

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanaman karet (*Hevea brasiliensis*) merupakan salah satu komoditas perkebunan utama di Indonesia yang memiliki nilai ekonomi tinggi. Namun, produktivitas tanaman karet dalam beberapa tahun terakhir mengalami penurunan, salah satunya disebabkan oleh serangan penyakit gugur daun yang disebabkan oleh jamur *Pestalotiopsis* sp. Penyakit gugur daun *Pestalotiopsis* (PGDP) pertama kali dilaporkan di Indonesia pada tahun 2016 di wilayah Sumatera Utara, dan telah menyebar ke berbagai sentra perkebunan karet seperti Sumatera Selatan, Jambi, Riau, dan Kalimantan. Penyakit ini menyerang daun karet yang menyebabkan pengguguran tajuk secara masif dan berdampak pada penurunan produksi lateks hingga mencapai 45% (Pusat Penelitian Karet, 2018).

Mikroorganisme antagonis seperti *Trichoderma* sp. telah dikenal luas sebagai agen hayati yang efektif dalam pengendalian berbagai penyakit tanaman. Menurut Syamsafitri *et. al.*, (2023), menyatakan bahwa peran *Trichoderma* sp. sangat besar dalam menjaga kesuburan tanah dan menekan populasi jamur patogen, sehingga *Trichoderma* sp. berpotensi sebagai kompos aktif dan sebagai agen pengendali organisme patogen. Kemampuan antagonis *Trichoderma* sp. dalam menekan pertumbuhan jamur patogen ini diduga berkaitan erat dengan produksi metabolit sekunder yang memiliki aktivitas antifungi. Metabolit sekunder yang dihasilkan oleh *Trichoderma* sp. dapat berupa senyawa volatil maupun non-volatil yang mampu menghambat pertumbuhan, sporulasi, dan viabilitas patogen target. Dalam konteks pengendalian penyakit gugur daun yang disebabkan oleh *Pestalotiopsis* sp. pada tanaman karet (*Hevea brasiliensis*),

pemanfaatan metabolit sekunder *Trichoderma* sp. dapat menjadi alternatif pengendalian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, mengingat semakin meningkatnya resistensi patogen terhadap fungisida sintetik dan kebutuhan akan praktik pertanian yang lebih sustainable.

Jamur *Pestalotiopsis* sp. sebagai patogen penyebab PGDP mampu menginfeksi seluruh fase pertumbuhan daun, termasuk daun muda hingga tua. Penyakit ini sangat cepat berkembang pada kondisi kelembaban tinggi, curah hujan yang tinggi, dan suhu optimal sekitar 25–28°C. Upaya pengendalian penyakit ini umumnya dilakukan melalui praktik budidaya sehat, pemupukan berimbang, pengurangan beban sadap, serta penggunaan fungisida sistemik seperti difenokonazol dan mankozeb. Namun, efektivitasnya masih terbatas dan tidak selalu konsisten di lapangan, mengingat jamur ini mampu bertahan di sisa-sisa daun yang terinfeksi dan menyebar melalui percikan air hujan (Kusdiana *et al.*, 2022).

Indonesia memiliki potensi untuk menjadi produsen karet terbesar di dunia, mengingat negara pesaing utama seperti Thailand dan Malaysia menghadapi keterbatasan lahan untuk pengembangan. Namun, Indonesia juga menghadapi beberapa tantangan dalam pengembangan karet, termasuk rendahnya produktivitas, khususnya pada karet rakyat yang mencakup mayoritas areal karet nasional. Ragam produk olahan karet pun masih terbatas, dengan dominasi karet remah (*crumb rubber*). Rendahnya produksi dan produktivitas karet rakyat disebabkan oleh banyaknya areal yang sudah tua, rusak, dan tidak produktif, serta penggunaan bibit yang bukan klon unggul. Meski demikian, Indonesia memiliki potensi sumber daya yang memadai untuk meningkatkan produksi dan

produktivitas karet, baik melalui pengembangan areal baru maupun peremajaan areal tanaman karet tua dengan menggunakan klon-klon unggul (Rukmana, 2018).

Pengendalian penyakit gugur daun secara konvensional umumnya menggunakan fungisida kimiawi yang meskipun efektif, namun dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia jika digunakan dalam jangka panjang. Selain itu, penggunaan fungisida secara terus-menerus juga dapat menyebabkan timbulnya resistensi patogen (Purnomo *et al.*, 2019). Oleh karena itu, diperlukan upaya pengendalian alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya adalah dengan menggunakan agen hayati berbasis mikroorganisme antagonis seperti *Trichoderma sp.*

Trichoderma sp. dikenal sebagai salah satu agen hayati unggulan karena mampu menghasilkan berbagai senyawa metabolit sekunder, seperti gliotoksin, peptaibol, dan viridin yang bersifat antimikroba. Metabolit-metabolit tersebut berperan dalam menekan pertumbuhan patogen melalui mekanisme antibiosis, kompetisi ruang dan nutrisi, serta mikoparasitisme (Hermosa *et al.*, 2012). Selain itu, *Trichoderma sp.* juga memiliki kemampuan untuk merangsang pertumbuhan tanaman dan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan patogen melalui induksi ketahanan sistemik (Verma *et al.*, 2007).

Dengan mempertimbangkan potensi tersebut, penting dilakukan penelitian untuk mengkaji lebih lanjut efektivitas metabolit sekunder dari *Trichoderma sp.* dalam menghambat pertumbuhan *Pestalotiopsis sp.* pada tanaman karet secara *in vitro*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan teknologi pengendalian hayati yang efisien, ramah lingkungan,

dan aplikatif di lapangan, serta menjadi dasar untuk formulasi biofungisida yang dapat digunakan dalam sistem pertanian berkelanjutan (Setiawan *et al.*, 2022).

Berdasarkan uraian di atas penulis ingin melakukan penelitian mengenai **“Potensi Metabolit Sekunder (*Trichoderma* sp.) dalam Mengendalikan Penyakit Gugur Daun (*Pestalotiopsis*) pada Tanaman Karet (*Hevea brasiliensis*) di Laboratorium”**.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui potensi metabolit sekunder (*Trichoderma* sp.) dalam mengendalikan penyakit gugur daun (*Pestalotiopsis*) pada tanaman karet (*Hevea brasiliensis*) di laboratorium.

1.3 Hipotesis Penelitian

Hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah diduga ada potensi metabolit sekunder (*Trichoderma* sp.) dalam mengendalikan penyakit gugur daun (*Pestalotiopsis*) pada tanaman karet (*Hevea brasiliensis*) di laboratorium.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana S-1 di Fakultas Pertanian Universitas Islam Sumatera Utara, Medan.
2. Sebagai bahan informasi bagi pihak yang membutuhkan dalam pengendalian penyakit gugur daun dengan menggunakan metabolit sekunder (*Trichoderma* sp.).

II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Klasifikasi Tanaman Karet (*Hevea brasiliensis*)

Tanaman karet (*Hevea brasiliensis*) berasal dari negara Brazil. Tanaman ini merupakan sumber utama bahan tanaman karet alam dunia. Jauh sebelum tanam karet ini dibudidayakan, penduduk asli diberbagai tempat seperti; Amerika Serikat, Asia dan Afrika Selatan menggunakan pohon lain yang juga menghasilkan getah. Getah yang mirip lateks juga dapat diperoleh dari tanaman *Castilla elastica* (*family moraceae*). Sekarang tanaman tersebut kurang dimanfaatkan lagi getahnya karena tanaman karet telah dikenal secara luas dan banyak dibudidayakan. Sebagai 4 penghasil lateks tanaman karet dapat dikatakan satu satunya tanaman yang dikedunkan secara besar-besaran (Budiman, 2012).

Kingdom : *Plantae*

Divisi : *Spermatophyta*

Kelas : *Dicotyledonae*

Ordo : *Euphorbiales*

Famili : *Euphorbiaceae*

Genus : *Hevea*

Spesies : *H.brasiliensis*. (Sumber: Anwar, 2018)

2.2 Morfologi Tanaman Karet

Tanaman karet memiliki beberapa bagian morfologi penting, yaitu:

2.2.1 Akar

Tanaman karet memiliki sistem perakaran tunggang dengan akar utama yang kuat dan dapat mencapai kedalaman 6-8 meter (Priyadarshan, 2017). Akar-akar lateral menyebar luas di permukaan tanah.

2.2.2 Batang

Batang tanaman karet berbentuk lurus dan silindris, dapat mencapai tinggi 20-30 meter dengan diameter batang 30-60 cm pada umur produktif (Langenberger *et al.*, 2009). Kulit batang berwarna kelabu dengan permukaan tidak rata.

2.2.3 Daun

Daun karet majemuk dengan 3 anak daun berbentuk elips memanjang, panjang 10-15 cm, lebar 4-6 cm, dan memiliki tangkai daun yang panjang (Priyadarshan, 2017).

2.2.4 Bunga

Bunga karet muncul di ketiak daun, berbentuk malai dengan bunga jantan dan betina dalam satu tandan (Langenberger *et al.*, 2009). Bunga berwarna kuning kehijauan.

2.2.5 Buah

Buah karet berbentuk kapsul yang terdiri dari 3 ruang, masing-masing berisi 1 biji (Priyadarshan, 2017). Buah masak ditandai dengan pecahnya kapsul dan keluarnya biji.

2.3 Syarat Tumbuh Tanaman Karet

Tanaman karet membutuhkan persyaratan iklim dan tanah yang spesifik untuk dapat tumbuh dan berproduksi dengan optimal, antara lain:

2.3.1 Iklim

Tanaman karet menghendaki iklim tropika basah dengan curah hujan merata sepanjang tahun, suhu rata-rata 25-34°C, dan kelembaban udara 70-90% (Priyadarshan, 2017).

2.3.2 Tanah

Tanaman karet tumbuh baik pada tanah-tanah subur, dalam, dan berdrainase baik dengan pH 4,5-6,5 (Priyadarshan, 2017). Jenis tanah yang sesuai antara lain Ultisol, Inceptisol, dan Oxisol. Bahan organik mempunyai muatan negatif yang besar sehingga dapat menjerap hara yang diberikan maupun hasil dari pelapukan mineral dan bahan organik yang ada (Siregar, D. 2016).

2.4 Klasifikasi Penyakit Gugur Daun (*Pestalotiopsis* sp.)

Penyakit gugur daun pada tanaman karet (*Hevea brasiliensis*) disebabkan oleh cendawan patogen dari genus *Pestalotiopsis*.

Kingdom : *Fungi*

Phylum : *Ascomycota*

Class : *Sordariomycetes*

Ordo : *Xylariales*

Family : *Amphisphaeriaceae*

Genus : *Pestalotiopsis* sp. (Maharachchikumbura *et al.*, 2014).

Cendawan *Pestalotiopsis* sp memiliki bentuk aseksual dan seksual. Bentuk aseksual dari cendawan *Pestalotiopsis* sp adalah piknidium, sedangkan seksualnya adalah peritisiium. Namun yang sering ditemukan di lapangan adalah dalam bentuk piknidium yang terdapat di balik epidermis daun.

Cendawan *Pestalotiopsis* sp. memiliki ciri makroskopis koloni berwarna putih dengan miselium merata, pertumbuhan koloni rata dan tebal. Ciri mikroskopinya adalah hifa berwarna putih dan memiliki tubuh buah yang disebut aservuli yang terletak di bawah epidermis tanaman inang. Di dalam aservuli terdapat konidia yang bersekat 2-5 dengan dinding tebal. Konidia berbentuk

lonjong yang agak meruncing pada kedua ujungnya. Pada salah satu ujung konidia terdapat seperti bulu cambuk berjumlah 3 atau 5.

2.4.1 Gejala Serangan Penyakit Gugur Daun (*Pestalotiopsis* sp.)

Gejala awal penyakit ditandai dengan adanya bercak-bercak nekrotik berwarna kuning pada daun seperti gejala klorosis pada bagian sisi bawah daun, paling utama pada ujung daun yang sudah tua. Bercak nekrotik ini dapat menyatu membentuk bercak yang lebih luas atau besar dengan batas bercak berwarna coklat agak kemerah-merahan, pusat bercak tampak menebal berwarna abu-abu kehijauan. Pada pusat bercak terdapat bintil-bintil hitam yang terdiri dari badan buah (*aservulus*) jamur patogen. Infeksi juga dapat terjadi pada batang, bila intensitas serangan tinggi maka daunnya terserang gugur sebelum waktunya, pada serangan yang lebih lanjut bibit menjadi kuning. Penyakit bercak merah disebabkan oleh cendawan patogen *Pestalotiopsis* sp. (Hidayah *et al.*, 2015).

Gejala serangan *Pestalotiopsis* sp. ditandai adanya bercak-bercak kecil pada daun yang berwarna abu-abu dan berbuah menjadi coklat gelap pada stadium lanjut, dengan bentuk oval dan tidak beraturan (10-50 mm). Pengendalian *Pestalotiopsis* sp. di kebun lingkup PT. Perkebunan Nusantara III (persero) sudah dilakukan secara pengabutan (fogging) menggunakan fungisida Anvil 50 SC sesuai dengan dosis anjuran (Balai Penelitian Sungai Putih, 2020).

2.4.2 Faktor yang Mempengaruhi Penyakit Gugur Daun

a. Faktor Iklim

Perkembangan penyakit gugur daun (*Pestalotiopsis* sp.) pada tanaman karet dipengaruhi oleh kondisi iklim, terutama curah hujan, suhu, dan kelembaban. Curah hujan yang tinggi dan distribusi merata sepanjang tahun dapat

meningkatkan infeksi dan perkembangan penyakit (Situmorang *et al.*, 2021). Suhu optimum bagi perkembangan *Pestalotiopsis* berkisar antara 25-30°C, sedangkan kelembaban yang tinggi (70-90%) juga mendukung proses infeksi dan sporulasi patogen (Izzati & Abdullah, 2008).

b. Faktor Tanah

Karakteristik tanah juga berpengaruh terhadap perkembangan penyakit gugur daun. Tanaman karet yang ditanam pada tanah-tanah yang subur, gembur, dan memiliki drainase yang baik cenderung lebih tahan terhadap serangan *Pestalotiopsis* dibandingkan tanaman yang tumbuh pada tanah marginal (Priyadarshan, 2017). Hal ini diduga terkait dengan kondisi perakaran dan ketahanan tanaman terhadap cekaman.

c. Faktor Genetik Tanaman

Varietas dan klon tanaman karet memiliki tingkat ketahanan yang berbeda-beda terhadap penyakit gugur daun. Beberapa klon unggul yang dilaporkan lebih tahan terhadap *Pestalotiopsis* antara lain PB 260, RRIC 100, dan IRR 112 (Situmorang *et al.*, 2022).

d. Faktor Budidaya

Praktik budidaya tanaman karet juga dapat mempengaruhi perkembangan penyakit gugur daun. Pemupukan yang tidak berimbang, jarak tanam yang terlalu rapat, serta sanitasi kebun yang buruk dapat menciptakan kondisi lingkungan yang kondusif bagi infeksi dan penyebaran *Pestalotiopsis* (Situmorang *et al.*, 2021).

2.5 Penyakit Gugur Daun (*Pestalotiopsis sp.*) pada Tanaman Karet

Penyakit Gugur Daun (PGD) yang disebabkan oleh jamur *Pestalotiopsis sp.* merupakan salah satu penyakit utama yang menyerang tanaman karet (*Hevea*

brasiliensis), khususnya di wilayah tropis seperti Indonesia. Serangan patogen ini menyebabkan daun mengalami bercak nekrotik yang pada akhirnya menyebabkan pengguguran daun secara masif. Akibatnya, produktivitas tanaman menurun secara signifikan, bahkan dapat menyebabkan kerugian hasil lateks hingga 45% (Pusat Penelitian Karet, 2018). Penyakit ini pertama kali dilaporkan di Indonesia pada tahun 2016 dan terus meluas ke berbagai sentra perkebunan karet lainnya di Sumatera dan Kalimantan.

Jamur *Pestalotiopsis* sp. tergolong sebagai patogen yang berkembang cepat dalam kondisi lingkungan yang lembap dan suhu hangat. Sporulasi patogen ini terjadi optimal pada kelembapan di atas 80% dan suhu 25–28°C. PGD menjadi lebih sulit dikendalikan karena penyebarannya yang sangat cepat melalui percikan air hujan dan kemampuannya bertahan pada jaringan tanaman yang terinfeksi (Kusdiana *et al.*, 2022).



Gambar 3.1 Daun Karet Terserang *Pestalotiopsis* sp.
Sumber : Isolasi Penelitian, 2025.

2.6 Metabolit Sekunder

Metabolit sekunder adalah senyawa yang dihasilkan oleh organisme atau mikroba dan dibuang karena tidak secara langsung berperan dalam pertumbuhan,

perkembangan, dan reproduksi mereka (Soesanto *et al.*, 2020). Menurut Nurhayati *et al.*, (2022), metabolit sekunder merupakan senyawa yang berasal dari biosintesis turunan metabolit primer yang terbentuk dalam kondisi stres atau cekaman. Senyawa ini berfungsi sebagai pertahanan terhadap lingkungan dan serangan organisme lain, tetapi tidak berperan dalam pertumbuhan organisme itu sendiri.

Umumnya, metabolit sekunder terbentuk pada tahap akhir pertumbuhan dan merupakan sisa metabolisme yang tidak diperlukan untuk kehidupan organisme. Contohnya termasuk antibiotika, enzim, hormon, dan toksin. Kelebihan dari penggunaan metabolit sekunder adalah kemudahannya aplikasinya dalam berbagai cara dan kondisi, karena tidak terpengaruh oleh perbedaan lokasi dan iklim (Soesanto, 2015).

Lebih lanjut, Soesanto (2015) menyatakan bahwa peran metabolit sekunder dapat bersifat tunggal, artinya hanya satu jenis metabolit sekunder yang berfungsi. Namun, sering kali metabolit sekunder berperan ganda, baik secara aditif maupun sinergis. Hal ini terlihat dari aplikasi metabolit sekunder yang tidak hanya mengendalikan organisme pengganggu tanaman (OPT) tetapi juga berpengaruh pada pertumbuhan tanaman itu sendiri. Metabolit sekunder juga mampu menjangkau keberadaan OPT di dalam jaringan tanaman melalui berbagai mekanisme yang sesuai dengan kandungan dalam metabolit tersebut.

2.6.1 Metabolit Sekunder *Trichoderma* sp.

Banyak OPT pada perkebunan yang sulit diatasi dengan metode kimia maupun non-kimia, karena keberadaannya dalam jaringan tanaman seringkali sulit

terdeteksi. Selain itu, metode kimia atau non-kimia umumnya bersifat tunggal, sehingga kurang efektif dalam mengendalikan OPT tersebut (Soesanto, 2019).

Penggunaan mikroba antagonis dianggap sebagai strategi pengendalian yang lebih baik dan ramah lingkungan, meskipun masih memerlukan penelitian lebih lanjut untuk aplikasi yang efektif di lapangan. Salah satu agen hayati yang dapat digunakan adalah *Trichoderma spp.*, yang merupakan jamur antagonis yang umum digunakan untuk mengendalikan jamur patogen pada tanaman. Sukamto (2020) menjelaskan bahwa meskipun pengendalian dengan *Trichoderma spp.* pada tanaman kakao tidak seefektif fungisida tembaga, penerapannya penting untuk menghindari pencemaran lingkungan dan mendukung produksi organik.

Mekanisme antagonis dari jamur ini meliputi parasitisme, lisis, antibiosis, dan kompetisi ruang (Soesanto *et al.*, 2020). Selain dapat digunakan langsung untuk mengendalikan patogen, filtrat *Trichoderma* juga dilaporkan efektif dalam menanggulangi patogen tanaman. Hambatan pertumbuhan patogen terjadi karena kemampuan *Trichoderma sp.* untuk mendominasi tempat tinggal dan sumber makanan serta membentuk pelilitan hifa pada jamur patogen. *Trichoderma sp.* menghasilkan berbagai senyawa antibiotik, seperti alamethicin, paracelsin, dan trichotoxin, yang dapat merusak sel patogen melalui pengaruh pada permeabilitas membran sel. Enzim seperti kitinase dan laminarinase juga berkontribusi terhadap lisis dinding sel patogen (Arya dan Perello, 2010).

Herman *et al.*, (2019) menjelaskan bahwa *Trichoderma sp.* menghasilkan enzim hidrolisis, termasuk β -1,3-glukanase, kitinase, dan selulase, yang dapat melarutkan dinding sel patogen. Beberapa spesies dalam genus *Trichoderma* menghasilkan toksin seperti trichodermin saat berada pada tanaman hidup. *T.*

viridae menghasilkan dua jenis antibiotika, yaitu gliotoksin dan viridin, yang dapat melindungi tanaman bibit dari serangan patogen.

Kandungan metabolit sekunder pada *Trichoderma sp.* sangat beragam dan lengkap. Selain itu, beberapa enzim yang dihasilkan oleh agen pengendali hayati ini juga terdapat dalam metabolit sekunder, memainkan peran penting dalam mekanisme antagonis, baik sebagai miko-parasit maupun hiperparasit. Enzim yang ditemukan dalam metabolit sekunder *Trichoderma spp.* meliputi protease, selulase, selubiase, kitinase, dan β -1,3-glukanase (Soesanto, 2015).

2.5.2 Mekanisme Antagonis (*Trichoderma sp.*)

Cendawan *Trichoderma sp.* diketahui memiliki kemampuan antagonis yang efektif dalam mengendalikan berbagai patogen tanaman, termasuk *Pestalotiopsis* penyebab penyakit gugur daun pada tanaman karet. Mekanisme antagonis *Trichoderma* terhadap patogen melibatkan beberapa proses, antara lain: Antibiosis *Trichoderma* dapat menghasilkan berbagai metabolit sekunder yang bersifat antifungi, seperti senyawa poliketida (*trichodermin*, *harzianum A*, *harzianolida*), terpenoid (*6-pentil- α -pyrone*), dan peptaibol (*trichorzianin*, *alamethicin*) (Cai *et al.*, 2023). Senyawa-senyawa tersebut dapat menghambat pertumbuhan dan perkembangan patogen secara langsung.

Kompetisi *Trichoderma* mampu berkompetisi dengan patogen dalam memperebutkan ruang, nutrisi, dan tempat tumbuh. Kemampuan *Trichoderma* yang cepat tumbuh dan agresif membuatnya dapat mendominasi lingkungan dan menghambat patogen (Harman *et al.*, 2004).

Parasitisme Cendawan *Trichoderma* dapat bertindak sebagai parasit terhadap patogen dengan cara menghasilkan enzim litik seperti kitinase, β -1,3-

glukanase, dan protease. Enzim-enzim ini dapat mendegradasi dinding sel patogen sehingga menghambat pertumbuhannya (Hermosa *et al.*, 2012).

Induksi Ketahanan Tanaman Keberadaan *Trichoderma* di sekitar perakaran dapat menginduksi respon pertahanan tanaman terhadap serangan patogen. Senyawa-senyawa yang dihasilkan *Trichoderma* dapat mengaktifkan jalur sinyal yang mengarah pada peningkatan aktivitas enzim, produksi fitoaleksin, dan pembentukan struktur pertahanan pada tanaman (Lorito *et al.*, 2010).

Berbagai mekanisme antagonis tersebut menyebabkan *Trichoderma* efektif dalam menekan perkembangan patogen penyebab penyakit gugur daun (*Pestalotiopsis*) pada tanaman karet. Namun, informasi mengenai efektivitas metabolit sekunder *Trichoderma* sp. dalam mengendalikan penyakit gugur daun pada tanaman karet di tingkat laboratorium masih terbatas.

2.7 Pengaruh Konsentrasi Metabolit Sekunder (*Trichoderma* sp.) terhadap Pertumbuhan *Pestalotiopsis* sp.

Metabolit sekunder yang dihasilkan oleh *Trichoderma* sp. memiliki peran penting dalam menekan pertumbuhan patogen tanaman, termasuk *Pestalotiopsis* sp.. Senyawa-senyawa seperti gliotoksin, viridin, peptaibol, dan trichodermin bekerja secara sinergis melalui mekanisme antibiosis yang dapat menghambat pembentukan spora, pertumbuhan miselium, dan penetrasi patogen ke jaringan tanaman (Hermosa *et al.*, 2012).

Konsentrasi metabolit sekunder memengaruhi efektivitas penghambatan patogen. Pada konsentrasi rendah, aktivitas antimikroba mungkin belum maksimal, sedangkan pada konsentrasi yang lebih tinggi, senyawa aktif lebih

mampu mengganggu metabolisme sel patogen, merusak membran plasma, serta menghambat proses biosintetik vital pada jamur target (Verma *et al.*, 2007). Oleh karena itu, penentuan dosis atau konsentrasi optimal metabolit sekunder *Trichoderma sp.* menjadi hal krusial untuk menjamin efikasi pengendalian *Pestalotiopsis sp.* secara *in vitro*.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi filtrat metabolit sekunder secara signifikan menurunkan laju pertumbuhan *Pestalotiopsis sp.*, ditunjukkan oleh tingginya nilai daya hambat pada media PDA (Potato Dextrose Agar). Hal ini memperkuat bahwa aktivitas metabolit sekunder bersifat dosis-dependent, di mana efektivitas penghambatan meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi yang diaplikasikan (Setiawan *et al.*, 2022).

Dengan demikian, studi tentang pengaruh konsentrasi metabolit sekunder dari *Trichoderma sp.* terhadap *Pestalotiopsis sp.* sangat penting untuk merumuskan strategi pengendalian hayati yang tepat, efisien, dan berkelanjutan dalam menghadapi penyakit gugur daun pada tanaman karet.

2.8 Potensi Pengembangan Metabolit Sekunder (*Trichoderma sp.*) dalam Pengendalian Hayati

Metabolit sekunder yang dihasilkan oleh *Trichoderma sp.* menunjukkan potensi besar dalam pengendalian hayati terhadap berbagai patogen tanaman. Senyawa-senyawa ini, seperti trichodermin, gliovirin, dan peptaibol, terbukti mampu menghambat pertumbuhan jamur patogen melalui mekanisme antibiosis, lisis dinding sel, serta gangguan proses fisiologis patogen (Vinale *et al.*, 2008). Dengan aktivitas antimikroba yang luas dan efek yang selektif terhadap organisme

target, metabolit ini menjadi alternatif ramah lingkungan dibandingkan pestisida kimia sintetis.

Penggunaan metabolit sekunder sebagai biofungisida memiliki keunggulan karena stabilitas senyawa yang tinggi, kemudahan dalam formulasi, serta efektivitasnya yang konsisten pada berbagai kondisi lingkungan (Woo *et al.*, 2014). Produk berbasis metabolit ini juga cenderung tidak menimbulkan resistensi seperti pada fungisida kimia karena cara kerjanya yang kompleks dan multitarget. Hal ini menjadikan *Trichoderma sp.* sebagai sumber potensial bagi pengembangan biofungisida komersial di masa depan (Mukherjee *et al.*, 2022).

Dalam konteks keberlanjutan, penggunaan metabolit sekunder dari *Trichoderma sp.* sangat mendukung sistem pertanian ramah lingkungan. Pengembangannya juga dapat diterapkan dalam teknologi pertanian presisi untuk pengendalian penyakit berbasis data dan lokasi (Köhl *et al.*, 2019). Oleh karena itu, riset lebih lanjut terkait isolasi, karakterisasi, dan uji efektivitas metabolit tersebut sangat diperlukan untuk mendukung formulasi produk biofungisida yang aplikatif di lapangan.