

UJI ANTAGONISME JAMUR *Trichoderma* sp. ASAL LIMBAH JAMUR MERANG TERHADAP BEBERAPA JAMUR PATOGEN TANAMAN HORTIKULTURA SECARA *IN VITRO*

Muhammad Ramadhani Zakaria Hasibuan, Satriyo Restu Adhi*, Fauzia Mustikasari

Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Singaperbangsa Karawang,
Jl. HS. Ronggo Waluyo, Telukjambe Timur, Kabupaten Karawang, Jawa Barat 41361, Indonesia.

*Email: satriyo.restu@faperta.unsika.ac.id

Submitted: 16-09-2026

Accepted: 07-10-2026

Approved: 07-10-2026

ABSTRAK

Keberadaan jamur patogen merupakan kendala utama dalam budi daya hortikultura yang membutuhkan solusi pengendalian hayati yang efektif dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kemampuan antagonisme isolat *Trichoderma* sp. asal limbah jamur merang terhadap enam patogen hortikultura, yaitu *F. oxysporum* tanaman bawang merah dan cabai, *Sclerotium rolfsii*, *Rhizoctonia solani* padi, *Colletotrichum*, dan *Rhizopus stolonifer* stroberi, secara *in vitro* menggunakan metode *dual culture* dalam rancangan acak lengkap pola faktorial dengan empat ulangan. Parameter yang diukur meliputi persentase inhibisi pertumbuhan radial (PIRG), laju pertumbuhan harian (LPH), dan *area under the colony growth curve* (AUCGC), dianalisis dengan uji Kruskal–Wallis dan uji lanjut Dunn's–Bonferroni ($\alpha = 5\%$). Hasil menunjukkan bahwa *Trichoderma* sp. mampu menekan seluruh patogen uji, dengan PIRG tertinggi pada *F. oxysporum* isolat cabai (59,97%) dan terendah pada *S. rolfsii* (34,58%). *S. rolfsii* mencatat nilai LPH dan AUCGC tertinggi, mengindikasikan agresivitas kolonisasi tinggi dengan respons penekanan paling rendah. Pengamatan mikroskopis mengonfirmasi mekanisme mikoparasitisme berupa pelilitan dan lisis hifa, serta antibiosis yang ditandai oleh zona bening pada area interaksi. Pengelompokan statistik ini konsisten pada ketiga parameter menunjukkan kemampuan penekanan yang stabil dengan efektivitas bervariasi sesuai tingkat agresivitas patogen, sehingga *Trichoderma* sp. asal limbah jamur merang berpotensi sebagai biofungisida untuk pengendalian patogen hortikultura.

Kata kunci: *Trichoderma* sp., biokontrol, *dual culture*, AUCGC, hortikultura

ABSTRACT

Pathogenic fungi remain a major constraint in horticultural cultivation, necessitating effective and environmentally friendly biological control solutions. This study evaluated the antagonistic ability of *Trichoderma* sp. isolated from spent mushroom (*Volvariella volvacea*) substrate against six horticultural pathogens *F. oxysporum* from shallot and chili, *Sclerotium rolfsii*, *Rhizoctonia solani* from rice, *Colletotrichum* sp., and *Rhizopus stolonifer* from strawberry *in vitro* using the *dual culture* method within a completely randomized factorial design with four replications. Parameters measured were percentage inhibition of radial growth (PIRG), daily growth rate (LPH), and *area under the colony growth curve* (AUCGC), analyzed using the Kruskal Wallis test followed by Dunn's Bonferroni post hoc test ($\alpha = 5\%$). *Trichoderma* sp. suppressed all tested pathogens, with the highest PIRG against the chili isolate of *F. oxysporum* (59.97%) and the lowest against *S. rolfsii* (34.58%). *S. rolfsii* exhibited the highest LPH and AUCGC values, indicating high colonization aggressiveness with the weakest suppression response. Microscopic observations confirmed mycoparasitism, marked by hyphal coiling and lysis, and antibiosis, indicated by clear inhibition zones. Consistent statistical grouping across all parameters demonstrated stable suppression capacity, with effectiveness varying according to pathogen aggressiveness, indicating that *Trichoderma* sp. from spent mushroom substrate holds potential as a biofungicide for horticultural pathogen control.

Keywords: *Trichoderma* sp., biocontrol, *dual culture*, AUCGC, horticulture

PENDAHULUAN

Komoditas hortikultura seperti bawang merah, cabai, padi, dan stroberi sangat rentan terhadap serangan jamur patogen berspektrum inang luas yang menyebabkan kerugian pada berbagai fase produksi, mulai dari pembibitan hingga pascapanen (Hewedy *et al.*, 2020). *Fusarium oxysporum*, *Sclerotium rolfsii*, *Rhizoctonia solani*, *Colletotrichum*, dan *Rhizopus stolonifer* merupakan beberapa contoh patogen tular tanah dan pascapanen yang secara konsisten dilaporkan menyebabkan penurunan hasil dan kualitas produk hortikultura di berbagai wilayah pertanian, sehingga keberadaannya menjadi perhatian penting dalam upaya pengamanan produksi pangan (Nizamani *et al.*, 2025). Pengendalian konvensional berbasis fungisida sintetik yang selama ini diandalkan menimbulkan dampak serius berupa resistensi patogen, dampak negatif terhadap lingkungan, dan biaya produksi yang tinggi, sehingga kebutuhan terhadap alternatif pengendalian yang lebih ramah lingkungan menjadi semakin mendesak (Samsudin & Amaria, 2016).

Trichoderma sp. telah lama dikenal sebagai agens biokontrol yang mampu menekan patogen tular tanah maupun pascapanen melalui kombinasi mekanisme mikoparasitisme, antibiosis, serta kompetisi ruang dan nutrisi (Manzar *et al.*, 2022; Woo *et al.*, 2023). Penelitian terdahulu telah membuktikan efektivitas *Trichoderma* terhadap masing-masing patogen target secara terpisah, misalnya *T. asperellum* yang mampu menekan pertumbuhan beberapa spesies *Fusarium* melalui kombinasi antibiosis dan kompetisi (Elshahawy & Marrez, 2024), dan *T. virens* yang menghambat *Rhizoctonia solani* melalui produksi enzim degradasi dinding sel (Ghasemi *et al.*, 2020). Namun demikian, bukti tersebut masih bersifat parsial karena masing-masing hanya menguji satu jenis patogen, sehingga gambaran komprehensif mengenai spektrum antagonisme satu isolat terhadap kombinasi beberapa patogen hortikultura strategis secara bersamaan perlu dilakukan (Nair, 2020).

Isolat *Trichoderma* sp. yang digunakan dalam penelitian ini diisolasi dari limbah media jamur merang (*Volvariella volvacea*) sebagai sumber non-konvensional yang kaya bahan organik (Adhi, 2023), dan telah melalui tahap isolasi, pemurnian, serta skrining antagonisme awal. Evaluasi efektivitas antagonisme dalam penelitian ini tidak hanya mengandalkan pertumbuhan radial patogen pada H+7,

Persentase inhibisi pertumbuhan radial (PIRG) pada satu titik akhir pengamatan, melainkan juga menggunakan laju pertumbuhan harian (LPH), dan *area under the colony growth curve* (AUCGC) yang diadaptasi dari konsep *area under the disease progress curve* (AUDPC) dalam epidemiologi penyakit tanaman, guna menangkap dinamika penekanan pertumbuhan patogen secara lebih menyeluruh sejak fase awal inkubasi. Pendekatan berlapis ini dilengkapi dengan pengamatan mikroskopis pada zona interaksi *dual culture* untuk memverifikasi keberadaan mekanisme mikoparasitisme, seperti pelilitan (*coiling*), penetrasi, dan lisis hifa patogen (Mukherjee *et al.*, 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan antagonisme isolat *Trichoderma* sp. asal limbah jamur merang terhadap enam patogen penting tanaman hortikultura secara *in vitro* melalui pengukuran pertumbuhan radial patogen H+7, LPH, AUCGC dan PIRG, sekaligus menganalisis perbedaan karakter agresivitas di antara patogen uji serta mendeskripsikan indikasi mekanisme antagonisme yang mendasarinya.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di laboratorium organisme pengganggu tumbuhan (OPT), Fakultas Pertanian, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, Jawa Barat, selama dua bulan (Maret – April 2026). Bahan biologis berupa isolat *Trichoderma* sp. asal limbah media spent jamur merang (*Volvariella volvacea*) dan enam isolat patogen target bersumber dari koleksi laboratorium yang sama, dan telah dikonfirmasi patogenisitasnya pada penelitian-penelitian sebelumnya (Nuraeni *et al.*, 2025; Nursaadah *et al.*, 2025; Margaretha & Adhi, 2026). Media tumbuh yang digunakan adalah *potato dextrose agar* (PDA), dengan peralatan utama meliputi *laminar air flow*, cawan Petri berdiameter 90 mm, *cork borer* berdiameter 5 mm, jangka sorong, mikroskop cahaya, dan termohigrometer digital.

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial dengan dua faktor: aplikasi *Trichoderma* sp. (T0 = kontrol; T1 = perlakuan) dan jenis patogen (P1–P6), menghasilkan 12 kombinasi perlakuan × 4 ulangan (48 unit percobaan). Uji antagonisme dilakukan secara *in vitro* melalui metode *dual culture*: disk inokulum (Ø 5 mm) *Trichoderma* sp. dan patogen diletakkan berhadapan pada media PDA, diinkubasi pada suhu $25 \pm 2^\circ \text{C}$ selama tujuh hari (H+1–H+7).

Pengamatan penunjang mencakup suhu dan kelembapan ruang inkubasi, pengamatan antibiosis (zona bening makroskopis dan abnormalitas hifa mikroskopis, perbesaran 100×, *methylene blue*), indikasi kompetensi ruang dan nutrisi, serta indikasi mikoparasitisme (*scotch tape method*, 100×, hari ke-7) untuk mendeteksi *coiling*, penetrasi, dan lisis hifa.

Pengamatan utama meliputi empat parameter kuantitatif: pertumbuhan radial patogen pada H+7, laju pertumbuhan harian (LPH) = $(R_t - R_o)/t$, diukur dari pertumbuhan radial koloni setiap 24 jam, *area under the colony growth curve* (AUCGC), dihitung dengan metode trapesium untuk merangkum

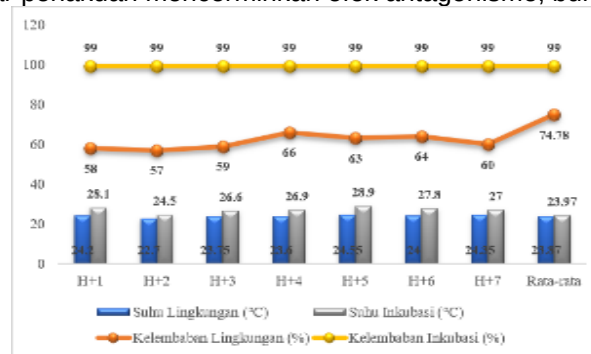
akumulasi pertumbuhan koloni selama tujuh hari, dengan persentase reduksi AUCGC = $[(AUCGC \text{ kontrol} - AUCGC \text{ perlakuan})/AUCGC \text{ kontrol}] \times 100\%$; dan Persentase Inhibisi Pertumbuhan Radial (PIRG) pada H+7 = $[(R_k - R_p)/R_k] \times 100$, dikategorikan mengikuti SNI 8027.3:2014 (sangat efektif bila $PI \geq 50\%$).

Data Data pertumbuhan radial H+7, LPH, dan AUCGC tidak memenuhi asumsi normalitas dan homogenitas ragam, sehingga dianalisis menggunakan uji non-parametrik Kruskal–Wallis dengan uji lanjut Dunn's dan koreksi Bonferroni pada taraf nyata 5%. Data PIRG dianalisis deskriptif mengacu pada SNI 8027.3:2014, sedangkan data pengamatan penunjang dianalisis deskriptif-kualitatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Lingkungan dan Mekanisme Antagonisme

Suhu selama penelitian berkisar 22,0 – 24,5° C (lingkungan) dan 24,5 – 28,9° C (ruang inkubasi), dengan kelembapan lingkungan 57 – 66% dan kelembapan inkubasi konsisten 99% (Gambar 1), sesuai kisaran optimal pertumbuhan fungi (Alfiky, 2021). Pemantauan suhu dan kelembapan dilakukan secara harian menggunakan termohigrometer untuk memastikan konsistensi kondisi mikroklimat selama masa inkubasi. Ruang inkubasi dijaga tertutup dan terhindar dari paparan sinar matahari langsung guna meminimalkan fluktuasi suhu akibat faktor eksternal. Kondisi ini stabil sepanjang H+1–H+7, sehingga variasi pertumbuhan antar perlakuan mencerminkan efek antagonisme, bukan fluktuasi lingkungan.



Gambar 1. Perbandingan fluktuasi suhu dan kelembapan lingkungan dengan ruang inkubasi (H+1 hingga H+7).

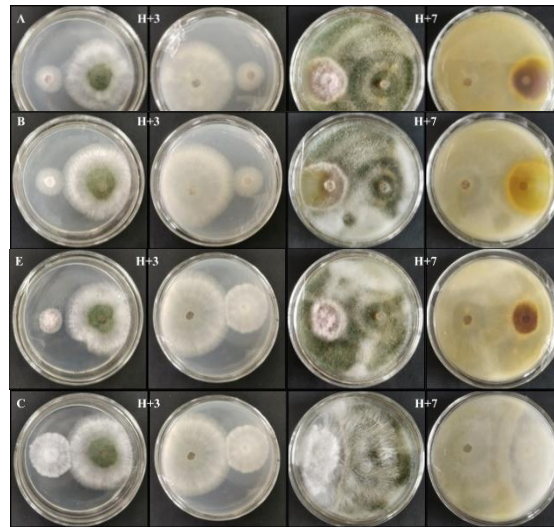
(Sumber: Dokumentasi pribadi, 2026)

Antibiosis teramati pada seluruh kombinasi, ditandai zona bening, perubahan warna koloni ke coklat-kehitaman, dan abnormalitas hifa berupa plasmolisis serta pembengkakan. Kondisi tersebut diduga disebabkan oleh senyawa antifungi volatil dan nonvolatil yang disekresikan *Trichoderma* sp. sehingga berdifusi ke dalam media dan menghambat pertumbuhan patogen uji. Zona bening paling tegas terbentuk pada *Colletotrichum* (E) dan *R. solani* padi (D), sedangkan pada *S. rolfsii* (C) zona bening relatif sempit (Gambar 2).



Gambar 2. Penampakan makroskopis antibiosis dual culture *Trichoderma* sp. terhadap patogen target pada media PDA (H+7). Tanda panah menunjukkan zona hambatan dan perubahan pigmen pada area interaksi. (Sumber: Dokumentasi pribadi, 2026)

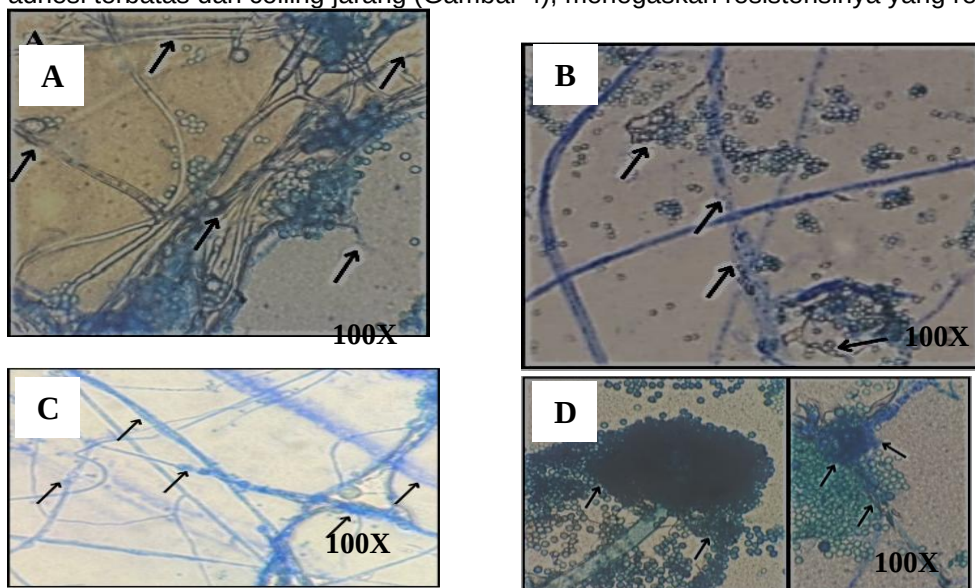
Kompetisi ruang menunjukkan pola serupa: *Trichoderma* sp. dominan sejak H+3 pada *F. oxysporum* tanaman bawang merah dan cabai (A, B) dan *Colletotrichum* (E), menutupi sebagian besar cawan pada H+7. Pada *S. rolfsii* (C), luas koloni kedua organisme tetap seimbang hingga H+7 (Gambar 3), konsisten dengan nilai PIRG dan AUCGC yang menempatkan *S. rolfsii* sebagai patogen paling sulit ditekan.

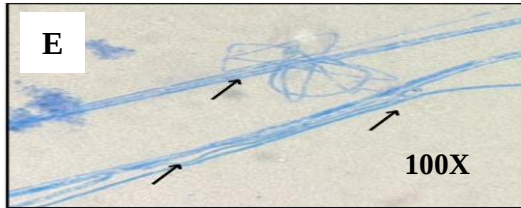


Gambar 3. Pola kolonisasi *Trichoderma* sp. dan patogen target secara makroskopis pada H+3 dan H+7 pada media PDA. (Sumber: Dokumentasi pribadi, 2026)

Selain mekanisme antibiosis yang teramati secara makroskopis, keberhasilan *Trichoderma* sp. dalam menekan pertumbuhan patogen uji juga didukung oleh mekanisme mikoparasitisme yang bekerja secara langsung pada tingkat hifa. Mekanisme ini merupakan bentuk interaksi antagonistik fisik, di mana *Trichoderma* sp. secara aktif mendekati, melilit, dan merusak struktur hifa patogen sasaran. Proses ini umumnya diawali dengan pengenalan kimiawi terhadap hifa inang, dilanjutkan dengan pertumbuhan hifa *Trichoderma* sp. mengarah dan melekat pada hifa patogen sebelum akhirnya terjadi penetrasi. Untuk mengonfirmasi keberadaan mekanisme tersebut, dilakukan pengamatan mikroskopis guna mengidentifikasi pola adhesi, *coiling*, serta indikasi lisis pada hifa masing-masing isolat patogen uji.

Pengamatan mikroskopis (100×, *methylene blue*) mengonfirmasi mikoparasitisme berupa adhesi hifa, *coiling*, dan indikasi lisis. Mekanisme tersebut mencerminkan interaksi antagonistik langsung, di mana hifa *Trichoderma* sp. melilit dan menembus hifa patogen sehingga integritas selulernya terganggu. *Coiling* jelas dan kerusakan hifa nyata teramati pada *F. oxysporum* tanaman cabai (A), *Colletotrichum* (B), *R. solani* padi (C), dan *R. stolonifer* stroberi (D); sebaliknya pada *S. rolfsii* (E) hanya adhesi terbatas dan *coiling* jarang (Gambar 4), menegaskan resistensinya yang relatif tinggi.





Gambar 4. Representasi pengamatan mikroskopis interaksi awal dan pelilitan (*coiling*) *Trichoderma* sp. terhadap hifa patogen target pada perbesaran 100×.
(Sumber: Dokumentasi pribadi, 2026)

Parameter Pertumbuhan Kuantitatif

Uji Kruskal–Wallis menunjukkan perlakuan *Trichoderma* sp. berpengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap keempat parameter kuantitatif (Tabel 1).

Tabel 1. Rerata pertumbuhan radial (H+7), laju pertumbuhan harian (LPH), *area under the colony growth curve* (AUCGC), dan persentase inhibisi pertumbuhan radial (PIRG) pada perlakuan *dual culture* *Trichoderma* sp. terhadap enam patogen uji.

Kode	Jenis Patogen	Diameter H+7 (mm)	LPH (mm/hari)	AUCGC	PIRG (%)
P1	<i>F. oxysporum</i> tanaman bawang merah	18,52 a	2,65 a	71,66 a	48,44
P2	<i>F. oxysporum</i> tanaman cabai	20,46 a	2,92 a	74,63 a	59,97
P3	<i>Sclerotium rolfsii</i>	49,63 b	7,09 b	158,04 b	34,58
P4	<i>Rhizoctonia solani</i> padi	26,54 ab	3,79 ab	95,93 ab	52,98
P5	<i>Colletotrichum</i>	19,16 a	2,74 a	69,52 a	53,02
P6	<i>Rhizopus stolonifer</i> stroberi	26,48 ab	3,78 ab	111,61 ab	55,13

Keterangan: Huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji lanjut Dunn's dengan koreksi Bonferroni ($\alpha = 5\%$).

Pertumbuhan radial H+7. Diameter koloni patogen tertinggi pada *S. rolfsii* (49,63 mm, notasi "b"), berbeda nyata dari *F. oxysporum* tanaman bawang merah dan cabai (A, B) dan *Colletotrichum* (18,52 – 20,46 mm, notasi "a"; Adj. Sig. $< 0,05$), sejalan dengan kapasitas *S. rolfsii* membentuk sklerotia sebagai struktur bertahan (Ayed *et al.*, 2018). Struktur sklerotia ini memungkinkan patogen mempertahankan cadangan energi dan melanjutkan pertumbuhan miselium secara agresif meskipun berada dalam kondisi kompetisi ruang dan nutrisi yang ketat dengan *Trichoderma* sp.

Laju pertumbuhan harian (LPH). Pola identik terulang: LPH *S. rolfsii* tertinggi (7,09 mm/hari, "b"), sedangkan *F. oxysporum* tanaman bawang merah dan cabai (A, B) dan *Colletotrichum* terendah (2,65 – 2,92 mm/hari, "a"), menegaskan laju kolonisasi *S. rolfsii* yang sulit diredam. Konsistensi pola ini antara data diameter koloni dan LPH memperkuat indikasi bahwa tingginya kecepatan pertumbuhan *S. rolfsii* bukan sekadar fenomena sesaat, melainkan karakter agresivitas intrinsik yang bertahan sepanjang periode pengamatan.

Area under the colony growth curve (AUCGC). AUCGC tertinggi tercatat pada *S. rolfsii* (158,04, "b"); *R. solani* padi dan *R. stolonifer* stroberi berada di posisi menengah (95,93 – 111,61, "ab"). Reduksi AUCGC tertinggi justru pada *R. solani* padi (40,76%) meski nilai absolutnya masih tinggi, menunjukkan bahwa penurunan luasan pertumbuhannya paling besar relatif terhadap potensi normalnya (Manzar *et al.*, 2022; Patil & Raja, 2022). Temuan ini mengindikasikan bahwa penilaian efektivitas antagonisme tidak dapat hanya bertumpu pada nilai absolut, melainkan juga perlu mempertimbangkan besaran reduksi relatif terhadap kapasitas pertumbuhan alami masing-masing patogen.

Persentase inhibisi pertumbuhan radial (PIRG). PIRG tertinggi pada *F. oxysporum* tanaman cabai (59,97%) dan terendah pada *S. rolfsii* (34,58%). Empat patogen (*F. oxysporum* tanaman cabai, *R. solani*, *Colletotrichum*, *R. stolonifer* stroberi) mencapai PIRG $>50\%$ (kategori "sangat efektif", SNI 8027.3:2014), sementara *S. rolfsii* berada di bawah ambang (34,58%) dan *F. oxysporum* tanaman bawang merah (48,44%), meski tetap menunjukkan penekanan yang bermakna secara biologis (Ghasemi *et al.*, 2020; Kareem & Mohsen, 2021). Perbedaan kategori efektivitas ini turut mengonfirmasi bahwa respons masing-masing patogen terhadap *Trichoderma* sp. sangat bergantung pada karakter biologis dan mekanisme pertahanan yang dimiliki setiap spesies.

Keempat parameter menunjukkan keselarasan: *S. rolfsii* konsisten paling sulit ditekan, *F. oxysporum* tanaman cabai dan *Colletotrichum* paling responsif. Sinergi kompetisi ruang, antibiosis, dan mikoparasitisme terkuat pada kelompok responsif ini, mengindikasikan potensi *Trichoderma* sp. asal limbah jamur merang sebagai agens biokontrol berspektrum luas (Rajesh *et al.*, 2016; Adhi, 2023).

Rekapitulasi Mekanisme Antagonisme

Tabel 2. Rekapitulasi indikator antibiosis dan mikoparasitisme *Trichoderma* sp. terhadap enam patogen target, dibandingkan dengan nilai PIRG.

Kode	Patogen Target	Antibiosis	Mikoparasitisme	PIRG (%)
T1P1	<i>F. oxysporum</i> tanaman bawang merah	+	++	48,44
T1P2	<i>F. oxysporum</i> tanaman cabai	+	++	59,97
T1P3	<i>Sclerotium rolfsii</i>	+/-	+	34,58
T1P4	<i>Rhizoctonia solani</i> padi	+	++	52,98
T1P5	<i>Colletotrichum</i>	+	++	53,02
T1P6	<i>Rhizopus stolonifer</i> stroberi	+	++	55,13

Keterangan: ++ = jelas; + = terdeteksi/lemah; +/- = sangat lemah/minimal.

Tabel 2 menunjukkan korelasi kuat antara intensitas mikoparasitisme dan PIRG: lima kombinasi dengan penilaian mikoparasitisme “++” seluruhnya mencatat PIRG >48%, sedangkan *S. rolfsii* (mikoparasitisme “+”, antibiosis “+/-”) mencatat PIRG terendah. Ini mengindikasikan mikoparasitisme yang terjadi kontak fisik langsung antar hifa sebagai mekanisme paling berperan dibanding antibiosis semata (Mukherjee *et al.*, 2022; Manzar *et al.*, 2022).

Secara praktis, efektivitas *Trichoderma* sp. di lapangan akan bergantung pada kepadatan inokulum dan waktu aplikasi yang mendukung kontak hifa optimal (Woo *et al.*, 2023). Untuk patogen resisten seperti *S. rolfsii*, pengendalian tunggal perlu dikombinasikan dengan sanitasi lahan atau agens hayati pelengkap. Mengingat seluruh hasil berasal dari pengujian *in vitro* pada media PDA, temuan ini merupakan bukti potensi awal yang memerlukan konfirmasi *in vivo* sebelum direkomendasikan sebagai agens biokontrol komersial.

KESIMPULAN

1. Isolat *Trichoderma* sp. asal limbah jamur merang terbukti mampu menghambat pertumbuhan seluruh enam patogen tanaman hortikultura yang diuji secara *in vitro*, dengan nilai PIRG berkisar antara 34,58% (*S. rolfsii*) hingga 59,97% (*F. oxysporum* tanaman cabai), disertai penurunan LPH dan AUCGC pada seluruh patogen dalam perlakuan dual culture dibandingkan kontrol.
2. Terdapat perbedaan nyata karakter pertumbuhan dan tingkat agresivitas di antara keenam patogen uji yang tercermin secara konsisten pada ketiga parameter, dengan *Sclerotium rolfsii* sebagai patogen paling agresif dan paling sulit ditekan, sementara *Fusarium oxysporum* (tanaman bawang merah dan cabai) dan *Colletotrichum* paling responsif terhadap antagonisme.
3. Pengamatan mekanisme secara makroskopis dan mikroskopis mengonfirmasi keterlibatan kompetisi ruang dan nutrisi, antibiosis, dan mikoparasitisme yang bekerja secara sinergis.
4. Temuan ini menunjukkan bahwa isolat *Trichoderma* sp. asal limbah jamur merang berpotensi dikembangkan sebagai kandidat biofungisida lokal berspektrum luas untuk pengendalian patogen penting tanaman hortikultura.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas kemudahan dan kekuatan yang diberikan sepanjang proses penelitian hingga jurnal ini dapat terselesaikan, serta mengapresiasi diri sendiri atas keteguhan untuk terus belajar dan tidak menyerah menghadapi berbagai tantangan selama proses tersebut. Penghargaan dan terima kasih yang tulus disampaikan kepada kedua orang tua atas doa, dukungan moril maupun materil, dan kepercayaan yang tak pernah putus; kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan kesabaran yang telah membentuk penulis menjadi lebih baik secara akademik maupun pribadi; serta kepada asisten laboratorium atas bantuan teknis dan kerja sama sehingga seluruh rangkaian pengujian dapat berjalan lancar. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan seperjuangan yang telah memberikan dukungan, semangat, dan diskusi yang berharga selama proses penelitian hingga penyusunan naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhi, S. R. (2023). Potensi *Spent Mushroom Substrate* dalam Perlindungan Tanaman: Meta Analisis Terhadap Pengaruhnya dalam Pengendalian Hama dan Penyakit. Gunung Djati Conference Series, 33. <https://conferences.uinsgd.ac.id/>
- Alfiky, A. (2021). Deciphering *Trichoderma*–Plant–Pathogen Interactions for Better Development of Biocontrol Applications. *Journal of Fungi*, 7(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/JOF7010061>
- Ayed, F., Khiareddine, H. J., Abdallah, R. A. Ben, & Remadi, M. D. (2018). Effect of Temperatures and Culture Media on *Sclerotium rolfsii* Mycelial Growth, Sclerotial Formation and Germination. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 9(8). <https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000446>
- Elshahawy, I. E., & Marrez, D. A. (2024). Antagonistic activity of *Trichoderma asperellum* against *Fusarium* species, chemical profile and their efficacy for management of *Fusarium*-root rot disease in dry bean. *Pest Management Science*, 80(3), 1153–1167. <https://doi.org/10.1002/ps.7846>
- Ghasemi, S., Safaie, N., Shahbazi, S., Shams-Bakhsh, M., & Askari, H. (2020). The Role of Cell Wall Degrading Enzymes in Antagonistic Traits of *Trichoderma virens* Against *Rhizoctonia solani*. *Iranian Journal of Biotechnology*, 18(4), 2333. <https://doi.org/10.30498/IJB.2020.2333>
- Hewedy, O. A., Abdel Lateif, K. S., Seleiman, M. F., Shami, A., Albarakaty, F. M., & El-Meihy, R. M. (2020). Phylogenetic Diversity of *Trichoderma* Strains and Their Antagonistic Potential against Soil-Borne Pathogens under Stress Conditions. *Biology*, 9(8), 1–21. <https://doi.org/10.3390/biology9080189>
- J. Kareem, H., & Mohsen Al-Araji, A. (2021). Evaluation of *Trichoderma Harzianum* Biological Control Against *Fusarium Oxysporum* F.Sp. *Melongenae*. *Iraqi Journal of Science*, 2051–2060. <https://doi.org/10.24996/IJS.2017.58.4B.7>
- Manzar, N., Kashyap, A. S., Goutam, R. S., Rajawat, M. V. S., Sharma, P. K., Sharma, S. K., & Singh, H. V. (2022). *Trichoderma*: Advent of Versatile Biocontrol Agent, Its Secrets and Insights into Mechanism of Biocontrol Potential. *Sustainability*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/su141912786>
- Margaretha, E., & Adhi, S. R. (2026). Uji Aplikasi Kitosan Sebagai Edible Coating dalam Pengendalian Penyakit Antraknosa (*Colletotrichum* spp.) Pada Buah Pisang Cavendish (*Musa acuminata* L.) di Laboratorium. *Jurnal Ilmiah Respati*, 17(1). <https://ejournal.urindo.ac.id/index.php/pertanian>
- Mukherjee, P. K., Mendoza-Mendoza, A., Zeilinger, S., & Horwitz, B. A. (2022). Mycoparasitism as a mechanism of *Trichoderma*-mediated suppression of plant diseases. *Fungal Biology Reviews*, 39, 15–33. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.11.004>
- Nair, B. (2020). In vitro evaluation of *Trichoderma* species for antagonistic activity, fungicide tolerance and competitive saprophytic ability. *Plant Pathology & Quarantine*, 10(1), 91–99. <https://doi.org/10.5943/ppq/10/1/11>
- Nizamani, M. M., Zhang, Q., Asif, M., Khaskheli, M. A., Wang, Y., & Li, C. (2025). Decoding *Rhizoctonia* spp. in-depth genomic analysis, pathogenic mechanisms, and host interactions. *Phytopathology Research*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s42483-024-00297-y>
- Nuraeni, Adhi, S. R., & Sugiarto. (2025). Eksplorasi dan Identifikasi Jamur Antagonisme Asal Limbah Media Jamur Tiram Serta Dalam Menekan Koloni *Fusarium oxysporum* Penyebab Layu *Fusarium* Cabai Secara *In Vitro*. *Jurnal Agrotech*, 15(1).
- Nursaadah, Adhi, S. R., & Sugiarto. (2025). Identifikasi Jamur Antagonis Asal Limbah Media Jamur Tiram Serta Potensinya dalam Menekan Koloni *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* Penyebab Penyakit Moler Bawang Merah secara *In-Vitro*. *Jurnal Agrotech*, 15(1).
- Patil, S. V., & Raja, J. (2022). Antagonism Of *Trichoderma* Species Against Major Soil Borne Plant Pathogens. *Journal of Plant Disease Sciences*, 19(1), 39–43. <https://doi.org/10.48165/JPDS.2022.1708>
- Rajesh, R. W., Rahul, M. S., & Ambalal, N. S. (2016). *Trichoderma*: A significant fungus for agriculture and environment. *African Journal of Agricultural Research*, 11(22), 1952–1965. <https://doi.org/10.5897/ajar2015.10584>
- Samsudin, & Amaria, W. (2016). Potensi Pemanfaatan Jamur Sebagai Agens Hayati Pengendali Penyakit Tanaman Perkebunan. *SIRINOV*, 4(2).
- Woo, S. L., Hermosa, R., Lorito, M., & Monte, E. (2023). *Trichoderma*: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology*, 21(5), 312–326. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00819-5>