



## **Trichoderma dalam Pertanian Berkelanjutan: Mekanisme, Aplikasi sebagai Agen Biokontrol dan Tantangan Masa Depan**

### *Trichoderma in Sustainable Agriculture: Mechanisms, Applications as Biocontrol Agents and Future Challenges*

Triwanto Nababan<sup>\*1</sup> , Nahrisa Rahmadhani<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sumatera Utara, Medan. 20155, Indonesia.

\*Corresponding Author: [triwantonababan@usu.ac.id](mailto:triwantonababan@usu.ac.id)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received : 30 Maret 2026

Revised : 15 April 2026

Accepted : 2 Mei 2026

Available online

<https://talenta.usu.ac.id/joa>

E-ISSN: [2963-2013](#)

P-ISSN: [2337-6597](#)

##### How to cite:

Nababan, T., Nahrisa, R. (2026). Trichoderma dalam Pertanian Berkelanjutan : Mekanisme, Aplikasi sebagai Agen Biokontrol dan Tantangan Masa Depan. *Jurnal Agroteknologi*, 14(2), 59-66.

#### ABSTRACT

Modern agriculture faces serious challenges due to the increasing incidence of plant diseases, which negatively impact productivity and yield quality. While synthetic chemical pesticides remain effective in controlling pests, they may lead to pathogen resistance, environmental pollution, hazardous residues, and ecosystem disruption. One promising biological agent is *Trichoderma*, which acts as a biocontrol agent through various mechanisms, such as competition for space and nutrients, mycoparasitism, production of hydrolytic enzymes, and antibiosis. Furthermore, *Trichoderma* can induce plant resistance through the Induced Systemic Resistance (ISR) mechanism, which involves jasmonic acid and ethylene signaling pathways, thereby enhancing plant responses to pathogen attacks. In addition, the interaction between *Trichoderma* and plants contributes to improved root growth and development through the production of bioactive metabolites and increased nutrient availability. *Trichoderma* functions not only as a biological control agent but also as a growth promoter and plant resistance enhancer, thus demonstrating great potential in supporting sustainable and environmentally friendly agricultural systems.

**Keyword:** Biopesticide, Endophyte, Induce Resistance, Symbiosis

#### ABSTRAK

Pertanian modern menghadapi tantangan serius akibat meningkatnya serangan penyakit tanaman yang berdampak pada penurunan produktivitas dan kualitas hasil. Pengendalian yang masih didominasi oleh pestisida kimia sintesis memang efektif, namun berpotensi menimbulkan resistensi patogen, pencemaran lingkungan, residu berbahaya, serta gangguan keseimbangan ekosistem. Salah satu agen hayati yang potensial adalah *Trichoderma*, yang berperan sebagai biokontrol dengan berbagai mekanisme, seperti kompetisi ruang dan nutrisi, mikoparasitisme, produksi enzim hidrolitik, dan antibiosis. Selain itu, *Trichoderma* mampu menginduksi ketahanan tanaman melalui mekanisme *Induced Systemic Resistance* (ISR) yang melibatkan jalur sinyal asam jasmonat dan etilen, sehingga meningkatkan respons tanaman terhadap serangan patogen. Interaksi *Trichoderma* dengan tanaman juga berkontribusi dalam meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan sistem perakaran melalui produksi metabolit bioaktif serta peningkatan ketersediaan nutrisi. *Trichoderma* tidak hanya berfungsi sebagai agen pengendali hayati, tetapi juga sebagai agen pemacu pertumbuhan dan penguat ketahanan tanaman, sehingga berpotensi besar dalam mendukung sistem pertanian berkelanjutan dan ramah lingkungan.

**Keyword:** Biopestisida, Endofit, Induksi Ketahanan, Simbiosis



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.

<http://doi.org/10.32734/ja.v14i2.25044>

### 1. Pendahuluan

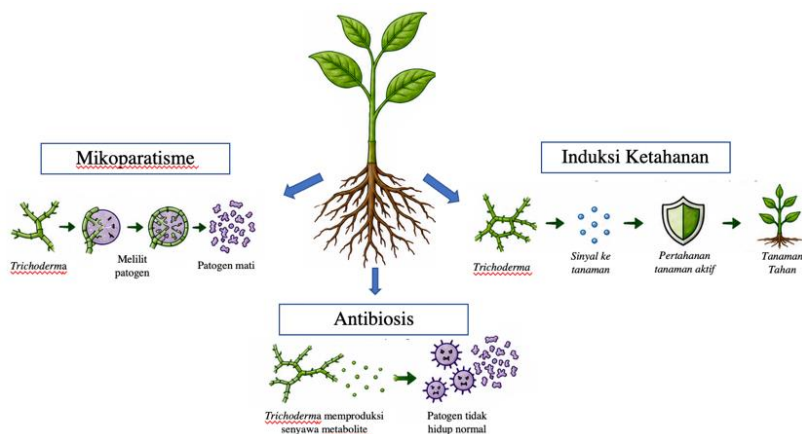
Pertanian modern saat ini menghadapi berbagai tantangan besar, terutama meningkatnya serangan penyakit tanaman yang dapat menurunkan produktivitas dan kualitas hasil panen (Savary and Willocquet 2020). Penyakit tanaman yang disebabkan oleh cendawan patogen, bakteri, nematoda, dan virus menjadi salah satu faktor utama pembatas produksi pertanian di berbagai komoditas penting (Nazarov *et al.*, 2020). Sedangkan pengendalian penyakit tanaman masih sangat bergantung pada penggunaan pestisida kimia sintetis. Meskipun efektif dan instan, penggunaan pestisida kimia secara intensif dapat resistensi patogen, pencemaran lingkungan, residu, serta mengganggu keseimbangan ekosistem (Najam and Alam 2023).

Pemanfaatan agen hayati dalam sistem pertanian berkelanjutan menjadi andalan dalam pengendalian ramah lingkungan seperti penggunaan bakteri endofit (Nababan *et al.*, 2024), bakteriofage (Azizah and Safni, 2024), dan juga *Trichoderma* (Lisnawita *et al.*, 2025). *Trichoderma* menjadi salah satu Agen hayati mampu menekan perkembangan patogen tanaman melalui berbagai mekanisme biologis tanpa menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan (Sood *et al.*, 2020). Sekitar 90% strain *Trichoderma* berperan menjadi agent biokontrol patogen. *Trichoderma* merupakan jamur tanah yang bersifat saprofit dan dapat ditemukan secara luas di berbagai ekosistem tanah (Manzar *et al.*, 2022). Di tanah yang terkontaminasi patogen, *Trichoderma* tidak hanya meningkatkan pertumbuhan tanaman tetapi juga menghambat pertumbuhan patogen melalui beberapa mekanisme antagonis seperti kompetisi ruang dan nutrisi, mikoparasitisme, produksi enzim hidrolitik dan antibiosis (Mukhopadhyay and Kumar 2020).

*Trichoderma* juga dapat mengkolonisasi akar hingga memicu aktifnya mekanisme ketahanan tanaman yang dikenal sebagai *Induced Systemic Resistance* (ISR) yaitu kondisi tanaman berada dalam keadaan siaga terhadap serangan patogen. Melalui aktivasi jalur sinyal pertahanan asam jasmonat dan etilen, hingga tanaman dapat merespons infeksi patogen secara cepat dan efektif (Behiri *et al.*, 2023). *Trichoderma* memodulasi fisiologi tanaman melalui produksi berbagai metabolit bioaktif serta enzim yang berperan dalam meningkatkan ketersediaan nutrisi di sekitar akar (Liu *et al.*, 2022). Interaksi ini tidak hanya meningkatkan pertumbuhan tanaman, tetapi juga memperbaiki perkembangan sistem perakaran (Hossain and Akter 2020). Dengan demikian, *Trichoderma* tidak hanya berfungsi sebagai agen antagonis terhadap patogen, tetapi juga sebagai mikroorganisme yang memperkuat ketahanan alami tanaman dan mendukung kesehatan agroekosistem secara keseluruhan (Singh *et al.*, 2021).

### 2. Interaksi *Trichoderma*, Patogen dan Tanaman Inang

Interaksi antara *Trichoderma*, patogen, dan tanaman melibatkan serangkaian mekanisme biologis yang kompleks di rizosfer (Gambar 1). Proses ini umumnya diawali dengan kemampuan *Trichoderma* dalam mengenali sinyal kimia yang dilepaskan oleh akar tanaman. Eksudat akar, oligosakarida, dan komponen dinding sel cendawan patogen dapat bertindak sebagai molekul sinyal yang memicu respons kemotaksis dan pertumbuhan hifa *Trichoderma* menuju sumber sinyal tersebut (Saldana *et al.*, 2023). *Trichoderma* memanfaatkan nutrisi dari eksudat akar sekaligus menempati ruang ekologis yang dapat menghambat keberadaan patogen di sekitar sistem perakaran (Halifu *et al.*, 2020).



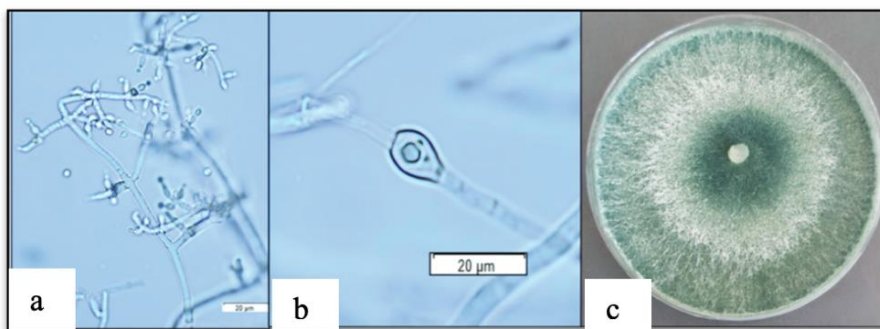
Gambar 1. Skema interaksi *Trichoderma*, Patogen dan Tanaman (El-Sharkawy *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2018; Galleti *et al.*, 2020)

Terdapat beberapa interaksi *Trichoderma* dengan patogen tanaman seperti mikoparasitisme, antibiosis dan induksi resistensi (Tabel 1). Secara mikroskopis *Trichoderma* berhifa sepat bercabang membentuk jaringan miselium yang padat (Gambar 2a) dan kladidospora berfungsi sebagai sel bertahan hidup (Gambar 2b). Koloni khas pada media *Potato Dextrose Agar* (PDA) *Trichoderma* tumbuh cepat berwarna hijau dengan tekstur halus (Gambar 2c) (Karaca and Elthem 2026). *Trichoderma* menunjukkan mekanisme mikoparasitisme yang merupakan salah satu bentuk antagonisme langsung. Proses ini melibatkan beberapa tahapan, yaitu pengenalan patogen, pertumbuhan hifa menuju patogen, perlekatan pada hifa patogen, dan pembentukan struktur melilit (*coiling*). Setelah kontak terjadi, *Trichoderma* mensekresikan enzim hidrolitik seperti kitinase,  $\beta$ -1,3-glukanase, dan protease yang mampu mendegradasi komponen utama dinding sel cendawan patogen (Novy *et al.*, 2019). Selain itu, *Trichoderma* juga menghasilkan berbagai metabolit sekunder yang bersifat antifungal, seperti peptida dan gliotoksin, yang dapat menghambat pertumbuhan patogen di sekitar akar tanaman (Tamandegani *et al.*, 2020).

Selain mekanisme antagonisme langsung terhadap patogen, kolonisasi *Trichoderma* pada akar juga memicu respons pertahanan tanaman melalui mekanisme ISR (Galleti *et al.*, 2020). Interaksi ini dimediasi oleh molekul elisitor yang dihasilkan oleh *Trichoderma*, seperti protein, enzim, dan metabolit sekunder yang dapat dikenali oleh sistem imun tanaman (Yadav *et al.*, 2021). Aktivasi jalur ini menyebabkan peningkatan ekspresi gen-gen pertahanan tanaman, produksi enzim pertahanan, serta akumulasi senyawa fenolik dan fitoaleksin. Akibatnya, tanaman berada dalam kondisi priming (Huang *et al.*, 2024).

Tabel 1. Spesies *Trichoderma* yang digunakan dalam penelitian lapangan

Mekanisme	Spesies <i>Trichoderma</i>	Target Patogen	Tanaman Inang	Referensi
Mikoparasitisme	<i>T. atroviridae</i>	<i>Hemilea vastratrix</i>	Kopi	Wulansari <i>et al.</i> , 2023
	<i>T. harzianum</i>	<i>Puccinia graminis</i>	Gandum	El-Sharkawy <i>et al.</i> , 2025
	<i>T. harzianum</i>	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Kedelai	Fagundes <i>et al.</i> , 2025
	<i>T. virens</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>	Tomat	Bandara <i>et al.</i> , 2024
	<i>Trichoderma spp.</i>	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Kedelai	Juliatti <i>et al.</i> , 2019
	<i>T. harzianum</i>	<i>Ustilago maydis</i>	Jagung	Harwoko <i>et al.</i> , 2019
Antibiosis	<i>T. longibrachiatum</i>	<i>Valsa mali</i>	Apel	Zhang <i>et al.</i> , 2018
	<i>T. asperellum</i>	<i>Fusarium spesies complex</i>	Solanum	Tamandegani <i>et al.</i> , 2020
	<i>T. atroviridae</i>	<i>Fusarium graminearum</i>	Gandum	Gao <i>et al.</i> , 2025
	<i>T. harzianum</i>	<i>Botrytis cinerea</i>	Anggur	Li <i>et al.</i> , 2024
	<i>T. virens</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Kapas	Howell <i>et al.</i> , 2008
	<i>T. asperellum</i>	<i>Meloidogyne incognita</i>	Terong	Saharan <i>et al.</i> , 2023
Induksi Ketahanan	<i>T. pubescens</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Tomat	Behiri <i>et al.</i> , 2023
	<i>T. virens</i>	<i>Colletotrichum graminicola</i>	Jagung	Huang <i>et al.</i> , 2024
	<i>T. gamsii</i>	<i>Fusarium verticillioides</i>	Jagung	Singh <i>et al.</i> , 2021
	<i>T. harzianum, T. asperellum</i>	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Terong	Galleti <i>et al.</i> , 2020



Gambar 2. (a) Pengamatan *T. harzianum* pada perbesaran 40x. (b) Kladidospora, (C) *T. harzianum* pada media PDA (Karaca and Eltem 2026).

### 3. Aplikasi *Trichoderma* dalam Pertanian Berkelanjutan

#### 3.1. *Trichoderma* sebagai Agen Pengendali Hayati

*Trichoderma* merupakan salah satu agen pengendali hayati yang paling banyak dikaji dan diaplikasikan dalam pengelolaan penyakit tanaman, khususnya terhadap patogen tular tanah. Beberapa penelitian menunjukkan efektivitas *Trichoderma* dalam menekan patogen seperti *Sclerotium rolfsii* (Veena *et al.*, 2023), *Fusarium ciceris*, *Macrophomina phaseolina*, dan *Rhizoctonia solani* (Mukhopadhyay and Pan, 2012), nematoda (Zhu *et al.*, 2022) dan virus (Aseel *et al.*, 2024).

Secara aplikatif, berbagai spesies *Trichoderma* telah diformulasikan dalam produk biopestisida yang diaplikasikan melalui beberapa pendekatan, seperti perlakuan benih, aplikasi tanah, maupun inokulasi pada bahan organik seperti kompos dan biopestisida cair. Perlakuan benih memungkinkan kolonisasi awal *Trichoderma* pada permukaan akar sehingga memberikan perlindungan terhadap infeksi patogen sejak tahap awal pertumbuhan tanaman (Couto *et al.*, 2021). Strategi formulasi lanjutan seperti mikrokapsul mampu meningkatkan efektivitas *Trichoderma* dibandingkan dengan aplikasi langsung, karena teknologi tersebut dapat meningkatkan stabilitas propagul (Qi *et al.*, 2023) dan aplikasi silver nanopartikel AgNPs *T. harzianum* yang dapat menekan *Ganoderma boninense* pada kelapa sawit (Lisawita *et al.*, 2025). Pendekatan ini menjadi komponen penting dalam strategi pengendalian penyakit terpadu, karena mampu mengurangi ketergantungan terhadap fungisida kimia sekaligus mempertahankan keseimbangan mikrobiologi tanah (Woo *et al.*, 2014).

Beberapa strain *Trichoderma* juga diketahui mampu bertindak sebagai bioinsektisida kontak terhadap beberapa serangga hama hemiptera, seperti kutu daun dan kutu kebul (Meesters *et al.*, 2023). Rahim and Iqbal (2019) juga melaporkan ekstrak *T. harzianum* dapat mengendalikan *Diuraphis noxia* dan *Tribolium castaneum* hingga 56%. Meskipun mekanisme kerjanya belum sepenuhnya dipahami. Spora *Trichoderma* akan menginfeksi tubuh serangga menembus kutikula dengan memproduksi toksin dan metabolit seperti kitinase, protease, dan PR1 yang dapat mendegradasi komponen struktural kutikula, mengganggu metabolisme dan merusak jaringan internal serangga (Mukherjee and Ghosh 2023).

#### 3.2. *Trichoderma* sebagai Plant Growth Promoting Fungi (PGPF)

*Trichoderma* mampu memodulasi metabolisme tanaman melalui produksi senyawa bioaktif yang berperan sebagai regulator pertumbuhan tanaman, seperti auksin dan metabolit volatil tertentu. Aktivitas enzimatis yang dihasilkan *Trichoderma* juga berperan dalam meningkatkan ketersediaan nutrisi tanah melalui pelarutan fosfat dan mobilisasi unsur hara lainnya (Luo *et al.*, 2023). Interaksi ini dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap berbagai stres abiotik, seperti kekeringan dan salinitas, melalui peningkatan aktivitas enzim antioksidan serta modifikasi metabolisme tanaman (Hidangmayum and Dwivedi 2018). Dalam kondisi *in vitro*, *Trichoderma* spp. mampu meningkatkan pertumbuhan *Arabidopsis thaliana* melalui emisi VOCs yang dilepaskan ke atmosfer (Wonglom *et al.*, 2020). Selain itu, beberapa strain *T. atroviride* terbukti mampu menginduksi pembentukan akar lateral serta meningkatkan percabangan akar pada *A. thaliana* (Nieto-Jacobo *et al.*, 2017).

Pada tanaman padi, aplikasi *T. harzianum* dilaporkan mampu meningkatkan pertumbuhan akar, tinggi tanaman, serta hasil panen melalui peningkatan efisiensi penyerapan nitrogen dan fosfor (Singh *et al.*, 2023). Pada tanaman hortikultura seperti tomat dan cabai, inokulasi *Trichoderma* pada media tanam atau melalui perlakuan benih terbukti mampu meningkatkan biomassa tanaman, jumlah daun, serta ketahanan terhadap cekaman lingkungan (Li *et al.*, 2018). Selain itu, pada tanaman sayuran seperti mentimun dan selada, penggunaan *Trichoderma* juga dilaporkan meningkatkan luas daun dan kandungan klorofil yang berhubungan dengan peningkatan aktivitas fotosintesis (Ersapoetri *et al.*, 2021). Perbandingan senyawa metabolik yang dihasilkan oleh beberapa jenis *Trichoderma* sangat signifikan berbeda (Crutcher *et al.*, 2013). Sebagai contoh, *T. virens* menghasilkan campuran kaya senyawa volatil isoprena sedangkan *T. atroviride* menghasilkan volatil oxylipin (Crutcher *et al.*, 2013). Selain itu, perlu diperhatikan bahwa produksi metabolit sekunder sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (Keller, 2019), dan perbedaan kondisi pertumbuhan tanaman dalam berbagai penelitian menyulitkan perbandingan karakteristik *Trichoderma* antarspesies.

#### 3.3. *Trichoderma* sebagai Bioremediasi tanah

Akumulasi residu pestisida di tanah akibat penggunaan pestisida secara intensif menjadi permasalahan serius dalam menurunkan kualitas tanah dan mengganggu keseimbangan mikroorganisme tanah (Huang *et al.*, 2024). *Trichoderma* dilaporkan mampu mendegradasi residu pestisida di dalam tanah. Kombinasi *T. asperellum* dan

*T. harzianum* dapat mendegradasi bahan aktif insektisida thiamethoxam dan chlorantraniliprole (Ismail *et al.*, 2024) dan organo klorin seperti pentachlorophenol, endosulfan, dan diklorodifeniltri-kloroetana (DDT) (Ebsa *et al.*, 2024). Kemampuan bioremediasi *Trichoderma* juga terlihat pada proses biosorpsi logam berat, di mana *T. viride* yang diimmobilisasi dengan Ca-alginate mampu menyerap chromium secara efektif (Bishnoi *et al.*, 2007) Demikian pula, *T. inhamatum* yang dapat mendegradasi dan mereduksi Kromium (Morales *et al.*, 2008) dan *T. harzianum* yang dapat mendegradasi kadmium dalam tanah (Faedda *et al.*, 2012).

Enzim ekstraseluler seperti selulase, laccase, peroksidase, dan monooxygenase yang dihasilkan *Trichoderma* mampu mendegradasi senyawa kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana sehingga tanah lebih cepat pulih (Dacco *et al.*, 2020). Keberadaan *Trichoderma* juga dapat memulihkan aktivitas biologis tanah (Cheng *et al.*, 2025). Oleh karena itu, integrasi *Trichoderma* dalam strategi bioremediasi menawarkan pendekatan yang ramah lingkungan untuk rehabilitasi tanah pertanian sekaligus mendukung keberlanjutan agroekosistem yang ramah lingkungan walau memerlukan waktu yang lebih panjang.

#### 4. Tantangan dan Prospek penggunaan *Trichoderma* dalam Sistem Pertanian Berkelanjutan

Pemanfaatan *Trichoderma* memiliki implikasi strategis dalam pengembangan sistem pertanian berkelanjutan. Penggunaannya dapat mengurangi ketergantungan terhadap input kimia sintesis dalam budidaya pertanian yang dalam jangka panjang dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan tanah. Aktivitas *Trichoderma* dapat memodulasi struktur komunitas mikroba tanah sehingga mendukung terbentuknya kondisi tanah yang lebih supresif terhadap patogen tanaman (Cheng *et al.*, 2025). *Trichoderma* membantu proses dekomposisi bahan organik serta meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman (Liu *et al.*, 2022). Selain itu, kolonisasi akar oleh *Trichoderma* dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap berbagai stres biotik dan abiotik (Hidangmayum *et al.*, 2018), sehingga tanaman mampu tumbuh lebih optimal dalam kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan. Pemanfaatan *Trichoderma* sebagai biofertilizer maupun biopestisida menjadi salah satu strategi penting dalam pengembangan sistem pertanian yang produktif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

Perkembangan teknologi formulasi juga membuka peluang integrasi *Trichoderma* dengan pendekatan nanoteknologi untuk meningkatkan stabilitas, efisiensi, dan efektivitas pengendalian penyakit tanaman. Pemanfaatan *Trichoderma* dengan mediasi AgNPs atau AuNPs menjadi peluang pengembangan bionanopestisida. Proses ini dikenal sebagai *green synthesis*, dimana metabolit atau enzim yang dihasilkan oleh *Trichoderma* berperan dalam mereduksi ion logam menjadi nanopartikel yang stabil dan aktif secara biologis (Gour and Jain 2019). Selain itu, pengembangan metabolit *Trichoderma* melalui teknik nanoenkapsulasi dan nanoemulsi dapat meningkatkan stabilitas senyawa bioaktif, memperpanjang masa simpan, serta memungkinkan pelepasan senyawa secara terkendali di lingkungan tanah maupun rizosfer (Løvschall *et al.*, 2024) Pendekatan ini berpotensi meningkatkan efisiensi aplikasi serta mengurangi dosis penggunaan dibandingkan formulasi konvensional.

Integrasi bioformulasi berbasis *Trichoderma* dengan pendekatan omik seperti genomik, transkriptomik, proteomik, maupun metabolomik dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai interaksi molekuler antara *Trichoderma*, patogen dan tanaman inang. Pemanfaatan sensor tanah, pemetaan spasial, juga sistem pemantauan berbasis data untuk mengoptimalkan efektivitas aplikasi *Trichoderma* di lapangan. Kemajuan ini akan mempercepat transisi menuju agroekosistem yang produktif dan berkelanjutan.

#### 5. Kesimpulan

*Trichoderma* mampu menekan berbagai patogen tanaman melalui mekanisme mikoparasitisme, antibiosis dan induksi resistensi tanaman, sekaligus meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui produksi hormon pertumbuhan, peningkatan ketersediaan unsur hara, dan peningkatan toleransi terhadap stres abiotik. Selain itu, *Trichoderma* juga memiliki kemampuan mendegradasi residu pestisida dan menyerap logam berat melalui aktivitas enzimatik dan biosorpsi, sehingga membantu memulihkan kualitas dan aktivitas biologis tanah. Dengan berbagai fungsi tersebut, pemanfaatan *Trichoderma* pada kegiatan pertanian menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung sistem pertanian yang produktif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

## Daftar Pustaka

- Aseel, D. G., Alaa, A., Elsilk, S., and Gaafar, R. M. (2024). Protective and curative applications of some *Trichoderma* species to tomato plants infected by tomato mosaic virus. *Egyptian Journal of Botany*, 64(3), 109-129.
- Azizah, N., and Safni, I. (2024). In Vitro Assay of Lytic Bacteriophage to Suppress the Growth of *Ralstonia syzygii* subsp. *indonesiensis*, the Causal Pathogen of Potato Wilt Disease. *Indonesian Journal of Agricultural Research*, 7(2), 79-90.
- Behiry, S., Soliman, S. A., Massoud, M. A., Abdelbary, M., Kordy, A. M., Abdelkhalek, A., and Heflish, A. (2023). *Trichoderma pubescens* elicit induced systemic resistance in tomato challenged by *Rhizoctonia solani*. *Journal of Fungi*, 9(2), 167.
- Bishnoi, N.R.; Kumar, R.; Bishnoi, K. (2007) Biosorption of Cr (VI) with *Trichoderma viride* immobilized fungal biomass and cell free Ca-alginate beads. *Indian J. Exp. Biol.* 45, 657–664.
- Cheng, H., Gao, M., Yang, W., Sun, H., Kong, T., and Xu, H. (2025). Combined application of organic wastes and *Trichoderma longibraciatum* to promote vegetation restoration and soil quality on mining waste dump sites. *Plant and Soil*, 508(1), 567-588.
- Couto, A. P. S., Pereira, A. E., Abati, J., Fontanela, M. L. C., Dias-Arieira, C. R., and Krohn, N. G. (2021). Seed treatment with *Trichoderma* and chemicals to improve physiological and sanitary quality of wheat cultivars. *Revista Caatinga*, 34(4), 813-823.
- Crutcher, F.K., Parich, A., Schuhmacher, R., Mukherjee, P.S., Zeilinger, S., Kenerley, C. M., 2013. A putative terpene cyclase, *vir4*, is responsible for the biosynthesis of volatile terpene compounds in the biocontrol fungus *Trichoderma virens*. *Fungal Genet. Biol.* 56, 67–77.
- Dacco, C., Nicola, L., Temporiti, M. E. E., Mannucci, B., Corana, F., Carpani, G., and Tosi, S. (2020). *Trichoderma*: evaluation of its degrading abilities for the bioremediation of hydrocarbon complex mixtures. *Applied Sciences*, 10(9), 3152.
- Ebsa, G., Gizaw, B., and Alemu, T. (2024). Screening, characterization and optimization for synergistic interaction of potential dichlorodiphenyltrichloroethane degrading fungi isolated from agro-industrial effluent and farm soil. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 57, 103063.
- Ersapoetri, F. S., Soesanto, L., Mugiastuti, E., Rahayuniati, R. F., Manan, A., and Rohadi, S. (2021). Pengomposan Limbah Sayur dengan Empat *Isolat Trichoderma harzianum* dan Pengaruhnya Terhadap Pertumbuhan Tanaman Mentimun In Planta. *Agrin*, 24(2), 159-174.
- Faemma, R., Puglisi, I., Sanzaro, V., Petrone, G., and Cacciola, S. O. (2012). Expression of genes of *Trichoderma harzianum* in response to the presence of cadmium in the substrate. *Natural product research*, 26(24), 2301-2308.
- Galletti, S., Paris, R., and Cianchetta, S. (2020). Selected isolates of *Trichoderma gamsii* induce different pathways of systemic resistance in maize upon *Fusarium verticillioides* challenge. *Microbiological Research*, 233, 126406.
- Gong, Z., Yang, Y., Zhang, L., Wang, S., Luo, J., and Luo, Q. (2024). First report of *Polygonatum cyrtoneura* root rot caused by *Trichoderma virens* in China. *Plant disease*, 108(2), 525.
- Gour, A., and Jain, N. K. (2019). Advances in green synthesis of nanoparticles. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*, 47(1), 844-851.
- Halifu, S., Deng, X., Song, X., Song, R., and Liang, X. (2020). Inhibitory mechanism of *Trichoderma virens* ZT05 on *Rhizoctonia solani*. *Plants*, 9(7), 912.
- Hidangmayum, A., and Dwivedi, P. (2018). Plant responses to *Trichoderma* spp. and their tolerance to abiotic stresses: a review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(1), 758-766.
- Hossain, S., and Akter, F. (2020). Effects of *Trichoderma*-enriched biofertilizer and farmyard manure on the growth and yield of brinjal (*Solanum melongena* L.). *Dhaka University Journal of Biological Sciences*, 29(1), 1-8.
- Huang, P. C., Yuan, P., Grunseich, J. M., Taylor, J., Tiénébo, E. O., Pierson, E. A., Bernal, J.S., Kenerley, C.M., and Kolomiets, M. V. (2024). *Trichoderma virens* and *Pseudomonas chlororaphis* differentially regulate maize resistance to anthracnose leaf blight and insect herbivores when grown in sterile versus non-sterile soils. *Plants*, 13(9), 1240.
- Huang, Y., Zhang, X., and Li, Z. (2024). Analysis of nationwide soil pesticide pollution: Insights from China. *Environmental Research*, 252, 118988.
- Ismail, A. M., Ahmed, A. Y., Eid, H. T., Saleh, R. A., Helmy, R. M. A., El Ganainy, S. M., and Mohamed, H. A. (2024). Exploring The Efficacy Of Indigenous *Trichoderma Asperellum* And *T. Harzianum* For

- Biodegrading Thiamethoxam And Chlorantraniliprole Insecticides. *Applied Ecology and Environmental Research*, 22(4).
- Karaca, K., & Eltem, R. (2026). Screening of *Trichoderma* spp. for biofertilizer and biocontrol potential in vitro. *Sigma J Eng Nat Sci–Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 162-173.
- Keller, N.P., 2019. Fungal secondary metabolism: regulation, function and drug discovery. *Nat. Rev. Microbiol.* 17, 167–180.
- Li, Y. T., Hwang, S. G., Huang, Y. M., and Huang, C. H. (2018). Effects of *Trichoderma asperellum* on nutrient uptake and Fusarium wilt of tomato. *Crop Protection*, 110, 275-282.
- Lisnawita, Saragih, W. S., Tantawi, A. R., Safni, I., and Lubis, K. (2025). Antifungal Effects of Silver Nanoparticles, Synthesized Using *Trichoderma harzianum*, on *Ganoderma boninense* causes of basal stem rot on oil palm. *Plant Disease*, (ja).
- Liu, L., Xu, Y., Cao, H., Fan, Y., Du, K., Bu, X., and Gao, D. (2022). Effects of *Trichoderma harzianum* biofertilizer on growth, yield, and quality of *Bupleurum chinense*. *Plant direct*, 6(11), e461.
- Løvschall, K. B., Velasquez, S. T., Kowalska, B., Ptaszek, M., Jarecka, A., Szczech, M., and Wurm, F. R. (2024). Enhancing stability and efficacy of *Trichoderma* bio-control agents through layer-by-layer encapsulation for sustainable plant protection. *Advanced Sustainable Systems*, 8(7), 2300409.
- Luo, M., Chen, Y., Huang, Q., Huang, Z., Song, H., and Dong, Z. (2023). *Trichoderma koningiopsis* Tk905: an efficient biocontrol, induced resistance agent against banana Fusarium wilt disease and a potential plant-growth-promoting fungus. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1301062.
- Manzar, N., Kashyap, A. S., Goutam, R. S., Rajawat, M. V. S., Sharma, P. K., Sharma, S. K., and Singh, H. V. (2022). *Trichoderma*: advent of versatile biocontrol agent, its secrets and insights into mechanism of biocontrol potential. *Sustainability*, 14(19), 12786.
- Manzar, N., Kashyap, A. S., Goutam, R. S., Rajawat, M. V. S., Sharma, P. K., Sharma, S. K., and Singh, H. V. (2022). *Trichoderma*: advent of versatile biocontrol agent, its secrets and insights into mechanism of biocontrol potential. *Sustainability*, 14(19), 12786.
- Meesters, C., Cialdella, L., Ingels, R., Jacquemyn, H., and Lievens, B. (2023). Cultivar-dependent effects of plant-beneficial fungi on plant nutrient composition and feeding damage by *Nesidiocoris tenuis*. *Plant and Soil*, 492(1), 177-190.
- Morales-Barrera, L., and Cristiani-Urbina, E. (2008). Hexavalent chromium removal by a *Trichoderma inhamatum* fungal strain isolated from tannery effluent. *Water, Air, and Soil Pollution*, 187(1), 327-336.
- Mukherjee, A., and Ghosh, S. K. (2023). An eco-friendly approach of biocontrol of aphid (*Aphis gossypii* Glover) by *Trichoderma harzianum*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 102.
- Mukhopadhyay, R and Pan S.K. (2012). Isolation and selection of some antagonistic *Trichoderma* species from different new alluvial zones of Nadia district, West Bengal. *J Bot Soc Bengal* 66(2):149–152
- Mukhopadhyay, R., and Kumar, D. (2020). *Trichoderma*: a beneficial antifungal agent and insights into its mechanism of biocontrol potential. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(1), 133.
- Nababan, T., Lisnawita, and Safni, I. (2024). Induksi Ketahanan Tanaman Tomat terhadap *Ralstonia solanaceae* subsp. *indonesiensis* Menggunakan Bakteri Endofit dan Asam Salisilat. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 20(6).
- Najam, L., and Alam, T. (2023). Pesticides and their impacts: Benefits and hazards. In *Environmental Pollution Impact on Plants* (pp. 19-68). Apple Academic Press.
- Nazarov, P. A., Baleev, D. N., Ivanova, M. I., Sokolova, L. M., and Karakozova, M. V. (2020). Infectious plant diseases: etiology, current status, problems and prospects in plant protection. *Acta naturae*, 12(3), 46.
- Nieto-Jacobo, M.F., Steyaert, J.M., Salazar-Badillo, F.B., Nguyen, D.V., Rostás, M., Braithwaite, M., De Souza, J.T., Jimenez-Bremont, J.F., Ohkura, M., Stewart, A., Mendoza-Mendoza, A., 2017. Environmental growth conditions of *Trichoderma* spp. affects indole acetic acid derivatives, volatile organic compounds, and plant growth promotion. *Front. Plant Sci.* 8, 102.
- Novy, V., Nielsen, F., Seiboth, B., and Nidetzky, B. (2019). The influence of feedstock characteristics on enzyme production in *Trichoderma reesei*: a review on productivity, gene regulation and secretion profiles. *Biotechnology for biofuels*, 12(1), 238.
- Qi, Q., Fan, C., Wu, H., Sun, L., and Cao, C. (2023). Preparation of *Trichoderma asperellum* microcapsules and biocontrol of cucumber powdery mildew. *Microbiology Spectrum*, 11(3), e05084-22.
- Rahim, S., and Iqbal, M. (2019). Exploring enhanced insecticidal activity of mycelial extract of *Trichoderma harzianum* against *Diuraphis noxia* and *Tribolium castaneum*. *Sarhad J Agric.* 35 (3): 757-62.
- Saharan, R., Patil, J. A., Yadav, S., Kumar, A., and Goyal, V. (2023). The nematocidal potential of novel fungus, *Trichoderma asperellum* FbMi6 against *Meloidogyne incognita*. *Scientific Reports*, 13(1), 6603.

- Saldana-Mendoza, S. A., Pacios-Michelena, S., Palacios-Ponce, A. S., Chávez-González, M. L., and Aguilar, C. N. (2023). Trichoderma as a biological control agent: mechanisms of action, benefits for crops and development of formulations. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(10), 269.
- Savary, S., and Willocquet, L. (2020). Modeling the impact of crop diseases on global food security. *Annual review of phytopathology*, 58(1), 313-341.
- Singh, P., Singh, R., Madhu, G. S., and Singh, V. P. (2023). Seed biopriming with *Trichoderma Harzianum* for growth promotion and drought tolerance in rice (*Oryza Sativus*). *Agricultural Research*, 12(2), 154-162.
- Singh, R., Tomer, A., Prasad, D., and Viswanath, H. S. (2021). Biodiversity of *Trichoderma* species in different agro-ecological habitats. In *Trichoderma: Agricultural Applications and Beyond*(pp. 21-40). Cham: Springer International Publishing.
- Singh, S. P., Keswani, C., Singh, S. P., Sansinenea, E., and Hoat, T. X. (2021). Trichoderma spp. mediated induction of systemic defense response in brinjal against *Sclerotinia sclerotiorum*. *Current Research in Microbial Sciences*, 2, 100051.
- Sood, M., Kapoor, D., Kumar, V., Sheteiwiy, M. S., Ramakrishnan, M., Landi, M., Araniti, F and Sharma, A. (2020). Trichoderma: The “secrets” of a multitalented biocontrol agent. *Plants*, 9(6), 762.
- Veena, S. S., Krishna, P. N., and Karthikeyan, S. (2023). Synergistic effect of oil cakes and *Trichoderma asperellum* in the suppression of *Sclerotium rolfsii*. *Journal of Root Crops*, 49(1), 39-45.
- Wonglom, P., Ito, S., Sunpapao, A., 2020. Volatile organic compounds emitted from endophytic fungus *Trichoderma asperellum* T1 mediate antifungal activity, defense response and promote plant growth in lettuce (*Lactuca sativa*). *Fungal Ecol.* 43, 100867.
- Yadav, M., Dubey, M. K., and Upadhyay, R. S. (2021). Systemic resistance in chilli pepper against anthracnose (caused by *Colletotrichum truncatum*) induced by *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma asperellum* and *Paenibacillus dendritiformis*. *Journal of Fungi*, 7(4), 307.
- Yang, Y., Fang, B., Feng, S., Wang, Z., Luo, Z., Yao, Z., Zou, H and Huang, L. (2021). Isolation and identification of *Trichoderma asperellum*, the novel causal agent of green mold disease in sweetpotato. *Plant disease*, 105(6), 1711-1718.
- Zhu, N., Zhou, J.J., Zhang, S.W., and Xu, B.L. (2022). Mechanisms of *Trichoderma longibrachiatum* T6 fermentation against *Valsa mali* through inhibiting its growth and reproduction, pathogenicity and gene expression. *J. Fungi*8:113. doi: 10.3390/jof8020113