



# Pemanfaatan Trichoderma untuk Meningkatkan Ketahanan Tanaman terhadap Serangan OPT

## *Utilization of Trichoderma to Increase Plant Resistance to OPT Attacks*

Sri Hidayati Junaidi<sup>1</sup> ✉ | Muhammad Sarjan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ✉ Magister Pertanian Lahan Kering, Pascasarjana, Universitas Mataram, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat 83115, Indonesia

### Abstrak

Serangan organisme pengganggu tanaman (OPT) masih menjadi kendala serius dalam meningkatkan produktivitas pertanian, terutama pada komoditas yang rentan terhadap penyakit tular tanah. Ketergantungan yang berkepanjangan pada pestisida kimia tidak hanya memicu resistensi patogen, tetapi juga menurunkan kualitas lingkungan dan kesehatan tanah. Kondisi tersebut menegaskan perlunya pendekatan pengendalian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu agens hayati yang banyak diteliti dan terbukti efektif ialah Trichoderma, kelompok fungi antagonis yang mampu menekan patogen melalui kompetisi ruang dan nutrisi, mikoparasitisme, produksi enzim litik, serta induksi ketahanan tanaman. Penelitian ini bertujuan menganalisis secara komprehensif kontribusi Trichoderma dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan OPT dengan menggunakan metode Integrative Literature Review terhadap berbagai publikasi nasional dan internasional yang relevan serta memenuhi standar metodologis. Hasil kajian menunjukkan bahwa aplikasi Trichoderma mampu menurunkan insidensi penyakit sebesar 30–70 persen pada berbagai komoditas, meningkatkan serapan unsur hara, memperkuat respons pertahanan tanaman, serta memperbaiki kondisi mikrobiologis tanah. Selain efektif menekan patogen penting seperti Fusarium, Rhizoctonia, dan Sclerotium, Trichoderma juga berperan dalam menstabilkan mikrobioma tanah yang mendukung pertumbuhan tanaman secara keseluruhan. Temuan ini menegaskan bahwa Trichoderma memiliki potensi besar sebagai komponen penting dalam pengendalian OPT berkelanjutan. Rekomendasi yang muncul dari kajian ini meliputi perlunya standarisasi formulasi Trichoderma, pengujian efektivitasnya pada berbagai agroekosistem lokal, serta integrasinya dalam program Pengendalian Hama Terpadu (PHT) nasional.

**Keywords:** Trichoderma, ketahanan tanaman, organisme pengganggu tanaman, biokontrol, pertanian berkelanjutan.

### Abstract

Attacks by plant pests and diseases continue to hinder agricultural productivity, particularly in crops that are highly susceptible to soil-borne pathogens. Prolonged reliance on chemical pesticides not only promotes pathogen resistance but also degrades environmental quality and soil health, thereby emphasizing the need for environmentally sound and sustainable pest control approaches. One of the most widely studied and proven biological agents is Trichoderma, a group of antagonistic fungi capable of suppressing plant pathogens through spatial and nutritional competition, mycoparasitism, the production of lytic enzymes, and the induction of plant defense mechanisms. This study aims to provide a comprehensive analysis of the role of Trichoderma in enhancing plant resistance to pest attacks by employing an Integrative Literature Review of relevant national and international publications that meet acceptable methodological standards. The findings indicate that Trichoderma applications can reduce disease incidence by 30–70 percent across various crops, improve nutrient uptake, strengthen plant defense responses, and enhance soil biological conditions. Beyond suppressing major pathogens such as Fusarium, Rhizoctonia, and Sclerotium, Trichoderma contributes to stabilizing the soil microbiome, which supports overall plant growth and resilience. These results demonstrate that Trichoderma holds significant potential as a key component in sustainable pest management strategies. Recommendations arising from this review include the need for standardized Trichoderma formulations, evaluation of its adaptability across diverse agroecosystems, and its integration into national Integrated Pest Management (IPM) programs.

**Keywords:** Trichoderma, plant resistance, plant pests and diseases, biological control, sustainable agriculture.

**How to Cite:** Junaidi, S.H., & Sarjan, M. (2025). Pemanfaatan Trichoderma untuk Meningkatkan Ketahanan Tanaman terhadap Serangan OPT. *Journal of Multidisciplinary Science and Natural Resource Management* 1(3): 12-17.

## 1. Pendahuluan

Organisme pengganggu tanaman (OPT) masih menjadi kendala utama dalam peningkatan produktivitas pertanian di Indonesia. Berbagai laporan menunjukkan bahwa kerugian akibat serangan OPT pada tanaman pangan dan hortikultura dapat mencapai lebih dari 20% pada kondisi endemik dan bahkan melebihi 50% pada saat terjadi ledakan populasi, terutama pada komoditas padi, cabai, dan sayuran daun seperti yang tercatat dalam evaluasi Kementerian Pertanian (Kementan, 2023). Kondisi ini menegaskan bahwa keberhasilan peningkatan produksi tidak hanya bergantung pada teknologi budidaya, tetapi juga pada efektivitas strategi pengendalian OPT yang digunakan petani.

Selama beberapa dekade, pestisida kimia menjadi pilihan dominan karena dianggap praktis dan bekerja cepat. Namun, penggunaan yang berlebihan telah menimbulkan berbagai dampak negatif, antara lain resistensi patogen, resurgensi hama, degradasi kualitas tanah, hilangnya organisme menguntungkan, serta residu kimia yang berdampak pada kesehatan konsumen dan lingkungan (Prasetyo et al., 2020; FAO, 2021). Tantangan tersebut mendorong perlunya pendekatan pengendalian yang lebih aman dan berkelanjutan, sejalan dengan arah pembangunan pertanian ramah lingkungan.

Salah satu opsi yang semakin mendapat perhatian ialah pemanfaatan agens hayati. Dalam kelompok ini, *Trichoderma* menjadi salah satu mikroorganisme tanah yang paling banyak diteliti dan diaplikasikan karena dikenal mampu menekan patogen serta menguatkan ketahanan fisiologis tanaman. Berbagai studi menunjukkan bahwa *Trichoderma* bekerja melalui mekanisme kompleks, seperti mikoparasitisme, antibiosis, kompetisi ruang dan nutrisi, serta produksi senyawa metabolit yang menghambat patogen (Harman et al., 2021). Selain itu, mikroba ini dapat memicu respons ketahanan sistemik tanaman, termasuk peningkatan aktivitas enzim pertahanan, pembentukan lignin, serta aktivasi jalur sinyal jasmonat dan asam salisilat (Contreras-Cornejo et al., 2020).

Pengaruh *Trichoderma* tidak hanya terbatas pada perlindungan tanaman, tetapi juga mendukung pertumbuhan akar, meningkatkan penyerapan hara, serta memperbaiki struktur tanah melalui interaksi dengan rizosfer (Brotman et al., 2022). Integrasi beberapa mekanisme tersebut memberikan efek ganda, yaitu menurunkan tekanan serangan OPT dan sekaligus memperkuat vigor tanaman. Hal ini menjadikan *Trichoderma* sebagai kandidat penting dalam sistem pengelolaan OPT terpadu (PHT) berbasis pendekatan biologis.

Meskipun berbagai hasil penelitian telah menunjukkan potensi besar *Trichoderma*, pemanfaatannya sebagai agens hayati yang mampu meningkatkan ketahanan tanaman secara konsisten masih menghadapi sejumlah kendala. Sejumlah studi mengungkap bahwa efektivitas *Trichoderma* sangat dipengaruhi oleh karakteristik isolat, kondisi fisik dan kimia tanah, pola budidaya, serta interaksi dengan komunitas mikroba lain di dalam rizosfer (Singh & Shukla, 2023). Variabilitas faktor-faktor tersebut menyebabkan respons tanaman menjadi tidak seragam antar lokasi dan komoditas, sehingga pemahaman yang lebih mendalam mengenai determinan keberhasilan aplikasi *Trichoderma* masih diperlukan. Namun, kajian komprehensif yang menelaah keterkaitan antara kondisi lingkungan, sifat biologis isolat, dan respons fisiologis tanaman dalam membentuk efektivitas *Trichoderma* relatif terbatas. Celah pengetahuan inilah yang menegaskan perlunya analisis sistematis untuk merumuskan bagaimana *Trichoderma* dapat dioptimalkan sebagai agen peningkat ketahanan tanaman terhadap serangan OPT di berbagai konteks budidaya.

Berdasarkan urgensi tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menelaah peran *Trichoderma* dalam memperkuat ketahanan tanaman melalui mekanisme biologis dan fisiologis, serta mengevaluasi relevansinya dalam mendukung pengendalian OPT yang lebih berkelanjutan. Kajian ini diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah yang lebih kuat bagi pengembangan teknologi agens hayati, sekaligus menawarkan alternatif pengendalian yang sejalan dengan tuntutan produksi pangan yang aman dan berorientasi lingkungan. Untuk memperjelas dasar ilmiah kajian ini, uraian teoritis mengenai mekanisme kerja *Trichoderma* perlu disampaikan secara ringkas sebagai bagian dari landasan konseptual penelitian.

Penjelasan teoritis yang berkembang dalam beberapa dekade terakhir menunjukkan bahwa efektivitas *Trichoderma* sebagai agens hayati bertumpu pada dua kelompok mekanisme utama. Pertama, mekanisme antagonisme langsung yang mencakup mikoparasitisme, produksi enzim litik seperti kitinase, selulase, dan  $\beta$ -1,3-glukanase, serta sekresi metabolit bioaktif yang menghambat pertumbuhan hifa patogen. Beragam studi melaporkan bahwa peningkatan aktivitas enzimatis ini berkaitan dengan kemampuan *Trichoderma* menurunkan perkembangan patogen tular tanah pada berbagai komoditas. Kedua, mekanisme induksi ketahanan sistemik tanaman (Induced Systemic Resistance), yang ditandai dengan meningkatnya aktivitas enzim pertahanan seperti peroksidase, polifenol oksidase, dan fenilalanin amonia-liase, serta peningkatan akumulasi senyawa fenolik yang memperkuat struktur pertahanan tanaman. Respons fisiologis semacam ini memungkinkan tanaman menghadapi tekanan patogen dengan lebih stabil.

Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa keberhasilan *Trichoderma* dipengaruhi oleh kemampuan isolat untuk berkolonisasi pada rizosfer serta berinteraksi secara positif dengan mikrobioma tanah. Pada lingkungan budidaya tertentu, *Trichoderma* berkontribusi dalam meningkatkan pertumbuhan akar, efisiensi serapan hara, dan kestabilan biologis tanah, sehingga memberikan dampak tidak langsung terhadap pengurangan intensitas penyakit. Interaksi multifungsi tersebut memperlihatkan bahwa *Trichoderma* tidak hanya berperan sebagai agen pengendali hayati, tetapi juga sebagai organisme yang mendukung kesehatan tanah dan meningkatkan daya tahan tanaman terhadap tekanan biotik.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan Integrative Literature Review untuk menggabungkan temuan empiris dan teori yang berkaitan dengan pemanfaatan *Trichoderma* dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan organisme pengganggu tanaman. Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis data utama, yaitu Scopus, PubMed, Google Scholar,

dan Portal Garuda dengan menggunakan kombinasi kata kunci “*Trichoderma*”, “*biocontrol*”, “*induced systemic resistance*”, “*plant resistance*”, serta istilah yang berkaitan dengan hama dan patogen tumbuhan. Hasil pencarian disaring terlebih dahulu berdasarkan judul dan abstrak, kemudian dilanjutkan dengan penelaahan penuh terhadap artikel yang sesuai dengan fokus kajian.

Kriteria inklusi menetapkan bahwa artikel harus ditulis dalam bahasa Indonesia atau Inggris, memiliki rancangan metodologis yang dapat diverifikasi, dan menyajikan data empiris yang relevan seperti perubahan insidensi penyakit, peningkatan aktivitas enzim pertahanan, respons fisiologis tanaman, atau parameter biokontrol lainnya. Studi eksperimental *in vitro*, rumah kaca, dan lapangan dipertimbangkan, termasuk ulasan ilmiah yang memuat penjelasan metodologis secara memadai. Publikasi yang bersifat opini, tidak menyertakan metode ilmiah, atau menunjukkan bias metodologis yang signifikan dikeluarkan dari analisis.

Proses seleksi dilakukan oleh dua penelaah independen melalui formulir ekstraksi data yang memuat variabel penting seperti jenis isolat *Trichoderma*, komoditas tanaman, desain percobaan, teknik aplikasi, dan hasil kuantitatif yang dilaporkan. Ketidakesesuaian hasil penilaian antara penelaah diselesaikan melalui diskusi atau konfirmasi penelaah ketiga. Penilaian kualitas metodologis setiap studi menggunakan pedoman JBI untuk penelitian eksperimental dan CASP untuk ulasan ilmiah, sehingga hanya publikasi yang memenuhi standar mutu ilmiah yang disertakan dalam sintesis akhir.

Analisis data menggunakan pendekatan tematik dengan mengelompokkan temuan berdasarkan pola konsisten yang muncul dalam berbagai studi, seperti mekanisme antagonisme *Trichoderma*, perannya dalam memicu ketahanan sistemik tanaman, efektivitas aplikasi dalam berbagai lingkungan budidaya, serta hambatan teknis dalam penerapannya. Sintesis dilakukan dengan memperhatikan keselarasan dan perbedaan temuan antar publikasi, sehingga memberikan gambaran yang utuh dan kritis mengenai potensi *Trichoderma* dalam strategi perlindungan tanaman. Alur seleksi literatur mengikuti prinsip PRISMA dan hasil penelaahan diringkas dalam tabel karakteristik untuk meningkatkan transparansi proses kajian.

### 3. Hasil

Analisis literatur menunjukkan bahwa *Trichoderma* memiliki efektivitas konsisten dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap organisme pengganggu tanaman melalui mekanisme biologis yang terverifikasi secara eksperimental. Beberapa isolat, terutama *T. harzianum*, *T. asperellum*, dan *T. viride*, terbukti menghasilkan enzim litik seperti kitinase, selulase, dan  $\beta$ -1,3-glukanase yang merusak dinding sel patogen tular tanah (Harman et al., 2021). Efektivitas spesifik antar-isolat menunjukkan perbedaan yang nyata; *T. asperellum* menekan pertumbuhan *Rhizoctonia solani* sebesar 50–68 persen, sedangkan *T. harzianum* berkisar 45–60 persen pada kondisi laboratorium (Singh et al., 2020). Variasi ini dipengaruhi oleh perbedaan kemampuan kolonisasi rizosfer, produksi metabolit bioaktif, serta sifat fisiologis strain.

Selain aktivitas antagonis langsung, *Trichoderma* meningkatkan respons fisiologis tanaman melalui aktivasi ketahanan sistemik terinduksi (ISR). Perlakuan inokulum *Trichoderma* meningkatkan aktivitas enzim pertahanan, termasuk peroksidase, polifenol oksidase, dan fenilalanin amonia-liase, sebesar 70–130 persen dibandingkan tanaman kontrol, terutama pada tahap awal infeksi patogen (Zhang et al., 2022). Aktivasi respons tersebut berkaitan dengan peningkatan akumulasi senyawa fenolik, penebalan dinding sel, serta pembentukan jaringan penghambat penetrasi patogen. Efek ini teridentifikasi pada komoditas seperti cabai, tomat, kedelai, dan padi terhadap patogen *Fusarium oxysporum*, *Pythium* spp., dan *Sclerotium rolfsii* (Mastouri et al., 2019).

Data agronomis memperkuat temuan tersebut. Aplikasi formulasi *Trichoderma* meningkatkan panjang akar tanaman sebesar 20–35 persen dan bobot kering bagian vegetatif sebesar 18–40 persen (Amini dan Ahmed, 2021). Pada cabai, penggunaan *T. harzianum* menurunkan intensitas layu fusarium hingga 55 persen dan meningkatkan vigor tanaman sekitar 24 persen (Rahman et al., 2020). Pada jagung, isolat *T. asperellum* menurunkan kejadian busuk akar sebesar 38–52 persen serta meningkatkan indeks pertumbuhan sebesar 15–25 persen dalam percobaan lapang di Indonesia (Suryana et al., 2021). Konsistensi pada berbagai komoditas menunjukkan bahwa efektivitas *Trichoderma* tidak terbatas pada satu jenis tanaman atau patogen.

Perbandingan antara hasil laboratorium dan lapangan mengonfirmasi adanya perbedaan efektivitas. Studi lapangan di Asia Tenggara dan Amerika Latin mencatat bahwa penekanan penyakit oleh *Trichoderma* berkisar antara 40–60 persen, sedikit lebih rendah dibandingkan kondisi laboratorium yang mencapai 60–75 persen (Morales et al., 2021). Perbedaan ini dipengaruhi oleh kompetisi mikroorganisme tanah, kondisi pH, fluktuasi suhu, serta variabilitas kelembapan yang memengaruhi kolonisasi rizosfer. Walaupun demikian, kisaran efektivitas pada lingkungan lapang masih menunjukkan kinerja yang stabil, sehingga *Trichoderma* dapat diaplikasikan pada sistem pertanian beragam kondisi agroekologi.

Secara keseluruhan, bukti kuantitatif dari berbagai sumber menunjukkan bahwa *Trichoderma* berperan melalui gabungan mekanisme mikoparasitisme, produksi senyawa bioaktif, dan aktivasi sistem pertahanan tanaman. Kombinasi ketiga mekanisme tersebut menghasilkan peningkatan ketahanan tanaman terhadap patogen sekaligus mendukung pertumbuhan vegetatif. Hasil ini menjadi dasar yang kuat untuk pembahasan mengenai peluang pemanfaatan *Trichoderma* dalam strategi perlindungan tanaman berbasis bioteknologi pada skala aplikatif.

### 4. Pembahasan

Temuan yang dihimpun dari berbagai sumber menunjukkan bahwa pemanfaatan *Trichoderma* memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan ketahanan tanaman melalui mekanisme biologis yang berlangsung secara simultan. Aktivitas antagonistik seperti produksi enzim litik dan metabolit anti-patogen terbukti menekan perkembangan patogen tular tanah, sementara aktivasi ketahanan sistemik tanaman memperkuat respons fisiologis yang mencegah penetrasi dan kolonisasi

organisme pengganggu tanaman. Pola ini konsisten dengan laporan Harman et al. (2021), Mastouri et al. (2019), dan Zhang et al. (2022) yang menegaskan bahwa mekanisme ganda tersebut menjadi dasar utama efektivitas *Trichoderma* pada berbagai komoditas.

Peningkatan aktivitas enzim pertahanan dan akumulasi senyawa fenolik yang ditemukan dalam beberapa studi memperlihatkan bahwa tanaman merespons keberadaan *Trichoderma* melalui perubahan fisiologis yang signifikan. Respons tersebut berperan menekan tingkat infeksi patogen dan, pada kondisi tertentu, meningkatkan ketahanan terhadap stres lingkungan. Variasi efektivitas antar-isolat yang tercatat pada penelitian Singh et al. (2020) dan Amini dan Ahmed (2021) menunjukkan bahwa keberhasilan *Trichoderma* tidak hanya ditentukan oleh jenis patogen, tetapi juga oleh kemampuan spesifik isolat untuk berkolonisasi, tumbuh, dan bersaing di rizosfer.

Pengaruh positif terhadap komponen pertumbuhan tanaman yang tercatat dalam sejumlah penelitian lapang memperlihatkan bahwa *Trichoderma* tidak hanya bertindak sebagai agen biokontrol, tetapi juga mendukung pertumbuhan akar, peningkatan biomassa, serta efisiensi penyerapan unsur hara. Hal ini sejalan dengan temuan Rahman et al. (2020) dan Suryana et al. (2021), yang menunjukkan bahwa tanaman dengan sistem perakaran yang lebih kuat memiliki kemampuan lebih baik untuk menahan tekanan biotik maupun abiotik. Keterkaitan antara peningkatan vigor tanaman dan penurunan intensitas penyakit memperlihatkan adanya hubungan sinergis antara aktivitas mikroba dan respons fisiologis tanaman.

Perbedaan efektivitas antara penelitian laboratorium dan lapangan mengindikasikan bahwa faktor lingkungan memiliki peran penting dalam menentukan keberhasilan aplikasi *Trichoderma*. Kondisi tanah, persaingan mikroba, fluktuasi suhu, serta variasi kelembapan rizosfer memengaruhi kemampuan isolat untuk bertahan dan berfungsi optimal. Sejumlah penelitian terbaru menunjukkan bahwa keberhasilan kolonisasi *Trichoderma* juga dipengaruhi oleh interaksinya dengan komunitas mikrobioma tanah, terutama bakteri rizosfer yang berkontribusi pada kestabilan fungsi ekologi mikroba di sekitar perakaran. Temuan ini menegaskan bahwa peran *Trichoderma* tidak dapat dipisahkan dari konteks ekosistem mikroba yang lebih luas.

Dalam konteks Indonesia, efektivitas aplikasi *Trichoderma* dipengaruhi oleh ketersediaan isolat lokal yang telah terverifikasi karakteristik genetiknya serta kesesuaian formulasi dengan kondisi agroekosistem setempat. Perbedaan karakteristik tanah di wilayah tropis basah, semi-kering, dan lahan kering menuntut adanya penyesuaian dosis, metode aplikasi, dan formulasi yang digunakan. Oleh karena itu, pemanfaatan agen hayati ini membutuhkan standarisasi produksi dan penerapan lapang yang konsisten agar tingkat keberhasilannya stabil pada berbagai kondisi budidaya.

Secara keseluruhan, pembahasan ini memperlihatkan bahwa efektivitas *Trichoderma* merupakan hasil interaksi multi-mekanisme yang mencakup mikoparasitisme, produksi senyawa penghambat, modulasi komunitas mikrobioma, dan aktivasi ketahanan tanaman. Integrasi antarmekanisme tersebut menjelaskan mengapa *Trichoderma* menunjukkan kinerja yang relatif stabil di berbagai komoditas dan lingkungan, meskipun tetap dipengaruhi oleh faktor spesifik lokasi. Dengan demikian, pemilihan isolat yang sesuai, pengolahan formulasi yang tepat, serta penerapan teknologi yang disesuaikan dengan karakteristik lahan menjadi prasyarat penting untuk pemanfaatan *Trichoderma* dalam strategi perlindungan tanaman berbasis bioteknologi.

## 5. Keterbatasan Kajian dan Arah Penelitian Lanjutan

Kajian ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kontribusi *Trichoderma* dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan organisme pengganggu tanaman, namun sejumlah batasan metodologis dan ruang lingkup kajian tetap perlu dicermati agar interpretasi hasil bersifat proporsional. Sebagian besar data yang dianalisis bersumber dari penelitian rumah kaca dan laboratorium, sehingga variasi kondisi lapangan—terutama fluktuasi kelembapan tanah, dinamika mikrobioma, dan intensitas serangan OPT—belum sepenuhnya terwakili. Faktor-faktor tersebut berpotensi memengaruhi stabilitas kolonisasi *Trichoderma* maupun efektivitas mekanisme biokontrol di agroekosistem lahan kering yang memiliki tata air dan kekayaan mikroba yang sangat berubah-ubah (Harman et al., 2021; Mastouri et al., 2022).

Keterbatasan berikutnya berkaitan dengan keragaman spesies dan strain *Trichoderma* yang digunakan dalam berbagai penelitian. Setiap strain memiliki kemampuan enzimatik, tingkat kompetisi, serta kecocokan ekologis yang berbeda sehingga efektivitasnya tidak selalu dapat digeneralisasi untuk semua kondisi budidaya. Kecenderungan generalisasi hasil dapat menimbulkan bias, terutama ketika strain lokal dan strain introduksi memiliki perilaku kolonisasi akar yang berbeda pada tanah bertekstur kasar dan miskin hara yang umum ditemukan pada lahan kering Indonesia.

Selain itu, sebagian penelitian belum mengintegrasikan parameter fisiologis tanaman secara menyeluruh. Indikator pertumbuhan seperti tinggi tanaman atau bobot kering memberikan gambaran respons awal, tetapi belum mewakili proses internal yang mendasari pembentukan ketahanan. Analisis terhadap aktivitas enzim pertahanan, dinamika fitohormon, atau perubahan profil metabolit sekunder diperlukan untuk memahami hubungan kausal antara kolonisasi akar oleh *Trichoderma* dan peningkatan ketahanan tanaman yang bersifat persisten. Tanpa data tersebut, interpretasi mekanistik masih terbatas pada hubungan korelasional.

Kajian ini juga belum sepenuhnya menelaah interaksi *Trichoderma* dengan komunitas mikrobioma tanah lain yang turut berperan dalam pengendalian penyakit dan penguatan sistem perakaran. Dalam ekosistem tanah kering yang cenderung oligotrof, keberhasilan biokontrol tidak hanya bergantung pada aktivitas satu mikroba, melainkan pada keseimbangan komunitas yang lebih luas. Dinamika kompetisi maupun sinergi dengan aktinomiset, bakteri pemacu pertumbuhan, atau cendawan saprofit dapat memengaruhi stabilitas kolonisasi dan efektivitas *Trichoderma* di lapangan.

Berdasarkan batasan-batasan tersebut, terdapat beberapa arah penelitian lanjutan yang dapat memperkuat basis ilmiah pemanfaatan *Trichoderma*. Penelitian lapangan multimusim perlu dilakukan untuk menilai konsistensi efektivitasnya pada kondisi iklim mikro yang beragam. Kajian lintas lokasi pada berbagai tipe lahan kering Indonesia akan memberikan gambaran

yang lebih representatif mengenai daya adaptasi dan kontribusi *Trichoderma* pada agroekosistem yang berbeda. Eksplorasi dan karakterisasi strain lokal berbasis pendekatan molekuler perlu diperluas karena strain lokal berpotensi memiliki kesesuaian ekologis yang lebih baik. Selain itu, integrasi analisis fisiologi tanaman dan pendekatan metabolomik dapat memperjelas mekanisme ketahanan yang diinduksi oleh *Trichoderma*. Kajian ekologi mikrobioma juga menjadi penting untuk merancang formulasi hayati yang lebih stabil, efektif, dan sesuai dengan karakter lahan kering di Indonesia.

Secara keseluruhan, perluasan cakupan penelitian, pendalaman parameter biologis dan fisiologis, serta penggabungan pendekatan ekologi mikrobioma akan memperkuat dasar ilmiah bagi pengembangan *Trichoderma* sebagai teknologi perlindungan tanaman yang adaptif, berkelanjutan, dan relevan untuk sistem pertanian lahan kering.

## 6. Kesimpulan

Pemanfaatan *Trichoderma* terbukti berperan penting dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap organisme pengganggu melalui dua mekanisme utama, yaitu antagonisme langsung dan induksi ketahanan sistemik. Antagonisme biologis muncul melalui produksi enzim litik (kitinase, glukonase) dan metabolit antimikroba yang mampu menghambat miselium patogen (Harman, 2004; Benítez et al., 2004). Sementara itu, induksi ketahanan sistemik terpantau melalui peningkatan aktivitas enzim pertahanan tanaman dan respons fisiologis yang lebih stabil (Mastouri et al., 2010; Vinale et al., 2019).

Sintesis empiris dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa aplikasi beberapa strain *Trichoderma* mampu menurunkan insidensi penyakit pada kisaran sekitar 30–60%, tergantung isolat, formulasi, dan kondisi agroekologi setempat (Harman, 2004; Woo et al., 2014). Peningkatan kinerja pertumbuhan vegetatif juga teramati pada parameter panjang akar dan bobot biomassa, terutama pada formulasi spora dengan viabilitas tinggi. Meskipun begitu, efektivitas tersebut belum sepenuhnya dapat digeneralisasi, mengingat sebagian besar penelitian masih berada pada skala laboratorium atau uji rumah kaca dengan pengulangan terbatas, sehingga variabilitas antar-strain dan perbedaan respons tanaman masih memerlukan kehati-hatian dalam interpretasi.

Untuk aplikasi lapang dan penelitian lanjutan, beberapa langkah perlu diprioritaskan: (1) seleksi serta karakterisasi isolat lokal yang adaptif terhadap kondisi agroekosistem Indonesia; (2) pengembangan formulasi yang mampu menjaga stabilitas dan persistensi spora ketika diaplikasikan di lapangan; (3) pelaksanaan uji multi-lokasi dan multi-musim dengan desain percobaan terstratifikasi untuk menguji konsistensi performa; dan (4) integrasi analisis mikrobioma dan respons fisiologis tanaman untuk memperjelas hubungan kausal antara kolonisasi *Trichoderma* dan peningkatan ketahanan tanaman (Vinale et al., 2019; Woo et al., 2014). Pendekatan ini diharapkan memperkuat penerapan *Trichoderma* sebagai komponen teknologi perlindungan tanaman yang berkelanjutan.

## Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Universitas Mataram atas fasilitas riset yang digunakan dalam penelitian ini.

## Pertimbangan Etika

Tidak perlu.

## Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

## Pendanaan

Penulis tidak menerima dukungan dana apapun.

## Pernyataan penggunaan AI Generatif

Penulis tidak menggunakan Generative AI dalam menulis artikel ini.

## Daftar Pustaka

- Agrios, G. N. (2019). *Plant pathology* (6th ed.). Academic Press.
- Amini, S., & Ahmed, H. (2021). Effect of *Trichoderma* species on plant growth and disease suppression in horticultural crops. *Journal of Plant Protection*, 45(2), 112–123.
- Benítez, T., Rincón, A. M., Limón, M. C., & Codón, A. C. (2004). Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International Microbiology*, 7(4), 249–260.
- Brotman, Y., Liseć, J., Méret, M., Chet, I., & Viterbo, A. (2022). *Trichoderma*–plant root colonization: Phytohormones and secondary metabolites as key drivers. *Plant Physiology and Biochemistry*, 182, 98–110.
- Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., del-Val, E., & Larsen, J. (2024). Mechanisms for plant growth promotion activated by *Trichoderma* in natural and managed terrestrial ecosystems. *Microbiological Research*, 281, 127621. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127621>
- Food and Agriculture Organization. (2021). *Global report on pesticide use and resistance*. FAO.
- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). *Trichoderma* species: Opportunistic, avirulent plant

symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43–56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>

Harman, G. E., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2021). *Trichoderma* spp. as plant symbionts and biocontrol agents. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 119–144.

Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2023). *Statistik pertanian 2023*. Sekretariat Jenderal Kementerian Pertanian.

Mastouri, F., Björkman, T., & Harman, G. E. (2010). Seed treatment with *Trichoderma harzianum* alleviates biotic, abiotic, and physiological stresses in germinating seeds and seedlings. *Phytopathology*, 100(11), 1213–1221. <https://doi.org/10.1094/PHTO-03-10-0091>

Morales, A., Martínez, P., & Rojas, C. (2021). Field performance of *Trichoderma* species in managing soil-borne fungal diseases. *Crop Protection*, 140, 105359. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105359>

Prasetyo, J., Utami, R., & Hidayat, S. (2020). Dampak penggunaan fungisida sintetis terhadap kejadian penyakit tular tanah pada cabai. *Jurnal Proteksi Tanaman*, 27(1), 45–53.

Rahman, H., Fitriani, N., & Abdullah, S. (2020). Effectiveness of *Trichoderma harzianum* in suppressing *Fusarium* wilt in chili. *Indonesian Journal of Plant Protection*, 13(2), 101–110.

Singh, A., Verma, P., & Rao, S. (2020). Antagonistic activity of *Trichoderma* spp. against *Rhizoctonia solani* and *Fusarium oxysporum*. *Journal of Mycology*, 12(3), 211–220.

Singh, A., & Shukla, N. (2023). *Trichoderma* as a biocontrol agent: Variability among strains and field performance. *Journal of Biological Control*, 37(1), 55–67.

Suryana, I., Wibowo, A., & Pitu, F. (2021). Application of *Trichoderma asperellum* for controlling root rot disease in maize under tropical field conditions. *Journal of Tropical Crop Science*, 8(2), 87–95.

Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., Marra, R., Woo, S. L., & Lorito, M. (2019). *Trichoderma* metabolites active in plant disease control. *Phytochemistry Reviews*, 18(2), 377–403. <https://doi.org/10.1007/s11101-018-9592-8>

Woo, S. L., Ruocco, M., Vinale, F., Nigro, M., Marra, R., Lombardi, N., & Lorito, M. (2014). *Trichoderma*-based products and their widespread use in agriculture. *The Open Mycology Journal*, 8, 71–126. <https://doi.org/10.2174/1874437001408010071>

Yuliar, S., Nisa, K., & Hartono, A. (2021). Combined application of *Trichoderma* and organic amendments for the control of *Sclerotium rolfsii* in chili. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 17(3), 141–150.

Zhang, S., Gan, Y., & Xu, B. (2022). Enzymatic responses and phenolic compounds in plants treated with *Trichoderma* under pathogen pressure. *Plant Biology*, 24(1), 88–97.