensi risiko terhadap lingkungan, manusia, maupun kemungkinan timbulnya resistensi dari patogen target. Berbagai penelitian telah mengkaji peran mikroorganisme endofit dalam pengendalian hayati, khususnya dalam menekan patogen tular tanah. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5, agen pengendalian biologis menggunakan berbagai cara untuk menghambat patogen yang ditularkan melalui tanah, antara lain melalui: (1) Persaingan nutrisi, di mana mikroba antagonis memanfaatkan sumber daya lebih cepat sehingga patogen tidak dapat berkembang optimal; (2) Produksi antibiotik dan senyawa metabolit sekunder yang bersifat fungistatik atau fungisidal; (3) Mekanisme struktural, seperti gangguan pada dinding sel, penghambatan sintesis protein, kerusakan permeabilitas membran, serta gangguan sintesis DNA/RNA dan metabolisme sel patogen. Gangguan ini menyebabkan kerusakan integritas sel yang menghambat kelangsungan hidup patogen (Arifiyanto et al., 2020; Miranda et al., 2022) (4) Mekanisme biokimia melalui pengaruh senyawa eksudat akar yang memediasi aktivitas mikroba di zona perakaran (rizosfer) (5) Toleransi terhadap stres, yang diperoleh melalui peningkatan pertumbuhan akar dan ketahanan fisiologis tanaman terhadap lingkungan; serta (6) Induksi resistensi sistemik, aktivasi

sistem pertahanan tanaman secara internal terhadap serangan patogen (Ghorbanpour et al., 2018; Karlsson et al., 2017).



Gambar 2. 5 Mekanisme mikrobioma tanaman terhadap interaksi tanaman dengan mikroba yang menguntungkan
[Sumber: Mon et al., 2021]

Beberapa mikroorganisme antagonis dapat menginduksi resistensi pada tanaman terhadap penyakit tanpa harus berinteraksi langsung dengan patogen target (Conrath et al., 2015; Köhl et al., 2019; Pieterse et al., 2014). Mikroba menguntungkan lainnya bersaing dengan patogen untuk ruang dan nutrisi, sehingga melemahkan dan menghilangkan patogen dari tanaman (Spadaro & Droby, 2016). Beberapa mikroba antagonis melawan patogen melalui hiperparasitisme dengan menghasilkan senyawa seperti enzim atau metabolit lain dalam konsentrasi rendah selama interaksinya. Dalam mekanisme yang lain, antagonis dapat bertindak sebagai hiperparasitisme atau antibiosis, di mana mereka menyerang dan membunuh miselium, spora, serta struktur istirahat patogen jamur (Ghorbanpour et al., 2018). Beberapa antagonis juga menghasilkan metabolit sekunder antimikroba yang dapat menghambat efek negatif patogen. Antagonis tertentu menginduksi resistensi dengan menghasilkan rangsangan tertentu.

Misalnya, *Pseudomonas aeruginosa* yang diisolasi dari rizosfer pisang menunjukkan aktivitas antibiosis spektrum luas terhadap jamur penyebab layu dan nekrosis akar pada pisang (Ayyadurai et al., 2006). Beberapa bakteri antagonis mensintesis enzim perusak seperti kitinase, protease, selulase, atau β -glukanase yang menghancurkan struktur patogen dan akhirnya menghambat pertumbuhan miselium jamur (Wang et al., 2019).

Dalam kaitannya dengan resistensi, Fishal et al. mengamati bahwa enzim seperti peroksidase, fenilalanin amonia liase, dan asam lignitiolegolat, terlibat dalam Resistensi Sistemik yang Diinduksi (ISR), di mana resistensi hanya terinduksi setelah kolonisasi akar oleh bakteri (Fishal et al., 2010). Setelah kolonisasi, bakteri menghasilkan metabolit sekunder, senyawa volatil, dan enzim pertahanan seperti peroksidase (PO) yang terlibat dalam oksidasi substrat dan lignifikasi dinding sel, serta polifenol oksidase (PPO) yang dapat mengoksidasi senyawa fenolik menjadi kuinin, yang memainkan peran aktif dalam pengaturan metabolisme tanaman setelah infeksi. ISR oleh endofit penting dalam pengelolaan spektrum luas patogen tanaman pada berbagai spesies di lingkungan rumah kaca dan lapangan (Thangavelu et al., 2004).

Agen biokontrol juga memiliki kelebihan lain sebagai pemacu pertumbuhan tanaman (PGP) sehingga tanaman mendapatkan nutrisi dalam pertumbuhannya. Tanah di sekitar perakaran tanaman (rizosfer) mengandung banyak mikroba yang dapat merangsang pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme. Pertama, sebagai biostimulan, PGP membantu tanaman untuk memproduksi dan mengatur konsentrasi fitohormon seperti auksin, giberelin, etilen, dan sitokinin. Kedua, sebagai biofertilizer, PGP berperan dalam fiksasi dan penambatan nitrogen serta pelarutan fosfat. Ketiga, sebagai bioprotektan atau antagonis, PGP menghasilkan senyawa anti-patogen seperti siderofor, glukanase, kitinase, antibiotik, dan sianida yang dapat menghambat pertumbuhan patogen (Sayyed et al., 2019).

Fitohormon seperti IAA yang dihasilkan oleh rizobakteri dapat meningkatkan pertumbuhan akar lateral dan jumlah rambut akar, sehingga memperbaiki penyerapan unsur hara dalam tanah (Larosa et al., 2013). Biosintesis IAA di tanah dipicu oleh triptofan alami dari eksudat akar yang diubah oleh mikroba menjadi IAA (Kholida & Zulaika, 2015). Terdapat tiga tahapan konversi triptofan menjadi IAA: pertama, triptofan diubah menjadi asam indol piruvat melalui transaminasi; kedua, asam indol piruvat diubah menjadi indol asetaldehida melalui dekarboksilasi; dan ketiga, indol asetaldehida dioksidasi menjadi IAA.

Fosfat merupakan salah satu unsur penting bagi pertumbuhan tanaman, setelah nitrogen. Fosfat memiliki peran penting dalam berbagai proses metabolisme seperti fotosintesis, transfer energi, transduksi sinyal, biosintesis, dan respirasi (Sharma et al., 2013). Meskipun fosfat tersedia melimpah di tanah dalam bentuk organik maupun anorganik, sebagian besar fosfat anorganik berbentuk mineral yang tidak larut, sehingga sulit diserap langsung oleh akar tanaman. Beberapa jenis PGPR memiliki kemampuan melarutkan fosfat, sehingga meningkatkan ketersediaan fosfat di tanah dan memudahkan akar tanaman untuk menyerapnya. Biofertilizer yang mengandung PGPR pelarut fosfat diketahui dapat meningkatkan ketersediaan fosfat, baik organik maupun anorganik, bagi tanaman (Prasad et al., 2015; Vejan et al., 2016).

2.1.7 *Paenibacillus* sp.

Paenibacillus sp. diketahui sebagai salah satu genus bakteri yang banyak dimanfaatkan sebagai agen biokontrol. *Paenibacillus polymyxa* merupakan salah satu bakteri endofit yang terdapat pada tanaman padi dan berpotensi sebagai agensia pengendali hayati penyakit pada tanaman padi (Jannah et al., 2023). *Paenibacillus polymyxa* termasuk golongan bakteri antagonis yang bisa digunakan sebagai agen pengendali beberapa jenis penyakit pada tanaman pangan dan hortikultura serta menghasilkan antibiotik polimiksin yang memiliki daya hambat terhadap aktivitas mikroorganisme lain (Kantikowati et al., 2018). Kemampuan bakteri P.

polymyxa untuk mengurangi serangan penyakit pada tanaman berkaitan dengan kemampuannya untuk menghasilkan beberapa enzim seperti kitinase dan β -1,3 glukonase (Nurosid et al., 2018) yang memiliki sifat antifungi sehingga mampu untuk menghidrolisis struktur β -glukan pada dinding sel jamur. Hidrolisis struktur tersebut mengakibatkan dinding sel jamur menjadi lemah, sel lisis dan kemudian mati (Sutama et al., 2015).

Taksonomi *Paenibacillus* pertama kali dikemukakan oleh Ash tahun 1993, dimana pertama kali memisahkan genus *Paenibacillus* dari *Bacillus*, berdasarkan studi filogenetik 16S rRNA (Ash et al., 1993).

Kingdom : Bacteria
 Divisi : Firmicutes
 Kelas : Bacili
 Ordo : Bacillales
 Famili : Paenibacillaceae
 Genus : *Paenibacillus*

2.1.8 *Streptomyces* sp.

Di antara beberapa kelompok mikroba, aktinomisetes merupakan mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk memperbaiki pengembangan pertanian yang berkelanjutan (Johansson et al., 2004). Actinomycetes merupakan bagian utama dari populasi mikroba yang hidup di tanah. Mikroorganisme ini bersifat aerobik dan memiliki miselia, yang berperan penting dalam siklus nutrisi tanah (Franco-Correa et al., 2010). Aktinomisetes juga istimewa karena mampu menghasilkan berbagai senyawa aktif seperti antibiotik, faktor pertumbuhan tanaman, antioksidan, herbisida, pestisida, antiparasit, serta enzim selulase dan xilanase (Mustafa et al., 2004). Diperkirakan hampir 80% antibiotik di dunia berasal dari Actinomycetes, terutama dari genus *Streptomyces* dan *Micromonospora* (Sapkota et al., 2020). *Streptomyces* sp. merupakan salah satu bakteri dari kelas Actinomycetes yang dapat ditemukan pada organisme laut dan daratan. Genus *Streptomyces* dikelompokkan sebagai bakteri gram positif, tidak tahan asam, memiliki hifa udara (aerial hyphae) yang bersekat, dan

bersifat katalase (Sari et al., 2012). Bakteri *Streptomyces* diketahui mampu menghasilkan antibiotic dan enzim hidrolitik ekstraseluler seperti enzim kitinase dan β 1,3-glukanase (Minas et al., 2000). *Streptomyces* dapat menghasilkan senyawa metabolit sekunder yang berpotensi sebagai antifungi dan antibakteri untuk mikroorganisme patogen. Mengingat kemampuan genus ini dalam menghasilkan metabolit sekunder sebagai antimikroba yang kuat serta dapat menghasilkan *Plant Growth Promotion* (PGP) dalam kondisi lingkungan yang ekstrim, yang menjadikan bakteri *Streptomyces* pilihan tepat untuk dijadikan agen biokontrol yang dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dan melindungi dari penyakit (Newitt et al., 2019).

Streptomyces pertama kali dideskripsikan oleh Waksman dan Henrici (1943) berdasarkan karakteristik morfologi dan metabolit sekundernya, termasuk kemampuannya menghasilkan antibiotik. Namun, berdasarkan pendekatan filogenetik 16S rRNA dan data molekuler, dimuat dalam Buku *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, Volume 5: The Actinobacteria* (Wolfgang & Jean, 2012) sebagai berikut.

Kingdom	: Bacteria
Divisi	: Aktinobakteri
Kelas	: Aktinobakteri
Ordo	: Streptomycetales
Famili	: Streptomycetaceae
Genus	: <i>Streptomyces</i>

2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Adapun ringkasan penelitian-penelitian relevan yang dijadikan sumber referensi terkait kajian dalam penelitian ini yang dilakukan, dapat dilihat pada tabel berikut.

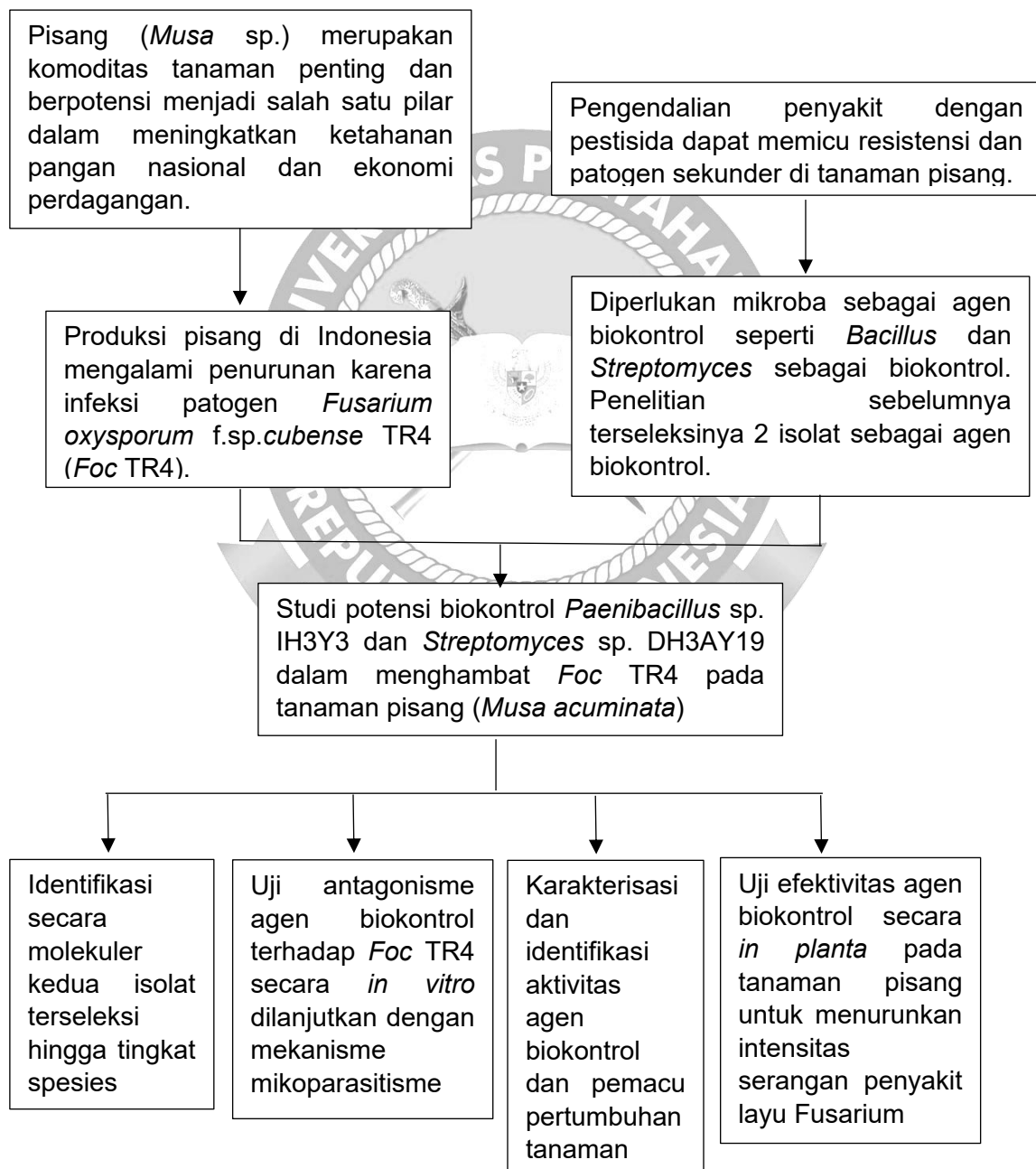
Tabel 2.2 Penelitian terdahulu tentang uji potensial agen biokontrol pada patogen *Fusarium oxysporum*

No.	Penulis	Hasil
1.	(Muhammad, S. S., Avianto, Y., Anindita, N. S., & Nugraheni, 2023)	Potensi bakteri endofit dari tanaman cabai dan batang ketimun menunjukkan bahwa bakteri endofit menunjukkan pengaruh yang lebih baik pada perkembangan tanaman dibandingkan dengan tanaman yang telah diinokulasikan jamur <i>Fusarium</i> . Oleh karena itu, bakteri endofit berpengaruh pada pertumbuhan tanaman cabai baik pada saat persemaian maupun pada tahap pindah tanam sampai fase vegetatif tanaman cabai.
2.	(Suwarno & Masnilah, 2020)	<i>Bacillus</i> sp. mampu menekan pertumbuhan patogen <i>F. oxysporum</i> melalui uji antagonis secara <i>in vitro</i> dengan presentase daya hambat terbaik sebesar 30% dan juga berpotensi sebagai agen pengendali hayati pada tanaman melon dalam menekan patogen <i>F. oxysporum</i> ditunjukkan hasil terbaik dengan nilai keparahan penyakit terendah 23,75%

No.	Penulis	Hasil
3.	(Zakqy et al., 2024)	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi bakteri <i>Bacillus</i> spp dan dosis berpengaruh terhadap penekanan intensitas patogen <i>Fusarium</i> sp. pada tanaman cabai dengan parameter fase vegetatif yaitu tinggi tanaman dan jumlah daun. Namun, kombinasi <i>Bacillus</i> spp. dan dosis menunjukkan bahwa parameter fase generatif tidak berpengaruh nyata terhadap kemunculan bunga pertama dan berat basah buah.
4.	(Ho et al., 2015)	<i>Bacillus cenocepacia</i> endofit menurunkan insiden penyakit layu <i>Fusarium</i> pada tanaman pisang. Lebih jauh pertumbuhan tanaman pisang yang diinokulasikan bakteri endofit yang signifikan diamati dalam percobaan lapangan. <i>Bacillus cenocepacia</i> menghasilkan potensial pyrrolnitrin dan pyrroloquinoline quinone sebagai agen biokontrol dalam pengendalian hayati layu <i>Fusarium</i> dan pertumbuhan tanaman.
5.	(Suryaminarsih et al., 2019)	Hasil penelitian menunjukan semua isolat <i>Streptomyces</i> sp. yang digunakan sebagai agen hayati dapat mengendalikan lalat buah <i>Bactrocera</i> sp. dan berpotensi sebagai PGPR untuk tanaman tomat dan cabai

2.3 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir dalam penelitian ini dijabarkan dalam Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2. 6 Kerangka Berpikir