

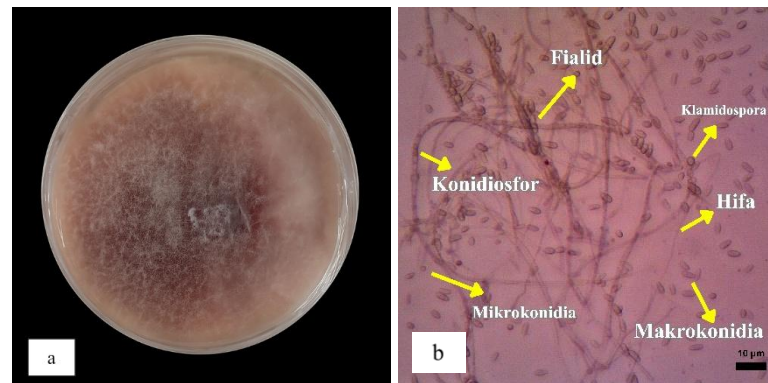
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Identifikasi *Fusarium oxysporum* sp.

Hasil identifikasi karakteristik morfologi secara makroskopis dan mikroskopis serta uji kerapatan menunjukkan patogen penyebab layu fusarium pada tanaman cabai rawit adalah *Fusarium oxysporum* f.s. *capsici* (Ilustrasi 9). Hasil pengamatan morfologi secara makroskopis menunjukkan koloni *Fusarium oxysporum* sp. pada media PDA (*Potato Dextrose Agar*) memiliki karakteristik yang khas. Pertumbuhan miselium pada fase awal inkubasi tampak berwarna putih bersih, dengan tekstur beludru atau kapas tipis dengan miselium aerial yang tebal, sedangkan tepi koloni cenderung tidak beraturan. Isolat membentuk pola konsentris atau zonasi pada permukaan koloni, yang seringkali berkorelasi dengan perbedaan tingkat sporulasi.

Seiring bertambahnya waktu dan umur koloni, pigmen pada bagian bawah (*reverse*) media mulai terbentuk dan rona koloni berubah menjadi merah keunguan atau violet muda. Pola perubahan pigmen ini konsisten dengan fenomena pigmen internal yang berkembang setelah fase pertumbuhan miselium dominan. Hal ini sesuai dengan penelitian Tilahun *et al.*, (2024) yang menyatakan bahwa isolat *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* memperlihatkan variasi warna koloni dari putih hingga pink atau krem seiring perkembangan kultur. Isolat *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* memiliki tekstur koloni bersifat cottony dan fluffy dengan miselium aerial yang tebal (Harish *et al.*, 2023).



Ilustrasi 9. Identifikasi *Fusarium oxysporum* dari tanaman cabai rawit terindikasi layu fusarium, (a) makroskopis (*Fusarium oxysporum* sp. di media PDA), (b) mikroskopis menggunakan *haemocytometer neubauer* perbesaran 40 x 10.

Hasil pengamatan mikroskopis dengan perbesaran 400× menunjukkan bahwa isolat *Fusarium oxysporum* sp. memiliki beberapa bagian seperti hifa, konidiofor, fialid, mikrokonidia, makrokonidia, dan klamidospora. Mikrokonidia tampak berjumlah banyak, berbentuk bulat hingga oval, tidak bersepta (bersel satu), serta tersusun membentuk kelompok (*false heads*) pada ujung fialid. Struktur fialid berfungsi sebagai tempat pembentukan dan pelepasan konidia, sedangkan konidiofor berperan sebagai penyangga fialid agar proses reproduksi aseksual berlangsung optimal. Mikrokonidia merupakan propagul infeksiif utama yang berfungsi dalam penyebaran patogen melalui air, tanah, maupun percikan air di sekitar perakaran tanaman. Hifa bersepta yang tampak memanjang berfungsi dalam pertumbuhan koloni, penyerapan nutrisi, serta penetrasi jaringan tanaman inang. Ciri-ciri tersebut sesuai dengan deskripsi baku *Fusarium oxysporum* sp. yaitu mikrokonidia umumnya bersel satu, berbentuk elipsoid hingga bulat, dan diproduksi pada fialid dalam bentuk *false heads* dengan ukuran $4-7 \times 2-3 \mu\text{m}$ (Hafizi *et al.*, 2014). Makrokonidia teramati berbentuk sabit panjang (*falcate*),

hialin, memiliki 1–5 sekat dengan dominasi 3 sekat, serta ujung sedikit melengkung. Struktur ini berperan dalam penyebaran sekunder dan membantu memperluas infeksi pada jaringan tanaman maupun media tumbuh.

Pengamatan makroskopis menunjukkan koloni *Fusarium oxysporum* sp. tumbuh membentuk miselium berwarna putih hingga merah muda pucat dengan tekstur menyerupai kapas. Pertumbuhan miselium yang cepat menunjukkan kemampuan patogen dalam melakukan kolonisasi media secara aktif. Hubungan antarstruktur morfologi pada *Fusarium oxysporum* sp. berlangsung secara berurutan dimulai dari klamidospora sebagai struktur bertahan hidup di dalam tanah pada kondisi lingkungan tidak menguntungkan. Klamidospora berdinding tebal akan berkecambah membentuk hifa ketika kondisi lingkungan sesuai dan terdapat eksudat akar tanaman inang. Hifa kemudian berkembang membentuk konidiofor dan fialid yang menghasilkan mikrokonidia serta makrokonidia sebagai alat reproduksi dan penyebaran. Mikrokonidia selanjutnya menginfeksi tanaman melalui akar, terutama pada bagian luka atau celah alami, kemudian hifa berkembang di jaringan pembuluh xilem sehingga menghambat translokasi air dan unsur hara yang akhirnya menyebabkan gejala layu fusarium. Klamidospora yang terbentuk kembali pada jaringan tanaman atau tanah memungkinkan patogen bertahan dalam jangka waktu lama dan menjadi sumber inokulum pada musim tanam berikutnya.

Hasil uji kerapatan spora *Fusarium oxysporum* sp. menunjukkan rata-rata kerapatan spora yang diperoleh dari sampel tanaman cabai bergejala layu *Fusarium* adalah $4,225 \times 10^7$ spora per ml (lampiran 5). Nilai tersebut didapat dari hasil

pengenceran 1 kali (10^{-1}). Kerapatan menunjukkan keberadaan inokulum dalam jumlah yang relatif tinggi dan sudah sesuai dengan standar inokulum. Hal ini sesuai dengan pendapat Zhang *et al.*, (2021) yang menyatakan bahwa studi sporulasi isolat *Fusarium oxysporum* sp. pada tanaman lain khususnya pada *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, tercatat isolat dengan jumlah sporulasi minimum sekitar $2,76 \times 10^6$ spora/mL dan isolat maksimum hingga $2,4 \times 10^7$ spora/mL. Nilai $4,225 \times 10^7$ spora/mL berada di atas rentang yang dilaporkan pada beberapa isolat, sehingga dapat dikategorikan sebagai kerapatan tinggi.

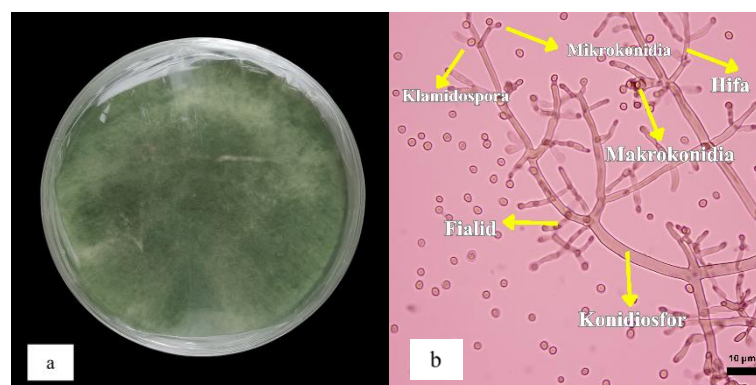
Peningkatan kerapatan inokulum berkorelasi positif dengan intensitas penyakit. Nilai inokulum yang lebih besar umumnya meningkatkan peluang infeksi dan kejadian penyakit tanaman. Nilai densitas spora yang relatif tinggi seperti $4,225 \times 10^7$ spora/mL memungkinkan berkontribusi pada tingginya insiden layu atau keparahan penyakit pada tanaman cabai dalam uji patogenitas. Menurut Shaheen *et al.*, (2021), jumlah inokulum merupakan salah satu faktor penting yang memodulasi intensitas penyakit dan keberhasilan infeksi penyakit pada tanaman. Beberapa faktor seperti kondisi spora, pH media, umur isolat dan kondisi ruang pertumbuhan isolat juga mempengaruhi variasi pertumbuhan spora.

4.2. Identifikasi dan Pengujian *Trichoderma* sp.

Hasil identifikasi secara makroskopis menunjukkan *Trichoderma* sp. memiliki pertumbuhan cepat, koloni berbentuk bulat atau menyebar (cincin), permukaan koloni awalnya putih kemudian berubah menjadi hijau atau hijau kekuningan di pusatnya, serta arah pertumbuhan menyebar ke tepi (mekanisme

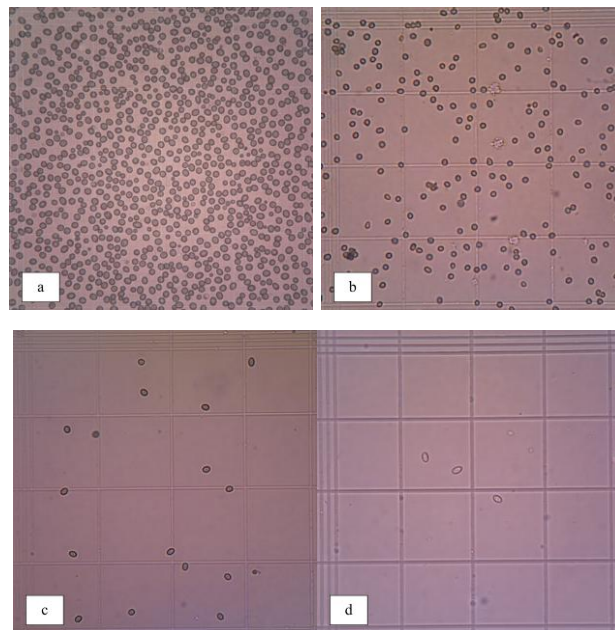
kompetisi ruang). Menurut Farida *et al.*, (2022), isolat dengan pertumbuhan cepat dan penyebaran koloni ke tepi merupakan karakter khas untuk isolat antagonis.

Trichoderma sp. secara mikroskopis memiliki hifa tampak bersepta dan bercabang, berfungsi sebagai struktur vegetatif untuk penyerapan nutrisi serta kolonisasi media tumbuh. Konidiofor berkembang dari hifa sebagai tangkai penyangga pembentukan konidia, sedangkan fialid merupakan sel khusus tempat terbentuknya konidia secara asexual. Mikrokonidia atau konidia pada *Trichoderma* sp. umumnya berbentuk bulat hingga oval, berwarna hijau hingga hialin, dan berfungsi sebagai alat reproduksi serta penyebaran jamur melalui udara, air, maupun kontak antar media. Makrokonidia pada beberapa spesies *Trichoderma* sp. dapat ditemukan dalam jumlah lebih sedikit dan berfungsi membantu penyebaran inokulum. Klamidospora merupakan struktur berdinding tebal yang berfungsi sebagai organ pertahanan hidup saat kondisi lingkungan tidak mendukung, sehingga jamur mampu bertahan dalam tanah dalam jangka waktu lama (Ilustrasi 10).



Ilustrasi 10. Identifikasi *Trichoderma* sp., (a) makroskopis (*Trichoderma* sp. di media PDA), (b) mikroskopis perbesaran 40 x 10.

Hasil pengujian kerapatan spora *Trichoderma* sp. melalui pengenceran bertingkat dari kerapatan spora paling tinggi yaitu kerapatan 10^9 spora/ml sampai dengan kerapatan 10^6 spora/ml menunjukkan hasil yang sesuai dan viabilitas spora dari masing masing kerapatan yang tergolong tinggi (Ilustrasi 11). Peningkatan kerapatan berpotensi mempercepat masa kolonisasi namun tidak selalu meningkatkan penurunan insidensi penyakit secara proporsional, efeknya juga bergantung pada formulasi, metode aplikasi, dan kombinasi perlakuan lain yang digunakan.



Ilustrasi 11. Identifikasi kerapatan *Trichoderma* sp., menggunakan *haemocytometer neubauer* perbesaran 10 x 10. (a) Kerapatan 10^9 spora/ml, (b) Kerapatan 10^8 spora/ml, (c) Kerapatan 10^7 spora/ml, (d) Kerapatan 10^6 spora/ml

Hasil viabilitas berada di rentan 95 - 100 %, artinya sebagian besar spora injeksi masih hidup dan dapat berkembang ketika diaplikasikan. Viabilitas spora > 90 % menunjukkan sebagian besar spora dalam formulasi masih aktif dan mampu berkecambah dengan sangat baik dan mendukung efektivitas aplikasi. Nilai

viabilitas tersebut memenuhi standar mutu ($> 60\%$) dan sangat baik untuk efektivitas agen hayati. Hasil pengujian viabilitas spora *Trichoderma* sp. menunjukkan potensi rasio spora aktif yang tinggi, daya jangkauan atau penetrasi lebih baik, dan lebih tahan terhadap stres lingkungan awal (misalnya adaptasi kelembaban, pH) karena cadangan spora aktif yang cukup banyak. Viabilitas 95 - 100 % berada dalam zona ideal untuk aplikasi praktis, sebagian besar spora siap berfungsi dan buffer kerusakan atau kematian selama aplikasi masih relatif rendah. Data hasil uji kerapatan dan viabilitas *Trichoderma* sp pada beberapa tingkat pengenceran tersaji pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Kerapatan dan Viabilitas *Trichoderma* sp.

Level Pengenceran	Hasil Kerapatan Spora (spora/ml)	Viabilitas Spora (%)
10^{-0}	$1,28 \times 10^9$	95,00
10^{-1}	$5,55 \times 10^8$	96,84
10^{-2}	$7,45 \times 10^7$	96,64
10^{-3}	$7,25 \times 10^6$	100,00

Efektifitas *Trichoderma* sp. perlu diimbangi dengan distribusi spora yang merata karena disisi lain, viabilitas yang terlalu tinggi bisa memicu kompetisi antar spora atau agregasi (spora saling menempel) sehingga efektivitas nyata bisa sedikit berkurang. Hal ini sesuai dengan pendapat Amalia (2023) yang menyatakan bahwa viabilitas yang tinggi juga belum menjamin ketahanan metabolit antimikroba atau kemampuan kolonisasi bila isolat tidak terdistribusi merata dan tangguh terhadap kondisi lingkungan (kelembaban, suhu, pH). Masa inkubasi yang terlalu lama juga dapat menurunkan viabilitas karena cadangan makanan di dalam media semakin

berkurang, kondisi lingkungan menjadi kurang optimal, dan sebagian spora memasuki fase dorman atau mengalami degenerasi fisiologis. Sebaliknya, pada pengenceran yang lebih tinggi jumlah spora lebih sedikit sehingga kompetisi antarspora berkurang dan peluang spora untuk berkecambah menjadi lebih optimal.

Uji pemeraman dilakukan untuk memastikan jamur *Trichoderma* sp. yang diaplikasikan benar-benar mampu tumbuh dan menempel (kolonisasi) dalam tanah atau pada sistem perakaran tanaman selama periode tertentu setelah aplikasi. Uji pemeraman juga bertujuan untuk memverifikasi bahwa agen hayati tidak hanya berada pada formulasi, tetapi juga dapat hidup dan berkembang dalam kondisi lapang atau semi-lapang. Uji pemeraman *Trichoderma* sp. tersaji pada ilustrasi 12.



Ilustrasi 12. Hasil Uji Pemeraman *Trichoderma* sp selama 7 hari

Hasil uji pemeraman selama 7 hari, menunjukkan bahwa *Trichoderma* sp. tumbuh dalam media tanam tanah yang sesuai pada kondisi lapang. Hal tersebut ditandai dengan ciri makroskopis yaitu muncul koloni di permukaan tanah yang awalnya putih kemudian berubah menjadi hijau atau hijau kekuningan di pusatnya. Menurut Susila *et al.*, (2023), *Trichoderma* sp. yang tumbuh dalam 7 hari mengindikasikan adaptasi awal yang baik, sehingga mekanisme antagonisme dapat

segera bekerja. Agen hayati *Trichoderma* sp. telah berhasil mengkolonisasi cukup cepat, yang memungkinkan mereka memulai mekanisme antagonis (kompetisi ruang/nutrisi, pengeluaran enzim lisis, produksi metabolit, parasitisme) pada fase awal pertumbuhan patogen. Uji pemeraman memastikan bahwa isolat *Trichoderma* sp. yang digunakan tidak hanya bekerja secara in vitro, tetapi juga memiliki kemampuan adaptasi di tanah nyata. Uji pemeraman *Trichoderma* sp. memberi asumsi bahwa pengaruh proteksi atau kompetisi terhadap patogen terjadi karena kolonisasi nyata, bukan hanya injeksi sementara.

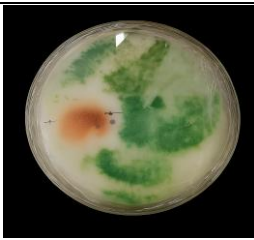
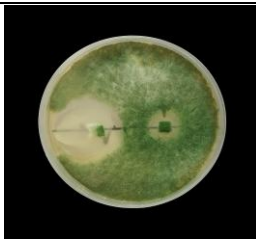
4.3. Uji Antagonis *Trichoderma* sp. terhadap *Fusarium oxysporum* sp.

Hasil uji antagonis *Trichoderma* sp. terhadap *Fusarium oxysporum* sp. dan persentase antagonis (hambatan) tersaji pada tabel 5. Tabel 5 menunjukkan bahwa *Trichoderma* sp. berpengaruh dalam menekan pertumbuhan patogen *Fusarium oxysporum* sp. yang dibuktikan dengan meningkatnya persentase antagonisme seiring bertambahnya waktu pengamatan. Hasil persentase antagonis di dapatkan dari perhitungan jarak jari jari koloni *Trichoderma* sp. dan *Fusarium oxysporum* sp. (Lampiran 7).

Persentase antagonis pada hari ke-3 mulai terlihat dengan nilai 56,67%. Hasil ini menunjukkan bahwa *Trichoderma* sp. telah mulai menunjukkan kemampuan menekan pertumbuhan *Fusarium oxysporum* sp. Secara makroskopis terlihat bahwa koloni *Trichoderma* sp. berkembang lebih cepat dan mulai mendominasi sebagian area media. Kecepatan pertumbuhan ini merupakan salah satu karakter penting dari *Trichoderma* sp. sebagai agen pengendali hayati. Tahap ini kemungkinan telah

terjadi mekanisme kompetisi ruang dan nutrisi, dimana *Trichoderma sp.* memanfaatkan sumber nutrisi lebih cepat dibandingkan patogen sehingga pertumbuhan *Fusarium oxysporum sp.* menjadi terhambat.

Tabel 5. Hasil Uji Antagonis *Trichoderma sp.* terhadap *Fusarium oxysporum sp.*

Pengamatan hari ke-	3 hari	5 hari	7 hari
Hasil Pengamatan			
Persentase Antagonis (%)	56,67	67,00	70,30

Nilai persentase antagonis pada hari ke-5 meningkat menjadi 67%, yang menunjukkan bahwa aktivitas penghambatan oleh *Trichoderma sp.* semakin kuat. Pertumbuhan koloni *Trichoderma sp.* terlihat semakin meluas dan menutupi area yang sebelumnya ditempati oleh *Fusarium oxysporum sp.* Peningkatan daya hambat ini mengindikasikan bahwa selain kompetisi, kemungkinan telah terjadi mekanisme antibiosis, yaitu produksi senyawa metabolit sekunder oleh *Trichoderma sp.* yang dapat mengganggu metabolisme jamur patogen.

Persentase antagonis pada hari ke-7 mencapai 70,3%, yang menunjukkan tingkat penghambatan yang paling tinggi selama periode pengamatan. Koloni *Trichoderma sp.* terlihat hampir sepenuhnya mendominasi permukaan media. Hal ini menunjukkan bahwa *Trichoderma sp.* memiliki kemampuan adaptasi dan pertumbuhan yang sangat baik sehingga mampu mengkolonisasi media lebih cepat

dibandingkan patogen. Selain kompetisi dan antibiosis, juga dimungkinkan terjadi mikoparasitisme, yaitu interaksi langsung dimana hifa *Trichoderma sp.* menyerang dan melilit hifa *Fusarium oxysporum sp.* sehingga menghambat bahkan merusak pertumbuhan patogen tersebut.

Trichoderma sp. memiliki kemampuan yang efektif dalam menghambat pertumbuhan *Fusarium oxysporum* secara in vitro. Semakin lama waktu interaksi, maka semakin besar pula kemampuan *Trichoderma sp.* dalam menekan perkembangan patogen. *Trichoderma sp.* lebih mendominasi pertumbuhan pada media. Ujung hifa patogen ketika menyentuh ujung hifa *Trichoderma sp.* pertumbuhannya mengalami hambatan, hifa menggulung, padat, dan berwarna coklat muda menunjukkan bahwa hifa patogen mengalami kerusakan atau mati. Mekanisme antagonisme yang terjadi diduga melibatkan kombinasi kompetisi ruang dan nutrisi, antibiosis, serta mikoparasitisme.

4.4. Kompilasi Hasil Analisis Ragam (ANOVA) pada Seluruh Parameter Pengamatan

Hasil analisis ragam (ANOVA) menunjukkan bahwa perlakuan kerapatan spora *Trichoderma sp.* berpengaruh nyata pada parameter periode inkubasi, insidensi, intensitas penyakit, tinggi tanaman, jumlah daun, waktu muncul bunga, jumlah buah, bobot buah, panjang buah dan *visual quality rating*. Perlakuan waktu aplikasi *Trichoderma sp.* berpengaruh nyata pada parameter periode inkubasi, insidensi penyakit, intensitas penyakit, tinggi tanaman, jumlah daun, jumlah buah, bobot buah, dan *Visual Quality Rating*. Perlakuan waktu aplikasi *Trichoderma sp.*

tidak berpengaruh nyata pada parameter waktu muncul bunga dan panjang buah. Interaksi antara perlakuan kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi *Trichoderma* sp. hanya memberikan pengaruh nyata pada parameter periode inkubasi, insidensi penyakit, intensitas penyakit, jumlah buah dan bobot buah. Kompilasi hasil analisis ragam (ANOVA) tersaji pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Analisis Ragam (ANOVA) dan Uji lanjut DMRT pada Parameter Pengamatan

Perlakuan	Kerapatan Spora <i>Trichoderma</i> sp. (P)	Waktu Aplikasi (W)	Interaksi (P x W)
Periode Inkubasi	*(e/d/c/b/a)	*(a//b/c)	* W1: g/de/bc/a/a W2: fg/fg/cd/ab/a W3: fg/fg/ef/bc/a
Insidensi Penyakit	*(a/a/b/c/d)	*(b/a/a)	* W1: a/bc/de/f/f W2: a/a/cd/e/ef W3: a/a/ab/de/ef
Intensitas Penyakit	*(a/b/c/d/e)	*(c/b/a)	* W1: a/b/cd/f/f W2: a/a/c/ef/ef W3: a/a/b/de/ef
Tinggi Tanaman	*(c/b/a/a/a)	*(a/a/b)	tn
Jumlah Daun	*(b/b/a/a/a)	*(a/a/b)	tn
Waktu Muncul Bunga	*(a//b/bc/bc/c)	tn	tn
Jumlah Buah	*(d/c/b/a/a)	*(a//b/c)	* W1: f/e/d/a/b W2: f/f/e/c/c W3: f/f/e/d/c/c
Bobot Buah	*(e//d/c/a/b)	*(a//b/c)	*W1: g/f/e/a/b W2: g/g/ef/c/c W3: g/g/f/d/d
Panjang Buah	*(c/b/a/a/a)	tn	tn
Visual Quality Rating (VQR)	*(d/c/b/a/a)	*(a/b/c)	tn

Keterangan: (*) berpengaruh nyata pada taraf 5% berdasarkan analisis ragam; (tn) tidak berbeda nyata; (a,b,c,d,e,f,g) notasi menunjukkan adanya perbedaan nyata berdasarkan uji lanjut DMRT.

4.5 Periode Inkubasi

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa perlakuan kerapatan suspensi *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi memberikan pengaruh terhadap periode inkubasi penyakit layu fusarium pada tanaman cabai rawit. Periode inkubasi ditunjukkan oleh lamanya waktu muncul gejala setelah inokulasi (HSI). Semakin lama periode inkubasi, maka perkembangan penyakit semakin terhambat sehingga menunjukkan efektivitas perlakuan dalam menekan serangan patogen.

Tabel 7. Periode Inkubasi *Fusarium oxysporum* sp. Cabai Rawit pada Perlakuan Kerapatan *Trichoderma* sp. dan Waktu Aplikasi

Kerapatan <i>Trichoderma</i> sp.	Waktu Aplikasi			Rata-Rata
	7 hari sebelum tanam	Saat tanam	7 hari setelah tanam	
	- - - Hari Setelah Inokulasi (HSI) - - -			
Kontrol (0 spora/ml)	12,83	17,79	19,25	16,63
10 ⁶ spora/ml	43,75	17,50	16,63	25,96
10 ⁷ spora/ml	70,29	55,71	31,79	52,60
10 ⁸ spora/ml	-	81,08	65,92	81,67
10 ⁹ spora/ml	-	88,08	88,08	91,39
Rata-Rata	64,58	52,03	44,33	

* Tanda (-) menunjukkan tanaman sehat dan tanpa gejala

Data pada tabel menunjukkan bahwa perlakuan tanpa aplikasi *Trichoderma* sp. (kontrol) memiliki periode inkubasi tercepat, yaitu rata-rata 16,63 HSI. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tanpa adanya agen antagonis, patogen *Fusarium oxysporum* dapat berkembang dan menginfeksi tanaman lebih cepat. Perlakuan kontrol pada aplikasi 7 hari sebelum tanam menunjukkan periode inkubasi sebesar 12,83 HSI, saat tanam 17,79 HSI, dan 7 hari setelah tanam 19,25 HSI.

Peningkatan kerapatan spora *Trichoderma* sp. cenderung memperpanjang periode inkubasi penyakit. Perlakuan kerapatan 10^6 spora/ml menghasilkan rata-rata periode inkubasi 25,96 HSI, sedangkan pada kerapatan 10^7 spora/ml meningkat menjadi 52,60 HSI. Perlakuan kerapatan 10^8 spora/ml dan 10^9 spora/ml menunjukkan hasil terbaik dengan rata-rata masing-masing sebesar 81,67 HSI dan 91,39 HSI. Pada perlakuan tersebut beberapa tanaman bahkan tidak menunjukkan gejala penyakit hingga akhir pengamatan yang ditandai dengan simbol (-). Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kerapatan spora *Trichoderma* sp., maka kemampuan dalam menghambat perkembangan patogen semakin besar.

Waktu aplikasi *Trichoderma* sp. juga memengaruhi periode inkubasi penyakit. Rata-rata periode inkubasi tertinggi diperoleh pada aplikasi 7 hari sebelum tanam sebesar 64,58 HSI, kemudian aplikasi saat tanam sebesar 52,03 HSI, sedangkan aplikasi 7 hari setelah tanam menunjukkan rata-rata terendah yaitu 44,33 HSI. Hasil tersebut menunjukkan bahwa aplikasi lebih awal memberikan kesempatan bagi *Trichoderma* sp. untuk beradaptasi dan berkembang di daerah perakaran sebelum patogen menginfeksi tanaman. Kolonisasi awal tersebut memungkinkan *Trichoderma* sp. lebih efektif dalam menekan pertumbuhan dan perkembangan *F. oxysporum*.

Interaksi kombinasi perlakuan terbaik terlihat pada kerapatan 10^9 spora/ml dengan aplikasi 7 hari sebelum tanam yang menunjukkan tidak munculnya gejala penyakit hingga akhir pengamatan. Hasil serupa juga terlihat pada perlakuan 10^8 spora/ml dengan aplikasi 7 hari sebelum tanam. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa kombinasi kerapatan spora tinggi dan waktu aplikasi lebih awal mampu

memberikan perlindungan optimal terhadap tanaman cabai rawit. Mekanisme penghambatan diduga terjadi melalui kompetisi ruang dan nutrisi, mikoparasitisme, serta produksi senyawa antibiotik oleh *Trichoderma* sp. yang mampu menghambat perkembangan patogen di daerah perakaran.

4.6 Insidensi Penyakit

Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi berpengaruh nyata ($P < 0,05$) terhadap insidensi penyakit layu fusarium pada tanaman cabai rawit serta menunjukkan adanya interaksi antarperlakuan (Lampiran 8). Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi kerapatan spora *Trichoderma* sp., maka insidensi penyakit semakin rendah.

Tabel 8. Insidensi Penyakit Cabai Rawit pada Perlakuan Kerapatan *Trichoderma* sp. dan Waktu Aplikasi

Kerapatan <i>Trichoderma</i> sp.	Waktu Aplikasi			Rata-Rata
	7 hari sebelum tanam	Saat tanam	7 hari setelah tanam	
	----- % -----			
Kontrol (0 spora/ml)	100,00 ^a	100,00 ^a	100,00 ^a	100,00 ^a
10 ⁶ spora/ml	70,83 ^{bc}	100,00 ^a	100,00 ^a	90,28 ^a
10 ⁷ spora/ml	37,50 ^{de}	54,17 ^{cd}	83,33 ^{ab}	58,33 ^b
10 ⁸ spora/ml	0,00 ^f	25,00 ^e	37,50 ^{de}	20,83 ^c
10 ⁹ spora/ml	0,00 ^f	16,67 ^{ef}	16,67 ^{ef}	11,11 ^d
Rata-Rata	41,67 ^b	59,17 ^a	67,50 ^a	

*Superskrip berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$).

Aplikasi 7 hari sebelum tanam, kerapatan 10⁶ spora/ml sudah mampu menurunkan insidensi penyakit, sedangkan efektivitas terbaik diperoleh pada kerapatan 10⁸–10⁹ spora/ml. Penurunan insidensi pada aplikasi saat tanam mulai terlihat pada kerapatan 10⁷ spora/ml, sedangkan pada aplikasi 7 hari setelah tanam

efektivitas baru terlihat pada kerapatan 10^8 spora/ml. Perlakuan kerapatan 10^8 – 10^9 spora/ml pada semua waktu aplikasi menunjukkan hasil yang tidak berbeda nyata, sehingga dianggap sebagai konsentrasi optimal dalam menekan penyakit. Kerapatan spora yang rendah (0 dan 10^6 spora/ml) belum mampu mengkolonisasi rizosfer secara optimal sehingga *Fusarium oxysporum* sp. masih mendominasi dan menginfeksi tanaman. Sebaliknya, peningkatan kerapatan spora *Trichoderma* sp. mampu meningkatkan kompetisi ruang dan nutrisi, menghasilkan metabolit antifungal, serta menginduksi ketahanan tanaman. Hal ini sesuai dengan Poveda *et al.* (2020) yang menyatakan bahwa *Trichoderma* sp. pada konsentrasi tinggi mampu menghambat pertumbuhan patogen melalui mekanisme mikoparasitisme dan antibiosis.

Waktu aplikasi juga memengaruhi efektivitas pengendalian penyakit. Aplikasi 7 hari sebelum tanam memberikan hasil terbaik karena *Trichoderma* sp. memiliki waktu lebih lama untuk beradaptasi dan mengkolonisasi media tanam sebelum inokulasi patogen, sehingga mampu membentuk penghalang biologis terhadap infeksi *Fusarium oxysporum* sp. Sebaliknya, aplikasi setelah tanam memberikan peluang lebih besar bagi patogen untuk menginfeksi akar terlebih dahulu. Hal ini sejalan dengan Zhang *et al.* (2021) yang menyatakan bahwa efektivitas agens hayati sangat dipengaruhi oleh waktu aplikasi relatif terhadap infeksi patogen. Secara keseluruhan, kombinasi kerapatan *Trichoderma* sp. 10^8 – 10^9 spora/ml dengan aplikasi 7 hari sebelum tanam merupakan perlakuan terbaik dalam menekan insidensi penyakit hingga 0%. Harman *et al.* (2021) menyatakan bahwa aplikasi *Trichoderma* dengan kerapatan tinggi sebelum tanam memungkinkan

kolonisasi akar secara maksimal sehingga patogen kehilangan ruang dan sumber nutrisi untuk berkembang, sekaligus meningkatkan ketahanan sistemik tanaman.

4.7 Intensitas Penyakit

Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi berpengaruh nyata ($P < 0,05$) terhadap intensitas penyakit layu fusarium pada tanaman cabai rawit serta menunjukkan adanya interaksi antarperlakuan (Lampiran 11). Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi kerapatan spora *Trichoderma* sp., maka intensitas penyakit semakin rendah.

Tabel 9. Intensitas Penyakit Cabai Rawit pada Perlakuan Kerapatan *Trichoderma* sp. dan Waktu Aplikasi

Kerapatan <i>Trichoderma</i> sp.	Waktu Aplikasi			Rata-Rata
	7 hari sebelum tanam	Saat tanam	7 hari setelah tanam	
	----- % -----			
Kontrol (0 spora/ml)	97,92 ^a	96,88 ^a	100,00 ^a	98,26 ^a
10 ⁶ spora/ml	66,67 ^b	97,92 ^a	95,83 ^a	86,81 ^b
10 ⁷ spora/ml	33,33 ^{cd}	43,75 ^c	72,92 ^b	50,00 ^c
10 ⁸ spora/ml	0,00 ^f	14,58 ^{ef}	20,83 ^{de}	11,81 ^d
10 ⁹ spora/ml	0,00 ^f	4,17 ^{ef}	6,25 ^{ef}	3,47 ^e
Rata-Rata	39,58 ^c	51,46 ^b	59,17 ^a	

*Superskrip berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$).

Aplikasi 7 hari sebelum tanam dan kerapatan 10⁶ spora/ml telah mampu menurunkan intensitas penyakit, sedangkan hasil terbaik diperoleh pada kerapatan 10⁸–10⁹ spora/ml. Penurunan intensitas penyakit pada aplikasi saat tanam dan 7 hari setelah tanam mulai terlihat pada kerapatan 10⁷ spora/ml, sedangkan perlakuan 10⁸–10⁹ spora/ml memberikan pengaruh yang tidak berbeda nyata dan menjadi konsentrasi yang paling efektif dalam menekan penyakit. Secara keseluruhan,

kombinasi kerapatan *Trichoderma* sp. 10^8 – 10^9 spora/ml dengan waktu aplikasi 7 hari sebelum tanam merupakan perlakuan terbaik dalam menekan intensitas penyakit layu fusarium. Perlakuan tersebut menunjukkan kemampuan optimal dalam menghambat perkembangan *Fusarium oxysporum* sp. karena *Trichoderma* sp. telah lebih dahulu beradaptasi dan mengkolonisasi rizosfer sebelum patogen menginfeksi tanaman. Kolonisasi awal ini memungkinkan *Trichoderma* sp. mendominasi ruang dan nutrisi di sekitar perakaran serta menghasilkan senyawa antagonis yang menghambat perkembangan patogen. Sharma *et al.* (2022) menyatakan bahwa densitas spora *Trichoderma* sp. yang tinggi meningkatkan kemampuan antagonis dan mempercepat kolonisasi sehingga patogen kehilangan kesempatan untuk berkembang.

Nilai intensitas penyakit tertinggi terdapat pada perlakuan tanpa *Trichoderma* sp. (0 spora/ml), sedangkan intensitas terendah diperoleh pada perlakuan 10^9 spora/ml. Hal ini menunjukkan adanya efek antagonistik langsung *Trichoderma* sp. terhadap *Fusarium oxysporum*. Menurut Harman *et al.* (2021), *Trichoderma* sp. mampu menghasilkan enzim kitinase dan β -1,3-glukanase yang melisis dinding sel patogen sehingga perkembangan penyakit dapat ditekan. Selain itu, aplikasi sebelum tanam memberikan efektivitas lebih tinggi dibandingkan aplikasi setelah tanam karena agens hayati memiliki waktu lebih lama untuk membentuk dominasi mikroba antagonis di rizosfer. Hal ini sejalan dengan Zin dan Badaluddin (2020) yang menyatakan bahwa aplikasi *Trichoderma* sp. sebelum tanam efektif dalam menekan perkembangan penyakit melalui pembentukan koloni antagonis pada zona perakaran tanaman.

4.8 Laju Perkembangan Penyakit

Berdasarkan data intensitas penyakit layu fusarium pada 1 hingga 8 minggu setelah inokulasi (MSI), terlihat bahwa perkembangan penyakit bersifat progresif seiring bertambahnya waktu pengamatan seperti yang tersaji pada tabel 10. Perlakuan kontrol (0 spora/ml) pada berbagai waktu aplikasi menunjukkan bahwa gejala penyakit sudah muncul sejak 1 MSI dan terus meningkat secara konsisten hingga mencapai intensitas sangat tinggi pada 8 MSI (>95%). Hal ini sesuai dengan pendapat Li *et al.*, (2023) yang menyatakan bahwa *Fusarium oxysporum* sp. mampu berkembang secara agresif pada tanaman cabai rawit ketika tidak terdapat agen antagonis yang menekan aktivitas patogen, sehingga proses kolonisasi patogen berlangsung cepat dan bersifat sistemik.

Perlakuan 10^6 spora/mL menunjukkan intensitas penyakit masih meningkat secara nyata dari awal hingga akhir pengamatan, meskipun nilainya lebih rendah dibandingkan kontrol. Gejala penyakit mulai teramati sejak 1 MSI (7 HSI) dan terus berkembang hingga 8 MSI (56 HIS), terutama pada waktu aplikasi saat tanam dan 7 hari setelah tanam. Kondisi ini mengindikasikan bahwa konsentrasi *Trichoderma* sp. yang rendah belum mampu menghambat pertumbuhan dan penetrasi *Fusarium oxysporum* sp. secara efektif, sehingga patogen tetap berkembang meskipun laju infeksiya sedikit terhambat.

Tabel 10. Perkembangan Penyakit Layu Fusarium Berdasarkan Intensitas Pada Tanaman Cabai Rawit Varietas Maruti F1 dengan perlakuan Konsentrasi Kerapatan *Trichoderma* sp. dan Waktu Aplikasi *Trichoderma* sp.

Perlakuan	Perkembangan Penyakit Layu Fusarium							
	7 HSI	14 HSI	21 HSI	28 HSI	35 HSI	42 HSI	49 HSI	56 HSI
	----- (%) -----							
P0W1	9,38	22,22	39,58	58,33	69,79	78,13	92,71	97,92
P0W2	2,08	11,11	38,54	54,17	67,71	80,21	91,67	96,88
P0W3	4,17	16,67	37,50	56,25	66,67	77,08	97,92	100,00
P1W1	2,08	6,94	14,58	22,92	46,88	54,17	64,58	66,67
P1W2	2,08	11,11	32,29	44,79	57,29	76,04	90,63	97,92
P1W3	5,21	13,89	36,46	55,21	67,71	80,21	90,63	95,83
P2W1	0,00	2,78	6,25	8,33	13,54	22,92	28,13	33,33
P2W2	0,00	2,78	11,46	20,83	28,13	30,21	39,58	43,75
P2W3	4,17	8,33	23,96	40,63	54,17	66,67	70,83	72,92
P3W1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3W2	0,00	0,00	2,08	4,17	10,42	14,58	14,58	14,58
P3W3	2,08	9,72	11,46	13,54	18,75	18,75	20,83	20,83
P4W1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4W2	0,00	0,00	0,00	2,08	2,08	2,08	4,17	4,17
P4W3	0,00	0,00	0,00	0,00	2,08	6,25	6,25	6,25

* P = Perlakuan Konsentrasi Kerapatan *Trichoderma* sp. P0 = Kontrol (tanpa pemberian *Trichoderma* sp.); P1 = Kerapatan 10^6 spora/ml; P2 = Kerapatan 10^7 spora/ml; P3 = Kerapatan 10^8 spora/ml; P4 = Kerapatan 10^9 spora/ml, W = Perlakuan Waktu Aplikasi Jamur *Trichoderma*. W1 = 7 hari sebelum pindah tanam; W2 = waktu pindah tanam; W3 = 7 hari setelah pindah tanam. MSI = Minggu Setelah Inokulasi

Perlakuan 10^7 spora/ml menunjukkan pola perkembangan penyakit yang lebih terkendali. Intensitas penyakit relatif rendah pada fase awal pengamatan (1–3 MSI), kemudian meningkat secara bertahap hingga 8 MSI, namun tetap berada pada kategori sedang. Pola ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi menengah,

Trichoderma sp. mulai mampu menekan perkembangan patogen, tetapi belum sepenuhnya menghentikan infeksi dalam jangka panjang. Hal ini sejalan dengan pendapat Poveda *et al.* (2021) yang menyatakan bahwa kemampuan *Trichoderma* sp. dalam mengendalikan patogen tular tanah bergantung pada keseimbangan antara populasi antagonis dan patogen selama masa inkubasi penyakit.

Perlakuan 10^8 spora/ml dan 10^9 spora/ml menunjukkan tingkat pengendalian penyakit yang sangat efektif, terutama pada waktu aplikasi 7 hari sebelum tanam. Intensitas penyakit pada kombinasi kerapatan 10^8 spora/ml dan 10^9 spora/ml pada waktu aplikasi 7 hari sebelum tanam tidak teramati sejak 1 MSI hingga 8 MSI (0%). Hal ini menunjukkan bahwa patogen tidak mampu berkembang setelah inokulasi serta mengindikasikan bahwa aplikasi *Trichoderma* sp. dengan konsentrasi tinggi dan waktu yang lebih awal memungkinkan kolonisasi rizosfer secara optimal sebelum patogen diinokulasikan, sehingga *Trichoderma* sp. mendominasi mikroflora tanah dan menghambat infeksi *Fusarium oxysporum* sp.

Intensitas penyakit pada perlakuan waktu aplikasi saat tanam dan 7 hari setelah tanam masih muncul namun dengan nilai yang sangat rendah dan peningkatan yang lambat hingga 8 MSI. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun aplikasi dilakukan setelah tanam, konsentrasi *Trichoderma* sp. yang tinggi tetap mampu menekan laju perkembangan penyakit, walaupun efektivitasnya lebih rendah dibandingkan aplikasi sebelum tanam. Data intensitas penyakit dari 1–8 MSI menunjukkan bahwa perkembangan penyakit layu fusarium sangat dipengaruhi oleh interaksi antara waktu pengamatan, konsentrasi *Trichoderma* sp., dan waktu aplikasi.

4.9 Nilai Area Under the Disease Progress Curve (AUDPC)

Nilai Area Under Disease Progress Curve (AUDPC) menunjukkan tingkat perkembangan penyakit layu *Fusarium* pada tanaman cabai rawit yang dipengaruhi oleh perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma sp.* dan waktu aplikasinya. Nilai AUDPC yang lebih rendah menunjukkan perkembangan penyakit yang lebih lambat. Nilai AUDPC yang lebih tinggi menunjukkan perkembangan penyakit yang lebih cepat dan tingkat serangan yang lebih berat. Hasil nilai AUDPC penyakit layu *Fusarium* dan kategori serangan tersaji pada Tabel 11.

Perlakuan kontrol tanpa aplikasi *Trichoderma sp.* menunjukkan nilai AUDPC yang tergolong tinggi yaitu 393,93 sampai 419,10 sehingga termasuk dalam kategori rentan. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya perlakuan agen hayati, tanaman cabai rawit lebih mudah terserang penyakit layu *Fusarium* dan perkembangan penyakit berlangsung lebih cepat. Perlakuan dengan konsentrasi *Trichoderma sp.* sebesar 10^6 spora/ml masih menunjukkan nilai AUDPC yang relatif tinggi, yaitu berkisar antara 245,49 hingga 397,24 dan seluruhnya termasuk dalam kategori rentan. Hal ini mengindikasikan bahwa konsentrasi tersebut belum cukup efektif dalam menekan perkembangan penyakit layu *Fusarium* pada tanaman cabai rawit.

Konsentrasi 10^7 spora/ml menunjukkan adanya penurunan nilai AUDPC dibandingkan dengan perlakuan sebelumnya. Perlakuan 10^7 spora/ml dan waktu aplikasi 7 hari sebelum tanam menunjukkan nilai AUDPC sebesar 98,62 dengan kategori tahan, sedangkan 10^7 spora/ml dan waktu aplikasi saat tanam sebesar 154,87 dengan kategori agak rentan, dan 10^7 spora/ml dan waktu aplikasi 7 hari

sesetelah tanam sebesar 305,22 yang masih termasuk kategori rentan. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi *Trichoderma sp.* mulai memberikan pengaruh dalam menekan perkembangan penyakit, meskipun efektivitasnya masih dipengaruhi oleh waktu aplikasi.

Tabel 11. Nilai AUDPC Penyakit Layu Fusarium dan Kategori Ketahanan Tanaman Cabai Rawit pada Perlakuan Konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma sp.* dan Waktu Aplikasi *Trichoderma sp.*

Perlakuan	Nilai AUDPC	Kategori Serangan
P0W1	419,10	Rentan
P0W2	393,93	Rentan
P0W3	406,26	Rentan
P1W1	245,49	Rentan
P1W2	363,19	Rentan
P1W3	397,24	Rentan
P2W1	98,62	Tahan
P2W2	154,87	Agak rentan
P2W3	305,22	Rentan
P3W1	0,00	Sangat Tahan
P3W2	53,12	Tahan
P3W3	105,55	Agak Tahan
P4W1	0,00	Sangat Tahan
P4W2	12,50	Sangat Tahan
P4W3	17,71	Sangat Tahan

* P = Perlakuan Konsentrasi Kerapatan *Trichoderma sp.* P0 = Kontrol (tanpa pemberian *Trichoderma sp.*); P1 = Kerapatan 10^6 spora/ml; P2 = Kerapatan 10^7 spora/ml; P3 = Kerapatan 10^8 spora/ml; P4 = Kerapatan 10^9 spora/ml, W = Perlakuan Waktu Aplikasi Jamur *Trichoderma*. W1 = 7 hari sebelum pindah tanam; W2 = waktu pindah tanam; W3 = 7 hari setelah pindah tanam.

Perlakuan dengan konsentrasi 10^8 spora/ml menunjukkan hasil yang lebih baik dalam menekan perkembangan penyakit. Nilai AUDPC pada perlakuan 10^8 spora/ml dan waktu aplikasi 7 hari sebelum tanam sebesar 0,00 dengan kategori sangat tahan, 10^8 spora/ml dan waktu aplikasi saat tanam sebesar 53,12 dengan kategori tahan, serta aplikasi 10^8 spora/ml dan waktu aplikasi 7 hari setelah tanam sebesar 105,55 dengan kategori agak tahan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi *Trichoderma sp.* yang diberikan, maka kemampuan dalam menghambat perkembangan patogen semakin meningkat. Hasil terbaik diperoleh pada perlakuan konsentrasi 10^9 spora/ml dengan nilai AUDPC sangat rendah, yaitu 0,00 pada aplikasi 7 hari sebelum tanam, 12,50 pada aplikasi saat tanam, dan 17,71 pada aplikasi 7 hari setelah pindah tanam yang seluruhnya termasuk dalam kategori sangat tahan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi *Trichoderma sp.* sangat efektif dalam menekan perkembangan penyakit layu *Fusarium oxysporum sp.* pada tanaman cabai rawit.

Waktu aplikasi juga mempengaruhi efektivitas pengendalian penyakit. Aplikasi yang dilakukan 7 hari sebelum pindah tanam cenderung memberikan hasil terbaik dibandingkan dengan aplikasi saat pindah tanam maupun 7 hari setelah pindah tanam. Hal ini diduga karena *Trichoderma sp.* memiliki waktu yang cukup untuk beradaptasi dan berkembang di dalam tanah sehingga mampu berkompetisi dengan patogen serta menekan perkembangan *Fusarium oxysporum sp.* sejak awal pertumbuhan tanaman. Peningkatan konsentrasi *Trichoderma sp.* dan waktu aplikasi yang lebih awal mampu menurunkan nilai AUDPC serta meningkatkan ketahanan tanaman cabai rawit terhadap penyakit layu fusarium.

Nilai AUDPC mencerminkan dinamika perkembangan penyakit yang dipengaruhi oleh interaksi komponen dalam konsep segitiga penyakit, yaitu inang, patogen, dan lingkungan, serta faktor waktu dalam konsep segi empat penyakit. Tanaman cabai rawit sebagai inang yang rentan, keberadaan patogen *Fusarium oxysporum* sp., serta kondisi lingkungan tanah yang mendukung menjadi faktor utama yang menentukan terjadinya infeksi dan perkembangan penyakit. Aplikasi *Trichoderma* sp. pada berbagai kerapatan dan waktu aplikasi berperan mengganggu keseimbangan interaksi tersebut dengan menekan populasi patogen melalui mekanisme antagonisme, kompetisi ruang dan nutrisi, serta produksi enzim dan senyawa antimikroba.

Gangguan terhadap komponen patogen dalam segitiga penyakit menyebabkan proses infeksi menjadi lebih lambat, sehingga perkembangan penyakit dari waktu ke waktu juga terhambat. Kondisi ini tercermin dari nilai AUDPC yang lebih rendah pada perlakuan dengan aplikasi *Trichoderma* sp. dibandingkan dengan perlakuan tanpa aplikasi. Nilai AUDPC dapat menggambarkan secara kuantitatif bagaimana interaksi antara inang, patogen, lingkungan, dan waktu mempengaruhi perkembangan penyakit layu fusarium pada tanaman cabai rawit.

4.10 Tinggi Tanaman

Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi *Trichoderma* sp. masing-masing berpengaruh nyata ($P < 0,05$) terhadap tinggi tanaman (Lampiran 12). Uji analisis ragam menunjukkan tidak ada interaksi antara

konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi *Trichoderma* sp. ($P > 0,05$). Parameter tinggi tanaman cabai rawit pada perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi *Trichoderma* sp. tersaji pada Tabel 12.

Tabel 12. Tinggi Tanaman Cabai Rawit pada Perlakuan Kerapatan *Trichoderma* sp. dan Waktu Aplikasi (Umur 8 MST atau 56 HST)

Kerapatan <i>Trichoderma</i> sp.	Waktu Aplikasi			Rata-Rata
	7 hari sebelum tanam	Saat tanam	7 hari setelah tanam	
	----- cm/tan -----			
Kontrol (0 spora/ml)	55,25	54,17	45,75	51,72 ^c
10 ⁶ spora/ml	62,00	57,67	59,50	59,72 ^b
10 ⁷ spora/ml	66,92	64,67	61,00	64,19 ^a
10 ⁸ spora/ml	71,33	67,42	64,00	67,58 ^a
10 ⁹ spora/ml	69,50	65,75	62,50	65,92 ^a
Rata-Rata	65,00 ^a	61,93 ^a	58,55 ^b	

*Superskrip berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$).

Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. 10⁷ spora/ml berbeda nyata lebih tinggi dari perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. 10⁶ spora/ml dan tanpa perlakuan *Trichoderma* sp., namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. 10⁸ spora/ml dan 10⁹ spora/ml. Perlakuan 10⁷ spora/ml, 10⁸ spora/ml, dan 10⁹ spora/ml secara statistik mengalami peningkatan, dan sudah menunjukkan hasil yang optimum sesuai deskripsi tanaman cabai rawit varietas Maruti F1 yaitu 60 - 80 cm (Lampiran 2.)

Kerapatan spora *Trichoderma* sp. yang memadai memberikan efek positif terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman melalui berbagai mekanisme fisiologis dan biokimia yang aktif di rizosfer. Hal ini sesuai dengan pendapat Contreras *et al.*, (2024) yang menyatakan bahwa *Trichoderma* sp. mampu menghasilkan senyawa

bioaktif seperti IAA serta meningkatkan serapan unsur hara melalui solubilisasi nutrisi di dalam tanah sehingga merangsang elongasi batang dan perkembangan vegetatif. Kerapatan spora 10^7 spora/ml, 10^8 spora/ml dan 10^9 spora/ml menunjukkan hasil yang tidak berbeda nyata karena pada kisaran tersebut kebutuhan populasi efektif *Trichoderma* sp. telah tercapai. Hal ini sesuai dengan pendapat Siddiquee *et al.*, (2021) yang menyatakan bahwa kerapatan spora tinggi cenderung memberikan respons pertumbuhan tanaman yang lebih baik karena aktivitas metabolik dan kolonisasi akar berlangsung lebih optimal.

Perlakuan aplikasi *Trichoderma* sp. 7 hari sebelum tanam berbeda nyata lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan aplikasi *Trichoderma* sp. 7 hari setelah tanam namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan aplikasi *Trichoderma* sp. saat pindah tanam. Aplikasi sebelum tanam atau saat tanam memungkinkan *Trichoderma* sp. beradaptasi lebih awal di dalam tanah dan berkolonisasi di sekitar perakaran sejak fase pertumbuhan tanaman. Hal ini sesuai dengan pendapat Zhang *et al.*, (2022) yang menyatakan bahwa kolonisasi dini ini berperan penting dalam meningkatkan perkembangan akar, penyerapan nutrisi, serta pemanjangan batang yang berdampak pada peningkatan tinggi tanaman.

4.11 Jumlah Daun

Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi *Trichoderma* sp. masing-masing berpengaruh nyata ($P < 0,05$) terhadap jumlah daun (Lampiran 13). Uji analisis ragam menunjukkan tidak ada interaksi antara konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi *Trichoderma* sp.

($P > 0,05$). Parameter jumlah daun pada perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi *Trichoderma* sp. tersaji pada Tabel 13.

Tabel 13. Jumlah Daun Cabai Rawit pada Perlakuan Kerapatan *Trichoderma* sp. dan Waktu Aplikasi (Umur 10 MST atau 70 HST)

Kerapatan <i>Trichoderma</i> sp.	Waktu Aplikasi			Rata-Rata
	7 hari sebelum tanam	Saat tanam	7 hari setelah tanam	
	----- helai/tan -----			
Kontrol (0 spora/ml)	58,00	54,50	48,00	53,50 ^b
10 ⁶ spora/ml	73,25	63,88	58,25	65,13 ^b
10 ⁷ spora/ml	111,13	124,46	75,21	103,60 ^a
10 ⁸ spora/ml	144,92	118,67	110,58	124,72 ^a
10 ⁹ spora/ml	134,08	111,63	93,92	113,21 ^a
Rata-Rata	104,28 ^a	94,63 ^a	77,19 ^b	

*Superskrip berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$).

Perlakuan secara tunggal kerapatan *Trichoderma* sp. 0 spora/ml dan 10⁶ spora/ml tidak menunjukkan perbedaan nyata. Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. 10⁷ spora/ml berbeda nyata lebih tinggi dari perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. 10⁶ spora/ml dan kontrol, namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. 10⁸ spora/ml dan 10⁹ spora/ml. Perlakuan 10⁷ spora/ml, 10⁸ spora/ml, dan 10⁹ spora/ml secara statistik mengalami peningkatan jumlah daun dengan hasil terbaik pada kerapatan 10⁸ spora/ml yaitu jumlah daun mencapai 124,72 helai per tanaman. Peningkatan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. cenderung meningkatkan jumlah daun dibandingkan dengan perlakuan kontrol.

Jumlah daun tertinggi diperoleh dengan perlakuan 10⁸ spora/ml, sedangkan perlakuan kontrol menunjukkan jumlah daun terendah. *Trichoderma* sp. berperan sebagai agen pemacu pertumbuhan tanaman khususnya pada fase vegetatif.

Peningkatan jumlah daun berkaitan dengan kemampuan jamur dalam meningkatkan pertumbuhan sistem perakaran dan efisiensi penyerapan unsur hara. Hal tersebut sesuai dengan pendapat Zhou *et al.*, (2020) yang menyatakan bahwa *Trichoderma* sp. mampu melarutkan fosfat, meningkatkan ketersediaan nitrogen, serta menghasilkan senyawa bioaktif seperti auksin dan sitokinin yang berperan dalam pembelahan dan pemanjangan sel daun. Pemberian *Trichoderma* sp. pada konsentrasi yang terlalu tinggi tidak selalu linear meningkatkan jumlah daun, yang dapat dilihat pada perlakuan 10^9 spora/ml yang pada beberapa waktu aplikasi tidak menunjukkan peningkatan yang sangat besar dibandingkan 10^8 spora/ml. Hal ini diduga disebabkan oleh efek dosis berlebihan dimana spora pada konsentrasi sangat tinggi dapat menyebabkan kompetisi mikroba yang intens di rizosfer sehingga menghambat efektivitas interaksi simbiotik dengan tanaman.

Perlakuan aplikasi *Trichoderma* sp. 7 hari sebelum tanam berbeda nyata lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan aplikasi *Trichoderma* sp. 7 hari setelah tanam namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan aplikasi *Trichoderma* sp. saat pindah tanam. Aplikasi 7 hari sebelum tanam dan saat tanam menghasilkan jumlah daun tertinggi dibandingkan 7 hari setelah pindah tanam. Hal ini menunjukkan bahwa aplikasi *Trichoderma* sp. sebelum tanam dan saat tanam memberikan waktu yang cukup bagi jamur untuk beradaptasi dan berkembang di dalam tanah, sehingga saat tanaman ditanam, kondisi rizosfer sudah siap mendukung pertumbuhan awal tanaman. Hal ini sesuai dengan pendapat Poveda *et al.*, (2021) yang menyatakan bahwa lingkungan perakaran yang telah terkolonisasi *Trichoderma* sp. memungkinkan tanaman lebih cepat menyerap unsur hara dan air, yang

berimplikasi pada peningkatan pembentukan daun sejak fase awal pertumbuhan vegetatif. Menurut Harman *et al.* (2021), efektivitas *Trichoderma* sp. sebagai *plant growth-promoting fungi* sangat dipengaruhi oleh waktu kolonisasi awal pada rizosfer, semakin dini aplikasi dilakukan, semakin besar pengaruhnya terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman.

Tidak adanya interaksi antara konsentrasi spora dan waktu aplikasi menunjukkan bahwa masing-masing faktor bekerja secara independen dalam mempengaruhi jumlah daun. Artinya, peningkatan jumlah daun akibat konsentrasi *Trichoderma* sp. relatif konsisten pada setiap waktu aplikasi, dan demikian pula pengaruh waktu aplikasi tidak bergantung pada tingkat konsentrasi spora yang diberikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa dosis optimum *Trichoderma* sp., khususnya pada konsentrasi 10^7 spora/ml, telah cukup efektif meningkatkan jumlah daun tanpa dipengaruhi oleh variasi waktu aplikasi secara spesifik.

4.12 Waktu Muncul Bunga Pertama

Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. berpengaruh nyata ($P < 0,05$) terhadap waktu muncul bunga tanaman, akan tetapi perlakuan waktu aplikasi *Trichoderma* sp. tidak berpengaruh nyata terhadap waktu muncul bunga pertama. Interaksi perlakuan konsentrasi kerapatan dan waktu aplikasi juga tidak menunjukkan pengaruh yang nyata (Lampiran 14). Parameter waktu muncul bunga pertama tanaman cabai rawit disajikan pada tabel 14.

Tabel 14. Waktu Muncul Bunga Pertama Cabai Rawit pada Perlakuan Kerapatan *Trichoderma* sp. dan Waktu Aplikasi

Kerapatan <i>Trichoderma</i> sp.	Waktu Aplikasi			Rata-Rata
	7 hari sebelum tanam	Saat tanam	7 hari setelah tanam	
	----- HST -----			
Kontrol (0 spora/ml)	41,75	43,08	43,00	42,61 ^a
10 ⁶ spora/ml	36,08	38,13	38,63	37,61 ^b
10 ⁷ spora/ml	33,58	35,17	36,33	35,03 ^{bc}
10 ⁸ spora/ml	32,75	33,29	35,00	33,68 ^{bc}
10 ⁹ spora/ml	31,17	32,79	31,75	31,90 ^c
Rata-Rata	35,07	36,49	36,94	

*Superskrip berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$).

Waktu muncul bunga pertama pada perlakuan konsentrasi kerapatan *Trichoderma* sp. 0 spora/ml berbeda nyata dari perlakuan 10⁶ spora/ml. Hal ini menunjukkan bahwa secara tunggal kerapatan 10⁶ spora/ml sudah mampu memperpendek waktu muncul bunga pertama. Perlakuan 10⁶ spora/ml tidak menunjukkan perbedaan nyata terhadap perlakuan 10⁷ spora/ml dan 10⁸ spora/ml, namun secara independen berbeda nyata dengan perlakuan 10⁹ spora/ml. Perlakuan 10⁶ spora/ml, 10⁷ spora/ml, 10⁸ spora/ml, dan 10⁹ spora/ml secara statistik sudah menunjukkan hasil yang optimum sesuai umur waktu berbunga pada deskripsi tanaman cabai rawit varietas Maruti F1 yaitu 30 – 40 hari setelah tanam (Lampiran 2.). Rata-rata waktu muncul bunga pertama pada 0 spora/ml (kontrol) adalah 42,61 HST, sedangkan perlakuan dengan spora *Trichoderma* sp. menunjukkan percepatan, dengan perlakuan terbaik 10⁹ spora/ml mencatat waktu 31,90 HST. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. berpengaruh nyata dalam memperpendek umur menuju fase generatif berupa munculnya bunga pertama pada tanaman cabai rawit.

Trichoderma sp. diketahui dapat mendorong percepatan fase pembungaan serta meningkatkan kualitas bunga melalui stimulasi metabolik dan fisiologis pada jaringan tanaman sehingga bunga muncul lebih cepat dibanding tanpa perlakuan *Trichoderma*. Menurut Andrzejak dan Janowska (2023) menyatakan bahwa aplikasi *Trichoderma* sp. mempercepat fase generatif seperti awal pembungaan hingga sekitar 10–14 hari lebih cepat dibanding kontrol, yang diduga berkaitan dengan peningkatan penyerapan nutrisi dan aktivitas hormon tanaman oleh *Trichoderma* sp. Percepatan waktu munculnya bunga pertama dapat dijelaskan dari mekanisme kerja *Trichoderma* sp. sebagai mikroba yang berperan dalam menguatkan sistem fisiologis tanaman, seperti meningkatkan ketersediaan nutrisi makro dan mikro di rhizosfer sekaligus meningkatkan produksi hormon pertumbuhan dan metabolit sekunder, sehingga transisi fase vegetatif ke generatif berlangsung lebih cepat dibanding tanaman yang tidak mendapatkan perlakuan organisme tersebut.

Waktu aplikasi *Trichoderma* sp. tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap waktu muncul bunga pertama tanaman cabai rawit. Ketidaksignifikanan ini mengindikasikan bahwa efektivitas *Trichoderma* sp. dalam mempengaruhi fase generatif tanaman lebih ditentukan oleh keberadaan dan kerapatan inokulum di daerah perakaran, bukan oleh perbedaan waktu aplikasi dalam rentang yang relatif dekat. Menurut Bobadilla *et al.* (2023), *Trichoderma* sp. memiliki kemampuan untuk segera menyesuaikan diri dengan lingkungan akar dan memberikan efek bio stimulan secara relatif seragam selama aplikasi masih berada pada fase awal pertumbuhan tanaman, sehingga perbedaan waktu aplikasi dalam selang beberapa

hari sering kali tidak menunjukkan respons yang berbeda secara signifikan. Tidak adanya perbedaan nyata antar perlakuan waktu aplikasi menunjukkan bahwa rentang waktu aplikasi yang digunakan masih berada dalam periode efektif bagi *Trichoderma* sp. untuk berperan sebagai biostimulan, sehingga seluruh perlakuan mampu memberikan pengaruh yang relatif sama terhadap waktu muncul bunga pertama tanaman cabai rawit.

4.13 Jumlah Buah

Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi berpengaruh nyata ($P < 0,05$) terhadap jumlah buah cabai rawit serta menunjukkan adanya interaksi antarperlakuan (Lampiran 15). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kerapatan spora *Trichoderma* sp. cenderung meningkatkan jumlah buah yang dihasilkan. Perlakuan aplikasi 7 hari sebelum tanam memberikan respons terbaik dibandingkan waktu aplikasi lainnya.

Tabel 15. Jumlah Buah Cabai Rawit pada Perlakuan Kerapatan *Trichoderma* sp. dan Waktu Aplikasi

Kerapatan <i>Trichoderma</i> sp.	Waktu Aplikasi			Rata-Rata
	7 hari sebelum tanam	Saat tanam	7 hari setelah tanam	
	----- buah/tan -----			
Kontrol (0 spora/ml)	2,00 ^f	1,75 ^f	0,00 ^f	1,25 ^d
10 ⁶ spora/ml	26,00 ^e	2,00 ^f	2,00 ^f	10,00 ^c
10 ⁷ spora/ml	57,00 ^d	35,50 ^e	33,00 ^e	41,83 ^b
10 ⁸ spora/ml	126,75 ^a	78,50 ^c	57,25 ^d	87,50 ^a
10 ⁹ spora/ml	95,75 ^b	82,50 ^c	70,75 ^c	83,00 ^a
Rata-Rata	61,50 ^a	40,05 ^b	32,60 ^c	

*Superskrip berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$).

Kerapatan 10^6 spora/ml pada aplikasi 7 hari sebelum tanam telah mampu meningkatkan jumlah buah, sedangkan hasil tertinggi diperoleh pada kerapatan 10^8 spora/ml. Perlakuan aplikasi saat tanam menunjukkan peningkatan jumlah buah mulai pada kerapatan 10^7 spora/ml, sementara aplikasi 7 hari setelah tanam memberikan hasil optimal pada kerapatan 10^8 spora/ml. Kombinasi kerapatan *Trichoderma* sp. 10^8 spora/ml dan waktu aplikasi 7 hari sebelum tanam merupakan perlakuan terbaik dalam meningkatkan jumlah buah cabai rawit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi spora yang optimal dan aplikasi lebih awal mampu memberikan efek sinergis terhadap pertumbuhan generatif tanaman. Kolonisasi *Trichoderma* sp. yang lebih awal di rizosfer memungkinkan terbentuknya perlindungan terhadap akar serta meningkatkan ketahanan sistemik tanaman, sehingga proses pembungaan dan pembentukan buah berlangsung lebih optimal. Sebaliknya, aplikasi yang terlambat menyebabkan *Fusarium oxysporum* sp. telah lebih dahulu berkembang dan mengganggu penyerapan air serta hara tanaman. Siddiqui *et al.* (2020) menyatakan bahwa infeksi *Fusarium oxysporum* sp. dapat menghambat transportasi air dan unsur hara, menurunkan viabilitas bunga, serta meningkatkan gugur bunga dan buah muda.

Perlakuan 10^9 spora/ml tidak menunjukkan peningkatan jumlah buah yang berbeda nyata dibandingkan 10^8 spora/ml, sehingga kerapatan 10^8 spora/ml diduga merupakan titik optimum bagi *Trichoderma* sp. dalam mendukung pertumbuhan generatif cabai. Woo dan Pepe (2023) menyatakan bahwa konsentrasi yang terlalu tinggi berpotensi menimbulkan kompetisi mikroba di rhizosfer atau ketidakseimbangan mikroekologi tanah sehingga efisiensi kolonisasi akar menjadi

menurun. Perlakuan tanpa *Trichoderma* sp. menghasilkan jumlah buah terendah karena patogen berkembang tanpa hambatan dan mengganggu fungsi vaskular tanaman. Jumlah buah yang dihasilkan pada seluruh perlakuan masih berada di bawah standar deskripsi varietas Maruti F1. Kondisi tersebut diduga dipengaruhi oleh infeksi *Fusarium oxysporum*, keterbatasan media tanam polybag, serta jumlah panen yang terbatas selama penelitian sehingga pembentukan dan perkembangan buah belum berlangsung optimal.

4.14 Bobot Buah

Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi berpengaruh nyata ($P < 0,05$) terhadap bobot buah cabai rawit serta menunjukkan adanya interaksi antarperlakuan (Lampiran 16). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kerapatan spora *Trichoderma* sp. cenderung meningkatkan bobot buah. Aplikasi 7 hari sebelum tanam memberikan respons terbaik dibandingkan waktu aplikasi lainnya.

Tabel 16. Bobot Buah Cabai Rawit pada Perlakuan Kerapatan *Trichoderma* sp. dan Waktu Aplikasi

Kerapatan <i>Trichoderma</i> sp.	Waktu Aplikasi			Rata-Rata
	7 hari sebelum tanam	Saat tanam	7 hari setelah tanam	
	----- gram/tan -----			
Kontrol (0 spora/ml)	1,30 ^g	1,99 ^g	0,00 ^g	1,10 ^e
10 ⁶ spora/ml	32,33 ^f	2,37 ^g	2,90 ^g	12,53 ^d
10 ⁷ spora/ml	51,87 ^e	40,19 ^{ef}	33,37 ^f	41,81 ^c
10 ⁸ spora/ml	150,11 ^a	95,34 ^c	74,20 ^d	106,55 ^a
10 ⁹ spora/ml	115,55 ^b	92,13 ^c	72,71 ^d	93,46 ^b
Rata-Rata	70,23 ^a	46,40 ^b	36,63 ^c	

*Superskrip berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$).

Kerapatan 10^6 spora/ml pada aplikasi 7 hari sebelum tanam telah mampu meningkatkan bobot buah, sedangkan hasil tertinggi diperoleh pada kerapatan 10^8 spora/ml. Aplikasi saat tanam dan 7 hari setelah tanam mulai menunjukkan peningkatan bobot buah pada kerapatan 10^7 spora/ml, sementara perlakuan 10^8 – 10^9 spora/ml memberikan hasil yang tidak berbeda nyata sehingga dianggap sebagai konsentrasi optimal. Kombinasi kerapatan *Trichoderma* sp. 10^8 spora/ml dan waktu aplikasi 7 hari sebelum tanam merupakan perlakuan terbaik dalam meningkatkan bobot buah cabai rawit. Perlakuan tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi spora yang optimal dan aplikasi lebih awal mampu memberikan efek sinergis antara pengendalian patogen dan peningkatan pertumbuhan tanaman.

Kolonisasi awal *Trichoderma* sp. di rizosfer memungkinkan agen hayati mendominasi ruang dan nutrisi sebelum *Fusarium oxysporum* sp. menginfeksi akar tanaman, sehingga proses penyerapan air dan hara tetap berlangsung optimal. Kondisi tersebut mendukung pembentukan dan pembesaran buah secara lebih baik dibandingkan perlakuan lainnya. Monika *et al.* (2025) menyatakan bahwa efektivitas agen hayati sangat dipengaruhi oleh dosis dan waktu aplikasi yang tepat serta kondisi lingkungan yang mendukung aktivitas mikroba antagonis. Kerapatan *Trichoderma* sp. yang optimal mampu menekan perkembangan *Fusarium oxysporum* sp. melalui mekanisme kompetisi ruang dan nutrisi, mikoparasitisme, serta induksi ketahanan sistemik tanaman. Harman *et al.* (2021) menyatakan bahwa *Trichoderma* sp. juga mampu menghasilkan hormon pertumbuhan seperti auksin dan giberelin yang berperan dalam pembesaran buah sehingga berkontribusi terhadap peningkatan bobot buah. Sebaliknya, perlakuan tanpa *Trichoderma* sp.

menunjukkan bobot buah lebih rendah karena infeksi *Fusarium oxysporum* sp. mengganggu fungsi perakaran dan penyerapan air serta hara sehingga akumulasi fotosintat untuk pembentukan buah menurun (Putri *et al.*, 2022).

Data bobot buah yang dihasilkan masih jauh di bawah standar deskripsi tanaman cabai rawit varietas Maruti F1 yang seharusnya berada pada kisaran 320 – 620 gram/tanaman (Lampiran 2). Data bobot buah yang rendah kemungkinan disebabkan oleh kombinasi faktor seperti adanya inokulasi *Fusarium oxysporum* sp. yang menghambat transportasi air dan hara ke jaringan xilem sehingga tanaman mengalami stress fisiologis yang kemudian mengurangi pembentukan bunga dan buah karena banyak tanaman yang terkena layu fusarium. Penggunaan media tanam polybag juga dapat membatasi perkembangan akar sehingga pertumbuhan vegetatif dan generatif menjadi terbatas. Faktor lain yaitu umur panen dan jumlah panen yang terbatas selama penelitian sehingga bobot buah per tanaman menjadi tidak optimal.

4.15 Panjang Buah

Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. berpengaruh nyata ($P < 0,05$) terhadap panjang buah, akan tetapi perlakuan waktu aplikasi *Trichoderma* sp. tidak berpengaruh nyata terhadap panjang buah. Interaksi perlakuan konsentrasi kerapatan dan waktu aplikasi juga tidak menunjukkan pengaruh yang nyata (Lampiran 17). Parameter panjang buah tanaman cabai rawit disajikan pada tabel 17.

Tabel 17. Panjang Buah Cabai Rawit pada Perlakuan Kerapatan *Trichoderma* sp. dan Waktu Aplikasi

Kerapatan <i>Trichoderma</i> sp.	Waktu Aplikasi			Rata-Rata
	7 hari sebelum tanam	Saat tanam	7 hari setelah tanam	
	----- cm/buah -----			
Kontrol (0 spora/ml)	0,75	0,88	0,00	0,54 ^c
10 ⁶ spora/ml	4,23	1,33	1,17	2,24 ^b
10 ⁷ spora/ml	5,63	5,44	5,01	5,36 ^a
10 ⁸ spora/ml	5,99	6,07	5,21	5,76 ^a
10 ⁹ spora/ml	6,11	5,98	5,59	5,89 ^a
Rata-Rata	4,54	3,94	3,39	

*Superskrip berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$).

Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. 10⁷ spora/ml berbeda nyata lebih tinggi dari perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. 10⁶ spora/ml dan tanpa perlakuan *Trichoderma* sp., namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. 10⁸ spora/ml dan 10⁹ spora/ml. Perlakuan 10⁸ spora/ml dan 10⁹ spora/ml secara statistik menunjukkan hasil yang optimum sesuai panjang buah pada deskripsi tanaman cabai rawit varietas Maruti F1 yaitu 5,6 – 6,5 cm. Sedangkan perlakuan 0 spora/ml, 10⁶ spora/ml dan 10⁷ spora/ml masih dibawah standar panjang buah pada deskripsi tanaman cabai rawit varietas Maruti F1 (Lampiran 2.)

Peningkatan konsentrasi *Trichoderma* sp. mampu meningkatkan panjang buah cabai rawit hingga mencapai tingkat tertentu, setelah itu peningkatan konsentrasi tidak lagi memberikan perbedaan yang nyata terhadap panjang buah. Perbedaan panjang buah yang nyata antara perlakuan konsentrasi *Trichoderma* sp. diduga berkaitan dengan peran *Trichoderma* sp. sebagai mikroorganisme pemacu pertumbuhan tanaman. *Trichoderma* sp. diketahui mampu meningkatkan

ketersediaan dan penyerapan unsur hara serta menghasilkan senyawa pemacu pertumbuhan seperti auksin dan giberelin yang berperan dalam proses pembelahan dan pemanjangan sel. Menurut Yadav *et al.*, (2023), proses tersebut mendukung pembentukan dan perkembangan buah sehingga panjang buah meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi inokulum. Hal tersebut didukung oleh Raju dan Punamalai, (2025) yang menyatakan bahwa *Trichoderma* sp. juga dapat memperbaiki kondisi rizosfer dan meningkatkan serapan unsur hara fosfor pada fase pembentukan dan pengisian buah.

Perlakuan waktu aplikasi *Trichoderma* sp. tidak menunjukkan pengaruh nyata terhadap panjang buah cabai rawit. Tidak adanya pengaruh waktu aplikasi terhadap panjang buah diduga karena *Trichoderma* sp. memerlukan waktu untuk beradaptasi dan berkolonisasi di sekitar perakaran tanaman. Setelah berhasil berkolonisasi, *Trichoderma* sp. dapat memberikan efek pemacu pertumbuhan secara bertahap selama pertumbuhan tanaman, sehingga perbedaan waktu aplikasi pada awal pertumbuhan tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap hasil akhir tanaman, khususnya panjang buah. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa interaksi antara konsentrasi kerapatan *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi tidak berpengaruh nyata terhadap panjang buah cabai rawit. Hal ini berarti bahwa kombinasi antara konsentrasi dan waktu aplikasi *Trichoderma* sp. tidak memberikan efek tambahan terhadap parameter panjang buah. Tidak signifikannya interaksi ini menunjukkan bahwa pengaruh utama terhadap panjang buah lebih ditentukan oleh konsentrasi inokulum *Trichoderma* sp. sedangkan waktu aplikasi tidak memperkuat atau memperlemah pengaruh tersebut.

4.16 Visual Quality Rating (VQR)

Perlakuan konsentrasi kerapatan spora *Trichoderma* sp. dan waktu aplikasi *Trichoderma* sp. berpengaruh nyata ($P < 0,05$) terhadap kualitas buah cabai rawit, namun tidak menunjukkan adanya interaksi antar perlakuan (lampiran 18). Perlakuan kerapatan 10^9 spora/ml menghasilkan kualitas buah lebih tinggi dibanding perlakuan lainnya, dengan hasil terbaik pada 10^9 spora/ml yang memperoleh rata-rata skor VQR 4,72.

Tabel 18. Visual Quality Rating (VQR) Buah Cabai Rawit pada Perlakuan Kerapatan *Trichoderma* sp. dan Waktu Aplikasi

Kerapatan <i>Trichoderma</i> sp.	Waktu Aplikasi			Rata-Rata
	7 hari sebelum tanam	Saat tanam	7 hari setelah tanam	
	----- skor/buah -----			
Kontrol (0 spora/ml)	0,25	0,25	0,00	0,17 ^d
10^6 spora/ml	1,67	0,33	0,25	0,75 ^c
10^7 spora/ml	2,96	3,13	2,13	2,74 ^b
10^8 spora/ml	5,00	4,67	4,38	4,68 ^a
10^9 spora/ml	4,92	4,67	4,58	4,72 ^a
Rata-Rata	2,96 ^a	2,61 ^b	2,27 ^c	

*Superskrip berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$).

Perlakuan waktu aplikasi 7 hari sebelum tanam juga menunjukkan hasil terbaik dengan rata-rata skor VQR 2,96 dibanding aplikasi saat tanam maupun 7 hari setelah tanam. Tingginya kualitas buah pada perlakuan tersebut diduga karena *Trichoderma* sp. mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara dan menghasilkan fitohormon yang mendukung pembentukan buah, sekaligus menekan perkembangan *Fusarium oxysporum* di daerah perakaran. Perlakuan tanpa *Trichoderma* sp. menunjukkan kualitas buah terendah akibat infeksi patogen yang mengganggu sistem vaskular dan penyerapan hara tanaman. Aplikasi 7 hari

sebelum tanam memberikan waktu yang cukup bagi *Trichoderma* sp. untuk berkolonisasi di rizosfer sebelum patogen berkembang, sehingga pengendalian penyakit menjadi lebih efektif (Vinale et al., 2020).

Kondisi tersebut sejalan dengan parameter kesehatan tanaman lainnya, dimana kualitas visual tanaman yang baik berkorelasi dengan rendahnya intensitas penyakit, insidensi penyakit, dan nilai AUDPC, serta semakin panjangnya masa inkubasi penyakit. Semakin baik kemampuan *Trichoderma* sp. dalam menekan perkembangan penyakit, maka kondisi fisiologis tanaman tetap optimal sehingga pembentukan dan kualitas buah meningkat. Sebaliknya, tanaman dengan kualitas visual rendah umumnya menunjukkan perkembangan penyakit lebih cepat yang ditandai oleh tingginya intensitas, insidensi, dan AUDPC serta masa inkubasi yang lebih singkat. Menurut Monika et al., (2025), efektivitas agen hayati sangat dipengaruhi oleh ketepatan waktu aplikasi sebelum patogen berkembang secara intensif. Secara keseluruhan, peningkatan kerapatan *Trichoderma* sp. hingga 10^8 – 10^9 spora/ml dan aplikasi sebelum tanam efektif dalam menekan penyakit layu fusarium sekaligus meningkatkan kualitas buah cabai rawit varietas Maruti F1.

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa pemberian *Trichoderma* sp. dengan kombinasi perlakuan kerapatan spora 10^8 spora/ml dan aplikasi 7 hari sebelum pindah tanam merupakan kombinasi tertinggi dalam mengendalikan penyakit layu fusarium dengan intensitas penyakit 0% (tanpa gejala) serta mampu mempertahankan produksi cabai rawit varietas Maruti F1. Kerapatan spora dan waktu aplikasi menjadi faktor penting dalam penerapan agen hayati *Trichoderma* sp. sebagai upaya pengendalian penyakit dan peningkatan produktivitas tanaman cabai rawit.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu perlu dilakukan penelitian pada skala lapangan yang lebih luas untuk memastikan konsistensi hasil. Perlu mengkaji efektivitas *Trichoderma* sp. pada formulasi yang berbeda serta mengombinasikannya dengan agen hayati lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Abadi, A., Rahmawati, D., dan Sulastri, R. 2023. Perubahan komunitas mikroba tanah akibat infeksi *Fusarium oxysporum* pada tanaman cabai. J. Fitopatologi Indonesia, 19(2): 85–94.
- Adnan, M., Islam, W., Shabbir, A., Khan, K. A., Ghramh, H. A., Huang, Z., Chen, H. Y. H., dan Lu, G. 2019. Plant defense against fungal pathogens by antagonistic fungi with *Trichoderma* in focus. J. Microbial Pathogenesis, 129: 7–18.
- Aidawati, N., dan Fitriyani, L. 2021. Ketahanan beberapa varietas cabai rawit terhadap penyakit utama tanaman cabai. J. Agroteknologi Tropika, 10(1): 41–49.
- Alfizar, Marlina, dan Hasanah. 2021. Upaya pengendalian penyakit layu *Fusarium oxysporum* dengan pemanfaatan agen hayati cendawan FMA dan *Trichoderma harzianum*. J. Floratek, 6(1): 8–17.
- Alif, M. 2017. Pengaruh intensitas cahaya terhadap pertumbuhan dan hasil cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.). J. Agrosains, 15(3): 112–118.
- Amalia, A. R. 2023. Secondary metabolites of *Trichoderma* sp. as antifungal agents. J. Nukleus, 58(1): 1–10.
- Andari, N. N., Yunus, M., dan Asrul, A. 2020. Pengaruh masa inkubasi biakan *Trichoderma* sp. terhadap kerapatan spora dan viabilitasnya. J. Mitra Sains, 8(1): 95–103.
- Andayani, S. R. 2016. Faktor-faktor yang mempengaruhi produksi cabai merah. J. Pemikiran Masyarakat Ilmiah Berwawasan Agribisnis, 1(1): 261–267.
- Andrzejak, R., dan Janowska, B. 2023. Effect of *Trichoderma* spp. on growth and flowering of *Gladiolus hybridus*. J. Sustainability, 15(8): 4576.
- Anggraini, D. 2020. Karakterisasi morfologi dan viabilitas benih cabai rawit. J. Teknologi Benih, 8(1): 23–30.
- Antari, N. M. D., Darmayasa, I. B. G., dan Hardini, E. 2020. Pengaruh volume aplikasi *Trichoderma asperellum* terhadap penyakit layu fusarium pada cabai merah. J. Biologi Udayana, 24(2): 65–72.

- Asghar, H. N., Zahir, Z. A., dan Shahzad, S. M. 2024. Endophytic and rhizospheric *Trichoderma* spp. in sustainable crop protection. *J. Biological Control*, 186: 105291.
- Asmi, A., Hidayat, R., dan Putri, A. R. 2023. Mekanisme infeksi *Fusarium oxysporum* pada tanaman hortikultura. *J. Perlindungan Tanaman*, 7(1): 14–24.
- Awad, A. E. F. A., Shams, A. H. M., Helaly, A. A., dan Ragheb, E. I. M. 2022. Effective applications of *Trichoderma* spp. as biofertilizers and biocontrol agents mitigate tomato fusarium wilt disease. *J. Agriculture*, 12(11): 1950.
- Aziez, F., Rahman, A., dan Siregar, M. 2021. Pengaruh iklim terhadap pertumbuhan dan hasil cabai rawit. *J. Agroklimatologi*, 9(2): 77–85.
- Azmi, M. 2021. Keragaman patogen *Fusarium oxysporum* pada tanaman hortikultura. *J. Fitopatologi*, 17(3): 133–140.
- Badan Pusat Statistik. 2023. Statistik harga produsen pertanian subsektor tanaman pangan, hortikultura dan perkebunan rakyat. Badan Pusat Statistik.
- Barnett, H. L., dan Hunter, B. B. 1972. *Illustrated genera of imperfect fungi* (edisi ke-4). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Belezaca, C., Martinez, J., dan Paredes, M. 2025. Antagonistic activity of *Trichoderma* spp. against *Fusarium oxysporum*. *J. of Fungi*, 11(1): 44.
- Belezaca, G., Sosa, D., López, I., Vásquez, K., dan Villacís, J. 2025. Potential of *Trichoderma* spp. as a biocontrol agent in sustainable agriculture. *J. Applied Soil Ecology*, 195, 105308.
- Belezaca, P. L., Martínez, C., dan Pérez, E. 2025. Antagonistic activity of native *Trichoderma* strains against soilborne pathogens. *J. Pathogens*, 16(3): 85.
- Bhavik, P., Hiren, V., dan Patel, K. P. 2020. Cultural and morphological variability in *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *J. International J. ournal of Chemical Studies*, 8(4): 123–127.
- Bobadilla, L. F., Gutiérrez, M. F. J., Lucas, J. A., dan Ramos, S. B. 2023. *Trichoderma* spp. as biostimulants to promote plant growth and flowering. *J International J. ournal of Molecular Sciences*, 24(24): 15662.
- Cahyani, I. R., P. A. Sari., dan R. Pratiwi. 2021. Identifikasi morfologi Jamur *Trichoderma* sp. *J. Biologi Tropis*, 21(3): 145–152.

- Carro, G., P. S. Mayo., G. A. Rodríguez., P. A. Casquero., dan R. E. Cardoza. 2021. The role of *Trichoderma* secondary metabolites in the biocontrol of plant pathogens and their potential as biostimulants. *J. Plants*, 10(2): 318.
- Carro, H. G., J. Poveda., dan R. Hermosa. 2021. Temperature and growth response of *Trichoderma* spp. *J. Agronomy*, 11(9): 1771.
- Carro, M., M. Pujol., dan E. Monte. 2021. Environmental factors affecting growth of *Trichoderma* spp. *J. Microbiological Research*, 247, 126731.
- Cavalcante, R. S., W. G. Lima., L. S. Oliveira., dan V. P. Campos. 2025. Environmental factors influencing *Trichoderma* spp. activity and effectiveness as a biocontrol agent. *J. Biological Control*, 194, 105590.
- Cavalcante, R. S., A. L. Silva., dan M. J. Costa. 2025. pH tolerance and sporulation of *Trichoderma* spp. *J. Applied Soil Ecology*, 197, 105214.
- Chakrapani, K., S. Sanyal., dan S. S. Gnanamanickam. 2023. Deciphering growth abilities of *Fusarium oxysporum* f. sp. *pisi* under variable temperature, pH and nitrogen. *J. Frontiers in Microbiology*, 14, 1228442.
- Chen, S., P. Daly., W. M. Anjago., R. Wang., Y. Zhao., X. Wen., dan L. Wei. 2024. Genus-wide analysis of *Trichoderma* antagonism toward *Pythium* and *Globisporangium* plant pathogens. *J. Applied and Environmental Microbiology*, 90(9): e00314-24.
- Chili, R. 2017. Pengaruh jenis mikoriza arbuskular terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman cabai merah (*Capsicum annum* L.). *J. Agrotek Lestari*, 3(1): 30–38.
- Christy, A., A. Rahim., dan B. Nugroho. 2023. Morfologi dan sistem perakaran cabai rawit. *J. Hortikultura Indonesia*, 14(1): 29–37.
- Contreras, C. H. A., M. Schmoll., A. B. A. Esquivel., E. C. E. González., R. V. Rocha., dan J. Larsen. 2024. Mechanisms for plant growth promotion activated by *Trichoderma*. *J. Microbiological Research*, 281, 127621.
- Correa, D. M., F. B. Salazar-Badillo., dan L. C. Hernández. 2024. *Trichoderma* as endophyte in crop protection. *J. Biological Control*, 187, 105237.
- Correa, J. L., E. Rojas., dan S. Moreno. 2024. Endophytic *Trichoderma* and plant defense mechanisms. *J. Frontiers in Plant Science*, 15, 1289043.
- Cronquist, A. 1981. *An Integrated System of Classification of Flowering Plant*. Columbia University Press, New York.

- Cui, J., Y. Zhao., dan L. Chen. 2025. *Trichoderma virens* siderophore production enhances plant iron uptake and suppresses Fusarium wilt. J. Microbial Cell Factories, 24(1): 38.
- Cui, Y., X. Wang., dan Y. Li. 2025. Siderophore production by *Trichoderma* spp. and its role in biocontrol. J. Applied Microbiology and Biotechnology, 109(2): 789–801.
- Direktorat Perlindungan Perkebunan. 2014. Pedoman teknis agens hayati untuk pengendalian OPT perkebunan. Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Doehlemann, G., B. Ökmen., W. Zhu., dan A. Sharon. 2017. Plant pathogenic fungi. J. Microbiology Spectrum, 5(1): 1–23.
- Dwiastuti, M. E., Widodo., dan Supramana. 2015. Sumber inokulum *Fusarium oxysporum* pada tanaman hortikultura. J. Fitopatologi Indonesia, 11(2): 51–59.
- Elita, D., A. Rahman., dan Y. Sari. 2022. Karakterisasi morfologi mikroskopis jamur *Trichoderma* sp. J. Mikrobiologi Indonesia, 14(2): 89–97.
- Farida, N., S. Sudiono., T. Aeny., K. F. Hidayat., dan R. Suharjo. 2022. Pengaruh kepadatan spora *Trichoderma* sp. dan molase terhadap penyakit bulai jagung. J. Agrotek Tropika, 10(1): 35–42.
- Fatwami, E. F., dan S. Royani. 2023. Skrining fitokimia dan uji antioksidan daun cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.). J. Syifa Sciences and Clinical Research, 5(2): 253–260.
- Febriana, D., S. Sunar., dan H. K. Tuti. 2024. Efektivitas waktu aplikasi *Trichoderma* sp. terhadap layu fusarium pada cabai. J. Agrosience, 14(2): 91–100.
- Firdaus, E. Z., W. M. N. I. Indahsari., S. Bahri., dan E. Tyastirin. 2024. Exploration and identification of *Trichoderma* sp. as biological agent. J. Biologi Eksperimen dan Keanekaragaman Hayati, 11(2): 59–68.
- Fisher, M. C., S. J. Gurr., C. A. Cuomo., D. S. Blehert., H. Jin., E. H. Stukenbrock., J. E. Stajich., R. Kahmann., C. Boone., dan D. W. Denning. 2020. Threats posed by the fungal kingdom. J. mBio, 11(3), e00449-20.
- Ghufron, M., S. D. Nurcahyanti., dan W. S. Wahyuni. 2017. Pengendalian layu Fusarium dengan *Trichoderma* sp. pada tomat. J. Agroteknologi Tropika, 6(1): 29–34.

- Gusnawaty, H. S., M. Taufik., dan H. Herman. 2019. Efektivitas *Trichoderma* indigenus sebagai biofungisida. *J. Agroteknos*, 4(1): 24–37.
- Gusnawaty, H. S., M. Taufik., L. Triana., dan Asniah. 2019. Karakterisasi morfologis *Trichoderma* spp. indigenus. *J. Agroteknos*, 4(2): 87–93.
- Habib, M., S. Anwar., dan M. Iqbal. 2023. Soil-borne nature of *Fusarium oxysporum*. *J. Plant Pathology Journal*, 39(4): 356–365.
- Hardianti, A. R., S. R. Yuni., dan T. A. Mahanani. 2024. Efektivitas waktu pemberian *Trichoderma harzianum* pada tomat. *J. Lentera Bio*, 3(1): 21–25.
- Hardianti, L. 2019. Efektivitas *Trichoderma harzianum* terhadap layu *Fusarium* pada tomat. *J. Fitopatologi Indonesia*, 10(2): 45–52.
- Harish, J., M. Karthikeyan., dan S. Nakkeeran. 2023. Morphological characterization of *Fusarium* isolates. *J. Frontiers in Microbiology*, 14, 112345.
- Harman, G. E., F. Doni., R. B. Khadka., dan N. Uphoff. 2021. Endophytic strains of *Trichoderma* increase plant growth and resistance. *J. Microorganisms*, 9(3): 524.
- Harman, G. E., F. Doni., R. B. Khadka., dan N. Uphoff. 2021. *Trichoderma* species as plant growth promoters. *J. Microorganisms*, 9(2): 1–25.
- Irawati, A. F. C., K. H. Mutaqin., M. Suhartono., dan W. Widodo. 2020. The effect of application endophytic fungus *Trichoderma* spp. and *Fusarium* spp. to control bacterial wilt in chilli pepper. *J. Walailak Science and Technology*, 17(6): 559–569.
- Karim, H., A. I. Suryani., dan A. Naqiah. 2025. Efektivitas cendawan antagonis *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, dan *Trichoderma harzianum* terhadap *Fusarium* pada tanaman cabai rawit (*Capsicum frutescens*). *J. Otus Education*, 3(2): 0277.
- Kee, Y. J., M. S. Kim., Y. K. Lee., Y. J. Park., dan S. K. Lee. 2020. Morphology, phylogeny and pathogenicity of *Fusarium* species from tomato. *J. Plant Pathology*, 69(3): 456–468.
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. 2023. Komoditas pertanian subsektor hortikultura cabai. Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian.
- Khoirunisa, F. R., A. W. Sektiono., S. Djauhari, dan L. Q. Aini. 2024. Uji potensi jamur penghasil IAA sebagai pengendali hayati patgen layu *Fusarium*

- oxysporum* sp. pada tanaman cabai. J. Hama Penyakit Tumbuhan, 12(1): 25–41.
- Khuong, N. Q., N. T. Dung., dan T. T. Phuong. 2023. Evaluation of the biocontrol potential of *Trichoderma* strains against *Fusarium oxysporum*. J. Plant Protection Research, 63(1): 1–12.
- Khuong, N. Q., C. Trang., D. T. Xuan., L. T. Quang., T. N. Huu., L. N. T. Xuan., dan L. V. Thuc. 2023. Evaluation of the antagonistic potential of *Trichoderma* spp. against *Fusarium oxysporum*. J. Plant Protection Research, 63(1): 13–26.
- Khuong, T. Q., H. T. Nguyen., dan D. T. Tran. 2023. In vitro antagonism of *Trichoderma* spp. against *Fusarium oxysporum*. J. Plant Diseases and Protection, 130(2): 245–255.
- Kumar, S., R. Patel., dan V. Singh. 2021. Yield losses due to *Fusarium* wilt in chilli. J. Plant Protection Research, 61(3): 233–240.
- Kumar, S., A. Singh., dan S. C. Dubey. 2021. Timing and dose-dependent efficacy of *Trichoderma* spp. against soil-borne plant pathogens. J. Biological Control, 156: 104546.
- Lee, S., Y. Zhang., dan A. Ali. 2024. Effects of reduced phosphate fertilizer and increased *Trichoderma* application on the growth, yield, and quality of pepper plants. J. Plants, 13(16): 2998.
- Li, Y., Y. Li., H. Zhang., dan G. Zhang. 2023. *Trichoderma*-induced systemic resistance against *Fusarium* wilt in horticultural crops. J. Frontiers in Plant Science, 14: 1189452.
- Ma, L. J., D. M. Geiser., dan R. H. Proctor. 2018. *Fusarium* pathogenomics. J. Annual Review of Microbiology, 67: 399–416.
- Maulana, M., dan A. Rahmawati. 2025. Pengaruh aplikasi *Trichoderma harzianum* terhadap pengendalian jamur *Fusarium oxysporum* pada tanaman bayam Brazil (*Alternanthera sissoo*). J. Agrivet, 13(1): 209–216.
- Monika, R., E. Santoso., dan D. Lestari. 2025. Pengaruh faktor lingkungan terhadap intensitas penyakit layu fusarium dan efektivitas agen hayati. J. Fitopatologi Indonesia, 21(1): 15–24.
- Mukherjee, P. K., B. A. Horwitz., E. A. Herrera., M. Schmoll., dan C. M. Kenerley. 2022. *Trichoderma* research in the genome era. J. Phytopathology, 60: 291–316.

- Mukherjee, P. K., A. Mendoza., S. Zeilinger., dan B. A. Horwitz. 2022. Mycoparasitism as a mechanism of *Trichoderma*-mediated suppression of plant diseases. *J. Fungal Biology Reviews*, 39(1): 15–33.
- Muslim, A. 2019. Peran *Trichoderma* sebagai dekomposer bahan organik. *J. Agroteknologi Tropika*, 8(1): 45–53.
- Nabila, D. A. 2023. An in vitro study of the spore densities effect of *Trichoderma* spp. as biocontrol agent for Fusarium wilt in cayenne pepper (*Capsicum* sp.). *J. Tropical Plant Protection*, 5(1): 23–31.
- Nabila, T. T., I. A. Nugraheni., R. S. Widiyatmoko., dan W. Probowati. 2021. An in vitro study of the spore densities effect of *Trichoderma* spp. as biocontrol agent for fusarium wilt in cayenne pepper (*Capsicum* sp.). *J. International Health Science and Technology*, 3(1): 117–129.
- Nguyen, T. T. H., Q. H. Le., dan M. N. Tran. 2023. Incidence and yield losses of Fusarium wilt in chili (*Capsicum* spp.) under tropical conditions of Southeast Asia. *J. Plant Pathology*, 105(2): 245–256.
- Nguyen, T. T., Q. H. Pham., dan V. D. Le. 2023. Impact of Fusarium wilt on chilli production in Southeast Asia. *J. Crop Protection*, 171: 106290.
- Nisa, K. 2018. Aktivitas enzim *Trichoderma* dalam menghambat *Fusarium oxysporum*. *J. Fitopatologi Indonesia*, 14(5): 200–208.
- Nuraeni, D., S. Hidayat., dan I. Rahmawati. 2018. Kompetisi ruang *Trichoderma* sp. terhadap patogen tular tanah. *J. Perlindungan Tanaman Indonesia*, 22(2): 135–141.
- Nurjanah, S. 2020. Efektivitas aplikasi *Trichoderma* sp. terhadap serangan layu Fusarium pada cabai varietas TM 99. *J. Agroteknologi*, 14(1): 12–20.
- Oyesola, O. L., T. R. Kinge., O. Kolade., dan O. Obembe. 2025. Evaluating pre-planting *Trichoderma asperellum* application for biocontrol of *Macrophomina phaseolina* in screenhouse-grown cowpea: Effects on disease severity and biomass enhancement. *J. Biocontrol Research*, 15(1): 56–64.
- Peng, Y., S. J. Li., J. Yan., Y. Tang., J. P. Cheng., A. J. Gao., X. Yao., J. J. Ruan., dan B. L. Xu. 2021. Research progress on phytopathogenic fungi and their role as biocontrol agents. *J. Frontiers in Microbiology*, 12: 670135.
- Pereira, L. D. S., A. L. Salomón., V. A. C. Bermudez., dan S. P. Rius. 2025. Bioactive proteins from *Trichoderma* for the control of *Fusarium*: Evaluation of antagonist efficacy and potential for agronomic application. *J. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 103628.

- Poveda, J., U. P. Abril., dan C. Escobar. 2020. Biological control of plant-parasitic nematodes by *Trichoderma* spp.: A review. *J. Biological Control*, 140: 104128.
- Poveda, J., D. Eugui., U. P. Abril., dan P. Velasco. 2020. *Trichoderma* species as biocontrol agents and plant growth promoters. *J. Fungi*, 6(4): 1–25.
- Poveda, J., R. Hermosa., E. Monte., dan C. Nicolás. 2021. *Trichoderma harzianum* favors the tolerance of tomato plants to biotic and abiotic stresses. *J. Plant Physiology*, 257: 153336.
- Poveda, J., U. P. Urias., dan C. Escobar. 2021. Biological control of plant diseases by *Trichoderma* spp. and its impact on plant growth promotion. *J. Microbiological Research*, 252: 126786.
- Prasetyo, R. H., T. Santoso., dan P. Widodo. 2021. Pengaruh kepadatan spora *Trichoderma* sp. terhadap penyakit layu *Fusarium* pada cabai merah. *J. Fitopatologi Indonesia*, 17(2): 101–109.
- Puspitasari, A. 2020. Analisis biaya dan pendapatan usahatani cabai rawit di Kecamatan Cigalontang Kabupaten Tasikmalaya. *J. Pemikiran Masyarakat Ilmiah Berwawasan Agribisnis*, 6(2): 1130–1142.
- Putra, I. M. T. M., T. A. Phabiola., dan N. W. Suniti. 2019. Pengendalian penyakit layu *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* pada tanaman cabai rawit (*Capsicum frutescens*) di rumah kaca dengan *Trichoderma* sp. yang ditambahkan pada kompos. *J. Agroekoteknologi Tropika*, 8(1): 103–117.
- Putri, A. N., S. Wiyono., dan Widodo. 2022. Dampak penyakit layu fusarium terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman cabai. *J. Perlindungan Tanaman Indonesia*, 26(2): 89–97.
- Rahman, M. A., M. S. Chowdhury., dan M. A. Hossain. 2022. Soil moisture and temperature interaction affecting *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* incidence in chili pepper fields. *J. Plant Protection Research*, 62(3): 250–259.
- Rahman, M., T. Islam., dan M. Hossain. 2022. Soil moisture effect on *Fusarium* wilt severity. *J. Plant Disease*, 106(5): 1402–1409.
- Rai, N., D. S. Yadav., dan R. Kumar. 2022. Source–sink relationship and fruit development in chili (*Capsicum annuum* L.). *J. Scientia Horticulturae*, 293: 110726.
- Raju, Y., dan G. Punamalai. 2025. A review on the overview of *Trichoderma* – A versatile biocontrol agent and plant growth promoter. *J. Frontiers in Environmental Microbiology*, 11(2): 19–25.

- Rezki, R., S. Hidayat., dan B. Hermanto. 2017. Pengaruh aplikasi *Trichoderma harzianum* terhadap layu Fusarium dan pertumbuhan cabai varietas F1 Bintang Asia. *J. Hortikultura Indonesia*, 8(2): 85–94.
- Sari, G. L. M., R. R. D. Pertami., dan E. Eliyatiningasih. 2022. Aplikasi pupuk kalium terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman cabai merah besar (*Capsicum annuum* L.). *Prosiding Agropross*, 221–233.
- Sarma, B. K., D. K. Yadav., S. Singh., dan H. B. Singh. 2021. Microbial consortium-mediated plant defense against phytopathogens. *J. Plant Diseases and Protection*, 128: 27–39.
- Sarma, B. K., S. K. Yadav., S. Singh., dan H. B. Singh. 2021. Microbial consortium-mediated plant defense against *Fusarium oxysporum*. *J. Biological Control*, 158: 104599.
- Shaheen, N., T. Al-Sayed., dan T. Sayed. 2021. Genetics and genomics of Fusarium wilt of chilies: A review. *J. Fungi*, 7(10): 808.
- Sharma, P., S. Vaid., dan M. Sharma. 2022. Biological control of Fusarium wilt using *Trichoderma* species: Mechanisms and field applications. *J. Biological Control*, 172: 104973.
- Siahaan, S. H., Y. G. O. Aruan., dan F. Siahaan. 2022. Penyuluhan pengolahan cabai merah (*Capsicum annuum*) menjadi sari cabai original. *J. Indonesian Community Service*, 2(2): 106–115.
- Siddiquee, S., B. E. Cheong., K. Taslima., H. Kausar., dan M. M. Hasan. 2021. Dose-dependent effects of *Trichoderma* spp. on plant growth and soil microbial activity. *J. Plants*, 10(9): 1893.
- Siddiqui, Z. A., I. Mahmood., dan Z. Khan. 2020. Role of *Trichoderma* spp. in the management of soil-borne diseases of vegetables. *J. Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 53(6): 295–310.
- Singh, B. N., A. Singh., dan S. P. Singh. 2022. Timing of application of *Trichoderma* spp. influences disease suppression and yield of chili. *J. Biological Agriculture and Horticulture*, 38(4): 243–255.
- Srivastava, M., P. Verma., dan R. Singh. 2021. Influence of pH on *Trichoderma* growth and sporulation. *J. Frontiers in Microbiology*, 12: 668.
- Stange, P., J. Kersting., P. B. Sivaprakasa., J. P. Schnitzler., M. Rosenkranz., T. Karl., dan J. P. Benz. 2024. The decision for or against mycoparasitic attack by *Trichoderma* spp. is taken already at a distance in a prey-specific manner

- and benefits plant-beneficial interactions. *J. Fungal Biology and Biotechnology*, 11(1): 14–23.
- Sukasana, I. W., A. A. G. Putra., P. E. Apriastuti., dan I. G. A. S. U. Dewi. 2024. Pertumbuhan dan hasil tanaman cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.) pada dosis *Trichoderma* sp. dan pupuk organik petroganik. *J. Ganec Swara*, 18(1): 503–509.
- Sulistiyono, H. 2017. Pengaruh suhu dan unsur hara terhadap pertumbuhan *Trichoderma* sp. *J. Agroteknologi Tropika*, 6(2): 77–85.
- Susanna, S., A. Alfizar., dan E. Fitriadi. 2023. Efektivitas dosis dan waktu aplikasi pupuk kompos trico-glio untuk pengendalian penyakit layu fusarium (*Fusarium* sp.) pada tanaman cabai merah (*Capsicum annum* L.). *J. Agrikultura*, 34(3): 435–444.
- Syahputra, D. R., E. Pramono., dan A. Widodo. 2017. Potensi *Trichoderma* sp. sebagai agen hayati untuk pengendalian penyakit tanaman hortikultura. *J. Agrotek Indonesia*, 2(1): 45–54.
- Syahputra, D., R. Lestari., dan H. Putra. 2017. Pemanfaatan *Trichoderma* sp. sebagai agen hayati pengendali penyakit tanaman. *J. Pertanian Tropika*, 4(1): 25–34.
- Tarigan, R. S., R. C. Hutabarat., B. Karo., P. Sembiring., D. Napitupulu., S. Supardi., dan A. Hasyim. 2024. A comparison of synthetic fungicide and *Trichoderma* spp. applications against clubroot disease on cabbage. *J. Kultivasi*, 23(1): 91–100.
- Tayala, S., T. Suryaningsih., dan Y. Ramadhani. 2021. Efektivitas kerapatan spora *Trichoderma* sp. dalam menekan penyakit antraknosa. *J. Perlindungan Tanaman*, 19(3): 112–120.
- Thuy, N. P., N. N. Nam., N. N. Trai., N. H. X. Thao., V. T. Phong., dan D. T. Khang. 2022. Potential of *Trichoderma* spp. isolated in the rhizosphere to produce biofertilizer from organic materials. *J. Biodiversitas*, 23(12): 1–9.
- Tilahun, S., D. Bekele., dan T. Alemu. 2024. Incidence of Fusarium wilt on chilli. *J. Plant Pathology*, 106(1): 115–124.
- Tilahun, T., S. Abate., T. Tadesse., dan M. Taye. 2024. Morphological variability of *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* isolates infecting pepper (*Capsicum annum* L.) landraces in West Gojjam Zone, Ethiopia. *J. Cogent Food and Agriculture*, 10(1): 2322782.

- Villavicencio, V. M., L. F. Espinoza., dan L. J. Coronel. 2025. Biological control agents: Mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. J. *Frontiers in Agronomy*, 7: 1578915.
- Walia, A., S. K. Sharma., B. K. Gupta., N. Rana., A. Sharma., dan P. Verma. 2025. Biocontrol potential of *Trichoderma*-derived chitinase: Optimization, purification and antifungal activity against soil-borne pathogens of apple. J. *Frontiers in Fungal Biology*, 6: 1618728.
- Wandani, S. A. P., Yuliani., dan Y. S. Rahayu. 2015. Uji ketahanan lima varietas cabai terhadap penyakit tular tanah (*Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici*). J. *Lentera Bio*, 4(3): 155–160.
- Woo, S. L., dan O. Pepe. 2023. Microbial interactions in the rhizosphere: Implications for plant health and productivity. J. *Frontiers in Microbiology*, 14: 1182456.
- Yadav, M., M. K. Dubey., A. Rai., S. Kumar., dan Y. N. Tripathi. 2023. Plant growth promotion and differential expression of defense genes in chilli pepper induced by *Trichoderma asperellum* and *T. harzianum*. J. *BMC Microbiology*, 23: 54.
- Yanti, N. 2021. Aplikasi *Trichoderma* sp. sebagai pengendali hayati OPT tular tanah. J. *Agroteknologi Tropika*, 10(2): 55–62.
- Yanti, Y., Warnita., Reflin., dan M. Busniah. 2018. Indigenous endophytic bacteria ability to control *Ralstonia* and *Fusarium* wilt disease on chili pepper. J. *Biodiversitas*, 19(4): 1532–1538.
- Yasintasari, A., P. Hadi., dan P. S. Mukti. 2021. The effect of dose and time of administration of *Trichoderma* sp. on *Fusarium oxysporum* on shallot. J. *Ilmiah Ilmu-Ilmu Pertanian*, 15(2).
- Younesi, H., E. Bazgir., M. Darvishnia., dan K. Chehri. 2021. Selection and control efficiency of *Trichoderma* isolates against *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* in Iran. J. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 116: 101731.
- Younesi, H., M. J. Soleimani., M. Mirzakhani., dan S. A. Khodaparast. 2021. Morphological, molecular and pathogenic characterization of *Fusarium oxysporum* isolates. J. *Plant Protection Research*, 61(3): 234–242.
- Yulia, A., A. Prabowo., dan B. Nugroho. 2017. Pemanfaatan *Trichoderma* dalam pertanian berkelanjutan. J. *Agroekologi*, 8(1): 55–63.
- Yulia, A., T. Santoso., dan L. Nuraini. 2017. Potensi *Trichoderma* sp. dalam pengendalian hayati. J. *Bioteknologi Pertanian*, 2(2): 56–64.

- Yuliani, R. A., Y. Marsuni., dan I. S. Budi. 2025. Uji macam isolat *Trichoderma* sp. terhadap penyakit layu fusarium pada tanaman cabai besar. J. Proteksi Tanaman Tropika, 8(2): 1158–1166.
- Zhang, S. C., L. Qiu., Y. W. Zheng., W. Wang., H. G. Zhao., dan D. F. Yang. 2025. Timing of *Trichoderma* application affects root colonization and plant growth response. J. Frontiers in Plant Science, 13: 912345.
- Zhang, S., Y. Gan., dan B. Xu. 2021. Application of plant-growth-promoting fungi *Trichoderma* improves disease resistance in crops. J. Frontiers in Plant Science, 12: 640000.
- Zhang, S., Y. Gan., dan B. Xu. 2021. Induced systemic resistance mediated by *Trichoderma* spp. in plants. J. Plant Disease, 105(10): 2743–2752.
- Zhang, Z., S. Song., Y. Li., S. Liang., Y. Sun., dan R. Li. 2021. Tomato endophytic bacteria composition and mechanism: Experimental challenge with *Fusarium oxysporum*. J. Frontiers in Microbiology, 12: 731764.
- Zhou, J., B. Deng., Y. Zhang., A. B. Cobb., dan Z. Zhang. 2020. *Trichoderma* promotes plant growth by regulating hormone signaling and improving nutrient availability. J. Plant Physiology and Biochemistry, 152: 44–52.
- Zin, N. A. I. M., dan N. A. Badaluddin. 2020. Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. J. Annals of Agricultural Sciences, 65(2): 168–178.