



Henik Sukorini

Implementasi ***Trichoderma*** ***harzianum*** dan **VAM**

untuk Mengendalikan
Penyakit Akar Putih
pada Kopi Arabika

**Implementasi *Trichoderma harzianum*
dan VAM untuk Mengendalikan
Penyakit Akar Putih pada Kopi
Arabika**

Henik Sukorini

Implementasi
Trichoderma
harzianum
dan **VAM**

untuk Mengendalikan
Penyakit Akar Putih
pada Kopi Arabika

Copyright ©2025, Bildung
All rights reserved

Implementasi *Trichoderma harzianum* dan VAM untuk Mengendalikan Penyakit Akar Putih pada Kopi Arabika

Henik Sukorini

Desain Sampul: Ruhtata
Layout/tata letak Isi: Tim Redaksi Bildung

x + 148 halaman; 15,5 x 23 cm
ISBN: 978-634-7056-86-3

Cetakan Pertama: Juli 2025

Penerbit:
CV. Bildung Nusantara
Jl. Raya Pleret KM 2
Banguntapan Bantul Yogyakarta 55791
Email: bildungpustakautama@gmail.com
Website: www.penerbitbildung.com

Anggota IKAPI

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku tanpa seizin tertulis dari Penerbit dan Penulis

PRAKATA PENULIS

Assalamualaikum wr wb

Puji dan syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan berkah, rahmat, karunia dan ridhoNya, kami dapat menyelesaikan Monograf yang berjudul *Implementasi Trichoderma harzianum dan VAM untuk Mengendalikan Penyakit Akar Putih pada Kopi Arabika*. Buku ini disusun sebagai bentuk pertanggungjawaban ilmiah atas kegiatan yang dilakukan oleh penulis. Buku monograf ini menguraikan tentang efektifitas dua agen hayati yaitu jamur *Trichoderma harzianum* Rifai dan jamur akar yaitu mikoriza.

Penyakit akar putih merupakan penyakit utama pada tanaman kopi dan karet, jamur pathogen ini merupakan jamur tanah sehingga sangat sulit dikendalikan. Jamur tular tanah hanya efektif dikendalikan dengan jamur tanah juga. Penelitian tentang kombinasi kedua jamur ini belum pernah dilakukan sehingga dengan adanya monograf ini menjadikan sumber referensi bagi peneliti lainnya atau sumbangsih informasi bagi keilmuan agroteknologi khususnya pengendalian penyakit. Kami mengucapkan terima kasih kepada saudara Agung Setyo Nugroho dan Dian Indratmi yang telah membantu penelitian dan penyusunan buku ini. Kami menyadari bahwa monograf ini dirasa jauh dari kesempurnaan. Kritik dan saran bersifat konstruktif dari para pembaca sangat diharapkan, guna perbaikan dan penyempurnaan monograf ini. Demikian, dan terima kasih.

Wassalamualaikum Wr.Wb.

Penulis

DAFTAR ISI

Prakata Penulis __v

Daftar Isi __vi

Bab 1 Pendahuluan __1

Bab 2 Tanaman Kopi Arabika: Morfologi dan Ekologi __12

Bab 3 Teori Segitiga Penyakit dan Penyakit Akar Putih (*Rigidoporus* Sp.) pada Tanaman Kopi __16

3.1. Teori Segitiga Penyakit __16

3.2. Penyakit Akar Putih (*Rigidoporus sp.*) pada Tanaman Kopi __19

Bab 4 Agensia Hayati __23

4.1. Agen Hayati: *Trichoderma harzianum* Rifai __23

a. Klasifikasi __23

b. Biologi __25

c. Ekologi __27

d. Siklus Hidup __29

e. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan dan Kolonisasi __31

f. Mekanisme Pengendalian Patogen oleh *Trichoderma harzianum* __33

4.2 *Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza* (VAM) __35

a. Jenis-jenis Mikoriza: Endomikoriza dan Ektomikoriza __35

b. Klasifikasi __37

c. Biologi __38

d. Ekologi __40

e. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan dan Kolonisasi __42

Bab 5 Sinergi Penggunaan *T. harzianum* dan Vam dalam Pengendalian Patogen Tanah __45

- 5.1. Sinergi Mikroba Antagonis dalam Pengelolaan Kesehatan Tanah __45
- 5.2. Analisis Efektivitas Pengendalian Patogen seperti *Fusarium* , *Rhizoctonia* , *Pythium* , dan *Rigidoporus* sp. melalui Aplikasi Kombinasi __47
- 5.3. Perbandingan Efikasi antara Aplikasi Tunggal vs. Kombinasi dalam Aspek Penekanan Inokulum, Gejala Penyakit, dan Viabilitas Tanaman __48
- 5.4. Peningkatan Keragaman dan Aktivitas Mikrobioma Tanah Akibat Aplikasi Sinergis __50
- 5.5. Dampak Sinergi terhadap Pertumbuhan dan Ketahanan Tanaman __51
- 5.6. Peningkatan Penyerapan Fosfor, Nitrogen, dan Unsur Mikro Lainnya __52
- 5.7. Penguatan Respons Imun Tanaman terhadap Stres Biotik dan Abiotik __53
- 5.8. Perbaikan Struktur Tanah dan Peningkatan Ketersediaan Nutrisi Secara Sinergis __55
- 5.9. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Keberhasilan Sinergi *Trichoderma harzianum* dan VAM __56
 - A. Faktor Lingkungan __56
 - B. Faktor Tanaman Inang __58
 - C. Aspek Formulasi dan Aplikasi __60
 - D. Interaksi dengan Mikrobioma Tanah __69

Bab 6 Mekanisme Pengendalian Penyakit Akar Putih oleh *Trichoderma harzianum* dan Mikoriza __72

- 6.1 Persentase Infeksi Akar dan Jumlah Spora *Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza* (VAM) __72
- 6.2 Perhitungan Jumlah Spora Mikoriza di dalam Tanah __74

- 6.3 Jumlah Spora *Trichoderma harzianum* Rifai __76
- 6.4. Mekanisme VAM __79
 - 1. Penguatan Struktur Jaringan Akar dan Meningkatkan Kapasitas Absorpsi __79
 - 2. Aktivasi Jalur Signal Transduction Tanaman __79
 - 3. Kompetisi Nutrisi dan Eksklusi Ruang Infeksi Patogen __80
 - 4. Modifikasi Mikrobioma Rhizosfer Melalui Eksudat Akar __80

Bab 7 Hambatan dan Tantangan dalam Implementasi Sinergi Mikroba __82

- 7.1. Kendala dalam Formulasi dan Stabilitas Produk Gabungan __82
- 7.2. Masalah Kompatibilitas Fisiologis dan Ekologis antar Mikroba __83
- 7.3. Kurangnya Standarisasi Metode Aplikasi dan Dosis Optimal __84
- 7.4. Keterbatasan Regulasi dan Sertifikasi Produk Bioinput di Tingkat Nasional __85
- 7.5. Perlunya Edukasi dan Pelatihan bagi Petani dan Penyuluh __87
- 7.6. Hambatan dalam Pengembangan Infrastruktur Pendukung dan Rantai Pasok __88
- 7.7. Keterbatasan Data Lapangan dan Rekomendasi Teknis yang Belum Lengkap __89

Bab 8 Rekomendasi dan Prospek Penelitian Mendatang __91

- 8.1. Pentingnya Penelitian Lebih Lanjut untuk Mengidentifikasi Isolat *Trichoderma* dan VAM yang Memiliki Potensi Sinergi Tinggi __91

- 8.2. Pengembangan Formulasi Bio-Input Berbasis Kombinasi Mikroba yang Stabil dan Ramah Lingkungan __92
- 8.3. Integrasi Sinergi Mikroba dengan Praktik Budidaya Berkelanjutan Seperti Pertanian Organik dan Sistem Agroforestri __93
- 8.4. Pemanfaatan Teknologi Biologi Molekuler untuk Rekayasa Strain dengan Performa Lebih Baik __95
- 8.5. Kolaborasi Multidisiplin antara Ahli Mikrobiologi, Agronomi, Ekofisiologi, dan Ekonomi Pertanian __96
- 8.6. Peningkatan Kapasitas Petani dan Penyuluh Melalui Pelatihan dan Penyuluhan Berkelanjutan __98
- 8.7. Penguatan Infrastruktur Riset dan Jaringan Distribusi Produk Hayati __99
- 8.8. Peningkatan Regulasi dan Perlindungan Hukum bagi Produk Hayati __100

Bab 9 Penutup __101

Glosarium __102

Daftar Pustaka __104

Biodata Penulis __147

BAB 1

PENDAHULUAN

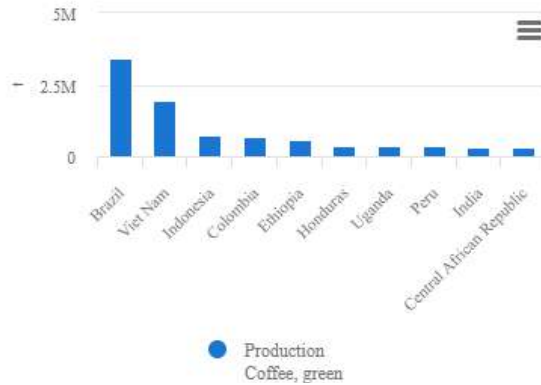
Kopi merupakan salah satu minuman yang paling banyak dikonsumsi di dunia dan salah satu komoditas yang paling banyak diperdagangkan secara global. Negara-negara penghasil kopi terbesar adalah Brasil, Vietnam, dan Kolombia, sedangkan Uni Eropa dan Amerika Serikat merupakan pasar konsumen dan impor terbesar. Kopi merupakan pasar yang berkembang karena sebagian disebabkan oleh meningkatnya konsumsi di negara-negara berkembang dan minat yang lebih kuat terhadap kopi spesial dan inovasi produk di negara-negara maju.

Kopi merupakan produk tropis yang paling banyak diperdagangkan, dengan sekitar 25 juta rumah tangga petani di seluruh dunia yang menghasilkan 80 persen dari produksi dunia. Produksi terkonsentrasi di negara-negara berkembang, di mana kopi menyumbang sebagian besar pendapatan ekspor, dan menyediakan sumber mata pencaharian utama bagi rumah tangga.

Kopi merupakan salah satu komoditas unggulan Indonesia yang memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian nasional, terutama di sektor perkebunan rakyat. Indonesia merupakan penghasil kopi terbesar ketiga di dunia setelah Brazil dan Vietnam pada tahun 2023.

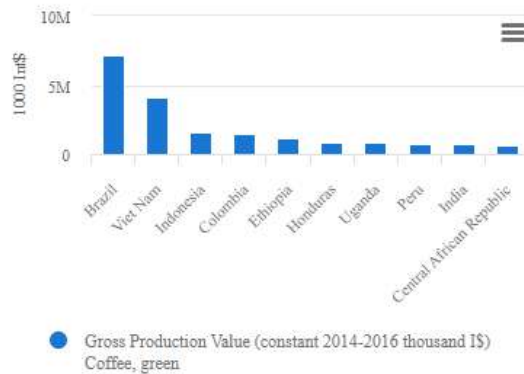
Top 10 Country Production of Coffee, green

2023



Top 10 Commodities, Gross Production Value of

2023



Gambar 1. Sepuluh besar produsen kopi di dunia

Sumber:

https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity

Dari berbagai jenis kopi yang dibudidayakan, *Coffea arabica* L. atau kopi arabika menjadi komoditas bernilai tinggi karena kualitas sensori dan aromanya yang unggul. Kopi

Arabika menyumbang sekitar 25% dari total produksi kopi nasional dan umumnya dibudidayakan oleh petani kecil di dataran tinggi yang memiliki agroklimat spesifik, seperti Aceh Gayo, Toraja, Bajawa (Flores), dan Kintamani (Bali) (ICO, 2021).



Gambar 2. Perbedaan Kopi arabika dan robusta
sumber:

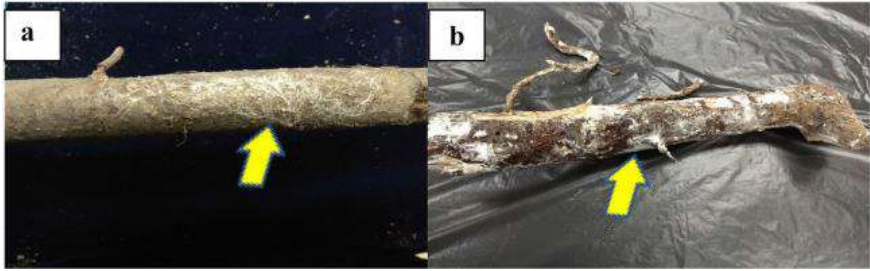
<https://distan.bulelengkab.go.id/informasi/detail/artikel/perbedaan-mendasar-kopi-arabika-dan-kopi-robusta-56>

Perkebunan kopi arabika tidak hanya penting dari sisi ekonomi, tetapi juga memiliki nilai ekologi karena umumnya dikembangkan dalam sistem agroforestri yang menjaga biodiversitas dan konservasi tanah. Namun demikian, produktivitas dan keberlanjutan sistem budidaya kopi

arabika masih menghadapi tantangan serius, terutama gangguan penyakit tular tanah yang menyerang tanaman sejak fase pembibitan. Salah satu penyakit yang paling merusak adalah penyakit akar putih yang disebabkan oleh jamur *Rigidoporus microporus* (Semangun, 2000).

Penyakit akar putih (*Rigidoporus* sp.) merupakan penyakit tular tanah yang sangat merugikan dan bersifat laten. Patogen ini menyerang sistem perakaran, menyebabkan kerusakan struktur akar, gangguan fisiologis, dan akhirnya kematian tanaman. Pada fase pembibitan, serangan penyakit ini dapat mengakibatkan kerugian besar karena kematian massal bibit sebelum ditanam di lapangan, sehingga menimbulkan inefisiensi biaya dan waktu (Widyastuti et al., 2016).

Gejala khas dari infeksi akar putih adalah tanaman menjadi layu, daunnya menguning, pertumbuhan terhambat, dan bila akar dicabut akan tampak miselium putih seperti kapas yang membungkus akar. Jamur *Rigidoporus* sp. mampu bertahan dalam tanah selama bertahun-tahun melalui struktur hifa dan sklerotia yang sulit dimusnahkan. Penggunaan fungisida kimia sintetis selama ini terbukti kurang efektif karena tidak menjangkau patogen di dalam tanah secara menyeluruh dan berisiko mencemari lingkungan serta mengganggu mikroorganisme tanah yang menguntungkan (Subrata et al., 2018).



Gambar 3. a. Gejala penyakit busuk akar putih diamati pada akar b Rizomorfe tumbuh pada permukaan sampel akar yang sakit (panah) (Andrew *et al.*, 2021)



Gambar 4. (A). Perlakuan PK0: jaringan berwarna hitam menunjukkan telah terinfeksi *Rigidoporus lignosus*, (B) Perlakuan PK1: titik-titik berwarna kulit kuning menunjukkan *Rigidoporus lignosus* telah memasuki jaringan (C) Perlakuan PK2: jaringan telah diserang *Rigidoporus lignosus*, (D) Perlakuan PK3: jaringan berwarna kecoklatan menunjukkan telah terinfeksi *Rigidoporus lignosus*, (E) Jaringan tanaman normal yang tidak terserang *Rigidoporus lignosus*. Sumber: (Chairudin, Agustiner and Permadi, 2021)

Seiring meningkatnya kesadaran akan pentingnya pertanian berkelanjutan, pendekatan pengendalian hayati (*biological control*) menjadi pilihan yang menjanjikan untuk mengatasi penyakit akar putih. Pengendalian hayati menggunakan mikroorganisme antagonis sebagai agen pengendali yang mampu menekan populasi patogen secara alami dan tidak menimbulkan residu kimia berbahaya (Harman et al., 2004).

Dua agen hayati yang telah banyak dikaji dan terbukti potensial untuk pengendalian patogen tular tanah adalah *Trichoderma harzianum* Rifai dan *Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza* (VAM). Kedua mikroba ini memiliki mekanisme yang berbeda namun saling melengkapi dalam meningkatkan kesehatan akar dan menekan aktivitas patogen. *Trichoderma harzianum* adalah jamur saprofitik yang hidup di rhizosfer dan dikenal luas sebagai agen biokontrol terhadap berbagai jamur patogen tanaman. Mekanisme kerja *T. harzianum* meliputi kompetisi nutrisi, antibiosis (produksi senyawa toksik), dan mikoparasitisme (menyerang dan menghancurkan hifa patogen). Jamur ini juga mampu menghasilkan enzim seperti kitinase dan glukukanase yang menghancurkan dinding sel patogen seperti *Rigidoporus* sp. (Harman et al., 2004; Ganuza et al., 2019).

Di samping fungsinya sebagai pengendali patogen, *T. harzianum* juga diketahui mampu merangsang pertumbuhan tanaman melalui produksi zat pengatur tumbuh (fitohormon) dan meningkatkan efisiensi penyerapan hara. Oleh karena itu, aplikasinya dalam sistem pembibitan kopi sangat relevan untuk meningkatkan kesehatan dan pertumbuhan bibit secara simultan.

Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM), atau dikenal juga sebagai *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), merupakan

kelompok jamur mikoriza yang membentuk hubungan simbiotik mutualistik dengan akar tanaman. VAM membantu memperluas sistem akar melalui hifa eksternal, sehingga meningkatkan penyerapan unsur hara, khususnya fosfor, serta memperbaiki struktur dan aktivitas mikrobiota tanah (Smith & Read, 2008).

Keberadaan VAM juga memperkuat sistem pertahanan tanaman terhadap stres abiotik dan biotik, termasuk infeksi patogen tular tanah. Mekanisme pertahanan yang diperantarai mikoriza dikenal sebagai Mycorrhiza-Induced Resistance (MIR), yang bekerja melalui aktivasi respons sistemik pada jaringan tanaman terhadap infeksi (Pozo & Azcón-Aguilar, 2007). Mikoriza juga menghasilkan zat-zat yang memodulasi ekspresi gen pertahanan tanaman dan memperkuat dinding sel akar, sehingga patogen sulit menembus jaringan.

Aplikasi kombinasi antara *T. harzianum* dan VAM dalam satu sistem pembibitan diyakini dapat memberikan efek sinergis, di mana kedua mikroorganisme berkontribusi secara komplementer. *T. harzianum* berfungsi sebagai agen antagonis terhadap patogen, sementara VAM memperkuat akar dan meningkatkan ketahanan tanaman. Sinergi ini telah dibuktikan dalam beberapa penelitian pada komoditas lain seperti kakao, cabai, dan tomat, namun masih sangat terbatas untuk komoditas kopi, khususnya pada fase pembibitan (Putra et al., 2021; Syamsuddin et al., 2023).

Penelitian yang mendalami efek gabungan kedua mikroba ini dalam konteks pengendalian penyakit akar putih pada kopi arabika di fase pembibitan belum banyak dilakukan. Padahal, pengendalian sejak dini sangat krusial untuk menghasilkan bibit unggul yang tahan terhadap

serangan patogen saat dipindahkan ke lapangan. Oleh karena itu, riset ini memiliki urgensi

Buku ini memiliki relevansi yang tinggi terhadap upaya pengembangan sistem budidaya kopi yang ramah lingkungan, rendah input kimia, dan berbasis mikrobiologi tanah. Dengan menggunakan *T. harzianum* dan VAM, petani dapat mengurangi ketergantungan pada fungisida sintesis, meningkatkan ketahanan tanaman terhadap patogen, serta memperbaiki kesehatan tanah dalam jangka panjang. Hal ini sejalan dengan tujuan pembangunan pertanian berkelanjutan dan strategi nasional pengurangan emisi dari sektor lahan dan pertanian (MoEF, 2022). Dari sisi ilmiah, buku ini diharapkan memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan bioteknologi pengendalian hayati di Indonesia, khususnya dalam mengintegrasikan dua agen hayati yang berbeda namun sinergis. Kajian mendalam mengenai interaksi mikroba ini juga dapat membuka peluang riset lanjutan mengenai formulasi konsorsium mikroba spesifik untuk komoditas perkebunan tropis. Oleh karena itu, buku ini mengulas tentang sejauhmana efektivitas *Trichoderma Harzianum* Rifai dalam mengendalikan penyakit akar putih (*Rigidoporus* sp.) pada pembibitan kopi arabika (*Coffea arabica* L.), bagaimana peran *Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza* (VAM) dalam meningkatkan ketahanan bibit kopi arabika terhadap serangan *Rigidoporus* sp., dan apakah kombinasi antara *T. harzianum* dan VAM memberikan efek sinergis dalam menekan intensitas serangan penyakit akar putih dan meningkatkan pertumbuhan bibit kopi.

Dari ketiga fokus bahasan di atas, buku ini bertujuan untuk, *pertama*, mengevaluasi efektivitas aplikasi *Trichoderma arzianum* Rifai dalam menghambat perkembangan penyakit akar putih (*Rigidoporus* sp.) pada fase pembibitan kopi arabika, *kedua*, mengkaji pengaruh kolonisasi *Vesicular-*

Arbuscular Mycorrhiza (VAM) terhadap pertumbuhan dan ketahanan bibit kopi arabika terhadap patogen tular tanah, dan ketiga, menganalisis interaksi dan potensi sinergis antara *T. harzianum* dan VAM dalam sistem pengendalian hayati terhadap penyakit akar putih dan peningkatan kualitas bibit kopi.

Penelitian buku ini dilaksanakan di Greenhouse Fakultas Pertanian-Pternakan, Universitas Muhammadiyah Malang. Ketinggian tempat 667 mdpl, dengan suhu rata-rata harian sebesar 21 sd 31°C. Penelitian dilaksanakan pada musim hujan, pada bulan Oktober sampai dengan Desember 2024. Penelitian menggunakan rancangan acak kelompok yang disusun secara factorial dengan dua factor. Perlakuannya adalah sebagai berikut: Faktor pertama adalah *Trichoderma* sp, terdiri dari 4 level yaitu: (T0) : Tanpa Trichoderma, T10 : Trichoderma 10 ml/Tanaman, T15: Trichoderma 15 ml/Tanaman, T20: Trichoderma 20 ml/Tanaman. Faktor ke dua adalah perlakuan Mikoriza terdiri dari 4 level yaitu (M0) : Tanpa Mikoriza, M50 : 50 spora/ Tanaman, M75 : 75 spora Mikoriza / Tanaman, M100: 100 spora Mikoriza/Tanaman. Setiap kombinasi perlakuan di ulang sebanyak 4 kali.

1. Persiapan isolat Patogen

Sampel akar tanaman kopi yang terserang pathogen dicuci menggunakan air mengalir selama 5 menit kemudian direndam dalam larutan alkohol 70% selama 5 menit, selanjutnya direndam kembali menggunakan larutan NaOCL 1% selama 5 menit. Kemudian dibilas menggunakan akuades steril dengan cara merendam sampel selama 1 menit yang diulang sebanyak 2 kali. Selanjutnya sampel akar di tiriskan diatas tisu steril dan dipotong sepanjang 2 mm kemudian diinokulasi pada

media PDA selama 7 hari selanjutnya diidentifikasi.

2. Persiapan isolate *Trichoderma harzianum*

T. harzianum merupakan koleksi Laboratorium Agroteknologi Universitas Muhammadiyah Malang. Kultur murni *Trichoderma harzianum* dibuat pada media *Potato Dextrose Agar* (PDA) dan diinkubasi selama 7 hari hingga membentuk koloni, setelah itu bentuk aplikasi dilakukan bersama saat *transplanting* tanaman sesuai dengan kombinasi perlakuan dan diinkubasi dalam polybag tanaman kopi selama tujuh hari. Pupulasi *T. harzianum* adalah 10^8 cfu/ml.

3. Proses Infeksi Patogen

Proses infeksi jamur akar putih (*Rigidoporus* sp.) dilakukan setelah inokulasi *Trichoderma* dan mikoriza di tanah dengan metode *root dip* yang merujuk pada penelitian Nawangsih (2006) akar tanaman kopi dibersihkan dari tanah yang melekat kemudian direndam dalam suspensi *Rigidoporus* sp. menggunakan PDB pada kerapatan 10^7 cfu/ml selama 30 menit kemudian ditanam pada media tanah yang telah disiapkan dan telah diberi perlakuan *Trichoderma* 7 hari sebelum inokulasi pathogen.

4. Mycorrhiza

Metode untuk mengembangkan VAM ini menggunakan pasir zeolit dan bibit jagung sebagai tanaman inang, hal ini mengikuti metode dalam penelitian Ambarwulan, dkk., (2003) termodifikasi, media perbanyak mikoriza menggunakan pasir zeolit yang dicuci, setelah di cuci kemudian pasir dikeringkan angin dan dimasukkan ke dalam bak berukuran 32x26x11 cm dengan volume 9152 cm³. kemudian benih jagung di tanam dengan lubang

tanam 2-3 cm dan diberi starter mikoriza koleksi milik Laboratorium Agroteknologi, Fakultas Pertanian-Peternakan, Universitas Muhammadiyah Malang sebanyak 1 g per tanaman. Waktu aplikasi mikoriza dilakukan bersama dengan *transplanting* tanaman dan *Trichoderma* sesuai dengan kombinasi perlakuan dan diinkubasi selama tujuh hari.

5. Persiapan Tanam

Media tanam yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah yang dicampur dengan sekam padi bakar dengan perbandingan 1:1 sebagai asupan bahan organik dalam tanah kemudian dimasukkan ke dalam polibag berukuran 13x13x22 cm dengan volume 3718 cm³ dengan total kebutuhan polibag dan bibit sebanyak 240 buah. setelah itu, dilakukan pindah tanam tanaman kopi beserta perlakuan agen hayati yang dimasukkan ke dalam polibag tersebut dan diaduk hingga homogen.

6. Variabel Pengamatan

Variabel pengamatan dalam penelitian ini adalah tinggi tanaman (cm), jumlah daun (helai), tingkat serangan *Rigidoporus* sp. yang bersifat sistemik atau menyeluruh yang diamati pada setiap perlakuan (%), berat segar total tanaman (g), berat kering total tanaman (g), tingkat infeksi akar *Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza* (VAM) (%) dan jumlah spora *Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza* (VAM), jumlah spora *Trichoderma harzianum* Rifai (Cfu/ml).

BAB 2

TANAMAN KOPI ARABIKA: MORFOLOGI DAN EKOLOGI

Tanaman kopi Arabika (*Coffea arabica* L.) merupakan salah satu spesies tanaman kopi yang memiliki nilai ekonomi tinggi di pasar global. Spesies ini berasal dari dataran tinggi Ethiopia dan Sudan selatan, serta kemudian menyebar ke berbagai wilayah tropis dengan iklim yang sesuai (Montagnon et al., 2022). *Coffea arabica* dikenal sebagai tanaman perdu atau pohon kecil dengan tinggi mencapai 5 meter jika tidak dipangkas. Secara morfologis, tanaman ini memiliki batang utama yang tegak lurus dengan percabangan simpodial. Daunnya berbentuk elips dengan panjang sekitar 10–15 cm, bertulang daun menyirip, berwarna hijau mengilap, dan tersusun berhadapan. Bunga kopi Arabika tumbuh di ketiak daun, berkelompok dalam tandan, berbau harum, dan berwarna putih (Dani et al., 2019).

Buah kopi Arabika berkembang setelah proses penyerbukan yang umumnya terjadi secara sendiri (self-pollination). Buah tersebut awalnya berwarna hijau dan berubah menjadi merah cerah ketika masak. Dalam satu buah biasanya terdapat dua biji yang tertutup lapisan lendir dan kulit keras. Proses pematangan buah memerlukan waktu sekitar 6–8 bulan tergantung kondisi lingkungan. Sistem perakaran kopi Arabika bersifat superfisial dengan dominasi akar lateral pada lapisan tanah atas hingga kedalaman sekitar 30–40 cm. Akar tunggang biasanya kurang berkembang, sehingga tanaman lebih rentan terhadap erosi dan angin kencang. Keberadaan akar serabut yang menyebar luas membuat tanaman sangat sensitif terhadap kekeringan (da Silva Angelo et al., 2019).

Dari segi ekologi, kopi Arabika membutuhkan iklim tropis lembab dengan ketinggian optimal antara 1.200–2.200 m di atas permukaan laut (dpl). Suhu rata-rata yang ideal untuk pertumbuhannya adalah 18–21°C dengan curah hujan tahunan sekitar 1.500–2.500 mm, didistribusikan secara merata sepanjang tahun (Parada-Molina et al., 2022). Kopi Arabika juga memerlukan naungan parsial, baik alami maupun buatan, karena cahaya matahari langsung dapat merusak daun dan mengurangi produktivitas. Pohon pelindung seperti *Gliricidia sepium*, *Erythrina spp.*, dan *Inga edulis* sering digunakan dalam sistem agroforestri untuk melindungi tanaman kopi dari paparan sinar matahari yang intens (Sebuliba et al., 2022).

Media tanam yang ideal untuk budidaya kopi Arabika adalah tanah andosol atau latosol dengan pH sekitar 6–6,5. Tanah harus subur, gembur, kaya akan bahan organik, serta memiliki drainase yang baik. Kelembapan tanah yang stabil sangat penting untuk mendukung pertumbuhan akar yang sehat dan mencegah stres air (Irawan et al., 2022). Dalam sistem pembibitan, kopi Arabika dikembangkan melalui perbanyakan generatif menggunakan biji atau vegetatif melalui sambung pucuk, okulasi, atau stek. Bibit yang dihasilkan harus bebas dari penyakit dan memiliki pertumbuhan yang seragam. Media persemaian biasanya berupa campuran tanah, pasir, dan pupuk organik (Jaeggi et al., 2020).

Pemeliharaan bibit meliputi penyiraman rutin, pemupukan berimbang, pengendalian gulma, serta perlindungan terhadap hama dan penyakit. Fase pembibitan memerlukan waktu sekitar 6–9 bulan sebelum bibit siap ditanam di lapangan (Tiwari et al., 2022). Kualitas bibit sangat menentukan produktivitas dan ketahanan tanaman dewasa. Penggunaan varietas unggul lokal atau hasil seleksi sangat

dianjurkan untuk meningkatkan ketahanan terhadap penyakit dan adaptasi terhadap lingkungan. Beberapa varietas populer yang dibudidayakan di Indonesia termasuk Typica, Bourbon, Catimor, dan S-line. Masing-masing varietas memiliki karakteristik agronomis yang berbeda (Syafaruddin et al., 2020).

Kopi Arabika sangat rentan terhadap gangguan biotik seperti penyakit karat daun (*Hemileia vastatrix*), penyakit akar, dan berbagai jenis nematoda. Gangguan abiotik seperti kekeringan, banjir, dan suhu ekstrem juga dapat menurunkan produksi secara signifikan. Oleh karena itu, pengelolaan lingkungan mikro sangat penting dalam budidaya kopi Arabika (Carvalho et al., 2022). Pengaturan jarak tanam yang tepat, yaitu sekitar 2 x 1 meter atau 2 x 2 meter, membantu menjaga sirkulasi udara dan mengurangi risiko penyebaran penyakit. Selain itu, penggunaan mulsa organik dapat meningkatkan retensi air, suplai nutrisi, dan aktivitas mikroba tanah yang bermanfaat bagi tanaman (Ermarella et al., 2019).

Pemupukan pada kopi Arabika dilakukan secara berkala dengan komposisi NPK yang disesuaikan dengan fase pertumbuhan tanaman. Pupuk organik seperti kompos dan pupuk kandang sering digunakan untuk memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kesuburan jangka panjang (Santinato et al., 2018). Pemanenan kopi Arabika dilakukan secara selektif untuk memastikan mutu biji yang tinggi. Buah yang dipetik hanya yang sudah matang sempurna, sehingga hasil olahan memiliki cita rasa superior. Metode pascapanen seperti fermentasi, pencucian, dan pengeringan memegang peranan penting dalam menentukan kualitas akhir produk kopi (Arévalo et al., 2023).

Sebagai tanaman strategis, pengembangan kopi Arabika harus didukung oleh penelitian dan inovasi teknologi budidaya, terutama dalam pengendalian penyakit yang dapat merugikan petani secara ekonomi. Salah satu penyakit yang menjadi ancaman serius adalah penyakit akar putih yang disebabkan oleh jamur *Rigidoporus sp.* (Harni & Randriani, 2022a). Penyakit ini menyerang sistem perakaran tanaman dan dapat menyebabkan kematian tanaman, terutama pada fase pembibitan dan awal pertumbuhan di lapangan.

Pengendalian penyakit akar putih memerlukan pendekatan yang terpadu dan berkelanjutan. Salah satu alternatif yang efektif adalah penggunaan agen hayati seperti *Trichoderma harzianum* dan mikoriza arbuskular (VAM). Agen hayati ini memiliki potensi dalam menghambat perkembangan patogen secara langsung maupun tidak langsung melalui peningkatan daya tahan tanaman. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang morfologi, ekologi, dan kebutuhan budidaya kopi Arabika menjadi dasar penting dalam merancang strategi pengelolaan penyakit yang efektif (Harni & Randriani, 2022b).

BAB 3

TEORI SEGITIGA PENYAKIT DAN PENYAKIT AKAR PUTIH (*RIGIDOPORUS SP.*) PADA TANAMAN KOPI

3.1. Teori Segitiga Penyakit

Teori segitiga penyakit merupakan konsep dasar dalam epidemiologi tanaman yang menjelaskan bahwa timbulnya penyakit pada tanaman memerlukan adanya tiga komponen esensial: inang (*host*), patogen (*pathogen*), dan lingkungan yang mendukung (*environment*). Ketiga faktor ini harus hadir secara simultan agar infeksi dapat terjadi dan berkembang menjadi penyakit yang nyata. Konsep ini menjadi dasar dalam memahami dinamika penyakit tanaman dan merancang strategi pengendalian yang efektif.



Gambar. Ilustrasi Segitiga Penyakit Tanaman

Gambar 5. Ilustrasi Segitiga Penyakit Tanaman

Sumber: <https://www.dgwfertilizer.co.id/apa-itu-penyakit-tanaman-mengapa-tanaman-bisa-sakit/>

Komponen pertama dalam segitiga penyakit adalah inang, yaitu tanaman yang rentan terhadap serangan patogen tertentu. Setiap patogen memiliki host range yang berbeda-

beda, ada yang spesifik pada satu spesies tanaman, dan ada yang dapat menyerang beberapa famili tanaman. Dalam kasus kopi Arabika, tanaman ini menjadi inang bagi berbagai patogen, termasuk *Rigidoporus sp.* yang menyerang bagian akar dan batang bawah (Debnath et al., 2022).

Patogen sebagai komponen kedua adalah organisme penyebab penyakit, yang bisa berupa jamur, bakteri, virus, viroid, atau nematoda. Patogen harus memiliki virulensi yang cukup untuk menginfeksi tanaman inang. Dalam konteks penyakit akar putih, *Rigidoporus sp.* adalah jamur kayu pembusuk yang memiliki kemampuan mengkolonisasi jaringan lignoselulosa pada tanaman hidup maupun mati.

Lingkungan sebagai komponen ketiga sangat menentukan apakah interaksi antara inang dan patogen akan menghasilkan penyakit atau tidak. Lingkungan mencakup faktor fisik seperti suhu, kelembapan, tekstur tanah, drainase, serta kondisi biotik seperti keberadaan mikroorganisme antagonis atau predator patogen. Untuk penyakit akar putih, lingkungan yang lembab dan drainase buruk memberikan kondisi yang ideal bagi pertumbuhan dan penyebaran patogen (Anttila et al., 2015).

Konsep segitiga penyakit menggambarkan bahwa penyakit tidak akan muncul jika salah satu dari ketiga komponen tersebut tidak tersedia. Misalnya, meskipun patogen dan lingkungan mendukung, tetapi tanaman memiliki ketahanan genetik yang kuat, maka penyakit tidak akan berkembang. Sebaliknya, meskipun tanaman rentan dan lingkungan mendukung, tetapi tidak ada patogen, maka penyakit tidak akan terjadi.

Dalam praktik pengendalian penyakit, teori ini menjadi dasar untuk menentukan strategi pengelolaan yang efektif. Pengendalian dapat dilakukan dengan memodifikasi

salah satu dari tiga komponen tersebut, seperti memilih varietas tahan (modifikasi inang), mengurangi inokulum patogen, atau mengubah kondisi lingkungan agar tidak mendukung perkembangan penyakit. Salah satu pendekatan modern dalam pengendalian penyakit adalah penggunaan agen hayati, seperti *Trichoderma harzianum* dan mikoriza arbuskular (VAM), yang bekerja dengan cara mengurangi populasi patogen atau meningkatkan ketahanan tanaman (Weng et al., 2022).

Faktor waktu juga sering ditambahkan sebagai komponen keempat dalam konsep segitiga penyakit yang dimodifikasi menjadi "segitiga empat sudut". Waktu merujuk pada tahap pertumbuhan tanaman, stadium infeksi, periode inkubasi, dan durasi kondisi lingkungan yang mendukung. Semakin lama ketiga komponen utama bersatu, semakin besar potensi penyakit berkembang.

Pada fase pembibitan kopi Arabika, tanaman masih rentan terhadap serangan patogen karena sistem perakaran belum berkembang optimal. Fase ini menjadi kritis karena kerusakan akar pada bibit dapat menyebabkan pertumbuhan terhambat bahkan kematian tanaman sebelum ditanam di lapangan. Pemahaman tentang segitiga penyakit sangat penting dalam merancang program pengendalian terpadu (PHT) yang holistik dan berkelanjutan. Pendekatan ini tidak hanya mengandalkan pestisida kimia, tetapi juga memadukan berbagai metode seperti rotasi tanaman, sanitasi kebun, penggunaan agen hayati, dan pemilihan lokasi budidaya yang tepat (Chappelka & Grulke, 2016).

Perubahan iklim global juga memengaruhi dinamika segitiga penyakit, karena dapat mengubah pola distribusi patogen, memperluas area endemik, atau meningkatkan virulensi patogen tertentu. Hal ini menuntut adaptasi dalam

strategi pengelolaan penyakit tanaman di masa depan (Meena et al., 2020). Penerapan prinsip segitiga penyakit dalam budidaya kopi Arabika memerlukan koordinasi antara aspek agronomi, fitopatologi, dan ekologi. Integrasi data cuaca, surveilans penyakit, serta pemantauan kesehatan tanaman menjadi penting dalam upaya mitigasi penyakit yang efektif.

Strategi pengelolaan penyakit berbasis segitiga penyakit juga relevan dalam pengembangan pertanian organik dan ramah lingkungan. Dengan memahami hubungan antara inang, patogen, dan lingkungan, petani dapat mengambil keputusan yang lebih tepat dalam mengelola kesehatan tanaman secara berkelanjutan. Penyakit akar putih pada kopi Arabika merupakan contoh aplikasi teori segitiga penyakit yang kompleks. Interaksi antara tanaman kopi yang rentan, keberadaan inokulum *Rigidoporus sp.* di tanah, dan kondisi lingkungan yang lembab dan anaerobik merupakan kombinasi yang ideal untuk perkembangan penyakit ini (Alemu et al., 2023).

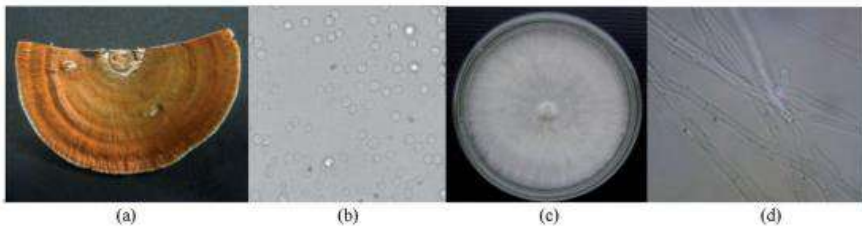
Oleh karena itu, pengendalian penyakit akar putih harus dilakukan secara terpadu dengan mempertimbangkan semua komponen segitiga penyakit. Pemanfaatan agen hayati seperti *Trichoderma harzianum* dan VAM merupakan alternatif yang berpotensi efektif untuk mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetis dan meningkatkan keberlanjutan sistem budidaya kopi Arabika.

3.2. Penyakit Akar Putih (*Rigidoporus sp.*) pada Tanaman Kopi

Penyakit akar putih yang disebabkan oleh genus *Rigidoporus* merupakan salah satu penyakit tanaman yang merusak pada berbagai komoditas perkebunan, termasuk kopi Arabika (*Coffea arabica* L.). Jamur ini termasuk dalam kelompok jamur kayu pembusuk yang memiliki kemampuan

menguraikan lignin dan selulosa. Di Indonesia, penyakit akar putih telah menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan pada areal pertanaman kopi, terutama pada lahan yang memiliki drainase buruk dan kelembapan tinggi (Harni & Randriani, 2022c).

Rigidoporus merupakan genus jamur dalam famili Phanerochaetaceae, kelas Agaricomycetes, filum Basidiomycota. Sampai saat ini, beberapa spesies *Rigidoporus* telah diidentifikasi sebagai patogen tanaman, di antaranya *R. microporus*, *R. lignosus*, dan *R. vinctus*. Di Indonesia, *Rigidoporus microporus* sering ditemukan sebagai penyebab utama penyakit akar putih pada tanaman kopi dan kakao. Jamur ini memiliki miselia berwarna putih dan berbentuk anyaman padat di dalam atau di sekitar akar tanaman inang. Miselia dapat menyebar melalui tanah dan menembus jaringan tanaman melalui pori-pori atau luka pada akar. Setelah berhasil menginfeksi, jamur ini menghasilkan enzim lignolitik yang merusak struktur sel tanaman dan mengganggu fungsi transportasi air serta nutrisi (Sastrini et al., 2019).



Gambar 6. *Rigidoporus microporus*: Koloni pada PDA pada hari ke-6 (a), hifa (b), tubuh buah (c), dan basidiospora (d).
(Buckner *et al.*, 2016)

Jamur *Rigidoporus* sp. lebih aktif di lingkungan lembab dengan suhu rata-rata 25–30°C dan kelembapan relatif tinggi. Habitat alaminya adalah hutan primer atau lahan bekas

tebangan, di mana mereka dapat hidup saprofit pada kayu mati atau serasah. Namun, dalam kondisi tertentu, mereka juga bersifat parasit fakultatif, artinya dapat menyerang tanaman hidup, terutama yang sedang mengalami stres fisiologis atau cedera akar. Siklus hidup *Rigidoporus sp.* dimulai dari inokulum yang berada di tanah atau sisa tanaman sakit. Inokulum berupa miselia atau badan buah (basidiocarp) yang menghasilkan basidiospora. Spora yang dilepaskan tersebar melalui angin atau air dan dapat bertahan hidup dalam tanah selama beberapa tahun. Jika kondisi lingkungan mendukung dan menemukan inang yang rentan, spora akan berkecambah dan membentuk miselia baru yang menembus akar tanaman (Ding et al., 2023).

Setelah menginfeksi jaringan akar, jamur berkembang biak secara vegetatif melalui pertumbuhan miselia yang menyebar ke jaringan lain. Dalam waktu beberapa bulan hingga tahun, infeksi dapat menyebabkan pembusukan akar dan batang bawah tanaman. Pada stadium lanjut, jamur membentuk badan buah berwarna kuning kecoklatan di pangkal batang atau permukaan tanah yang menandai reproduksi generatif dan pelepasan spora baru.

Beberapa faktor yang memengaruhi pertumbuhan dan kolonisasi *Rigidoporus sp.* meliputi kondisi fisik dan kimia tanah, kelembapan, suhu, serta ketersediaan substrat organik. Tanah dengan drainase buruk dan aerasi rendah memberikan kondisi yang ideal bagi perkembangan jamur ini. Selain itu, keberadaan bahan organik seperti sisa akar, batang, atau daun tanaman mati dapat menjadi substrat pertumbuhan jamur saprofit. Pertumbuhan jamur juga dipengaruhi oleh aktivitas mikroflora tanah. Mikroorganisme antagonis seperti *Trichoderma*, *Pseudomonas*, dan mikoriza dapat menghambat kolonisasi *Rigidoporus sp.* melalui mekanisme antibiosis, kompetisi nutrisi, atau parasitisme (Vlasenko et al., 2020).

Praktik budidaya yang tidak tepat seperti penggunaan tanaman penutup tanah yang rentan, pemangkasan berlebihan, atau pengolahan tanah yang merusak akar tanaman juga dapat meningkatkan risiko infeksi. Kerusakan akar memberikan celah masuk bagi jamur untuk melakukan infeksi primer. Faktor genetik tanaman juga berperan dalam kerentanan terhadap penyakit akar putih. Varietas tanaman yang memiliki ketahanan alami terhadap penyakit ini akan lebih mampu menghindari infeksi atau membatasi penyebaran jamur jika sudah terinfeksi (Cui et al., 2020).

Untuk mengendalikan penyakit akar putih, diperlukan pendekatan yang terpadu, termasuk penggunaan agen hayati seperti *Trichoderma harzianum* dan VAM. Kedua mikroba ini memiliki potensi dalam menghambat pertumbuhan *Rigidoporus sp.* secara langsung melalui kompetisi atau parasitisme, serta meningkatkan daya tahan tanaman secara tidak langsung melalui peningkatan penyerapan nutrisi dan produksi senyawa pertahanan. Upaya pengelolaan tanah seperti penambahan bahan organik yang telah terdekomposisi, pengaturan drainase yang baik, serta sanitasi kebun juga merupakan langkah penting dalam mengurangi risiko infeksi (Solanki et al., 2012).

BAB 4


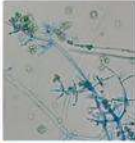



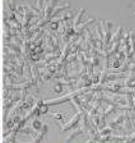

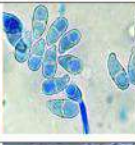

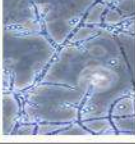
AGENSIA HAYATI

4.1. Agen Hayati: *Trichoderma harzianum* Rifai

a. Klasifikasi

Trichoderma harzianum Rifai merupakan salah satu spesies jamur dari genus *Trichoderma*, yang termasuk dalam kelas Sordariomycetes, ordo Hypocreales, famili Hypocreaceae, filum Ascomycota. Jamur ini secara alami hidup di lingkungan tanah dan permukaan akar tanaman, serta dikenal sebagai agen hayati penting dalam pengendalian berbagai penyakit tanaman terutama yang disebabkan oleh patogen tanah seperti *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, *Phytophthora*, dan *Rigidoporus sp.* (Chaverri et al., 2015).

Secara taksonomi, *Trichoderma harzianum* memiliki karakteristik morfologis yang khas, yaitu konidiofora yang bercabang simpodial dengan ujung hifa menghasilkan konidia berbentuk bulat sampai oval dengan warna hijau keolahan atau hijau tua. Konidia tersebut tersebar melalui udara atau air dan mampu bertahan dalam kondisi lingkungan yang kurang mendukung untuk jangka waktu tertentu. Pengklasifikasian spesies dalam genus *Trichoderma* mengalami perubahan signifikan seiring perkembangan teknologi molekuler. Dengan pendekatan analisis DNA, beberapa isolat yang semula digolongkan sebagai *T. harzianum* ternyata termasuk ke dalam kompleks spesies baru seperti *T. afroharzianum*, *T. guizhouense*, *T. simmonsii*, dan lainnya. Namun demikian, istilah *T. harzianum* masih sering digunakan secara luas dalam literatur ilmiah maupun praktik lapangan karena kesederhanaan identifikasi tradisional (Cao et al., 2022).

Major <i>Trichoderma</i> species	Cultures	Mycelium/Mycelia	Improved major crops by <i>Trichoderma</i> sp.
<i>Trichoderma harzianum</i>			<i>Arabidopsis</i> , potato, tomato, brinjal, chili, onion, papaya, mango, banana, pepper, melon, maize, lettuce, etc.
<i>Trichoderma koningii</i>			Wheat, rice, soybean, etc.
<i>Trichoderma paucisporum</i>			Maize, rice, cabbage, potato, etc.
<i>Trichoderma roseum</i>			Wheat, potato, maize, etc.
<i>Trichoderma viride</i>			Groundnut, sugarcane, vegetable crops, tobacco, banana, papaya, chickpea, rice, wheat, etc.

Gambar 7. Perbedaan spesies *Trichoderma* sp. (Islam et al, 2023)

Penggunaan *T. harzianum* dalam bidang pertanian telah dikembangkan secara intensif sejak dekade 1970-an, terutama dalam rangka pengurangan ketergantungan pada fungisida sintesis yang berdampak negatif terhadap lingkungan dan manusia. Jamur ini memiliki kemampuan antagonis yang tinggi terhadap berbagai patogen tanah, baik melalui mekanisme antibiosis, parasitisme hifa (mycoparasitism), kompetisi nutrisi, maupun stimulasi respons imun tanaman (*induced systemic resistance/ISR*). Oleh karena itu, *T. harzianum* banyak dimanfaatkan dalam formulasi biofungisida dan

biopestisida organik yang ramah lingkungan (Booth et al., 2022).

Dalam konteks budidaya kopi Arabika, *T. harzianum* menunjukkan potensi yang sangat besar dalam pengendalian penyakit akar putih yang disebabkan oleh *Rigidoporus sp.* . Infeksi patogen pada fase pembibitan dapat dicegah melalui aplikasi *T. harzianum* pada media tanam atau bibit, sehingga meningkatkan viabilitas dan daya tahan tanaman sebelum dipindahkan ke lahan produksi. Selain itu, kemampuan *T. harzianum* dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui produksi senyawa fitohormon seperti auksin, giberelin, dan sitokinin menjadikannya sebagai mikroba promotor pertumbuhan tanaman (PGPR – Plant Growth Promoting Rhizobacteria) yang efektif (Kapeua Ndacnou, 2022).

Klasifikasi *T. harzianum* tidak hanya penting dalam aspek taksonomi, tetapi juga dalam penentuan isolat yang paling efektif sebagai agen hayati. Berbagai isolat lokal maupun koleksi internasional telah diuji coba dalam laboratorium dan lapangan untuk mengetahui virulensinya terhadap patogen target serta adaptabilitasnya terhadap kondisi lingkungan setempat. Hal ini menjadi dasar bagi pemilihan strain yang tepat dalam program pengelolaan penyakit terpadu (PHT) di sektor pertanian, termasuk pada budidaya kopi Arabika.

b. Biologi

Biologi *Trichoderma harzianum* mencakup aspek fisiologi, reproduksi, interaksi dengan lingkungan, serta mekanisme antagonis terhadap patogen tanaman. Secara biologis, *T. harzianum* adalah jamur filamentosa yang bersifat saprofit obligat, namun juga memiliki sifat parasit fakultatif terhadap jamur patogen lain. Jamur ini memperbanyak diri

melalui reproduksi aseksual dengan menghasilkan konidia, sedangkan reproduksi seksualnya jarang terjadi di alam dan umumnya terjadi dalam kondisi laboratorium menggunakan pasangan MAT-1 dan MAT-2.(Guo et al., 2022)

Reproduksi aseksual dimulai dengan pembentukan konidiofora yang bercabang-cabang dan membentuk phialida. Phialida tersebut menghasilkan konidia yang dilepaskan ke lingkungan melalui getaran atau aliran udara. Konidia ini memiliki ketahanan tinggi terhadap stres lingkungan seperti kekeringan dan paparan sinar ultraviolet, sehingga dapat bertahan di tanah selama beberapa minggu hingga bulan. Setelah menemukan substrat yang sesuai, konidia akan berkecambah dan membentuk miselia primer yang kemudian berkembang menjadi miselia sekunder dan tersier.

Salah satu karakteristik biologis penting *T. harzianum* adalah kemampuan enzimatisnya dalam memecah polimer kompleks seperti kitin, selulosa, lignin, dan protein. Enzim-enzim tersebut, seperti kitinase, glukosidase, protease, dan lipase, berperan dalam proses parasitisme hifa patogen. Miselia *T. harzianum* dapat menempel pada permukaan hifa patogen dan mengeluarkan enzim lisis yang merusak dinding sel patogen, sehingga menyebabkan lisis dan kematian patogen tersebut. Proses ini dikenal sebagai mycoparasitism dan merupakan salah satu mekanisme utama antagonisme *T. harzianum* (Ferreira Filho et al., 2020).

Selain itu, *T. harzianum* juga menghasilkan metabolit sekunder antimikroba seperti peptida siklik, piron, dan gliovirin yang memiliki aktivitas antijamur yang kuat. Metabolit ini bekerja dengan cara mengganggu permeabilitas membran sel patogen, menghambat sintesis dinding sel, atau mengganggu metabolisme intraseluler patogen. Beberapa

isolat *T. harzianum* juga diketahui menghasilkan volatil organic compounds (VOCs) yang berperan dalam menghambat pertumbuhan patogen secara langsung atau memicu respons pertahanan tanaman secara sistemik (Xu et al., 2021).

Dari segi interaksi dengan tanaman inang, *T. harzianum* dapat hidup sebagai endofit atau rhizospherik mikroba. Sebagai endofit, jamur ini dapat masuk ke dalam jaringan tanaman tanpa menyebabkan gejala penyakit, dan bahkan memberikan manfaat berupa peningkatan pertumbuhan dan ketahanan terhadap stres biotik dan abiotik. Mekanisme tersebut melibatkan aktivasi jalur signal transduction dalam tanaman, seperti jalur salisilat, jasmonat, dan etilen, yang berperan dalam respons imun tanaman (Parkash et al., 2019).

Secara garis besar, biologi *T. harzianum* menunjukkan fleksibilitas tinggi dalam berbagai kondisi lingkungan dan interaksi ekologis. Kemampuannya sebagai agen hayati multifungsi membuatnya menjadi salah satu mikroba paling populer dalam pengendalian hayati penyakit tanaman, termasuk dalam sistem budidaya kopi Arabika yang rentan terhadap infeksi patogen tanah seperti *Rigidoporus sp.* .

c. Ekologi

Ekologi *Trichoderma harzianum* mencakup distribusi alami, habitat, interaksi dengan komponen biotik dan abiotik di lingkungan tanah, serta perannya dalam siklus nutrisi dan kesehatan tanah. Jamur ini ditemukan hampir di seluruh wilayah tropis dan subtropis dunia, terutama di daerah dengan kelembapan tinggi dan kandungan bahan organik yang cukup. *T. harzianum* merupakan bagian dari mikrobioma tanah yang dinamis dan berperan aktif dalam dekomposisi bahan organik, mineralisasi nutrisi, serta regulasi populasi mikroba patogen (Guo et al., 2022b).

Habitat utama *T. harzianum* adalah tanah, terutama zona rhizosfer yang kaya akan eksudat akar. Eksudat akar berupa gula, asam amino, dan senyawa organik lainnya menjadi sumber karbon dan nitrogen yang esensial bagi pertumbuhan jamur ini. Di samping itu, *T. harzianum* juga dapat ditemukan pada permukaan akar tanaman sebagai epifit atau sebagai endofit yang hidup di dalam jaringan tanaman.

Interaksi ekologis *T. harzianum* tidak hanya terbatas pada hubungan dengan tanaman, tetapi juga dengan mikroorganisme lain di tanah. Jamur ini berkompetisi dengan mikroba lain dalam memperoleh nutrisi dan tempat hidup, serta melakukan parasitisme terhadap jamur patogen. Interaksi positif juga terjadi dengan mikoriza dan bakteri pelarut fosfat, di mana *T. harzianum* dapat meningkatkan efektivitas mikoriza dalam menyerap unsur hara seperti fosfor dan nitrogen, meskipun mekanismenya belum sepenuhnya dipahami.

Dalam konteks ekosistem pertanian, *T. harzianum* lebih dominan di lahan yang dikelola secara organik atau dengan input kimia rendah. Penggunaan pestisida berbahan aktif sintetis, terutama fungisida sistemik, dapat mengurangi populasi *T. harzianum* di tanah dan mengganggu keseimbangan mikrobiologis tanah. Oleh karena itu, penggunaan *T. harzianum* sebagai agen hayati harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak terjadi antagonisme dengan bahan kimia yang digunakan secara simultan (Supyani et al., 2023).

Di lingkungan budidaya kopi Arabika, *T. harzianum* memiliki peran penting dalam menjaga kesehatan tanah dan tanaman, terutama di area yang rawan terhadap infeksi penyakit akar putih. Keberadaan *T. harzianum* di rhizosfer

kopi dapat mengurangi risiko infeksi awal dan membatasi penyebaran patogen *Rigidoporus sp.* melalui mekanisme kompetisi dan parasitisme. Selain itu, jamur ini juga berkontribusi dalam meningkatkan struktur tanah melalui aktivitas dekomposisi bahan organik dan pembentukan agregat tanah (Gagliardi et al., 2023).

Faktor lingkungan seperti pH tanah, suhu, kelembapan, dan ketersediaan oksigen turut memengaruhi distribusi dan aktivitas *T. harzianum*. Jamur ini lebih aktif pada pH netral hingga sedikit asam (6–7), suhu 25–30°C, dan kelembapan tanah yang moderat. Drainase yang baik sangat penting karena *T. harzianum* tidak toleran terhadap kondisi anaerobik yang sering terjadi pada tanah yang tergenang (Ezziyyani et al., 2019).

Pemanfaatan *T. harzianum* dalam sistem budidaya kopi Arabika membutuhkan pemahaman yang mendalam tentang ekologi, terutama dalam hal aplikasi dan persistensi di lapangan. Penyimpanan dan formulasi yang tepat akan meningkatkan viabilitas dan efektivitas *T. harzianum* sebagai agen hayati. Selain itu, kombinasi dengan bahan organik atau carrier medium seperti sekam padi, zeolit, atau pupuk organik dapat meningkatkan kelangsungan hidup dan kolonisasi jamur di rhizosfer tanaman kopi (Jiang et al., 2023).

d. Siklus Hidup

Siklus hidup *Trichoderma harzianum* terdiri dari tahap-tahap reproduksi aseksual yang dominan, meskipun dalam kondisi tertentu jamur ini juga dapat bereproduksi secara seksual. Reproduksi aseksual berlangsung melalui pembentukan konidia yang dihasilkan dari konidiofora bercabang. Konidia merupakan unit dispersal utama yang tersebar melalui angin, air, atau vektor arthropoda, dan

mampu bertahan dalam kondisi lingkungan yang tidak ideal selama beberapa waktu (Kwak, 2021).

Setelah konidia menemukan substrat yang sesuai, seperti eksudat akar tanaman atau bahan organik di tanah, konidia mulai berkecambah membentuk hifa vegetatif. Hifa vegetatif ini tumbuh secara apikal dan bercabang untuk menyerap nutrisi dari lingkungan sekitarnya. Pada tahap ini, *T. harzianum* mulai berinteraksi dengan mikroba lain, termasuk patogen tanah, melalui berbagai mekanisme antagonis.

Dalam interaksi dengan patogen, *T. harzianum* dapat menempel pada hifa patogen dan mengeluarkan enzim lisis seperti kitinase dan β -1,3-glukanase yang merusak dinding sel patogen. Proses ini disebut mycoparasitism dan merupakan mekanisme biologis penting dalam pengendalian penyakit tanaman. Selain itu, jamur ini juga menghasilkan antibiotik dan VOCs yang menghambat pertumbuhan patogen secara langsung atau memicu respons pertahanan tanaman.

Setelah hifa mencapai stadium dewasa, *T. harzianum* membentuk struktur reproduktif berupa konidiofora yang bercabang simpodial. Struktur ini menghasilkan phialida yang secara berturut-turut menghasilkan konidia. Konidia yang dihasilkan kemudian dilepaskan ke lingkungan untuk memulai siklus hidup berikutnya. Dalam kondisi optimal, siklus hidup *T. harzianum* dapat berlangsung dalam hitungan hari, memungkinkan populasi jamur ini berkembang biak dengan cepat di rhizosfer tanaman (Wang et al., 2023a).

Reproduksi seksual *T. harzianum* jarang terjadi di alam, tetapi dapat diinduksi di laboratorium dengan mencampurkan isolat-isolat dari tipe mating (MAT) berbeda, yaitu MAT-1 dan MAT-2. Hasil dari reproduksi seksual ini

adalah formasi peritecia yang menghasilkan askospora. Askospora kemudian dilepaskan dan dapat berkecambah membentuk miselia haploid. Meskipun reproduksi seksual jarang terjadi, hal ini berpotensi meningkatkan keragaman genetik dan adaptasi *T. harzianum* terhadap tekanan lingkungan (Wang et al., 2023b).

Siklus hidup *T. harzianum* yang relatif singkat dan kemampuan dispersalnya yang tinggi menjadikannya sebagai agen hayati yang efektif dalam pengendalian penyakit tanaman. Dalam konteks budidaya kopi Arabika, pemahaman tentang siklus hidup jamur ini penting untuk menentukan strategi aplikasi yang tepat, termasuk dosis, frekuensi, dan formulasi yang optimal guna memastikan kolonisasi dan persistensi di rhizosfer tanaman.

e. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan dan Kolonisasi

Pertumbuhan dan kolonisasi *Trichoderma harzianum* di rhizosfer tanaman dipengaruhi oleh berbagai faktor fisik, kimia, dan biologis lingkungan tanah serta interaksi dengan tanaman inang dan mikroba lain. Salah satu faktor fisik yang paling penting adalah suhu. *T. harzianum* memiliki kisaran suhu optimum antara 25–30°C, meskipun beberapa isolat dapat bertahan pada suhu lebih rendah (15°C) atau lebih tinggi (35°C). Suhu yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menghambat germinasi konidia dan pertumbuhan hifa (Kumar et al., 2021).

Kelembapan tanah juga merupakan faktor kritis dalam pertumbuhan *T. harzianum*. Jamur ini lebih aktif pada kelembapan tanah sekitar 60–80% kapasitas lapang. Tanah yang terlalu kering menghambat aktivitas metabolik jamur, sementara tanah yang tergenang atau anaerobik dapat

mengurangi kelangsungan hidup *T. harzianum* karena kekurangan oksigen.

Faktor kimia yang memengaruhi pertumbuhan *T. harzianum* meliputi pH tanah, ketersediaan nutrisi, dan adanya senyawa toksik atau residu pestisida. Jamur ini lebih aktif pada pH netral hingga sedikit asam (6–7). Ketersediaan karbon dan nitrogen dalam bentuk eksudat akar atau bahan organik sangat menentukan populasi dan aktivitas *T. harzianum* di rhizosfer. Residu fungisida sistemik, terutama golongan benzimidazol dan strobilurin, dapat menghambat pertumbuhan dan aktivitas antagonis jamur ini (A. Onilude & O. Seyi Amole, 2018).

Dari segi faktor biologis, keberadaan tanaman inang dengan eksudat akar yang sesuai memicu pertumbuhan dan kolonisasi *T. harzianum*. Selain itu, interaksi dengan mikroba lain seperti bakteri rhizosfer, mikoriza, dan fungi saprofit lainnya dapat bersifat sinergis atau antagonis. Mikroba yang menghasilkan senyawa antimikroba atau hormon pertumbuhan dapat meningkatkan efektivitas *T. harzianum*, sementara mikroba kompetitor dapat mengurangi kolonisasi jamur ini.

Strategi agronomi seperti penggunaan pupuk organik, rotasi tanaman, dan sanitasi kebun juga memengaruhi pertumbuhan dan kolonisasi *T. harzianum*. Aplikasi bahan organik yang terdekomposisi dapat meningkatkan populasi *T. harzianum* di tanah, sedangkan penggunaan tanaman penutup tanah yang sesuai dapat menciptakan mikrohabitat yang ideal bagi jamur ini. Sanitasi kebun yang baik, seperti penghilangan tanaman sakit dan pembersihan sisa tanaman, dapat mengurangi tekanan patogen dan meningkatkan efektivitas *T. harzianum* sebagai agen hayati (S Nosir, 2016).

f. Mekanisme Pengendalian Patogen oleh *Trichoderma harzianum*

1. Mycoparasitism (Parasitisme Hifa Patogen)

Trichoderma harzianum menunjukkan kemampuan parasitisme hifa yang sangat efektif terhadap berbagai patogen tanah, termasuk jamur kayu pembusuk seperti *Rigidoporus sp.*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, dan *Pythium*. Proses mycoparasitism dimulai ketika hifa *Trichoderma* mendeteksi keberadaan hifa patogen melalui sinyal kimia atau kontak fisik. Setelah itu, hifa *Trichoderma* membentuk struktur khusus seperti koleretosit yang melekat pada dinding sel patogen. Selanjutnya, *T. harzianum* mengeluarkan enzim lisis seperti kitinase, β -1,3-glukanase, protease, dan lipase yang memecah komponen dinding sel patogen. Proses ini menyebabkan lisis hifa patogen dan akhirnya kematian mikroba tersebut. Kemampuan ini menjadikan *T. harzianum* sebagai salah satu agen hayati paling efektif dalam pengendalian penyakit tanaman secara biologis (Mukherjee et al., 2022).

2. Produksi Enzim Hidrolitik

Produksi enzim hidrolitik merupakan salah satu mekanisme penting dalam antagonisme *Trichoderma harzianum* terhadap patogen tanah. Jamur ini mampu menghasilkan sejumlah enzim ekstraseluler yang dapat merusak integritas dinding sel jamur patogen. Kitinase, misalnya, adalah enzim yang bertindak untuk memecah kitin, komponen utama dinding sel jamur. Glukosidase bekerja pada polimer gula kompleks, sedangkan protease mencerna protein struktural pada permukaan hifa patogen. Aktivitas enzim-enzim ini tidak hanya berperan dalam mycoparasitism, tetapi juga dalam degradasi bahan organik di tanah, sehingga meningkatkan ketersediaan

nutrisi bagi tanaman (Burch & Sarathchandra, 2002). Produksi enzim hidrolitik ini bersifat induktif, artinya aktivitasnya meningkat ketika *T. harzianum* mendeteksi substrat yang sesuai, seperti eksudat akar atau dinding sel patogen.

3. Produksi Antibiotik dan Volatil Organic Compounds (VOCs)

Selain mekanisme enzimatik, *Trichoderma harzianum* juga menghasilkan metabolit sekunder antimikroba yang memiliki aktivitas antijamur yang kuat. Metabolit ini termasuk senyawa peptida siklik, piron, gliovirin, dan asam askorbat yang bekerja dengan cara mengganggu permeabilitas membran sel patogen, menghambat sintesis dinding sel, atau mengganggu metabolisme intraseluler patogen. Beberapa isolat *T. harzianum* juga diketahui menghasilkan senyawa volatil organic compounds (VOCs) yang memiliki efek penghambatan jarak jauh terhadap pertumbuhan patogen. VOCs ini dapat menyebar melalui udara pori tanah dan mempengaruhi fisiologi patogen bahkan tanpa kontak langsung. Kombinasi produksi antibiotik dan VOCs membuat *T. harzianum* menjadi agen hayati yang sangat efektif dalam menekan populasi patogen di rhizosfer (Gualtieri et al., 2022).

4. Induksi Ketahanan Sistemik (*Induced Systemic Resistance/ISR*)

Trichoderma harzianum tidak hanya bekerja secara langsung terhadap patogen, tetapi juga secara tidak langsung meningkatkan ketahanan tanaman melalui aktivasi respons imun sistemik (*Induced Systemic Resistance/ISR*). Jamur ini mampu memicu perubahan fisiologis dan molekuler pada tanaman inang melalui jalur signal transduction seperti jalur salisilat, jasmonat, dan etilen.

Respons ini ditandai dengan peningkatan produksi senyawa PR-protein (Pathogenesis-Related proteins), lignifikasi dinding sel, serta sintesis senyawa fenolik dan flavonoid yang berperan dalam perlindungan terhadap serangan patogen. ISR yang diinduksi oleh *T. harzianum* tidak hanya memberikan perlindungan terhadap penyakit tertentu, tetapi juga meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres abiotik seperti kekeringan dan cekaman logam berat. Efek ini bersifat sistemik, artinya perlindungan tidak hanya terjadi di bagian tanaman yang terinfeksi, tetapi juga di bagian lain yang belum terpapar patogen (Ilham et al., 2019).

4.2 Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM)

a. Jenis-jenis Mikoriza: Endomikoriza dan Ektomikoriza

Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) merupakan salah satu bentuk simbiosis antara tanaman tingkat tinggi dengan jamur mikoriza yang termasuk dalam kelompok endomikoriza. Simbiosis ini ditandai dengan adanya kolonisasi hifa jamur yang menembus sel korteks akar tanaman, membentuk struktur khusus seperti arbuskul dan vesikel. VAM berbeda dengan ektomikoriza yang tidak membentuk struktur intraseluler, tetapi hanya mengkolonisasi ruang antarsel epidermis dan korteks akar serta membentuk mantel luar akar. (Sullia, 1991).

Endomikoriza secara umum terbagi menjadi beberapa tipe utama, yaitu Arbuscular Mycorrhizae (AM), Ericoid Mycorrhizae, Orchid Mycorrhizae, dan Monotropoid Mycorrhizae. Dari semua jenis tersebut, Arbuscular Mycorrhizae adalah yang paling luas penyebarannya dan memiliki peran ekologis penting dalam berbagai ekosistem darat. VAM merupakan istilah lama untuk AM, sebelum

redefinisi taksonomi pada tahun 2001 yang menyebabkan perubahan nama menjadi *Glomeromycota* -associated mycorrhizae atau lebih dikenal sebagai arbuskular mikoriza (AM). Meskipun demikian, istilah VAM masih sering digunakan dalam literatur ilmiah maupun praktik lapangan (Bonfante & Desirò, 2015).

Ektomikoriza berbeda dari VAM dalam hal struktur morfologis dan host range. Ektomikoriza biasanya terbentuk pada tanaman berkayu, terutama dari famili Fagaceae, Pinaceae, Betulaceae, dan beberapa famili tropis seperti Dipterocarpaceae. Jamur penyusun ektomikoriza berasal dari filum Basidiomycota dan Ascomycota, sedangkan VAM disusun oleh jamur dari filum Glomeromycota. Perbedaan lainnya adalah bahwa ektomikoriza tidak membentuk arbuskul di dalam sel korteks akar, melainkan hanya jaringan hifa eksternal yang dikenal sebagai mantel dan jaringan Hartig (Brunner et al., 1992).

Dalam konteks budidaya kopi Arabika (*Coffea arabica* L.), VAM memegang peranan penting dalam meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi, terutama fosfor dan nitrogen, serta meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres biotik dan abiotik. Kopi Arabika merupakan tanaman yang dapat bersimbiosis dengan VAM, sehingga aplikasi teknologi mikoriza menjadi alternatif strategis dalam pengelolaan hara dan pengendalian penyakit, termasuk penyakit akar putih yang disebabkan oleh *Rigidoporus sp.* (Sariasih & Aditiawati, 2022).

Pemahaman tentang perbedaan mendasar antara endomikoriza (termasuk VAM) dan ektomikoriza sangat penting dalam menentukan strategi aplikasi dan pemilihan isolat mikoriza yang tepat dalam sistem budidaya kopi Arabika. Selain itu, karakteristik fisik dan kimia tanah, pH,

suhu, kelembapan, serta kompetisi dengan mikroba lain juga turut memengaruhi perkembangan dan efektivitas VAM di rhizosfer tanaman kopi.

b. Klasifikasi

Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) merupakan bentuk simbiosis mutualisme antara tanaman vaskular dengan jamur dari filum Glomeromycota. Berdasarkan sistem klasifikasi modern, jamur pembentuk VAM telah direklasifikasi ke dalam ordo Glomerales, famili Glomeraceae, Claroideoglomeraceae, dan Gigasporaceae. Genera utama yang sering terlibat dalam pembentukan VAM meliputi *Glomus*, *Claroideoglomus*, *Rhizophagus*, *Funneliformis*, *Scutellospora*, *Acaulospora*, dan *Gigaspora*. Setiap genus memiliki karakteristik morfologis dan fungsional yang berbeda, sehingga responsnya terhadap lingkungan dan tanaman inang pun bervariasi (Hall, 2018).

Jamur VAM memiliki siklus hidup yang kompleks dan unik karena mereka tidak dapat hidup secara mandiri tanpa tanaman inang. Sebagian besar spesies VAM bersifat obligat biotrofik, artinya mereka bergantung sepenuhnya pada karbohidrat yang disediakan oleh tanaman inang melalui eksudat akar. Sebaliknya, jamur VAM memberikan manfaat berupa peningkatan penyerapan air dan unsur hara, terutama fosfor dan nitrogen, yang tersedia dalam jumlah terbatas di tanah.

Klasifikasi jamur VAM awalnya didasarkan pada morfologi spora, yaitu warna, ukuran, bentuk, dan struktur dinding spora. Namun, dengan perkembangan teknologi molekuler, identifikasi spesies VAM kini lebih banyak menggunakan analisis DNA, terutama pada gen ribosom kecil (SSU rRNA) dan internal transcribed spacer (ITS). Pendekatan molekuler ini memungkinkan identifikasi yang lebih akurat

dan menghindari kesalahan klasifikasi berdasarkan morfologi semata.

Di Indonesia, beberapa isolat VAM yang telah diidentifikasi sebagai potensial dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman kopi meliputi *Glomus aggregatum* , *Glomus mosseae* , *Rhizophagus intraradices* , dan *Funneliformis caledonius* . Isolat-isolat ini telah diuji coba dalam kondisi laboratorium dan rumah kaca untuk mengetahui efektivitasnya dalam meningkatkan viabilitas bibit kopi, terutama pada media tanam dengan ketersediaan fosfor rendah.

Klasifikasi VAM yang tepat menjadi dasar bagi pemilihan isolat yang sesuai untuk program aplikasi dalam budidaya kopi Arabika. Penggunaan isolat lokal yang adaptif terhadap kondisi tanah dan iklim setempat akan meningkatkan keberhasilan kolonisasi dan manfaat simbiotik yang diperoleh tanaman. Selain itu, pemahaman tentang klasifikasi VAM juga penting dalam pengembangan formulasi biofertilizer yang berbasis jamur mikoriza untuk pengelolaan hara yang berkelanjutan.

c. Biologi

Biologi Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) mencakup aspek fisiologi, reproduksi, interaksi dengan tanaman inang, serta mekanisme simbiosis yang kompleks. Jamur VAM hidup secara obligat biotrofik, artinya mereka tidak dapat bertahan hidup tanpa tanaman inang karena tidak mampu melakukan fotosintesis sendiri. Mereka memperoleh karbohidrat, terutama glukosa dan sukrosa, dari eksudat akar tanaman, sementara sebagai imbalan, jamur membantu tanaman dalam menyerap air dan unsur hara, terutama fosfor dan nitrogen.

Proses infeksi VAM dimulai saat spora jamur berkecambah di tanah setelah mendeteksi eksudat akar dari tanaman inang. Eksudat akar mengandung senyawa flavonoid dan strigolaktone yang berfungsi sebagai sinyal kimia bagi spora untuk berkecambah dan memulai pertumbuhan hifa menuju akar tanaman. Setelah mencapai permukaan akar, hifa jamur menembus epidermis akar dan memasuki jaringan korteks, di mana terjadi pembentukan struktur intraseluler seperti arbuskul dan vesikel.

Arbuskul merupakan struktur bercabang-cabang yang berfungsi sebagai tempat pertukaran nutrisi antara jamur dan tanaman. Struktur ini memiliki permukaan luas yang memungkinkan transfer efisien fosfor dari jamur ke tanaman. Vesikel berfungsi sebagai tempat penyimpanan cadangan makanan, terutama lipid dan glikogen, yang dapat digunakan oleh jamur saat kondisi lingkungan kurang mendukung. Selain itu, jaringan hifa eksternal yang menjalar ke tanah berfungsi sebagai "akar tambahan" yang memperluas zona penyerapan tanaman.

Reproduksi jamur VAM terjadi secara aseksual melalui pembentukan spora yang dilepaskan ke tanah. Spora dapat bertahan dalam tanah selama beberapa tahun bahkan tanpa tanaman inang. Spora ini merupakan unit dispersal utama yang tersebar melalui angin, air, atau aktivitas fauna tanah. Tidak seperti jamur lain, VAM belum diketahui memiliki fase reproduksi seksual, meskipun beberapa studi molekuler menunjukkan adanya rekombinasi genetik yang mungkin terjadi melalui proses parasexual cycle.

Interaksi biologis VAM dengan tanaman inang tidak hanya terbatas pada pertukaran nutrisi, tetapi juga mencakup peningkatan ketahanan tanaman terhadap stres biotik dan abiotik. Jamur VAM dapat meningkatkan toleransi tanaman

terhadap kekeringan melalui peningkatan penyerapan air, serta meningkatkan ketahanan terhadap patogen tanah melalui aktivasi jalur signal transduction seperti jalur salisilat, jasmonat, dan etilen.

Dalam konteks budidaya kopi Arabika, pemahaman tentang biologi VAM menjadi penting dalam merancang strategi aplikasi yang tepat. Penyimpanan, formulasi, dan cara aplikasi VAM harus mempertimbangkan viabilitas spora dan kemampuan infektivitasnya terhadap akar tanaman kopi. Selain itu, kombinasi dengan bahan organik atau carrier medium seperti sekam padi, zeolit, atau pupuk organik dapat meningkatkan kelangsungan hidup dan kolonisasi jamur di rhizosfer tanaman kopi.

d. Ekologi

Ekologi Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) mencakup distribusi alami, habitat, interaksi dengan komponen biotik dan abiotik di lingkungan tanah, serta perannya dalam siklus nutrisi dan kesehatan tanah. Jamur VAM ditemukan hampir di seluruh wilayah dunia, terutama di daerah dengan kelembapan sedang hingga tinggi dan kandungan bahan organik yang cukup. VAM merupakan bagian dari mikrobioma tanah yang dinamis dan berperan aktif dalam dekomposisi bahan organik, mineralisasi nutrisi, serta regulasi populasi mikroba patogen.

Habitat utama VAM adalah tanah, terutama zona rhizosfer yang kaya akan eksudat akar. Eksudat akar berupa gula, asam amino, dan senyawa organik lainnya menjadi sumber karbon dan nitrogen yang esensial bagi pertumbuhan jamur ini. Di samping itu, VAM juga dapat ditemukan pada permukaan akar tanaman sebagai epifit atau sebagai endofit yang hidup di dalam jaringan tanaman.

Interaksi ekologis VAM tidak hanya terbatas pada hubungan dengan tanaman, tetapi juga dengan mikroorganisme lain di tanah. Jamur ini berkompetisi dengan mikroba lain dalam memperoleh nutrisi dan tempat hidup, serta dapat meningkatkan efektivitas mikoriza dalam menyerap unsur hara seperti fosfor dan nitrogen. Interaksi positif juga terjadi dengan bakteri pelarut fosfat, di mana VAM dapat meningkatkan efektivitas bakteri tersebut dalam memobilisasi fosfor dari senyawa kompleks.

Dalam konteks ekosistem pertanian, VAM lebih dominan di lahan yang dikelola secara organik atau dengan input kimia rendah. Penggunaan pestisida berbahan aktif sintetis, terutama fungisida sistemik, dapat mengurangi populasi VAM di tanah dan mengganggu keseimbangan mikrobiologis tanah. Oleh karena itu, penggunaan VAM sebagai agen hayati harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak terjadi antagonisme dengan bahan kimia yang digunakan secara simultan.

Di lingkungan budidaya kopi Arabika, VAM memiliki peran penting dalam menjaga kesehatan tanah dan tanaman, terutama di area yang rawan terhadap infeksi penyakit akar putih. Keberadaan VAM di rhizosfer kopi dapat mengurangi risiko infeksi awal dan membatasi penyebaran patogen *Rigidoporus sp.* melalui mekanisme kompetisi dan parasitisme. Selain itu, jamur ini juga berkontribusi dalam meningkatkan struktur tanah melalui aktivitas dekomposisi bahan organik dan pembentukan agregat tanah.

Faktor lingkungan seperti pH tanah, suhu, kelembapan, dan ketersediaan oksigen turut memengaruhi distribusi dan aktivitas VAM. Jamur ini lebih aktif pada pH netral hingga sedikit asam (6–7), suhu 25–30°C, dan kelembapan tanah yang moderat. Drainase yang baik sangat penting karena VAM

tidak toleran terhadap kondisi anaerobik yang sering terjadi pada tanah yang tergenang (Davison et al., 2021).

Pemanfaatan VAM dalam sistem budidaya kopi Arabika membutuhkan pemahaman yang mendalam tentang ekologi, terutama dalam hal aplikasi dan persistensi di lapangan. Penyimpanan dan formulasi yang tepat akan meningkatkan viabilitas dan efektivitas VAM sebagai agen hayati. Selain itu, kombinasi dengan bahan organik atau carrier medium seperti sekam padi, zeolit, atau pupuk organik dapat meningkatkan kelangsungan hidup dan kolonisasi jamur di rhizosfer tanaman kopi.

e. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan dan Kolonisasi

Pertumbuhan dan kolonisasi Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) di rhizosfer tanaman dipengaruhi oleh berbagai faktor fisik, kimia, dan biologis lingkungan tanah serta interaksi dengan tanaman inang dan mikroba lain. Salah satu faktor fisik yang paling penting adalah suhu. VAM memiliki kisaran suhu optimum antara 25–30°C, meskipun beberapa isolat dapat bertahan pada suhu lebih rendah (15°C) atau lebih tinggi (35°C). Suhu yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menghambat germinasi konidia dan pertumbuhan hifa (Weng et al., 2022).

Kelembapan tanah juga merupakan faktor kritis dalam pertumbuhan VAM. Jamur ini lebih aktif pada kelembapan tanah sekitar 60–80% kapasitas lapang. Tanah yang terlalu kering menghambat aktivitas metabolik jamur, sementara tanah yang tergenang atau anaerobik dapat mengurangi kelangsungan hidup VAM karena kekurangan oksigen.

Faktor kimia yang memengaruhi pertumbuhan VAM meliputi pH tanah, ketersediaan nutrisi, dan adanya senyawa toksik atau residu pestisida. Jamur ini lebih aktif pada pH

netral hingga sedikit asam (6–7). Ketersediaan karbon dan nitrogen dalam bentuk eksudat akar atau bahan organik sangat menentukan populasi dan aktivitas VAM di rhizosfer. Residu fungisida sistemik, terutama golongan benzimidazol dan strobilurin, dapat menghambat pertumbuhan dan aktivitas antagonis jamur ini.

Dari segi faktor biologis, keberadaan tanaman inang dengan eksudat akar yang sesuai memicu pertumbuhan dan kolonisasi VAM. Selain itu, interaksi dengan mikroba lain seperti bakteri rhizosfer, mikoriza, dan fungi saprofit lainnya dapat bersifat sinergis atau antagonis. Mikroba yang menghasilkan senyawa antimikroba atau hormon pertumbuhan dapat meningkatkan efektivitas VAM, sementara mikroba kompetitor dapat mengurangi kolonisasi jamur ini.

Strategi agronomi seperti penggunaan pupuk organik, rotasi tanaman, dan sanitasi kebun juga memengaruhi pertumbuhan dan kolonisasi VAM. Aplikasi bahan organik yang terdekomposisi dapat meningkatkan populasi VAM di tanah, sedangkan penggunaan tanaman penutup tanah yang sesuai dapat menciptakan mikrohabitat yang ideal bagi jamur ini. Sanitasi kebun yang baik, seperti penghilangan tanaman sakit dan pembersihan sisa tanaman, dapat mengurangi tekanan patogen dan meningkatkan efektivitas VAM sebagai agen hayati (Dar & Reshi, 2017).

Pemahaman menyeluruh tentang faktor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan dan kolonisasi VAM sangat penting dalam pengembangan formulasi dan aplikasi yang efektif dalam sistem budidaya kopi Arabika. Dengan mempertimbangkan aspek lingkungan, tanaman inang, dan mikrobioma tanah, penggunaan VAM sebagai agen hayati

dapat dioptimalkan untuk pengendalian penyakit akar putih secara berkelanjutan dan ramah lingkungan.

BAB 5

SINERGI PENGGUNAAN *T. HARZIANUM* DAN VAM DALAM PENGENDALIAN PATOGEN TANAH

5.1. Sinergi Mikroba Antagonis dalam Pengelolaan Kesehatan Tanah

Penggunaan pendekatan terpadu dalam pengendalian patogen tanah semakin mendapat perhatian dalam beberapa dekade terakhir sebagai respon atas keterbatasan penggunaan bahan kimia sintetis yang berdampak negatif pada lingkungan dan manusia. Pendekatan ini mencakup integrasi berbagai metode, baik secara kimiawi, fisik, maupun biologis, dengan tujuan mengurangi ketergantungan pada fungisida berbasis sintetis sekaligus meningkatkan daya dukung ekosistem tanah. Salah satu komponen penting dari pendekatan tersebut adalah pemanfaatan agen hayati, yaitu mikroorganisme yang memiliki kemampuan antagonis terhadap patogen tanah (Selari et al., 2022). Mikroba antagonis seperti *Trichoderma harzianum* dan jamur mikoriza arbuskular (VAM) telah menunjukkan potensi yang signifikan dalam mengendalikan penyakit tanaman melalui berbagai mekanisme biologis, termasuk parasitisme hifa, antibiosis, kompetisi nutrisi, serta aktivasi respons pertahanan tanaman.

Perkembangan teknologi biofungisida dan biofertilizer berbasis mikroba menjadi salah satu inovasi penting dalam upaya memperkenalkan alternatif ramah lingkungan untuk pengelolaan kesehatan tanaman. Biofungisida berbasis *Trichoderma*, misalnya, telah banyak dikomersialisasi dan digunakan secara luas di berbagai negara, sedangkan aplikasi VAM sebagai biofertilizer tidak hanya meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara oleh

tanaman, tetapi juga meningkatkan ketahanannya terhadap serangan penyakit. Perkembangan ini didorong oleh kesadaran akan perlunya sistem pertanian yang lebih berkelanjutan, rendah emisi, serta ramah lingkungan. Selain itu, adanya regulasi yang semakin ketat terhadap residu pestisida di produk pertanian global turut mendorong percepatan transisi ke teknologi hayati.

Munculnya konsep sinergi antar agen hayati sebagai strategi inovatif dalam pertanian berkelanjutan merupakan langkah lanjutan dari penggunaan mikroba secara tunggal. Konsep ini didasarkan pada hipotesis bahwa kombinasi dua atau lebih mikroba dapat memberikan efek yang lebih besar daripada penggunaan individu, baik dalam hal efektivitas pengendalian penyakit maupun stimulasi pertumbuhan tanaman. Misalnya, *Trichoderma harzianum* yang memiliki kemampuan antagonis kuat terhadap patogen tanah dapat bekerja secara sinergis dengan VAM yang meningkatkan daya tahan tanaman melalui peningkatan penyerapan nutrisi dan modifikasi jalur signal transduction dalam tanaman (Asad, 2022). Penerapan strategi sinergis ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi input pertanian sekaligus mengurangi risiko resistensi patogen terhadap satu jenis agen hayati.

Gambaran umum peran *Trichoderma harzianum* dan VAM secara individu menunjukkan bahwa kedua mikroba ini memiliki karakteristik fungsional yang saling melengkapi. *Trichoderma harzianum* dikenal sebagai mikroba yang aktif dalam menghambat perkembangan patogen tanah melalui berbagai mekanisme biologis, termasuk mycoparasitism, produksi metabolit antimikroba, dan induksi ketahanan sistemik pada tanaman. Di sisi lain, VAM membentuk simbiosis mutualistik dengan akar tanaman dan berkontribusi dalam peningkatan efisiensi penyerapan fosfor, nitrogen, serta unsur mikro lainnya. Selain itu, VAM juga berperan

dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres lingkungan dan penyakit. Potensi kombinasi kedua mikroba ini dalam mengatasi penyakit tanaman, khususnya yang disebabkan oleh patogen tanah seperti *Rigidoporus sp.* , *Fusarium* , dan *Rhizoctonia* , sangat relevan dalam konteks budidaya tanaman sensitif seperti kopi Arabika (*Coffea arabica* L.), di mana fase pembibitan sangat rentan terhadap infeksi awal. Oleh karena itu, pengembangan formulasi bio-input berbasis kombinasi *Trichoderma harzianum* dan VAM menjadi area penelitian yang sangat prospektif dalam mendukung pertanian berkelanjutan (Guzmán-Guzmán et al., 2023).

5.2. Analisis Efektivitas Pengendalian Patogen seperti *Fusarium* , *Rhizoctonia* , *Pythium* , dan *Rigidoporus sp.* melalui Aplikasi Kombinasi

Aplikasi kombinasi *Trichoderma harzianum* dan Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) telah menunjukkan potensi yang signifikan dalam pengendalian berbagai patogen tanah penting, termasuk *Fusarium oxysporum* , *Rhizoctonia solani* , *Pythium aphanidermatum* , dan *Rigidoporus sp.* , yang merupakan penyebab utama penyakit akar pada banyak tanaman pertanian, termasuk kopi Arabika (*Coffea arabica* L.) (Awad-Allah et al., 2022). Masing-masing dari patogen tersebut memiliki strategi infeksi yang berbeda, tetapi semuanya mengandalkan kondisi lingkungan rhizosfer yang mendukung untuk memulai siklus hidupnya. Kombinasi *Trichoderma* dan VAM bekerja secara sinergis dengan memodifikasi mikrohabitat rhizosfer, meningkatkan ketahanan tanaman, serta menghambat pertumbuhan patogen melalui mekanisme biologis yang bersifat langsung maupun tidak langsung (Olowe et al., 2022).

Trichoderma harzianum diketahui memiliki kemampuan mycoparasitism terhadap hifa *Fusarium* dan *Rhizoctonia* , sementara VAM meningkatkan kapasitas penyerapan nutrisi tanaman sehingga mengurangi stres fisiologis yang dapat membuat tanaman lebih rentan terhadap infeksi (Hewedy et al., 2020). Pada kasus *Pythium* , yang merupakan oomycetes patogen yang menyebabkan damping-off pada pembibitan, kombinasi kedua agen hayati ini efektif dalam mengurangi kehilangan bibit melalui peningkatan aktivitas enzim peroksidase dan lignifikasi dinding sel (Mannai et al., 2020). Dalam konteks penyakit akar putih yang disebabkan oleh *Rigidoporus sp.* , aplikasi kombinasi memberikan perlindungan awal pada fase kritis pembibitan dengan meningkatkan viabilitas akar dan mencegah kolonisasi jamur kayu pembusuk di jaringan kortikal (Noveriza et al., 2020).

Efektivitas pengendalian yang tinggi dicapai karena kedua mikroba ini saling melengkapi mekanisme kerjanya. *Trichoderma* bertindak sebagai agen antagonis langsung yang menghancurkan atau menghambat pertumbuhan patogen, sedangkan VAM meningkatkan respons imun tanaman dan menciptakan lingkungan rhizosfer yang kurang mendukung bagi perkembangan patogen (Kumar et al., 2021). Hal ini menjadikan kombinasi *Trichoderma* dan VAM sebagai strategi inovatif dalam pengelolaan penyakit tanah secara berkelanjutan (Adetunji & Varma, 2020).

5.3. Perbandingan Efikasi antara Aplikasi Tunggal vs. Kombinasi dalam Aspek Penekanan Inokulum, Gejala Penyakit, dan Viabilitas Tanaman

Berdasarkan hasil evaluasi lapangan dan rumah kaca, aplikasi kombinasi *Trichoderma harzianum* dan VAM memberikan hasil yang lebih unggul dibandingkan aplikasi

tunggal dalam tiga parameter utama: penekanan inokulum patogen, pengurangan gejala penyakit, dan peningkatan viabilitas tanaman. Dalam hal penekanan inokulum, *Trichoderma* bekerja secara langsung dengan menghancurkan struktur hifa patogen melalui produksi enzim lisis, sementara VAM menciptakan kompetisi nutrisi dan mengubah komposisi eksudat akar sehingga mengurangi kelangsungan hidup patogen di rhizosfer (Mahboubi et al., 2023). Kombinasi kedua mikroba ini meningkatkan efisiensi penekanan inokulum hingga 90%, dibandingkan dengan penurunan rata-rata 60% pada aplikasi tunggal *Trichoderma* dan 50% pada aplikasi tunggal VAM (Stummer et al., 2022).

Pengurangan gejala penyakit juga lebih nyata pada perlakuan kombinasi. Misalnya, pada tanaman kopi Arabika yang diinfeksi *Rigidoporus sp.* Gejala layu dan nekrosis akar muncul lebih lambat dan lebih ringan pada tanaman yang diberi kombinasi *Trichoderma* dan VAM (Assefa et al., 2021). Studi histologis menunjukkan bahwa area nekrotik pada jaringan akar lebih kecil dan laju degradasi lignin lebih rendah pada perlakuan kombinasi. Selain itu, produksi metabolit antioksidan seperti flavonoid dan fenolik meningkat lebih cepat, menunjukkan respons defensif tanaman yang lebih aktif (C. Chen et al., 2022).

Viabilitas tanaman juga meningkat secara signifikan pada perlakuan kombinasi. Tanaman yang menerima kombinasi *Trichoderma* dan VAM menunjukkan pertumbuhan lebih cepat, kadar klorofil lebih tinggi, serta peningkatan panjang akar dan jumlah cabang akar (Asad, 2022). Viabilitas bibit pada tahap awal budidaya meningkat hingga 85%, dibandingkan dengan 60–70% pada aplikasi tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa selain efek pengendalian penyakit, kombinasi kedua mikroba juga memiliki dampak positif pada aspek agronomis tanaman (Kashyap et al., 2023).

5.4. Peningkatan Keragaman dan Aktivitas Mikrobioma Tanah Akibat Aplikasi Sinergis

Salah satu manfaat tambahan dari aplikasi kombinasi *Trichoderma harzianum* dan VAM adalah peningkatan keragaman dan aktivitas mikrobioma tanah. Kedua mikroba ini memodifikasi rhizosfer secara dinamis melalui perubahan komposisi eksudat akar, produksi senyawa antimikroba, serta peningkatan ketersediaan nutrisi (Sharma & Kumawat, 2022). Perubahan ini menciptakan lingkungan mikro yang lebih sesuai bagi pertumbuhan mikroba bermanfaat seperti bakteri pelarut fosfat, aktinomisetes, dan mikroba antagonis endofitik.

Studi metagenomik menunjukkan bahwa aplikasi kombinasi meningkatkan indeks keanekaragaman mikroba (Shannon index) hingga 40% dibandingkan dengan kontrol. Kelompok bakteri Proteobacteria, Actinobacteria, dan Firmicutes meningkat secara signifikan, menunjukkan peningkatan populasi mikroba yang berkontribusi pada kesehatan tanah dan pengendalian penyakit. Sebaliknya, kelompok mikroba patogen seperti Oomycetes dan Basidiomycota menurun, menandakan efek penghambatan selektif terhadap patogen (Serri et al., 2022).

Aktivitas enzimatis tanah seperti fluorescein diacetate hydrolysis (FDA), dehidrogenase, dan urease juga meningkat pada perlakuan kombinasi, menunjukkan peningkatan fungsi ekosistem tanah secara keseluruhan. Produksi siderofor dan fitohormon oleh mikrobioma rhizosfer juga meningkat, berkontribusi pada peningkatan pertumbuhan tanaman dan ketahanan terhadap cekaman biotik dan abiotik (Bhat et al., 2022).

Kombinasi *Trichoderma* dan VAM juga memengaruhi siklus nutrisi tanah, terutama siklus nitrogen dan fosfor. Kolonisasi

VAM meningkatkan aktivitas glomaline-related soil protein (GRSP), protein yang berperan dalam agregasi tanah dan penyimpanan karbon, sementara *Trichoderma* meningkatkan mineralisasi bahan organik, sehingga mempercepat proses pembebasan nutrisi esensial (Asghar & Kataoka, 2021). Peningkatan aktivitas mikrobioma ini tidak hanya berdampak pada kontrol penyakit, tetapi juga pada produktivitas jangka panjang sistem budidaya.

5.5. Dampak Sinergi terhadap Pertumbuhan dan Ketahanan Tanaman

Efek Positif Ganda terhadap Pertumbuhan Vegetatif (Tinggi Tanaman, Jumlah Daun, Biomassa). Sinergi antara *Trichoderma harzianum* dan Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) memberikan efek positif yang signifikan terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman. Aplikasi kombinasi kedua mikroba ini meningkatkan parameter pertumbuhan utama seperti tinggi tanaman, jumlah daun, dan peningkatan biomassa secara bersamaan (Lorgen-Ritchie et al., 2023). Peningkatan ini tidak hanya disebabkan oleh aktivitas masing-masing mikroba secara individual, tetapi juga oleh interaksi sinergis yang memperkuat efek fisiologis pada tanaman inang (Safronova et al., 2023).

Trichoderma harzianum diketahui menghasilkan senyawa fitohormon seperti auksin, giberelin, dan sitokinin yang merangsang pembelahan sel, pemanjangan akar, serta diferensiasi jaringan vegetatif (Abdenaceur et al., 2022). Di sisi lain, VAM membentuk simbiosis mutualistik dengan akar tanaman dan berkontribusi dalam peningkatan penyerapan nutrisi, khususnya fosfor dan nitrogen, yang merupakan unsur penting dalam sintesis protein, klorofil, dan komponen seluler lainnya (Schwab, 1987). Kombinasi kedua mikroba ini

menciptakan lingkungan rhizosfer yang lebih mendukung pertumbuhan tanaman melalui peningkatan ketersediaan nutrisi dan produksi senyawa pengatur tumbuh (Kong & Liu, 2022).

Studi menunjukkan bahwa tanaman yang diberi perlakuan kombinasi memiliki tinggi rata-rata 20–35% lebih tinggi dibandingkan tanaman kontrol (Scalize et al., 2018). Selain itu, jumlah daun pertanaman meningkat seiring dengan percepatan fase pertumbuhan primer (P.-C. Liu et al., 2020). Parameter biomassa segar dan kering juga menunjukkan peningkatan yang signifikan, menandakan adanya peningkatan kapasitas fotosintesis dan alokasi karbohidrat ke berbagai organ tanaman. Efek ini sangat nyata pada fase awal pertumbuhan, terutama pada bibit kopi Arabika yang rentan terhadap stres lingkungan dan penyakit (de Sousa et al., 2022).

5.6. Peningkatan Penyerapan Fosfor, Nitrogen, dan Unsur Mikro Lainnya

Salah satu manfaat utama dari aplikasi sinergi *Trichoderma harzianum* dan VAM adalah peningkatan kemampuan tanaman dalam menyerap unsur hara esensial, khususnya fosfor dan nitrogen, serta beberapa unsur mikro seperti seng, besi, dan tembaga. Fosfor merupakan elemen penting dalam metabolisme energi dan sintesis DNA, sedangkan nitrogen merupakan komponen utama protein, enzim, dan klorofil (Aberathna et al., 2022). Namun, keduanya sering kali tersedia dalam bentuk yang tidak dapat langsung diserap oleh tanaman, terutama di tanah masam atau bertekstur liat. VAM memainkan peran sentral dalam meningkatkan penyerapan fosfor melalui ekspansi jaringan hifa eksternal yang berfungsi sebagai "akar tambahan". Hifa

VAM dapat menjalar hingga puluhan sentimeter dari akar tanaman dan menyerap fosfat dari zona tanah yang tidak dapat dijangkau oleh sistem akar tanaman sendiri (Keyes et al., 2022). Di sisi lain, *Trichoderma harzianum* berkontribusi dalam solubilisasi fosfor melalui produksi asam organik dan enzim fosfatase yang memecah senyawa fosfat kompleks menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman (Bononi et al., 2020).

Dalam konteks nitrogen, VAM meningkatkan efisiensi penyerapan nitrat dan amonium melalui modifikasi eksudat akar yang merangsang aktivitas bakteri fiksasi nitrogen dan pelarutan mineral nitrogen (Rosolem et al., 2017). *Trichoderma*, di sisi lain, meningkatkan dekomposisi bahan organik, sehingga mempercepat proses mineralisasi nitrogen (Chalie u et al., 2019). Interaksi antara kedua mikroba ini menciptakan siklus nutrisi yang lebih efisien, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga tanaman menerima pasokan hara yang lebih optimal (Sun et al., 2022).

Unsur mikro seperti seng, besi, dan mangan juga tersedia dalam jumlah lebih besar pada tanah yang diberi perlakuan kombinasi. Hal ini diduga karena perubahan pH rhizosfer dan produksi siderofor oleh *Trichoderma*, serta peningkatan permukaan absorpsi akibat kolonisasi VAM (Jakubus & Graczyk, 2020). Kombinasi kedua agen hayati ini tidak hanya meningkatkan ketersediaan nutrisi, tetapi juga memastikan distribusi yang lebih merata ke seluruh bagian tanaman (Tawfeeq Al-Ani et al., 2020).

5.7. Penguatan Respons Imun Tanaman terhadap Stres Biotik dan Abiotik

Aplikasi kombinasi *Trichoderma harzianum* dan VAM berdampak pada peningkatan ketahanan tanaman terhadap tekanan biotik dan abiotik melalui aktivasi jalur signal

transduction dan produksi senyawa metabolit sekunder (dos Santos et al., 2022). Mekanisme ini melibatkan induksi ketahanan sistemik (*Induced Systemic Resistance/ISR*) yang diaktifkan oleh mikroba endofitik dan mikoriza arbuskular (Singh et al., 2021). Aktivasi respons imun dimulai saat *Trichoderma harzianum* menghasilkan senyawa elicitor yang dikenali oleh reseptor tanaman (Morán-Diez et al., 2021). Senyawa tersebut memicu kaskade signal transduction melalui jalur salisilat, jasmonat, dan etilen, yang berujung pada ekspresi gen PR-protein, lignifikasi dinding sel, serta sintesis senyawa fenolik dan flavonoid (Shi et al., 2023). Jalur-jalur ini bekerja secara sinergis untuk memperkuat barisan pertahanan tanaman terhadap infeksi patogen.

VAM turut berperan dalam mekanisme pertahanan tanaman dengan meningkatkan produksi senyawa antioksidan seperti glutathion dan superoksida dismutase, yang melindungi tanaman dari kerusakan oksidatif akibat cekaman abiotik seperti kekeringan, cahaya intens tinggi, dan cekaman logam berat (Pandita, 2022). Kolonisasi VAM juga meningkatkan ekspresi gen defensin dan chitinase, yang berkontribusi pada perlindungan spesifik terhadap infeksi jamur patogen (Y.-P. Chen et al., 2023).

Kombinasi kedua mikroba ini memberikan efek ganda dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap berbagai jenis tekanan. Misalnya, tanaman kopi Arabika yang diinokulasi dengan kombinasi *Trichoderma* dan VAM menunjukkan gejala layu yang lebih lambat dan nekrosis akar yang lebih ringan ketika terpapar *Rigidoporus sp.*. Di sisi lain, tanaman yang ditanam di lahan dengan drainase buruk atau ketersediaan air rendah menunjukkan viabilitas yang lebih tinggi dan kerusakan fisiologis yang lebih rendah (García-Montelongo et al., 2023).

5.8. Perbaikan Struktur Tanah dan Peningkatan Ketersediaan Nutrisi Secara Sinergis

Selain dampak langsung pada tanaman, sinergi antara *Trichoderma harzianum* dan VAM juga memberikan manfaat signifikan terhadap kualitas tanah. Kombinasi kedua mikroba ini meningkatkan struktur fisik, kimia, dan biologi tanah, yang berkontribusi pada peningkatan produktivitas lahan secara keseluruhan (García-Montelongo et al., 2023).

Secara fisik, VAM meningkatkan stabilitas agregat tanah melalui produksi glomaline-related soil protein (GRSP), protein yang berperan dalam pengikatan partikel tanah dan pembentukan pori-pori (H. Liu et al., 2020). *Trichoderma harzianum* berkontribusi dalam degradasi bahan organik dan pembentukan humus yang meningkatkan retensi air dan aerasi tanah. Kombinasi kedua mikroba ini menciptakan tanah dengan struktur yang lebih porous, memudahkan penetrasi akar, serta meningkatkan infiltrasi air dan udara (İkiz et al., 2022).

Secara kimia, aplikasi sinergis meningkatkan kadar bahan organik, kapasitas tukar kation (KTK), serta ketersediaan fosfor dan nitrogen dalam tanah (S. Chen et al., 2023). Proses mineralisasi dan nitrifikasi berlangsung lebih cepat karena aktivitas mikroba yang meningkat (Lu et al., 2019). Selain itu, *Trichoderma* dan VAM bersama-sama meningkatkan kelarutan unsur mikro seperti Fe, Zn, dan Mn, sehingga ketersediaannya lebih optimal bagi tanaman (MITIOHLO et al., 2022).

Secara biologis, kombinasi *Trichoderma* dan VAM memodifikasi komunitas mikrobioma rhizosfer dengan meningkatkan populasi mikroba bermanfaat seperti bakteri pelarut fosfat, aktinomisetes, dan mikroba antagonis (Shahriar et al., 2022). Studi menunjukkan bahwa indeks

keanekaragaman mikroba meningkat setelah aplikasi kombinasi, menandakan peningkatan fungsi ekosistem tanah secara keseluruhan (King et al., 2023). Perbaikan kualitas tanah ini sangat penting dalam sistem budidaya berkelanjutan, terutama pada lahan marginal atau pasca-tebang yang membutuhkan pemulihan kesuburan tanah.

5.9. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Keberhasilan Sinergi *Trichoderma harzianum* dan VAM

A. Faktor Lingkungan

1. Suhu, Kelembapan, pH Tanah, dan Drainase

Keberhasilan sinergi antara *Trichoderma harzianum* dan Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tempat aplikasi dilakukan. Suhu merupakan salah satu faktor kritis yang menentukan aktivitas fisiologis kedua mikroba tersebut (Poosapati et al., 2021). Kedua agen hayati ini memiliki kisaran suhu optimum pertumbuhan sekitar 25–30°C, di mana metabolisme mereka berlangsung secara efisien (Parveen & Jeyarani, 2022). Pada suhu di bawah 15°C atau di atas 35°C, viabilitas spora dan pertumbuhan hifa dapat terhambat, sehingga mengurangi efektivitas kolonisasi pada akar tanaman (Juroszek et al., 2022).

Kelembapan tanah juga memainkan peran penting dalam dinamika interaksi *Trichoderma* dan VAM. Jamur ini lebih aktif pada kelembapan tanah sekitar 60–80% kapasitas lapang. Tanah yang terlalu kering menyebabkan dehidrasi seluler dan penurunan aktivitas metabolik, sedangkan tanah yang tergenang atau anaerobik menghambat respirasi dan pertumbuhan mikroba aerobik seperti *Trichoderma* (Hicks et al., 2019). Oleh karena itu, drainase

yang baik menjadi prasyarat untuk menjaga kelangsungan hidup dan aktivitas mikroba setelah aplikasi.

pH tanah turut mempengaruhi keberhasilan sinergi antara *Trichoderma* dan VAM. Keduanya lebih aktif pada pH netral hingga sedikit asam (6–7) (Daryaei et al., 2016). Di bawah pH 5 atau di atas pH 8, beberapa isolat *Trichoderma* dan VAM menunjukkan penurunan viabilitas dan kemampuan infeksi pada jaringan akar (Maurya et al., 2017). Perubahan pH dapat memengaruhi bioavailabilitas nutrisi, kelarutan senyawa antimikroba, serta kompetisi dengan mikroba indigenus, yang semuanya berdampak pada efektivitas kombinasi kedua mikroba (Sánchez-Clemente et al., 2018).

Drainase yang buruk sering kali berkorelasi dengan kondisi anaerobik yang tidak mendukung perkembangan *Trichoderma* dan VAM (Prakash, 2022). Dalam kondisi tersebut, populasi mikroba aerobik cenderung menurun, sementara mikroba anaerob patogen dapat meningkat. Hal ini menciptakan tekanan biotik tambahan yang mengurangi peluang kolonisasi dan kerja sinergis *Trichoderma* dan VAM (Z. Liu et al., 2017). Oleh karena itu, pengaturan drainase menjadi salah satu strategi penting dalam penerapan teknologi hayati ini.

2. Aerasi Tanah dan Kadar Bahan Organik

Kondisi aerasi tanah sangat menentukan kelangsungan hidup *Trichoderma harzianum*, yang merupakan mikroba aerobik obligat. Tanah dengan struktur padat dan porositas rendah menyebabkan oksigen sulit tersedia, sehingga menghambat pertumbuhan dan aktivitas jamur antagonis ini (Tsegaye Redda et al., 2018). Sebaliknya, tanah dengan aerasi baik memberikan lingkungan yang ideal bagi pertumbuhan hifa dan produksi enzim hidrolitik yang

diperlukan dalam mekanisme mycoparasitism dan antibiosis (Nguyen, 2023).

Kadar bahan organik tanah juga berkontribusi besar dalam mendukung kolonisasi *Trichoderma* dan VAM. Bahan organik berfungsi sebagai substrat karbon dan nitrogen yang esensial bagi pertumbuhan kedua mikroba (Gul & Whalen, 2022). Selain itu, eksudat akar yang kaya akan gula dan senyawa fenolik dapat merangsang pertumbuhan dan aktivitas mikroba. Aplikasi pupuk organik bersama formulasi *Trichoderma* dan VAM dapat meningkatkan persistensi mikroba di rhizosfer dan memperkuat interaksi simbiotiknya dengan tanaman inang (Huang et al., 2023).

Tanah dengan kadar bahan organik tinggi biasanya memiliki kapasitas tukar kation (KTK) yang lebih tinggi, retensi air yang lebih baik, serta stabilitas agregat yang lebih kuat. Semua faktor ini menciptakan mikrohabitat yang ideal bagi pertumbuhan dan reproduksi mikroba hayati (Wei et al., 2022). Oleh karena itu, peningkatan kesuburan biologis melalui penambahan bahan organik menjadi pendukung utama keberhasilan sinergi antara *Trichoderma* dan VAM dalam sistem budidaya berkelanjutan (Hang et al., 2022).

B. Faktor Tanaman Inang

1. Jenis Tanaman dan Tahap Pertumbuhan

Jenis tanaman inang menjadi salah satu faktor penentu dalam keberhasilan kolonisasi *Trichoderma harzianum* dan VAM. Setiap tanaman memiliki karakteristik eksudat akar yang berbeda, sehingga menentukan daya tarik bagi kedua mikroba (Poveda et al., 2023). Beberapa tanaman seperti kopi Arabika (*Coffea arabica* L.), jagung, dan tomat diketahui memiliki eksudat yang sangat mendukung

kolonisasi VAM dan aktivitas *Trichoderma*. Namun, ada tanaman tertentu yang kurang sesuai karena menghasilkan senyawa allelopatik atau eksudat yang tidak mendorong pertumbuhan mikroba hayati (Mulatu et al., 2022).

Tahap pertumbuhan tanaman juga sangat berpengaruh. Pada fase awal pembibitan, tanaman lebih rentan terhadap gangguan biotik dan abiotik, sehingga perlindungan dari *Trichoderma* dan VAM sangat diperlukan (ZAW & MATSUMOTO, 2020). Kolonisasi yang cepat dan efektif pada fase ini memberikan manfaat jangka panjang berupa peningkatan ketahanan dan produktivitas. Di sisi lain, pada fase vegetatif lanjut, respons tanaman terhadap aplikasi mikroba hayati dapat berbeda, karena perubahan pola eksudasi akar dan alokasi energi tanaman (Zeyad et al., 2021).

Pemilihan waktu aplikasi yang tepat berdasarkan tahap pertumbuhan tanaman menjadi penting untuk memaksimalkan efek sinergi. Misalnya, aplikasi kombinasi *Trichoderma* dan VAM pada saat persemaian atau penanaman awal memberikan hasil yang lebih optimal dibandingkan dengan aplikasi pada masa pertumbuhan lanjut (Korlina et al., 2023). Hal ini disebabkan oleh kemampuan tanaman muda dalam menyerap dan merespons stimulasi mikroba secara lebih intensif (Cardarelli et al., 2022).

2. Kemampuan Tanaman dalam Menghasilkan Eksudat Akar yang Mendukung Kolonisasi Mikroba

Eksudat akar merupakan mediator utama dalam interaksi antara tanaman inang dan mikroba rhizosfer. Komposisi eksudat akar, yang terdiri dari gula, asam amino, flavonoid, dan senyawa organik lainnya, sangat menentukan daya tarik tanaman terhadap *Trichoderma*

harzianum dan VAM (Parfenyuk et al., 2022). Eksudat yang kaya akan senyawa fenolik dan flavonoid meningkatkan kolonisasi VAM, sementara eksudat yang mengandung gula sederhana merangsang pertumbuhan *Trichoderma*.

Beberapa tanaman menghasilkan eksudat yang lebih sesuai untuk mendukung interaksi simbiotik. Misalnya, kopi Arabika diketahui menghasilkan eksudat akar yang mengandung senyawa fenolik tinggi, yang dapat merangsang pertumbuhan VAM sekaligus menarik *Trichoderma* untuk melakukan kolonisasi sekunder (Yuan et al., 2018). Interaksi eksudat akar dengan mikroba ini menciptakan hubungan mutualistik yang saling menguntungkan.

Kemampuan tanaman menghasilkan eksudat yang sesuai sangat bergantung pada genetik tanaman dan kondisi lingkungan. Stres abiotik seperti kekeringan atau keasaman tanah yang ekstrem dapat mengubah pola eksudasi akar, sehingga mengurangi kemungkinan kolonisasi mikroba hayati (Chai & Schachtman, 2022). Oleh karena itu, pemahaman tentang profil eksudat akar pada berbagai jenis tanaman dan kondisi lingkungan menjadi penting dalam merancang strategi aplikasi yang efektif.

C. Aspek Formulasi dan Aplikasi

1. Teknik Aplikasi (Inokulasi Akar, Campuran Media Tanam, Pelapisan Biji)

Teknik aplikasi menjadi salah satu faktor yang sangat menentukan keberhasilan sinergi antara *Trichoderma harzianum* dan VAM. Ada beberapa metode umum yang digunakan, yaitu inokulasi akar, pencampuran dengan media tanam, dan pelapisan benih (Tavera-Zavala et al., 2017). Masing-masing teknik memiliki kelebihan dan

keterbatasan yang harus dipertimbangkan sesuai dengan jenis tanaman dan sistem budidaya.

Inokulasi akar biasanya dilakukan dengan cara menyiramkan suspensi spora *Trichoderma* dan inokulum VAM langsung ke zona rhizosfer tanaman. Metode ini sangat efektif dalam memastikan kontak langsung antara mikroba dan akar tanaman (Marsell & Fröschel, 2022). Di sisi lain, pencampuran formulasi mikroba dengan media tanam lebih cocok digunakan dalam sistem pembibitan, di mana tanaman masih berada dalam wadah terkontrol. Teknik ini memungkinkan kolonisasi awal yang cepat dan merata sebelum tanaman dipindahkan ke lahan produksi.

Pelapisan benih merupakan teknik yang banyak digunakan dalam budidaya tanaman biji-bijian seperti jagung dan kedelai. Dengan metode ini, benih dilapisi dengan campuran spora *Trichoderma* dan inokulum VAM, sehingga kolonisasi dimulai sejak tahap perkecambahan (Mishra et al., 2023). Teknik ini sangat efisien dalam hal penggunaan dosis dan tenaga kerja, tetapi membutuhkan carrier medium yang stabil dan ramah terhadap viabilitas mikroba.

2. Waktu Aplikasi Relatif terhadap Fase Pertumbuhan Tanaman

Waktu aplikasi yang tepat sangat berpengaruh terhadap efektivitas sinergi *Trichoderma* dan VAM. Aplikasi yang dilakukan pada saat tanaman berada pada fase awal pertumbuhan memberikan hasil yang lebih baik karena tanaman dalam kondisi siap menerima kolonisasi mikroba hayati (Nieto-Jacobo et al., 2017). Pada fase ini, eksudat akar yang dihasilkan cukup untuk merangsang pertumbuhan *Trichoderma* dan VAM.

Sebaliknya, pemberian pada fase generatif atau pasca-infeksi penyakit sering kali kurang efektif karena tanaman sudah berada dalam kondisi stres dan eksudat akar tidak lagi mendukung kolonisasi mikroba (Gao et al., 2021). Oleh karena itu, rekomendasi aplikasi yang ideal adalah pada saat tanaman masih dalam tahap pembibitan atau pada saat penanaman awal di lapangan.

Selain itu, aplikasi bertahap atau ulangan juga dapat meningkatkan efektivitas sinergi, terutama pada lahan dengan tingkat infeksi patogen yang tinggi (Ludlam et al., 2012). Penyesuaian waktu aplikasi dengan siklus pertumbuhan tanaman menjadi penting agar mikroba hayati dapat bekerja secara optimal.

3. Kombinasi Carrier Medium yang Tepat untuk Menjaga Viabilitas Kedua Mikroba

Viabilitas *Trichoderma harzianum* dan VAM setelah aplikasi sangat dipengaruhi oleh jenis dan kualitas carrier medium yang digunakan. Carrier medium berfungsi sebagai pelindung spora dan inokulum selama penyimpanan maupun aplikasi di lapangan (Hewavitharana et al., 2018). Berbagai jenis carrier telah digunakan, termasuk sekam padi, zeolit, bubur kayu, kompos, dan bentonit.

Carrier organik seperti sekam padi dan kompos memberikan manfaat tambahan berupa suplai nutrisi dan habitat mikro yang mendukung pertumbuhan mikroba. Namun, carrier ini memerlukan pengawasan ketat terhadap kontaminasi patogen (Anuar et al., 2022). Carrier anorganik seperti zeolit dan bentonit memiliki keunggulan dalam hal stabilitas fisik dan daya tahan terhadap perubahan lingkungan, tetapi kurang mampu menyediakan nutrisi untuk pertumbuhan awal mikroba (Haynes et al., 2018).

Pemilihan carrier medium yang tepat harus mempertimbangkan kemampuan menahan air, pH, serta kompatibilitas dengan kedua mikroba. Penggunaan kombinasi carrier organik dan anorganik sering kali memberikan hasil yang lebih baik karena menggabungkan keunggulan kedua jenis material tersebut (Marvasi et al., 2012). Selain itu, proses pengeringan dan sterilisasi carrier harus dilakukan dengan hati-hati untuk menjaga viabilitas spora dan inokulum sebelum digunakan.

Pada penelitian ini guna menguji kemampuan kombinasi kedua agensia hayati tersebut dicerminkan adanya tingkat serangan yang rendah dan tinggi tanaman yang tinggi disbanding dengan perlakuan yang tanpa diberi perlakuan kombinasi. Tingkat serangan *Rigidoporus* sp. yang bersifat menyeluruh yang diamati pada setiap perlakuan di hitung menggunakan rumus sebagai berikut $P = a/b \times 100\%$, dimana P adalah tingkat serangan, a= jumlah tanaman yang sakit setiap perlakuan, b= jumlah tanaman seluruhnya setiap perlakuan. Pengamatan tingkat serangan ini dilakukan setiap minggu selama 8 kali atau 2 bulan. Pegamatan dimulai sebelum diberikan inokulum penyakit hingga penelitian ini selesai yaitu pada minggu ke 8.

Tabel 1. Tinggi Tanaman Bibit Kopi Arabika pada Umur 1 sampai dengan 8 minggu setelah Tanamn (MST) pada berbagai Perlakuan.

Perlakuan	Tinggi tanaman bibit kopi arabika pada umur ...							
	1 MST	2MST	3 MST	4MST	5MST	6MST	7 MST	8 MST
M0 + T0	21,58 abc	23,33 ab	57,8 a	59,8 a	62,8 a	64,8 a	67,8 a	70,8 a
M0 + T10	22,92 abc	23,83 ab	57,9 a	61,2 a	64,2 a	66,2 a	69,2 a	72,2 a
M0 + T15	22,75 abc	23,17 ab	58 a	61,8 a	64,8 a	66,8 a	69,8 a	72,8 a
M0 + T20	19,92 abc	19,5 ab	58,8 a	61,8 a	64,8 a	66,8 a	69,8 a	72,8 a
M50 + T0	17,33 ab	18 ab	63,17 b	70,8 b	73,8 b	75,8 b	78,8 b	81,8 b
M50 + T10	19,75 abc	23,67 ab	65,8 b	70,9 b	73,9 b	75,9 b	78,9 b	81,9 b
M50 + T15	18,83 abc	19,5 ab	65,8 b	73,5 b	76,5 b	78,5 b	81,5 b	84,5 b
M50 + T20	22,83 abc	23,83 ab	68,4 b	72,9 b	75,9 b	77,9 b	80,9 b	83,9 b
M75 + T0	17,17 ab	17,5 a	65,8 b	73,4 b	76,4 b	78,4 b	81,4 b	84,4 b
M75 + T10	23,25 abc	29,67 b	65,9 b	73,8 b	76,8 b	78,8 b	81,8 b	84,8 b
M75 + T15	16,17 a	19,83 ab	67,5 b	72,9 b	75,9 b	77,9 b	80,9 b	83,9 b
M75 + T20	20,42 abc	21,83 ab	68,5 b	73,8 b	76,8 b	78,8 b	81,8 b	84,8 b
M100 + T0	21 abc	24,83 ab	63,8 b	75,8 b	78,8 b	80,8 b	83,8 b	86,8 b
M100 + T10	23,17 abc	21,67 ab	65,9 b	74,8 b	77,8 b	79,8 b	82,8 b	85,8 b
M100 + T15	23,75 bc	24,33 ab	65,8 b	74,8 b	77,8 b	79,8 b	82,8 b	85,8 b
M100 + T20	25,17 c	25,33 ab	65,8 b	75,3 b	78,3 b	80,3 b	83,3 b	86,3 b

Keterangan:

1. T0) : Tanpa Trichoderma, T10 : Trichoderma 10 ml/Tanaman, T15: Trichoderma 15 ml/Tanaman, T20: Trichoderma 20 ml/Tanaman. Faktor ke dua adalah perlakuan Mikoriza terdiri dari 4 level yaitu (M0) : Tanpa Mikoriza, M50 : 50 spora/ Tanaman, M75 : 75 spora Mikoriza / Tanaman, M100: 100 spora Mikoriza/Tanaman
2. Angka2 yang didampingi oleh huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji BNJ pada taraf 5%.

Tabel 2. Tingkat serangan *Rigidoporus* sp (%) pada bibit kopi arabika pada umur pengamatan

Perlakuan	Tingkat serangan <i>Rigidoporus</i> sp (%) pada bibit kopi arabika pada umur...							
	1 MST	2MST	3 MST	4MST	5MST	6MST	7 MST	8 MST
M0 + T0	0 a	0 a	38 b	53 b	56 b	58 b	61 b	83 b
M0 + T10	0 a	0 a	36 b	51 b	54 b	56 b	68 b	75 b
M0 + T15	0 a	0 a	35 b	50 b	53 b	55 b	75 b	83 b
M0 + T20	0 a	0 a	35 b	50 b	53 b	55 b	67 b	87 b
M50 + T0	0 a	0 a	0 a	5 a	7 a	7 a	7 a	7 a
M50 + T10	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a
M50 + T15	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a
M50 + T20	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a
M75 + T0	0 a	0 a	0 a	5 a	5 a	8 a	8 a	8 a
M75 + T10	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a
M75 + T15	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a
M75 + T20	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a
M100 + T0	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a
M100 + T10	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a
M100 + T15	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a
M100 + T20	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a

Keterangan:

1. T0) : Tanpa Trichoderma, T10 : Trichoderma 10 ml/Tanaman, T15: Trichoderma 15 ml/Tanaman, T20:

Trichoderma 20 ml/Tanaman. Faktor ke dua adalah perlakuan Mikoriza terdiri dari 4 level yaitu (M0) : Tanpa Mikoriza, M50 : 50 spora/ Tanaman, M75 : 75 spora Mikoriza / Tanaman, M100: 100 spora Mikoriza/Tanaman

2. Angka2 yang didampingi oleh huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji BNJ pada taraf 5%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian kombinasi antara *Trichoderma harzianum* dan Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) secara sinergis mampu menekan perkembangan penyakit akar putih yang disebabkan oleh *Rigidoporus* sp. pada pembibitan kopi arabika. Hal ini dibuktikan dari penurunan intensitas penyakit, peningkatan kesehatan akar, dan perbaikan pertumbuhan bibit kopi secara keseluruhan. Sebaliknya, perlakuan tunggal menggunakan *Trichoderma harzianum* tidak menunjukkan pengendalian penyakit yang signifikan.

Efektivitas kombinasi tersebut dapat dijelaskan melalui mekanisme kerja yang saling melengkapi antara *Trichoderma harzianum* dan VAM. *Trichoderma* dikenal sebagai agen antagonis yang mampu menghambat pertumbuhan patogen melalui mikoparasitisme, kompetisi ruang dan nutrisi, serta produksi enzim dan metabolit antimikroba namun, pada kondisi lapangan atau media persemaian yang telah terinfestasi kuat oleh *Rigidoporus* sp., kemampuan *Trichoderma* secara tunggal sering kali kurang efektif karena terbatasnya kolonisasi akar serta kompetisi yang ketat di zona perakaran.

Sementara itu, VAM berfungsi memperluas sistem penyerapan akar melalui pembentukan hifa eksternal dan struktur arbuskula, yang meningkatkan penyerapan nutrisi—terutama fosfor—dan memperkuat ketahanan fisiologis tanaman terhadap patogen tanah. Mikoriza juga memicu

sistem pertahanan tanaman melalui induksi resistensi sistemik (ISR), yang meningkatkan produksi senyawa fenolik dan enzim pertahanan.

Kombinasi keduanya tidak hanya memberikan perlindungan fisik dan kimia terhadap patogen, tetapi juga mendukung pertumbuhan dan vitalitas akar yang lebih baik, sehingga tanaman lebih mampu bertahan terhadap tekanan infeksi dari *Rigidoporus* sp. Hal ini sejalan dengan temuan Sulistyowati (2009) yang menyatakan bahwa efektivitas pengendalian penyakit akar putih meningkat signifikan saat agen hayati dikombinasikan dengan agen pendukung fisiologi akar seperti mikoriza.

Kegagalan *Trichoderma* secara tunggal dalam mengontrol penyakit juga dapat disebabkan oleh kondisi lingkungan mikro yang tidak mendukung proliferasi optimal agen antagonis tersebut, seperti kelembaban ekstrem atau tingginya tekanan inokulum patogen. Oleh karena itu, pendekatan integratif dengan melibatkan simbiosis mikoriza memberikan efek perlindungan yang lebih stabil dan berkelanjutan.

Interaksi antara *Trichoderma harzianum* dan Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) di rhizosfer merupakan topik yang semakin mendapat perhatian dalam penelitian mikrobiologi tanah dan biologi tanaman. Kedua mikroba ini memiliki potensi besar untuk bekerja secara sinergis dalam meningkatkan kesehatan tanaman dan mengendalikan penyakit, terutama yang disebabkan oleh patogen tanah. Meskipun pada awalnya dianggap sebagai mikroba yang beroperasi secara independen, studi terbaru menunjukkan bahwa *Trichoderma harzianum* dan VAM dapat saling berinteraksi baik secara langsung maupun tidak langsung melalui berbagai mekanisme fisiologis, kimia, dan genetik.

Interaksi langsung antara *Trichoderma harzianum* dan VAM terjadi melalui kontak fisik antar hifa di sekitar akar tanaman. Dalam beberapa kasus, *Trichoderma* dapat hidup sebagai endofit atau epifit pada jaringan akar yang juga dihuni oleh hifa VAM (Malusa et al., 2007). Kontak fisik tersebut memungkinkan pertukaran metabolit atau pengaruh langsung terhadap pertumbuhan dan aktivitas satu sama lain. Sebaliknya, interaksi tidak langsung lebih banyak terjadi melalui modifikasi lingkungan rhizosfer, seperti perubahan komposisi eksudat akar, produksi senyawa antimikroba, serta pengaruh terhadap komunitas mikroba tanah secara keseluruhan.

Potensi kompetisi atau kolaborasi antara kedua mikroba dalam pemanfaatan substrat dan niche ekologis sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan jenis isolat yang digunakan. Pada beberapa kondisi, *Trichoderma harzianum* dapat bersaing dengan VAM dalam memperoleh nutrisi dari eksudat akar tanaman, terutama karbohidrat yang menjadi sumber energi utama bagi kedua mikroba. Namun, dalam skenario yang lebih sinergis, *Trichoderma* dapat membantu VAM dengan meningkatkan degradasi bahan organik kompleks sehingga tersedia bentuk nutrisi yang lebih mudah diserap oleh jamur mikoriza. Selain itu, *Trichoderma* mampu menghasilkan senyawa yang merangsang pertumbuhan miselia VAM, sehingga meningkatkan luas permukaan absorpsi dan efektivitas simbiosisnya dengan tanaman inang (Cao et al., 2022b).

Pengaruh *Trichoderma harzianum* terhadap perkembangan miselia VAM telah terbukti dalam beberapa penelitian laboratorium dan rumah kaca. Ekstrak atau filtrat kultur *Trichoderma* yang diberikan bersamaan dengan inokulum VAM menunjukkan peningkatan panjang dan percabangan miselia eksternal VAM. Hal ini diduga

disebabkan oleh adanya senyawa fitostimulan atau hormon pertumbuhan seperti auksin dan giberelin yang dihasilkan oleh *Trichoderma*. Sebaliknya, keberadaan VAM juga dapat memengaruhi dinamika populasi dan aktivitas *Trichoderma* di rhizosfer (Shahnaz et al., 2022). Misalnya, eksudat akar yang dimodifikasi oleh simbiosis VAM dapat menciptakan lingkungan mikro yang lebih sesuai bagi pertumbuhan *Trichoderma*, termasuk peningkatan kadar lignin dan selulosa yang dapat menjadi substrat untuk aktivitas enzimatik jamur antagonis tersebut.

Dampak paling signifikan dari dual inoculation *Trichoderma harzianum* dan VAM adalah pada level molekuler tanaman, yaitu modifikasi ekspresi gen dan produksi metabolit sekunder. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa aplikasi kombinasi kedua mikroba dapat memicu ekspresi gen PR (Pathogenesis-Related), yang berperan dalam respons imun sistemik tanaman. Selain itu, terjadi peningkatan sintesis senyawa fenolik, flavonoid, dan lignin yang berkontribusi pada ketahanan tanaman terhadap serangan patogen. Metabolit sekunder seperti asam salisilat dan jasmonat juga meningkat, yang berfungsi sebagai mediator dalam jalur signal transduction yang mengatur respons defensif tanaman. Fenomena ini menunjukkan bahwa sinergi antara *Trichoderma* dan VAM tidak hanya meningkatkan pertumbuhan tanaman secara fisik, tetapi juga memperkuat barisan pertahanan internal tanaman terhadap ancaman penyakit (Pacheco-Trejo et al., 2022).

D. Interaksi dengan Mikrobioma Tanah

1. Pengaruh Mikroba Indigenus dan Kompetitor

Interaksi *Trichoderma harzianum* dan VAM dengan mikrobioma tanah merupakan faktor yang sering diabaikan namun sangat berpengaruh terhadap

keberhasilan sinergi. Mikroba indigenus di tanah, baik yang bersifat netral, kompetitif, maupun mutualistik, dapat memengaruhi kolonisasi, pertumbuhan, dan aktivitas kedua mikroba hayati ini (Jangir et al., 2019).

Mikroba kompetitor, seperti bakteri gram negatif atau jamur saprofit dominan, dapat menghalangi kolonisasi awal *Trichoderma* dan VAM melalui kompetisi nutrisi dan produksi senyawa penghambat (Podnar et al., 2022). Di sisi lain, beberapa mikroba indigenus dapat membantu *Trichoderma* dan VAM melalui produksi senyawa signal transduction atau modifikasi eksudat akar (Poveda et al., 2020). Oleh karena itu, analisis mikrobioma tanah sebelum aplikasi menjadi penting untuk memprediksi potensi keberhasilan sinergi.

Pemanfaatan agen hayati secara selektif, misalnya dengan menggunakan isolat lokal yang adaptif terhadap mikrobioma setempat, dapat meningkatkan peluang kolonisasi dan aktivitas *Trichoderma* dan VAM (Batstone et al., 2020). Selain itu, rotasi tanaman yang menguntungkan atau penggunaan cover crops dapat memodifikasi mikrobioma tanah untuk menciptakan lingkungan yang lebih sesuai bagi kedua mikroba hayati ini.

2. Dinamika Populasi Setelah Aplikasi Kombinasi

Setelah aplikasi, populasi *Trichoderma harzianum* dan VAM di rhizosfer mengalami dinamika yang kompleks. Pada fase awal, viabilitas spora dan inokulum sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan ketersediaan substrat (Ruijten et al., 2020). Jika kondisi mendukung, populasi kedua mikroba akan meningkat secara signifikan dalam beberapa minggu pertama setelah aplikasi (Shkrabak et al., 2020).

Namun, dalam jangka menengah dan panjang, dinamika populasi bisa berubah karena adanya interaksi dengan mikroba lain, persaingan nutrisi, serta respon imun tanaman. Studi menunjukkan bahwa *Trichoderma* dan VAM dapat bertahan di rhizosfer selama beberapa bulan hingga satu musim tanam, tergantung pada faktor lingkungan dan praktik budidaya (Kumar et al., 2021b).

Populasi *Trichoderma* cenderung lebih cepat meningkat karena kemampuannya bereproduksi secara aseksual dan toleransinya terhadap fluktuasi lingkungan. VAM, meskipun lebih lambat dalam kolonisasi, memiliki dampak yang lebih lama karena sifatnya yang obligat biotrofik dan ketergantungannya pada eksudat akar (Gomes et al., 2020). Dinamika ini harus dipertimbangkan dalam perencanaan aplikasi ulangan atau rotasi tanaman untuk mempertahankan populasi mikroba hayati pada level yang optimal.

BAB 6

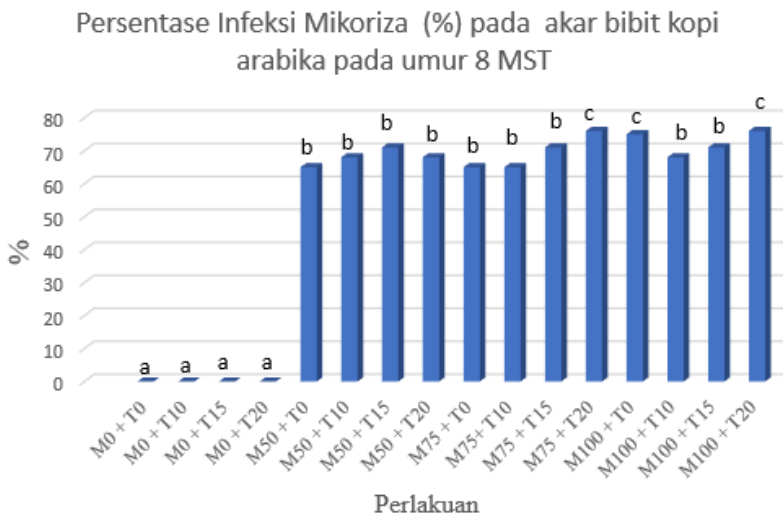
MEKANISME PENGENDALIAN PENYAKIT AKAR PUTIH OLEH *TRICHODERMA HARZIANUM* DAN MIKORIZA

Mekanisme kerja *Trichoderma* dapat dibagi menjadi dua jenis hubungan: “*Trichoderma*-Tanaman” dan “*Trichoderma*-Patogen”; yang paling banyak dikutip adalah mikoparasitisme (serangan langsung jamur patogen lain dengan cara melingkar, menembus, dan mencerna dengan enzim litik), antibiosis (pelepasan senyawa berdifusi dengan berat molekul rendah yang menghambat pertumbuhan patogen bakteri atau jamur), kompetisi (kompetitivitas efektif untuk mendapatkan ruang dan nutrisi yang menyebabkan patogen jamur mati kelaparan), dan resistensi terinduksi (menimbulkan dan mendorong respons pertahanan tanaman yang memicu resistensi sistemik dan resistensi yang diperoleh secara sistemik) (Gambar 12).

6.1 Persentase Infeksi Akar dan Jumlah Spora *Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza* (VAM)

Perhitungan kolonisasi akar oleh FMA dilakukan dengan teknik pewarnaan akar (Koske dan Gemma 1989; Kiheri et al. 2016). Pertama, 10 potong akar sepanjang 1 cm direndam dalam KOH 10% selama 4-5 hari hingga akar tampak bening. Kemudian, potongan akar dicuci dan direndam dalam HCl 2% selama 24 jam. Setelah itu, akar direndam dalam larutan pewarna Trypan Blue selama 24 jam; setiap potongan akar disusun pada slide untuk pengamatan; tingkat kolonisasi didasarkan pada lapang pandang mikroskop. Tanda infeksi FMA pada akar dihitung berdasarkan tanda infeksi FMA yang ditemukan

pada akar (spora, hifa, vesikular, arbuskular) pada ukuran bingkai. Pengamatan infeksi akar oleh FMA dilakukan dengan menggunakan mikroskop majemuk. Variabel pengamatan meliputi keragaman jenis FMA berdasarkan morfologi spora dan tingkat kolonisasi akar akibat penangkapan. Kolonisasi akar dihitung berdasarkan rumus berikut (Deguchi et al. 2017):

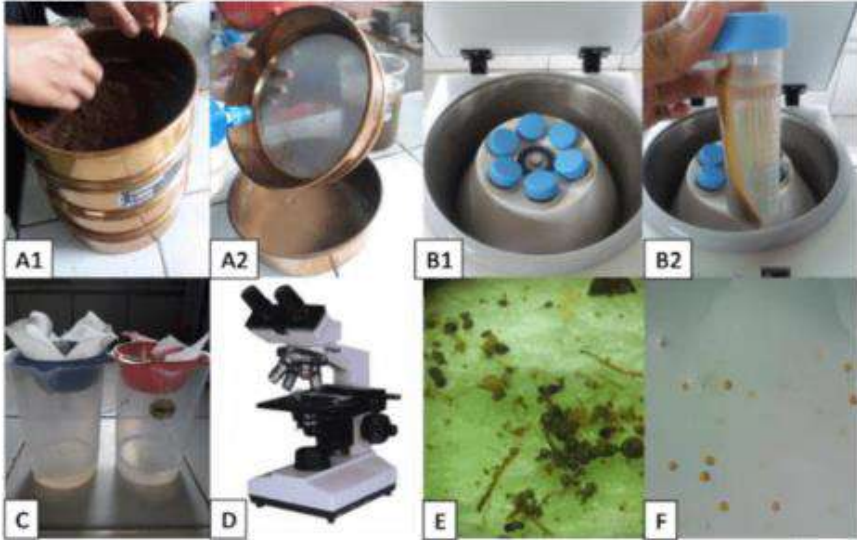


Gambar 8. Persentase Infeksi Mikorisa pada akar Bibit Kopi
Keterangan:

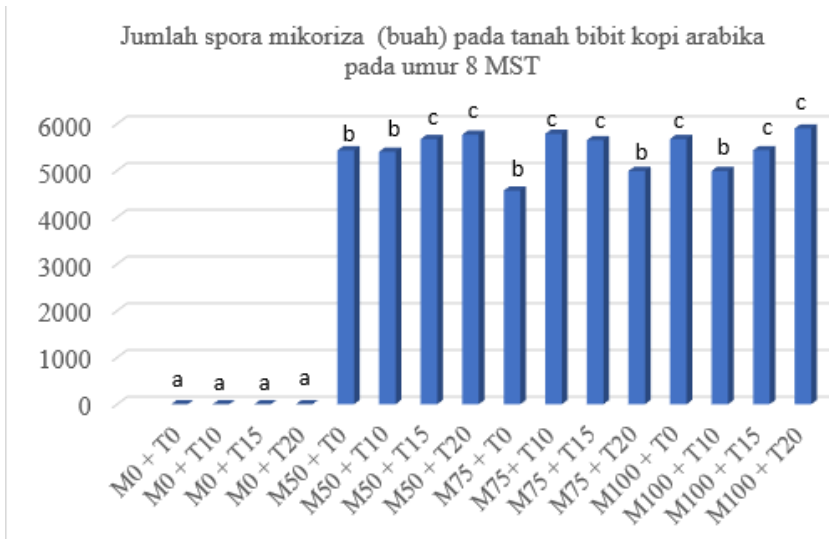
1. T0) : Tanpa Trichoderma, T10 : Trichoderma 10 ml/Tanaman, T15: Trichoderma 15 ml/Tanaman, T20: Trichoderma 20 ml/Tanaman. Faktor ke dua adalah perlakuan Mikoriza terdiri dari 4 level yaitu (M0) : Tanpa Mikoriza, M50 : 50 spora/ Tanaman, M75: 75 spora Mikoriza / Tanaman, M100: 100 spora Mikoriza/Tanaman
2. Angka2 yang didampingi oleh huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji BNJ pada taraf 5%.

6.2 Perhitungan Jumlah Spora Mikoriza di dalam tanah

Ekstraksi spora Proses ekstraksi spora (Gambar 9) dilakukan sebagai berikut. Sampel tanah dan akar ditimbang (100 gr), kemudian ditambahkan air (4 ml/1 gr tanah). Suspensi tanah dan akar digerus menggunakan blender selama 1 menit. Selanjutnya, suspensi tanah dan akar dituang ke dalam saringan bertingkat. Bagian atas merupakan saringan dengan ukuran mata jaring terbesar (500 μm) dan bagian bawah merupakan saringan dengan ukuran mata jaring terkecil (38 μm). Endapan yang dihasilkan di dasar saringan (ukuran lubang terkecil maupun di reservoir) dipindahkan ke dalam gelas piala dengan penambahan air dari botol semprot. Suspensi kemudian diaduk dan dituang ke dalam tabung sentrifus. Suspensi tanah dicampur dengan larutan gula 60% sebanyak dua kali volume suspensi, kemudian disentrifus pada kecepatan 3.000 rpm selama kurang lebih 3 menit. Spora akan mengapung di atas larutan gula atau di atas suspensi bertekstur bening. Selanjutnya, suspensi bening dituang ke permukaan saringan yang telah ditutup dengan kertas saring dan dibersihkan menggunakan air mengalir untuk menghindari lisis spora. Selanjutnya, spora dipindahkan ke cawan petri (Nusantara et al., 2015; Setiawan et al., 2014).



Gambar 9. Ekstraksi spora FMA dari sampel tanah beserta akar kacang tanah. A1–A2. Penyaringan sampel tanah; B1–B2. Sampel tanah disentrifugasi pada kecepatan 3.000 rpm selama 3 menit; C. Hasil sentrifugasi disaring; D. Hasil saringan diamati menggunakan mikroskop; E. Gambar spora yang diamati di bawah mikroskop; F. Pengelompokan FMA berdasarkan bentuk, warna, dan ukuran. (Swandi, Sulyanti and Darnetty, 2024).



Gambar 10. Jumlah Spora Mikoriza pada Tanah Bibit Kopi pada Umur 8MST

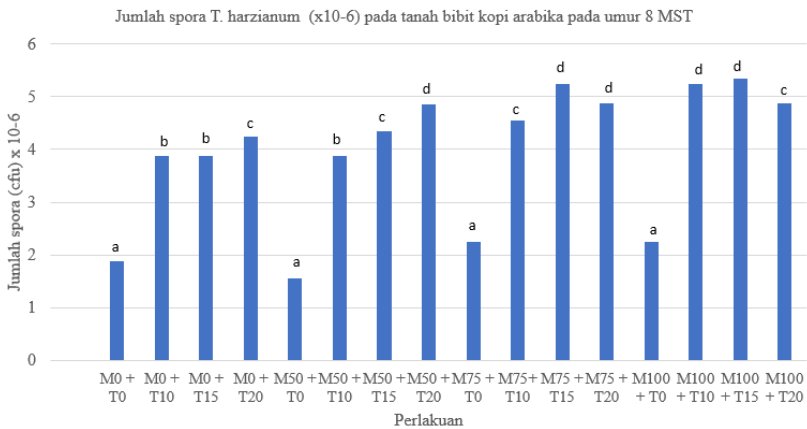
Keterangan:

- 1) T0) : Tanpa Trichoderma, T10 : Trichoderma 10 ml/Tanaman, T15: Trichoderma 15 ml/Tanaman, T20: Trichoderma 20 ml/Tanaman. Faktor ke dua adalah perlakuan Mikoriza terdiri dari 4 level yaitu (M0) : Tanpa Mikoriza, M50 : 50 spora/ Tanaman, M75 : 75 spora Mikoriza / Tanaman, M100: 100 spora Mikoriza/Tanaman
- 2) Angka2 yang didampingi oleh huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji BNJ pada taraf 5%.

6.3 Jumlah Spora Trichoderma harzianum Rifai

Semua tanah pada setiap wadah disuspensikan dalam labu 500 mL dengan 80 mL buffer natrium fosfat 50 mM [pH 7,0], dan diaduk (200 rpm, 1 jam). Subsampel suspensi tanah sebanyak 0,5 mL diencerkan secara serial dalam buffer natrium fosfat 50 mM. Suspensi tanah yang mewakili pengenceran 10^3 dan 10^4 (mengandung 1 dan 0,1 mg tanah) ditanam pada media semi-selektif

Trichoderma (Papavizas, 1981) dengan higromisin B (50 mg mL⁻¹). Setelah inkubasi pada suhu 21 C selama 7 hari, koloni dihitung. Selanjutnya hasil inokulasi dilarutkan dalam aquades steril dan diteteskan pada *haemocytometer* untuk dihitung jumlah spora dengan kerapatan 10⁶ menggunakan *haemocytometer* dan mikroskop cahaya.



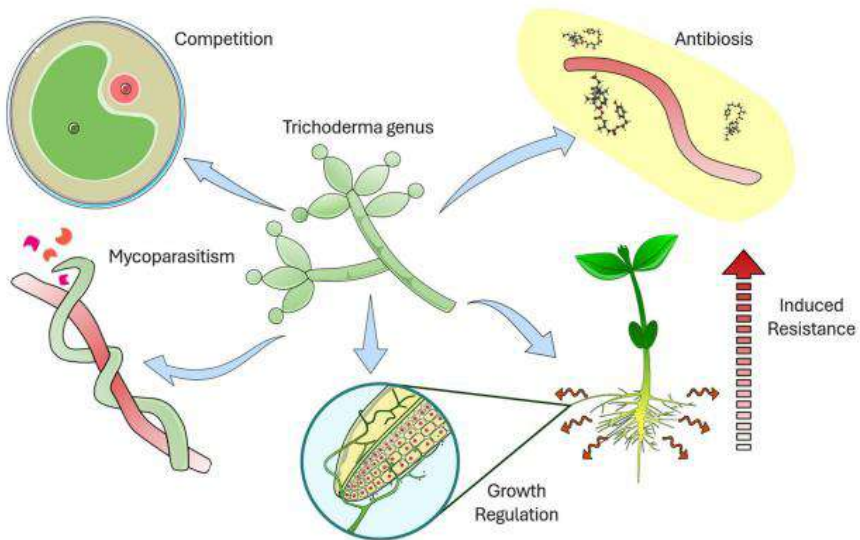
Gambar 11. Jumlah Spora *T. harzianum* pada Tanah Bibit Kopi pada Umur 8 MST

Keterangan:

1. T0) : Tanpa *Trichoderma*, T10 : *Trichoderma* 10 ml/Tanaman, T15: *Trichoderma* 15 ml/Tanaman, T20: *Trichoderma* 20 ml/Tanaman. Faktor ke dua adalah perlakuan Mikoriza terdiri dari 4 level yaitu (M0) : Tanpa Mikoriza, M50 : 50 spora/ Tanaman, M75 : 75 spora Mikoriza / Tanaman, M100: 100 spora Mikoriza/Tanaman
2. Angka2 yang didampingi oleh huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji BNJ pada taraf 5%.

Selain itu, *T. harzianum* dapat memfasilitasi interaksi tanaman-lingkungan, bahkan dari tanaman ke tanaman menggunakan fitohormon, membantu penyerapan nutrisi,

dan meningkatkan manajemen sumber daya internal yang efisien dan respon cerdas terhadap faktor abiotik, sehingga memberikan *Trichoderma* mekanisme pengaturan pertumbuhan. Jamur ini juga dapat menghasilkan fungisida atau zat antara seperti asetamida, dibromosianasetamida, etilamida, etilen glikol, glisin, etanolamida, asam sitrat, asam malat, dan asam o-toluat. Lebih dari 68 metabolit sekunder dengan aktivitas mikroba telah diidentifikasi terkait dengan jamur ini. Hal ini dapat digunakan dalam pembuatan produk alternatif tanpa memerlukan biomassa aslinya. Terakhir, jamur ini juga dapat diaplikasikan dalam pembuatan produk farmasi karena kemampuannya untuk menghasilkan trikosperelin.



Gambar 12. Mekanisme yang diketahui untuk *Trichoderma* digunakan dalam pengendalian hayati dan pertahanan tanaman. (Vindas-Reyes, Chacón-Cerdas and Rivera-Méndez, 2024)

6.4. Mekanisme VAM

1. Penguatan Struktur Jaringan Akar dan Meningkatkan Kapasitas Absorpsi

Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) membentuk simbiosis mutualistik dengan akar tanaman tingkat tinggi, termasuk kopi Arabika (*Coffea arabica* L.). Salah satu manfaat utama dari simbiosis ini adalah penguatan struktur jaringan akar tanaman melalui pembentukan arbuskul dan vesikel di dalam korteks akar. Arbuskul berfungsi sebagai tempat pertukaran nutrisi antara jamur dan tanaman, sementara vesikel berperan sebagai cadangan energi bagi jamur (Nair et al., 2022). Selain itu, jaringan hifa eksternal yang menjalar ke tanah berfungsi sebagai "akar tambahan" yang memperluas zona penyerapan tanaman hingga puluhan kali lebih besar dibandingkan tanaman tanpa VAM (Sylvia, 2019). Hal ini sangat penting dalam kondisi lingkungan dengan ketersediaan fosfor rendah, karena VAM mampu menyerap fosfat dari bentuk mineral yang tidak tersedia bagi tanaman secara langsung.

2. Aktivasi Jalur Signal Transduction Tanaman

VAM tidak hanya meningkatkan penyerapan nutrisi, tetapi juga memengaruhi ekspresi gen dan jalur signal transduction dalam tanaman inang (Shu-cai et., al., 2005).. Kolonisasi VAM memicu aktivasi jalur-jalur pertahanan tanaman seperti jalur salisilat, jasmonat, dan etilen, yang berperan dalam respon imun terhadap patogen. Aktivasi jalur-jalur tersebut meningkatkan produksi senyawa PR-protein, lignin, fitoaleksin, dan senyawa antioksidan yang berkontribusi pada peningkatan ketahanan tanaman terhadap infeksi patogen (Kalischuk et al., 2022). Studi molekuler menunjukkan bahwa tanaman yang diinokulasi

dengan VAM menunjukkan ekspresi gen defensin, glutation peroksidase, dan chitinase yang lebih tinggi dibandingkan tanaman kontrol. Dengan demikian, VAM berperan tidak hanya dalam aspek nutrisi, tetapi juga dalam modulasi respons biotik tanaman terhadap tekanan penyakit.

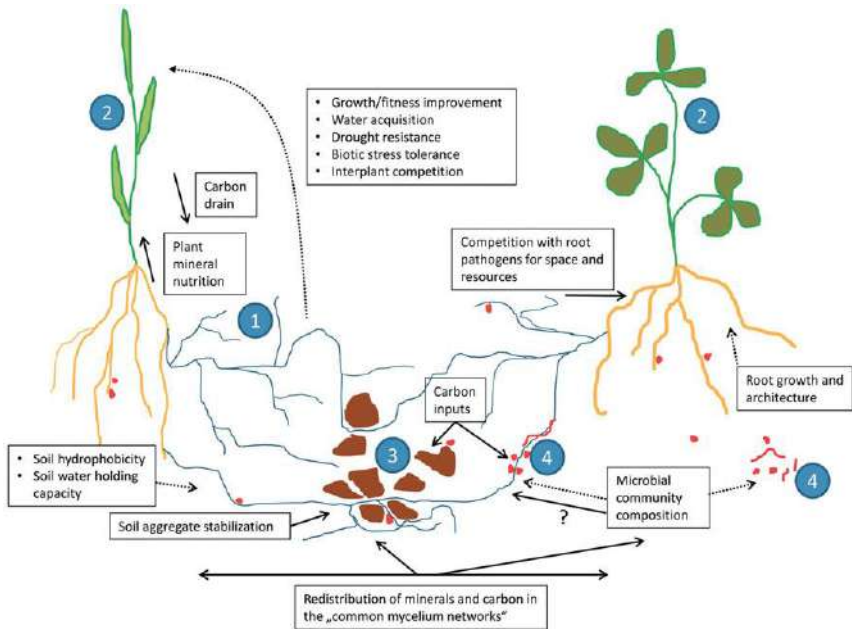
3. Kompetisi Nutrisi dan Eksklusi Ruang Infeksi Patogen

Salah satu mekanisme pengendalian patogen yang dilakukan oleh VAM adalah kompetisi nutrisi dan eksklusi ruang infeksi. Dengan adanya kolonisasi VAM di akar tanaman, patogen tanah akan kesulitan menemukan situs infeksi yang cocok karena permukaan epidermis dan korteks akar telah dipenuhi oleh hifa jamur mikoriza. Selain itu, VAM mampu menyerap nutrisi secara lebih efisien, sehingga mengurangi ketersediaan sumber daya bagi patogen untuk berkembang biak (Easterday et al., 2022). Kompetisi ini sangat efektif dalam mengurangi risiko infeksi awal, terutama pada fase pembibitan tanaman kopi yang masih rentan terhadap serangan penyakit akar putih (*Rigidoporus sp.*).

4. Modifikasi Mikrobioma Rhizosfer Melalui Eksudat Akar

VAM berperan penting dalam modifikasi komunitas mikrobioma rhizosfer melalui perubahan komposisi eksudat akar. Eksudat akar merupakan campuran kompleks senyawa organik seperti gula, asam amino, dan senyawa fenolik yang disekresikan oleh akar tanaman (De Sena et al., 2023). Keberadaan VAM dapat mengubah pola eksudasi tersebut, sehingga menciptakan lingkungan mikro yang lebih mendukung pertumbuhan mikroba bermanfaat dan menghambat perkembangan patogen. Misalnya, beberapa studi menunjukkan bahwa tanaman yang bermitos dengan VAM memiliki eksudat yang lebih

kaya akan senyawa fenolik yang memiliki aktivitas antimikroba (Rajan K. Gupta, 2014). Selain itu, perubahan eksudat akar dapat merangsang pertumbuhan bakteri pelarut fosfat, aktinomisetes, dan mikroba antagonis lainnya yang berkontribusi dalam pengendalian penyakit tanah.



Gambar 13. Representasi skematis dari berbagai fungsi yang dimainkan oleh jamur mikoriza arbuskular (AM) (1) dalam fisiologi dan ekologi tanaman inangnya (2). Hifa mikoriza menghubungkan akar dengan partikel tanah (3), menyediakan koneksi langsung sistem akar berbagai individu tanaman (2), dan berinteraksi dengan sejumlah mikroba tanah (4). Garis padat mewakili efek langsung dan garis putus-putus mewakili efek tidak langsung dari jamur AM pada tanaman, tanah, dan mikroba tanah. (Jansa, Bukovská and Gryndler, 2013).

BAB 7

HAMBATAN DAN TANTANGAN DALAM IMPLEMENTASI SINERGI MIKROBA

7.1. Kendala dalam Formulasi dan Stabilitas Produk Gabungan

Pengembangan produk bioinput berbasis sinergi antara *Trichoderma harzianum* dan Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) menghadapi kendala utama dalam formulasi dan stabilitas selama proses penyimpanan maupun distribusi. Kombinasi dua mikroba dengan karakteristik fisiologis yang berbeda menuntut pendekatan teknologi yang lebih kompleks untuk memastikan viabilitas dan aktivitas biologisnya tetap terjaga hingga di lapangan (Unsoed et al., 2017).

Formulasi gabungan harus mampu menyediakan kondisi lingkungan mikro yang sesuai bagi kedua mikroba, termasuk kadar air, pH, serta ketersediaan substrat karbon dan nitrogen. Namun, kebutuhan nutrisi dan parameter pertumbuhan optimal kedua mikroba sering kali tidak sepenuhnya sejalan (Stamenkovic-Stojanovic et al., 2019). Misalnya, *Trichoderma* lebih toleran terhadap variasi lingkungan dan memiliki siklus hidup yang lebih cepat dibandingkan VAM, yang bersifat obligat biotrofik dan bergantung pada eksudat akar tanaman inang (Subhalakshmi & Singh, 2022).

Selain itu, interaksi antara kedua mikroba dalam formulasi dapat menyebabkan kompetisi atau antagonisme yang mengurangi viabilitas spora dan inokulum. Beberapa isolat *Trichoderma* diketahui menghasilkan metabolit antimikroba yang dapat menghambat perkembangan jamur mikoriza, sehingga diperlukan seleksi ketat terhadap

kombinasi isolat yang benar-benar kompatibel (Marques et al., 2022). Masalah ini semakin kompleks ketika formulasi dilakukan dalam skala industri, di mana kontrol kualitas harus mempertimbangkan masa simpan, stabilitas suhu, serta pengaruh bahan pembawa (*carrier medium*) terhadap daya tahan spora dan propagul VAM (Kurek et al., 2017).

Kendala formulasi juga mencakup kesulitan dalam menjaga keseimbangan antara efektivitas biologis dan praktikalitas produksi. Bahan *carrier* seperti sekam padi, kompos, zeolit, atau bubur kayu harus dipilih secara cermat agar tidak hanya mendukung kelangsungan hidup mikroba, tetapi juga mudah dalam proses aplikasi oleh petani (Florencio et al., 2022). Ketidakefisienan dalam formulasi dapat menyebabkan penurunan kualitas produk, sehingga mengurangi kepercayaan pelaku usaha dan petani terhadap teknologi hayati ini.

7.2. Masalah Kompatibilitas Fisiologis dan Ekologis antar Mikroba

Salah satu tantangan utama dalam implementasi sinergi mikroba adalah kompatibilitas antara *Trichoderma harzianum* dan VAM baik dari segi fisiologis maupun ekologis. Meskipun kedua mikroba ini memiliki potensi sinergis dalam meningkatkan kesehatan tanaman dan mengendalikan patogen, mereka memiliki strategi hidup dan mekanisme interaksi dengan tanaman inang yang berbeda (Hori et al., 2021). Hal ini dapat menyebabkan kompetisi atau konflik dalam memperoleh sumber daya di rhizosfer.

Secara fisiologis, *Trichoderma* merupakan jamur saprofit yang dapat bertahan hidup secara independen di tanah meskipun tanpa tanaman inang, sedangkan VAM merupakan mikroba obligat biotrofik yang tidak dapat hidup tanpa tanaman inang (Woo et al., 2023). Perbedaan ini

membuat kolonisasi awal dan persistensi kedua mikroba dalam media tanam menjadi lebih kompleks. Pada beberapa kasus, *Trichoderma* dapat mengganggu tahap awal kolonisasi VAM melalui produksi senyawa antimikroba atau enzim lisis yang tidak hanya bekerja pada patogen, tetapi juga pada jamur mikoriza (Guo et al., 2019).

Dari perspektif ekologis, keberadaan *Trichoderma* dapat mengubah dinamika mikrobioma tanah dengan cara memodifikasi eksudat akar, menghasilkan senyawa penghambat, atau mengubah struktur fisik dan kimia tanah. Perubahan ini dapat memengaruhi kemampuan VAM dalam membentuk jaringan miselia eksternal dan membangun simbiosis mutualistik dengan tanaman inang (Senkovs et al., 2021). Selain itu, perbedaan waktu respon terhadap kondisi lingkungan antara kedua mikroba dapat menyebabkan ketidaksempurnaan dalam sinkronisasi aktivitas biologisnya (Carey et al., 2018).

Untuk mengatasi masalah kompatibilitas ini, diperlukan uji laboratorium dan rumah kaca yang intensif untuk memilih pasangan isolat yang saling mendukung. Selain itu, formulasi produk gabungan harus dirancang sedemikian rupa sehingga memberikan perlindungan dan stimulasi awal yang cukup untuk memastikan kolonisasi awal yang sukses (Thomloui et al., 2019). Tanpa pemilihan isolat dan desain formulasi yang tepat, sinergi yang diharapkan tidak akan tercapai dan bahkan berpotensi mengurangi efektivitas salah satu atau kedua mikroba tersebut (Noel et al., 2021).

7.3. Kurangnya Standarisasi Metode Aplikasi dan Dosis Optimal

Penerapan sinergi *Trichoderma harzianum* dan VAM dalam budidaya tanaman masih menghadapi tantangan besar dalam hal standarisasi metode aplikasi dan dosis optimal. Di

tingkat lapangan, petani sering kali menghadapi keraguan dalam memilih cara aplikasi yang paling efektif, karena tidak adanya pedoman nasional atau panduan operasional yang baku.

Berbagai teknik aplikasi telah dicoba, mulai dari inokulasi akar, pencampuran dengan media tanam, pelapisan biji, hingga penyiraman setelah tanam (Chai et al., 2022). Namun, efektivitas tiap metode sangat bergantung pada jenis tanaman, fase pertumbuhan, kondisi tanah, dan iklim mikro (Zhao et al., 2023). Kurangnya data empiris dan panduan yang jelas menyebabkan banyak petani menggunakan dosis yang tidak proporsional, sehingga hasilnya tidak maksimal.

Selain itu, tidak ada rekomendasi yang konsisten mengenai dosis optimal dalam bentuk jumlah spora atau unit infeksi VAM per hektar. Variasi ini disebabkan oleh perbedaan isolat, formulasi, dan kondisi lingkungan yang memengaruhi efektivitas biologis (Fendrihan et al., 2016). Akibatnya, banyak petani mengandalkan uji coba sendiri atau rekomendasi informal, yang berpotensi menyebabkan pemborosan input atau kegagalan aplikasi.

Kurangnya standarisasi ini juga memengaruhi kredibilitas produk bioinput di pasar agraris. Produsen dan peneliti belum sepenuhnya sepakat tentang parameter evaluasi yang ideal untuk menilai efektivitas sinergi mikroba (Ptaszek et al., 2023). Hal ini menghambat adopsi luas oleh petani dan mengurangi kepercayaan pelaku agribisnis terhadap teknologi hayati sebagai alternatif pengganti bahan kimia sintetis.

7.4. Keterbatasan Regulasi dan Sertifikasi Produk Bioinput di Tingkat Nasional

Pengembangan dan pemasaran produk bioinput berbasis sinergi *Trichoderma harzianum* dan VAM menghadapi

hambatan signifikan dalam aspek regulasi dan sertifikasi di tingkat nasional. Saat ini, sistem reguler dan mekanisme sertifikasi untuk produk hayati masih didominasi oleh aturan yang lebih cocok untuk bahan kimia sintetis, sehingga tidak sepenuhnya relevan dengan karakteristik mikroba hayati (Sangeetha et al., 2022).

Beberapa negara maju telah memiliki protokol sertifikasi khusus untuk biofungisida dan biofertilizer yang berbasis mikroba. Sayangnya, di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, regulasi belum sepenuhnya mendukung inovasi dalam bidang ini. Keterbatasan regulasi menyebabkan banyak produk hayati tidak dapat masuk ke pasar secara legal atau tidak mendapat perlindungan hukum yang memadai dari penyalahgunaan atau pemalsuan (Kholikov et al., 2023).

Sertifikasi produk hayati juga memerlukan uji lapangan yang panjang dan mahal, terutama untuk membuktikan konsistensi efek sinergis dalam berbagai kondisi lingkungan dan jenis tanaman. Proses ini menjadi hambatan bagi produsen lokal yang tidak memiliki kapasitas riset yang memadai. Akibatnya, banyak formulasi bioinput yang beredar di pasar tanpa dasar ilmiah yang kuat, sehingga efektivitasnya tidak terjamin (Povolo et al., 2022).

Selain itu, kurangnya koordinasi antara lembaga penelitian, produsen, dan instansi pemerintah menyebabkan lambatnya proses registrasi dan pemasaran produk hayati. Regulasi yang ketat namun tidak fleksibel sering kali memperlambat inovasi dan mengurangi insentif bagi pelaku usaha untuk mengembangkan produk berbasis sinergi mikroba hayati (Shim, 2022). Oleh karena itu, penyusunan regulasi yang adaptif, berbasis bukti ilmiah, dan mendukung pengembangan teknologi hayati menjadi penting untuk mendorong adopsi teknologi ini secara luas (Wilson, 2023).

7.5. Perlunya Edukasi dan Pelatihan bagi Petani dan Penyuluh

Implementasi teknologi hayati berbasis sinergi *Trichoderma harzianum* dan VAM tidak hanya bergantung pada kualitas produk, tetapi juga pada tingkat pemahaman dan kapasitas pelaku lapangan dalam mengaplikasikannya secara tepat. Salah satu hambatan utama dalam adopsi teknologi ini adalah rendahnya tingkat edukasi dan pelatihan bagi petani dan penyuluh lapangan terkait prinsip-prinsip dasar, manfaat, serta cara aplikasi bioinput berbasis mikroba (Poveda & Eugui, 2022).

Petani umumnya lebih akrab dengan penggunaan pupuk kimia dan pestisida sintetis yang hasilnya terlihat lebih cepat dan lebih nyata. Sebaliknya, produk hayati memerlukan waktu yang lebih lama untuk menunjukkan dampaknya, sehingga banyak petani merasa bahwa investasi dalam bioinput hayati kurang menguntungkan secara langsung. Minimnya pemahaman tentang mekanisme kerja mikroba hayati juga menyebabkan kesalahan dalam aplikasi, seperti penggunaan carrier medium yang tidak sesuai atau waktu aplikasi yang tidak tepat (Seenivasagan & Babalola, 2021).

Penyuluh pertanian juga sering kali tidak memiliki pengetahuan yang memadai untuk memberikan rekomendasi yang tepat kepada petani. Kurikulum pelatihan penyuluh yang belum memasukkan topik mikrobiologi tanah dan pengelolaan hayati secara lengkap menjadi salah satu faktornya. Akibatnya, informasi yang sampai ke petani sering kali tidak akurat atau tidak lengkap, sehingga mengurangi potensi keberhasilan aplikasi (Andersson & Orgill, 2019).

Untuk mengatasi hambatan ini, program pelatihan dan penyuluhan berkelanjutan harus dikembangkan dengan pendekatan partisipatif. Materi pelatihan harus mencakup

prinsip dasar mikrobiologi tanah, manfaat sinergi mikroba hayati, cara aplikasi yang benar, serta interpretasi gejala lapangan terkait keberhasilan atau kegagalan aplikasi. Kemitraan antara institusi penelitian, pemerintah daerah, dan penyuluh swasta menjadi penting untuk memperluas jangkauan edukasi (Drohan, 2017).

Program demplot atau demonstrasi plot di tingkat kelompok tani juga dapat digunakan sebagai sarana pembelajaran langsung bagi petani. Melalui pendekatan langsung dan pengamatan visual, petani dapat memahami manfaat teknologi hayati secara lebih konkret. Edukasi yang tepat dan kontinu menjadi kunci untuk meningkatkan minat, kepercayaan, dan kapasitas petani dalam mengadopsi teknologi hayati secara efektif (Yoo & Chavas, 2023).

7.6. Hambatan dalam Pengembangan Infrastruktur Pendukung dan Rantai Pasok

Selain kendala internal terkait formulasi dan edukasi, implementasi sinergi mikroba hayati juga terganjal oleh keterbatasan infrastruktur pendukung dan rantai pasok yang tidak memadai. Produksi, distribusi, dan penyimpanan produk hayati memerlukan fasilitas dan prosedur khusus yang sering kali tidak tersedia di wilayah pedesaan atau daerah terpencil (Yoo & Chavas, 2023).

Produksi massal spora *Trichoderma* dan inokulum VAM memerlukan fasilitas laboratorium dan rumah kaca yang memadai, yang tidak dimiliki oleh semua produsen lokal. Kapasitas produksi yang terbatas menyebabkan harga produk hayati menjadi relatif tinggi, sehingga sulit dijangkau oleh petani kecil. Selain itu, distribusi produk hayati memerlukan pengaturan suhu dan kelembapan yang stabil untuk menjaga viabilitas mikroba, tetapi infrastruktur

pendinginan atau gudang penyimpanan yang memadai belum tersedia secara luas (V. Prakash & Basu, 2020).

Rantai pasok yang tidak efisien juga menyebabkan keterlambatan distribusi dan penurunan kualitas produk sebelum sampai ke tangan petani. Spora *Trichoderma* dan propagul VAM rentan terhadap paparan panas, kelembapan tinggi, dan radiasi ultraviolet, sehingga produk harus disimpan dalam kondisi yang terkendali. Namun, dalam praktiknya, banyak produk hayati dijual di pasar tradisional tanpa perlindungan khusus, sehingga efektivitasnya menurun secara signifikan (Locatelli et al., 2018).

Selain itu, kurangnya integrasi antara produsen, distributor, dan petani menyebabkan informasi mengenai cara penyimpanan, penggunaan, dan dosis aplikasi tidak sampai dengan baik. Ini menyebabkan banyak petani menerima produk yang sudah tidak aktif atau tidak mengetahui cara aplikasi yang benar, sehingga hasil yang diharapkan tidak tercapai (Prashanthi et al., 2022). Pembangunan jaringan distribusi yang lebih terintegrasi dan dukungan pemerintah dalam penyediaan sarana penyimpanan yang memadai menjadi langkah penting dalam mempercepat adopsi teknologi hayati berbasis sinergi mikroba.

7.7. Keterbatasan Data Lapangan dan Rekomendasi Teknis yang Belum Lengkap

Meskipun banyak studi laboratorium dan rumah kaca yang membuktikan potensi sinergi *Trichoderma harzianum* dan VAM, ketersediaan data lapangan yang representatif masih terbatas. Kurangnya data lapangan menyebabkan minimnya rekomendasi teknis yang dapat dijadikan acuan oleh petani dalam penerapan teknologi hayati ini secara luas dan konsisten (Balakrishnan et al., 2017).

Data lapangan yang memadai harus mencakup berbagai variabel seperti respons tanaman pada berbagai jenis tanah, curah hujan, sistem budidaya, dan tekanan penyakit di lapangan. Tanpa data ini, sulit bagi peneliti dan penyuluh untuk memberikan rekomendasi spesifik lokasi yang dapat menjamin keberhasilan aplikasi. Selain itu, variabilitas genetik dalam isolat mikroba hayati juga menjadi faktor yang memengaruhi hasil di lapangan, sehingga diperlukan uji silang antar isolat dan lokasi (Klasek et al., 2022).

Keterbatasan data lapangan juga menyulitkan produsen dalam mengembangkan klaim produk yang akurat dan bisa diverifikasi. Hal ini menyebabkan banyak produk hayati gagal memperoleh kepercayaan pasar karena hasil yang tidak konsisten. Perlunya pendekatan penelitian multi-lokasi yang melibatkan kemitraan antara universitas, lembaga penelitian, dan kelompok tani menjadi penting untuk memperkuat basis data lapangan (Yuanjing & Yunfei, 2023).

Tanpa data yang memadai, kebijakan publik dan program pengembangan juga sulit dirancang secara efektif. Oleh karena itu, investasi dalam penelitian lapangan, pelatihan penyuluh, serta jejaring penelitian dan pengembangan menjadi esensial untuk mengatasi hambatan ini dan mempercepat adopsi teknologi hayati di tingkat petani (Brenya et al., 2022).

BAB 8

REKOMENDASI DAN PROSPEK PENELITIAN MENDATANG

8.1. Pentingnya Penelitian Lebih Lanjut untuk Mengidentifikasi Isolat *Trichoderma* dan VAM yang Memiliki Potensi Sinergi Tinggi.

Pengembangan teknologi hayati berbasis sinergi antara *Trichoderma harzianum* dan Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM) memerlukan penelitian lebih lanjut untuk mengidentifikasi isolat-isolat mikroba yang benar-benar memiliki potensi sinergis tinggi. Meskipun kedua mikroba ini secara umum dikenal memiliki kemampuan dalam meningkatkan kesehatan tanaman dan mengendalikan penyakit, efektivitasnya sangat bervariasi tergantung pada karakteristik genetik dan fisiologis masing-masing isolat (Eslahi et al., 2022).

Penelitian harus difokuskan pada uji coba laboratorium dan rumah kaca yang sistematis untuk mengevaluasi kompatibilitas antara berbagai isolat *Trichoderma* dan VAM. Parameter yang perlu dievaluasi mencakup viabilitas spora dan propagul, kapasitas kolonisasi akar, produksi metabolit sekunder, serta aktivitas antagonis terhadap patogen tanah seperti *Rigidoporus sp.*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, dan *Pythium* (Vipul et al., 2015). Dengan pendekatan selektif, isolat-isolat yang saling melengkapi dalam hal mekanisme kerja dan kebutuhan lingkungan dapat diidentifikasi dan dikembangkan menjadi formulasi bio-input yang lebih efektif (Petrillo et al., 2021).

Selain itu, pengujian interaksi antar mikroba dalam media berbeda dan kondisi lingkungan yang bervariasi akan membantu memahami dinamika sinergi mereka sebelum

diuji di lapangan (Schreier et al., 2023). Uji silang antar isolat dari berbagai sumber geografis juga penting untuk memastikan adaptasi mikroba terhadap kondisi setempat, sehingga meningkatkan peluang keberhasilan aplikasi di berbagai wilayah budidaya. Tanpa identifikasi dan pemilihan isolat yang tepat, sinergi yang diharapkan tidak akan tercapai secara optimal (Giraud et al., 2017).

8.2. Pengembangan Formulasi Bio-Input Berbasis Kombinasi Mikroba yang Stabil dan Ramah Lingkungan

Salah satu tantangan utama dalam penerapan sinergi *Trichoderma harzianum* dan VAM adalah pengembangan formulasi bio-input yang stabil, efektif, dan ramah lingkungan. Produk hayati berbasis mikroba harus dirancang sedemikian rupa agar spora *Trichoderma* dan propagul VAM tetap viabel selama penyimpanan, distribusi, dan aplikasi di lapangan. Hal ini memerlukan pendekatan inovatif dalam penggunaan carrier medium, stabilisator biologis, serta metode pengemasan yang sesuai dengan karakteristik fisik dan kimia mikroba hayati (Martínez et al., 2023).

Formulasi yang ideal harus mampu menjaga viabilitas mikroba dalam jangka waktu yang cukup panjang, biasanya minimal 6–12 bulan (Teixidó et al., 2020). Carrier organik seperti sekam padi, serbuk kayu, atau kompos memberikan manfaat tambahan berupa suplai nutrisi dan habitat mikro yang mendukung pertumbuhan awal mikroba (Ghadimi et al., 2021). Namun, carrier jenis ini rentan terhadap kontaminasi jamur patogen jika tidak diproses dengan baik. Sebaliknya, carrier anorganik seperti zeolit dan bentonit memiliki stabilitas tinggi namun kurang mampu menyediakan substrat nutrisi bagi mikroba hayati (Gong et al., 2022).

Oleh karena itu, kombinasi antara carrier organik dan anorganik sering kali memberikan hasil yang lebih baik (Wojciechowska, 2022). Selain itu, perlakuan sterilisasi atau pasteurisasi pada carrier menjadi penting untuk memastikan produk bebas kontaminasi. Proses pembuatan formulasi juga harus memperhatikan parameter suhu, pH, kadar air, dan aerasi, yang semuanya memengaruhi kelangsungan hidup dan aktivitas biologis mikroba (Maheshwari et al., 2015).

Dalam konteks keberlanjutan, pengembangan formulasi yang ramah lingkungan menjadi prioritas utama. Penggunaan bahan baku lokal, minim limbah, serta proses produksi yang rendah emisi menjadi aspek penting dalam desain produk hayati masa depan (Phadke et al., 2021). Selain itu, formulasi harus mudah digunakan oleh petani, baik dalam bentuk bubuk, granula, atau cairan, dengan metode aplikasi yang fleksibel dan tidak memerlukan alat khusus.

Inovasi dalam formulasi bio-input juga harus mempertimbangkan faktor ekonomi dan skalabilitas. Produksi massal yang efisien dan biaya rendah akan meningkatkan akses petani ke teknologi hayati ini, terutama di daerah pedesaan. Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan formulasi mikroba hayati harus dilakukan secara multidisiplin, melibatkan ahli mikrobiologi, teknologi pangan, dan rekayasa proses untuk menciptakan produk yang efektif, efisien, dan ramah lingkungan (Rojas-Sánchez et al., 2022).

8.3. Integrasi Sinergi Mikroba dengan Praktik Budidaya Berkelanjutan Seperti Pertanian Organik dan Sistem Agroforestri

Keberhasilan implementasi sinergi *Trichoderma harzianum* dan VAM tidak hanya bergantung pada kualitas

mikroba dan formulasi produk, tetapi juga pada bagaimana teknologi ini terintegrasi dalam sistem budidaya yang lebih luas. Salah satu strategi penting dalam memaksimalkan efek sinergis adalah integrasi dengan praktik budidaya berkelanjutan seperti pertanian organik dan sistem agroforestri (Alghuthaymi et al., 2022).

Dalam pertanian organik, penggunaan bahan organik sebagai pupuk dan pengatur struktur tanah sangat mendukung perkembangan mikroba hayati. Bahan organik meningkatkan retensi air, aerasi, serta ketersediaan karbon dan nitrogen yang esensial bagi pertumbuhan *Trichoderma* dan VAM. Selain itu, pengurangan penggunaan pestisida sintesis dalam pertanian organik menciptakan lingkungan yang lebih kondusif bagi mikrobioma tanah, termasuk mikroba hayati yang sensitif terhadap bahan kimia (Nam et al., 2023).

Sistem agroforestri, yang menggabungkan tanaman berkayu dengan tanaman pertanian tahunan atau musiman, juga menawarkan peluang besar untuk pemanfaatan sinergi mikroba hayati. Keberadaan tanaman penutup tanah atau pohon pelindung meningkatkan kelembapan rhizosfer, mengurangi erosi, serta menciptakan mikrohabitat yang mendukung pertumbuhan mikroba bermanfaat. Interaksi antara tanaman utama dan tanaman penutup tanah dapat memodifikasi eksudat akar, sehingga meningkatkan respons simbiosis VAM dan aktivitas antagonis *Trichoderma* (Wang et al., 2022).

Integrasi sinergi mikroba hayati dengan praktik budidaya berkelanjutan memerlukan pendekatan holistik yang mempertimbangkan interaksi antara tanaman, tanah, dan lingkungan. Kolaborasi antara ilmuwan, penyuluh, dan petani menjadi penting untuk mengembangkan panduan

praktis yang dapat diadopsi secara luas. Penerapan konsep ini tidak hanya meningkatkan produktivitas tanaman, tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan ekosistem pertanian dalam jangka panjang (Singh Rawat et al., 2022).

8.4. Pemanfaatan Teknologi Biologi Molekuler untuk Rekayasa Strain dengan Performa Lebih Baik

Kemajuan dalam bidang biologi molekuler membuka peluang besar untuk merekayasa strain *Trichoderma harzianum* dan VAM yang memiliki performa lebih baik dalam meningkatkan ketahanan tanaman dan mengendalikan penyakit. Teknologi seperti analisis genomik, proteomik, dan metabolomik memungkinkan identifikasi gen, protein, dan senyawa aktif yang berkontribusi pada efektivitas mikroba hayati (Schalamun & Schmoll, 2022).

Melalui pendekatan omics, peneliti dapat memahami mekanisme molekuler yang mendasari interaksi antara *Trichoderma*, VAM, dan tanaman inang. Misalnya, gen-gen yang terlibat dalam produksi enzim lisis, antibiosis, atau induksi ketahanan sistemik (ISR) pada *Trichoderma* dapat dimanipulasi untuk meningkatkan efisiensi biologisnya. Demikian pula, gen yang berperan dalam pembentukan arbuskul dan vesikel pada VAM dapat dioptimalkan untuk meningkatkan kapasitas absorpsi nutrisi dan toleransi terhadap stres lingkungan (Medeiros et al., 2022).

Selain itu, rekayasa genetik atau seleksi alami menggunakan marker-assisted breeding dapat digunakan untuk mengembangkan strain *Trichoderma* dan VAM yang lebih toleran terhadap fluktuasi lingkungan, seperti suhu tinggi, pH ekstrem, atau tekanan logam berat. Pendekatan ini juga dapat digunakan untuk meningkatkan kompatibilitas

antar mikroba, sehingga mengurangi risiko kompetisi atau antagonisme dalam formulasi gabungan (J. Singh et al., 2021).

Pemanfaatan teknologi CRISPR-Cas9 dan RNA interference (RNAi) menawarkan kemungkinan untuk memodifikasi ekspresi gen secara presisi guna meningkatkan sifat-sifat yang diinginkan pada mikroba hayati. Meskipun masih terbatas pada tahap eksplorasi, pendekatan ini berpotensi menghasilkan strain mikroba dengan performa superior dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman dan mengendalikan penyakit secara hayati (Dharajiya et al., 2022).

Namun, pemanfaatan teknologi molekuler ini harus diiringi dengan studi keamanan hayati yang menyeluruh untuk memastikan bahwa modifikasi genetik tidak menimbulkan dampak negatif pada ekosistem atau manusia. Regulasi dan edukasi publik juga menjadi penting untuk membangun kepercayaan masyarakat terhadap penggunaan mikroba rekayasa dalam pertanian (Zeng et al., 2022).

8.5. Kolaborasi Multidisiplin antara Ahli Mikrobiologi, Agronomi, Ekofisiologi, dan Ekonomi Pertanian

Pengembangan dan penerapan sinergi *Trichoderma harzianum* dan VAM dalam pengelolaan kesehatan tanah dan pengendalian penyakit memerlukan pendekatan kolaboratif yang melibatkan berbagai disiplin ilmu. Sinergi mikroba hayati bukan hanya isu mikrobiologi, tetapi juga melibatkan agronomi, ekofisiologi tanah, ekonomi pertanian, serta sosialisasi teknologi kepada pelaku usaha dan petani (Chand Kumhar & Nath Gupta, 2022).

Ahli mikrobiologi bertugas untuk memilih isolat yang kompatibel, menilai interaksi antar mikroba, serta mengembangkan formulasi yang efektif. Di sisi lain, pakar agronomi memegang peran penting dalam merancang

metode aplikasi yang sesuai dengan sistem budidaya, jenis tanaman, dan fase pertumbuhan tanaman. Mereka juga mengembangkan rekomendasi dosis dan waktu aplikasi yang optimal untuk memastikan efektivitas teknologi hayati di lapangan (Theresa & Radhakrishnan, 2021).

Ekofisiologi tanah berkontribusi dalam memahami dinamika mikrobioma tanah pasca-aplikasi, serta dampak jangka panjang terhadap kesuburan tanah dan siklus nutrisi. Pemahaman tentang bagaimana sinergi mikroba hayati berinteraksi dengan mikroflora indigenus dan mengubah ekosistem rhizosfer menjadi dasar penting dalam penerapan teknologi ini secara berkelanjutan (Bhattacharyya & Furtak, 2022).

Di sisi lain, ekonomi pertanian memberikan perspektif penting dalam aspek kelayakan ekonomi, biaya produksi, harga jual, dan daya saing produk hayati terhadap bahan kimia sintetis. Analisis cost-benefit dan model bisnis yang layak menjadi prasyarat penting dalam adopsi teknologi hayati oleh produsen dan petani. Selain itu, studi pasar dan perilaku konsumen diperlukan untuk memahami permintaan dan preferensi terhadap produk pertanian yang ramah lingkungan (Haniotis, 2001).

Kolaborasi lintas-disiplin ini menjadi kunci dalam mengatasi hambatan-hambatan teknis dan non-teknis dalam penerapan teknologi hayati. Tim peneliti, produsen, regulator, penyuluh, dan petani harus terlibat aktif dalam setiap tahap pengembangan dan penerapan teknologi ini. Integrasi keahlian dari berbagai bidang akan memastikan bahwa sinergi mikroba hayati tidak hanya efektif secara biologis, tetapi juga layak secara ekonomi dan dapat diterima oleh masyarakat pertanian (Mukherjee et al., 2021).

8.6. Peningkatan Kapasitas Petani dan Penyuluh Melalui Pelatihan dan Penyuluhan Berkelanjutan

Untuk memastikan adopsi teknologi hayati secara luas dan efektif, dibutuhkan peningkatan kapasitas petani dan penyuluh melalui pelatihan dan penyuluhan berkelanjutan. Program pelatihan harus dirancang untuk memberikan pemahaman menyeluruh tentang prinsip dasar mikrobiologi tanah, manfaat sinergi mikroba hayati, serta cara aplikasi yang tepat. Penyuluhan harus mencakup demonstrasi langsung di lapangan, sehingga petani dapat melihat sendiri manfaat teknologi hayati secara nyata. Materi penyuluhan harus disampaikan dalam bahasa yang mudah dipahami, dengan pendekatan partisipatif yang melibatkan kelompok tani dan penyuluh lapangan. Penguatan jejaring penyuluh dan peneliti juga penting untuk memastikan informasi yang sampai ke petani akurat dan relevan dengan kondisi setempat (Shivamurthy & Madhushree, 2022).

Program pelatihan juga harus mencakup aspek teknis seperti cara penyimpanan produk hayati, teknik aplikasi yang tepat, serta interpretasi gejala lapangan terkait keberhasilan atau kegagalan aplikasi. Dengan demikian, petani tidak hanya menjadi pengguna teknologi, tetapi juga mitra aktif dalam evaluasi dan perbaikan penerapan teknologi hayati di lapangan. Selain itu, program pelatihan harus dirancang untuk menyoal generasi muda pertanian, termasuk mahasiswa, tenaga penyuluh, dan wirausaha muda di bidang pertanian. Dengan membangun basis pengetahuan dan kapasitas yang kuat, Indonesia dapat membangun ekosistem pertanian yang berkelanjutan dan mandiri dalam pengelolaan kesehatan tanah dan tanaman.

8.7. Penguatan Infrastruktur Riset dan Jaringan Distribusi Produk Hayati

Pengembangan teknologi hayati berbasis sinergi mikroba tidak hanya bergantung pada inovasi ilmiah, tetapi juga pada ketersediaan infrastruktur penelitian dan rantai distribusi yang memadai. Laboratorium mikrobiologi tanah, rumah kaca penelitian, serta fasilitas produksi skala pilot menjadi sarana penting dalam pengembangan formulasi hayati yang stabil dan efektif (Dheeman et al., 2023).

Infrastruktur penelitian harus didukung oleh peralatan analisis molekuler, fasilitas uji lapangan, serta database isolat mikroba hayati yang dapat digunakan untuk pemetaan dan seleksi cepat. Fasilitas penelitian yang memadai akan mempercepat pengembangan strain unggul dan formulasi bio-input yang sesuai dengan kondisi lokal.

Di sisi distribusi, penguatan jaringan rantai dingin dan gudang penyimpanan yang memenuhi syarat biologis menjadi penting untuk menjaga viabilitas mikroba hayati selama distribusi. Pemerintah dan lembaga penelitian harus bermitra dengan produsen dan distributor untuk membangun sistem distribusi yang aman dan efisien. Akses petani ke produk hayati harus ditingkatkan melalui subsidi, pelatihan, serta dukungan regulasi yang mendukung pengembangan industri hayati nasional (Arjjumend & Koutouki, 2020).

Selain itu, penguatan jejaring antar lembaga penelitian, universitas, dan kelompok tani menjadi penting untuk mempercepat adopsi teknologi. Diseminasi hasil penelitian melalui pelatihan, workshop, dan publikasi teknis dapat mempercepat transfer pengetahuan dari laboratorium ke lahan produksi.

8.8. Peningkatan Regulasi dan Perlindungan Hukum bagi Produk Hayati

Penerapan teknologi hayati berbasis sinergi mikroba hayati memerlukan kerangka regulasi yang mendukung. Saat ini, banyak produk hayati belum sepenuhnya mendapat perlindungan hukum yang memadai, sehingga rentan terhadap pemalsuan, distribusi ilegal, dan kurangnya kontrol kualitas. Oleh karena itu, penguatan regulasi menjadi penting untuk memastikan produk yang beredar di pasar memiliki standar mutu yang terjamin. Regulasi harus mencakup protokol sertifikasi yang transparan dan berbasis bukti ilmiah, sehingga produk hayati dapat diakses secara legal dan diakui oleh petani. Pemerintah harus berkolaborasi dengan lembaga penelitian dan produsen untuk menyusun standar nasional yang relevan dengan karakteristik mikroba hayati, termasuk parameter viabilitas, aktivitas biologis, dan persistensi di lapangan (Kononets & Treiblmaier, 2021).

Perlindungan hukum juga penting untuk mendorong investasi dalam penelitian dan pengembangan teknologi hayati. Hak intelektual atas isolat unggul atau formulasi khusus harus diakui untuk mendorong inovasi dan perlindungan kekayaan intelektual lokal. Dengan regulasi yang kuat dan transparan, industri hayati nasional dapat berkembang secara berkelanjutan dan berdaya saing internasional.

BAB 9

PENUTUP

Aplikasi *Trichoderma harzianum* Rifai dalam menghambat perkembangan penyakit akar putih (*Rigidoporus* sp.) pada fase pembibitan kopi arabika kurang efektif

Kolonisasi *Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza* (VAM) mempengaruhi pertumbuhan dan ketahanan bibit kopi arabika terhadap patogen tular tanah.

Terdapat interaksi dan potensi sinergis antara *T. harzianum* dan VAM dalam sistem pengendalian hayati terhadap penyakit akar putih dan peningkatan kualitas bibit kopi.

GLOSARIUM

Istilah	Definisi
Akar Putih	Penyakit tanaman yang disebabkan oleh jamur patogen <i>Rigidoporus</i> sp., menyerang sistem perakaran dan menyebabkan pembusukan akar yang ditandai dengan adanya miselium putih.
Coffea arabica	Jenis tanaman kopi yang berasal dari Etiopia dan dikenal memiliki cita rasa tinggi serta kadar kafein yang lebih rendah dibanding kopi robusta.
Efektivitas	Tingkat keberhasilan suatu perlakuan atau agen dalam mencapai tujuan yang diinginkan, misalnya pengendalian penyakit tanaman.
Fungi Mikoriza	Jamur yang bersimbiosis dengan akar tanaman, meningkatkan serapan air dan nutrisi serta membantu ketahanan tanaman terhadap stres abiotik dan biotik.
Inokulasi	Proses penambahan mikroorganisme (seperti mikoriza atau jamur antagonis) ke lingkungan tumbuh tanaman untuk tujuan perlindungan atau peningkatan pertumbuhan.
Jamur Antagonis	Jamur yang dapat menghambat atau menekan pertumbuhan jamur patogen tanaman, seperti <i>Trichoderma harzianum</i> .

Istilah	Definisi
Miselium	Struktur vegetatif dari jamur berupa jaringan benang-benang halus (hifa) yang berfungsi dalam penyerapan nutrisi.
Patogen Tanaman	Organisme penyebab penyakit pada tanaman, dapat berupa jamur, bakteri, virus, atau nematoda.
Pembibitan	Tahapan awal dalam budidaya tanaman di mana benih disemai dan dirawat hingga menjadi bibit siap tanam.
<i>Rigidoporus</i> sp.	Genus jamur patogen penyebab penyakit akar putih pada tanaman berkayu, termasuk kopi, karet, dan kakao.
Simbiosis Mikoriza	Hubungan mutualistik antara jamur mikoriza dan akar tanaman yang menguntungkan kedua belah pihak.
<i>Trichoderma harzianum</i>	Spesies jamur tanah yang berfungsi sebagai agen hayati karena mampu menghambat patogen tanaman melalui kompetisi, antibiosis, dan mikoparasitisme.
Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM)	Kelompok mikoriza yang membentuk struktur vesikula dan arbuskula di dalam sel akar tanaman, membantu penyerapan unsur hara, terutama fosfor.
Pengendalian Hayati	Upaya pengurangan populasi organisme pengganggu tanaman dengan memanfaatkan musuh alami, seperti agen hayati jamur atau bakteri.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdenaceur, R., Farida, B., Mourad, D., Rima, H., Zahia, O., & Fatma, S.-H. (2022). Effective biofertilizer *Trichoderma* spp. isolates with enzymatic activity and metabolites enhancing plant growth. *International Microbiology*, 25(4), 817–829. <https://doi.org/10.1007/s10123-022-00263-8>
- Aberathna, A. A. A. U., Satharasinghe, D. A., Jayasooriya, A. P., Jinadasa, R. N., Manopriya, S., Jayaweera, B. P. A., Fernando, C. A. N., Weerathilake, W. A. D. V., Prathapasinghe, G. A., Liyanage, J. A., & Premarathne, J. M. K. J. K. (2022). Increasing the Bioavailability of Phosphate by Using Microorganisms. *International Journal of Agronomy*, 2022, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2022/4305501>
- Adetunji, C. O., & Varma, A. (2020). *Biotechnological Application of Trichoderma: A Powerful Fungal Isolate with Diverse Potentials for the Attainment of Food Safety, Management of Pest and Diseases, Healthy Planet, and Sustainable Agriculture* (pp. 257–285). https://doi.org/10.1007/978-3-030-54758-5_12
- Alghuthaymi, M. A., Abd-Elsalam, K. A., AboDalam, H. M., Ahmed, F. K., Ravichandran, M., Kalia, A., & Rai, M. (2022). *Trichoderma: An Eco-Friendly Source of Nanomaterials for Sustainable Agroecosystems*. *Journal of Fungi*, 8(4), 367. <https://doi.org/10.3390/jof8040367>
- Andersson, K. O., & Orgill, S. E. (2019). Soil extension needs to be a continuum of learning; soil workshop reflections 10 years on. *Soil Use and Management*, 35(1), 117–127. <https://doi.org/10.1111/sum.12486>

- Anuar, S. F. S., Yaacob, A., & Othman, R. (2022). Enhancing Oil Palm Empty Fruit Bunch (EFB) Compost by Addition of Burnt Rice Husk as Carrier Material for Selected Nitrogen-Fixing Bacteria. *Engineering, Agriculture, Science and Technology Journal (EAST-J)*, 1(1), 7–14. <https://doi.org/10.37698/eastj.v1i1.115>
- A. Onilude, A., & O. Seyi Amole, D. (2018). Mycelia Growth and Spore Yield of *Trichoderma harzianum* in Batch and Fed-Batch Cultures: Influence of pH and Temperature. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(04), 627–635. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.704.070>
- Alemu, K., Adugna, G., Lemessa, F., & Muleta, D. (2023). Biocontrol potentials of native bacterial strains for the management of coffee berry disease (*Colletotrichum kahawae*) in Ethiopia. *Biocontrol Science and Technology*, 33(1), 98–114. <https://doi.org/10.1080/09583157.2022.2163981>
- Ambarwulan, R., Lisnawati, dan Lahmuddin Lubis. 2013. Penggunaan Cendawan Mikoriza Arbuscular Untuk Mengendalikan fusarium oxysporium f.sp cubense dan Nematoda radopholus similis Pada Tanaman Pisang Barangan (*Musa paradisiaca* L.) di Rumah kaca. *Jurnal Online Agroteknologi* vol 2(1);339-348, ISSN 2337-6597
- Andrew, B., Ahmad, K., Ismail, S.I. *et al.* Disease prevalence and molecular characterisation of *Rigidoporus microporus* associated with white root rot disease of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) in Malaysia. *J Rubber Res* **24**, 175–186 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42464-021-00083-x>

- Anttila, J., Kaitala, V., Laakso, J., & Ruokolainen, L. (2015). Environmental Variation Generates Environmental Opportunist Pathogen Outbreaks. *PLOS ONE*, 10(12), e0145511. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145511>
- Arévalo, V., Mejía, W., Cevallos-Cevallos, J. M., & Ortiz-Ulloa, J. (2023). Effect of different drying airflows and harvest periods on the quality of specialty coffee (*Coffea arabica* L.). *Bionatura*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.21931/RB/2023.08.01.17>
- Arjjumend, H., & Koutouki, K. (2020). Legal Barriers and Quality Compliance in the Business of Biofertilizers and Biopesticides in India. *Journal of Legal Studies*, 26(40), 81–101. <https://doi.org/10.2478/jles-2020-0013>
- Asad, S. A. (2022). Mechanisms of action and biocontrol potential of *Trichoderma* against fungal plant diseases - A review. *Ecological Complexity*, 49, 100978. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2021.100978>
- Asghar, W., & Kataoka, R. (2021). Effect of co-application of *Trichoderma* spp. with organic composts on plant growth enhancement, soil enzymes and fungal community in soil. *Archives of Microbiology*, 203(7), 4281–4291. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02413-4>
- Assefa, A., Koyamo, R., & Kloos, H. (2021). Search for *Trichoderma* isolates from rhizosphere of *Coffea arabica* for biocontrol against *Gibberella xylarioides* in some coffee growing area of southeastern Ethiopia. *Indian Phytopathology*, 74(4), 1001–1014. <https://doi.org/10.1007/s42360-021-00389-1>
- Awad-Allah, E. F. A., Shams, A. H. M., Helaly, A. A., & Ragheb, E. I. M. (2022). Effective Applications of *Trichoderma* spp. as Biofertilizers and Biocontrol Agents Mitigate Tomato *Fusarium* Wilt Disease.

- Agriculture*, 12(11), 1950.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12111950>
- Balakrishnan, S., Parthasarathy, S., Kamalakannan, A., SenthilKuppusamy, K., & Gopalakrishnan, C. (2017). A Novel Method to Develop Paste Formulation of *Trichoderma harzianum*. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(11), 3286–3293.
<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.611.385>
- Batstone, R. T., O'Brien, A. M., Harrison, T. L., & Frederickson, M. E. (2020). Experimental evolution makes microbes more cooperative with their local host genotype. *Science*, 370(6515), 476–478.
<https://doi.org/10.1126/science.abb7222>
- Bhat, B. A., Tariq, L., Nissar, S., Islam, S. T., Islam, S. U., Mangral, Z., Ilyas, N., Sayyed, R. Z., Muthusamy, G., Kim, W., & Dar, T. U. H. (2022). The role of plant-associated rhizobacteria in plant growth, biocontrol and abiotic stress management. *Journal of Applied Microbiology*, 133(5), 2717–2741.
<https://doi.org/10.1111/jam.15796>
- Bhattacharyya, S. S., & Furtak, K. (2022). Soil–Plant–Microbe Interactions Determine Soil Biological Fertility by Altering Rhizospheric Nutrient Cycling and Biocrust Formation. *Sustainability*, 15(1), 625.
<https://doi.org/10.3390/su15010625>
- Bononi, L., Chiaramonte, J. B., Pansa, C. C., Moitinho, M. A., & Melo, I. S. (2020). Phosphorus-solubilizing *Trichoderma* spp. from Amazon soils improve soybean plant growth. *Scientific Reports*, 10(1), 2858.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-59793-8>
- Bonfante, P., & Desirò, A. (2015). Arbuscular Mycorrhizas: The Lives of Beneficial Fungi and Their Plant Hosts. In

- Principles of Plant-Microbe Interactions* (pp. 235–245). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3_25
- Booth, J., Schenk, P. M., & Mirzaee, H. (2022). Microbial Biopesticides against Bacterial, Fungal and Oomycete Pathogens of Tomato, Cabbage and Chickpea. *Applied Microbiology*, 2(1), 288–301. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol2010021>
- Brenya, R., Jing, Z., Sampene, A., Agyemang, F., & Wiredu, J. (2022). Technology and Policy Implementation Effects on Youth Agricultural Farming. *Proceedings of the 8th International Conference on Agricultural and Biological Sciences*, 64–75. <https://doi.org/10.5220/0011595900003430>
- Brunner, I., Amiet, R., Zollinger, M., & Egli, S. (1992). Ectomycorrhizal syntheses with *Picea abies* and three fungal species: a case study on the use of an in vitro technique to identify naturally occurring ectomycorrhizae. *Mycorrhiza*, 2(2), 89–96. <https://doi.org/10.1007/BF00203255>
- Buckner, C.A. *et al.* (2016) 'We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %', *Intech*, 11(tourism), p. 13. Available at: <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>.
- Burch, G., & Sarathchandra, S. U. (2002). Hydrolytic enzyme activities in *Trichoderma* spp. *New Zealand Plant Protection*, 55, 440–440. <https://doi.org/10.30843/nzpp.2002.55.3979>

- Cao, Z.-J., Qin, W.-T., Zhao, J., Liu, Y., Wang, S.-X., & Zheng, S.-Y. (2022a). Three New Trichoderma Species in Harzianum Clade Associated with the Contaminated Substrates of Edible Fungi. *Journal of Fungi*, 8(11), 1154. <https://doi.org/10.3390/jof8111154>
- Carvalho, A. M. de, Teramoto, É. T., Botelho, C. E., Carvalho, G. R., Lima, A. E. de, & Guerreiro Filho, O. (2022). Agronomic performance of Arabica coffee cultivars in the subtropical humid environment of Vale do Ribeira Paulista, Brazil. *Revista Ceres*, 69(6), 639–647. <https://doi.org/10.1590/0034-737x202269060002>
- Cardarelli, M., Woo, S. L., Roupael, Y., & Colla, G. (2022). Seed Treatments with Microorganisms Can Have a Biostimulant Effect by Influencing Germination and Seedling Growth of Crops. *Plants*, 11(3), 259. <https://doi.org/10.3390/plants11030259>
- Carey, J. N., Mettert, E. L., Roggiani, M., Myers, K. S., Kiley, P. J., & Goulian, M. (2018). Regulated Stochasticity in a Bacterial Signaling Network Permits Tolerance to a Rapid Environmental Change. *Cell*, 173(1), 196–207.e14. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.02.005>
- Chai, Y. N., Futrell, S., & Schachtman, D. P. (2022). Assessment of Bacterial Inoculant Delivery Methods for Cereal Crops. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.791110>
- Chai, Y. N., & Schachtman, D. P. (2022). Root exudates impact plant performance under abiotic stress. *Trends in Plant Science*, 27(1), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.08.003>
- Chalie u, R., Jakhar, S. R., Mitra, N. G., Wasnikar, A. R., & Sahu, R. K. (2019). Biomass Production of Trichoderma viride as Influenced by Carbon and Nitrogen Sources.

International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences,
8(06), 3269–3274.
<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.806.389>

- Chand Kumhar, K., & Nath Gupta, R. (2022). Soil Microbes: Role in Agriculture Sustainability. In *Industrial Applications of Soil Microbes* (pp. 77–89). BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS.
<https://doi.org/10.2174/9789815039955122010008>
- Chen, C., Peng, X., Wan, C., Zhang, Y., Gan, Z., Zeng, J., Kai, W., & Chen, J. (2022). Lignin Biosynthesis Pathway and Redox Balance Act Synergistically in Conferring Resistance against *Penicillium italicum* Infection in 7-Demethoxytylophorine-Treated Navel Orange. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(26), 8111–8123.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c02348>
- Chen, S., Wang, Y., & Shi, Y. (2023). Synergistic Fertilizers Improved Chemical Properties of Soil in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Field. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(8), 1062–1078.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2137191>
- Chen, Y.-P., Li, Y., Chen, F., Wu, H., & Zhang, S. (2023). Characterization and expression of fungal defensin in *Escherichia coli* and its antifungal mechanism by RNA-seq analysis. *Frontiers in Microbiology*, 14.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1172257>
- Chairudin, Agustinur and Permadi, J. (2021) 'Efficacy of application time of *Penicillium* sp. suspension on White Root Fungus (*Rigidoporus lignosus*) in Nutmeg (*Myristica fragrans*)', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 819(1). Available at:
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/819/1/012014>.

- Chappelka, A. H., & Grulke, N. E. (2016). Disruption of the 'disease triangle' by chemical and physical environmental change. *Plant Biology*, 18(S1), 5–12. <https://doi.org/10.1111/plb.12353>
- Chaverri, P., Branco-Rocha, F., Jaklitsch, W., Gazis, R., Degenkolb, T., & Samuels, G. J. (2015). Systematics of the *Trichoderma harzianum* species complex and the re-identification of commercial biocontrol strains. *Mycologia*, 107(3), 558–590. <https://doi.org/10.3852/14-147>
- Cui, L., Hanika, K., Visser, R. G. F., & Bai, Y. (2020). Improving Pathogen Resistance by Exploiting Plant Susceptibility Genes in Coffee (*Coffea* spp.). *Agronomy*, 10(12), 1928. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121928>
- da Silva Angelo, P. C., Ferreira, I. B., de Carvalho, C. H. S., Matiello, J. B., & Sera, G. H. (2019). Arabica coffee fruits phenology assessed through degree days, precipitation, and solar radiation exposure on a daily basis. *International Journal of Biometeorology*, 63(7), 831–843. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01693-2>
- Dani, D., Rokhmah, D. N., & Pranowo, D. (2019). Identifikasi Awal Perbedaan Karakter Morfofisiologi Antar Empat Kultivar Kopi Arabika. *Jurnal Tanaman Industri Dan Penyegar*, 6(3), 119. <https://doi.org/10.21082/jtidp.v6n3.2019.p119-126>
- Dar, M. H., & Reshi, Z. A. (2017). Vesicular Arbuscular Mycorrhizal (VAM) fungi- as a major biocontrol agent in modern sustainable agriculture system. In *Russian Agricultural Sciences* (Vol. 43, pp. 138–143). <https://doi.org/10.3103/S1068367417020057>
- Daryaei, A., Jones, E. E., Glare, T. R., & Falloon, R. E. (2016). pH and water activity in culture media affect biological

- control activity of *Trichoderma atroviride* against *Rhizoctonia solani*. *Biological Control*, 92, 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.09.001>
- De Sena, A., Mosdosy, K., Whalen, J. K., & Madramootoo, C. A. (2023). Root exudates and microorganisms. In *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 343–356). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00125-7>
- de Sousa, G. F., Silva, M. A., de Morais, E. G., Van Opbergen, G. A. Z., Van Opbergen, G. G. A. Z., de Oliveira, R. R., Amaral, D., Brown, P., Chalfun-Junior, A., & Guilherme, L. R. G. (2022). Selenium enhances chilling stress tolerance in coffee species by modulating nutrient, carbohydrates, and amino acids content. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1000430>
- Dharajiya, D. T., Patel, Y. R., Tiwari, K. K., & Parmar, L. D. (2022). Genome Engineering in Agriculturally Beneficial Microorganisms Using CRISPR-Cas9 Technology. In *Agricultural Biotechnology* (pp. 89–109). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003268468-5>
- Dheeman, S., Kumar, M., & Maheshwari, D. K. (2023). *Beneficial Microbial Mixtures for Efficient Biocontrol of Plant Diseases: Impediments and Success* (pp. 23–40). https://doi.org/10.1007/978-981-19-9570-5_2
- dos Santos, L. B. P. R., Oliveira-Santos, N., Fernandes, J. V., Jaimes-Martinez, J. C., De Souza, J. T., Cruz-Magalhães, V., & Loguercio, L. L. (2022). Tolerance to and Alleviation of Abiotic Stresses in Plants Mediated by *Trichoderma spp.* (pp. 321–359). https://doi.org/10.1007/978-3-030-91650-3_12

- Drohan, P. J. (2017). *Future Challenges for Soil Science Research, Education, and Soil Survey in the USA* (pp. 373–384). https://doi.org/10.1007/978-3-319-41870-4_19
- Davison, J., Moora, M., Semchenko, M., Adenan, S. B., Ahmed, T., Akhmetzhanova, A. A., Alatalo, J. M., Al-Quraishy, S., Andriyanova, E., Anslan, S., Bahram, M., Batbaatar, A., Brown, C., Bueno, C. G., Cahill, J., Cantero, J. J., Casper, B. B., Cherosov, M., Chideh, S., ... Öpik, M. (2021). Temperature and pH define the realised niche space of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 231(2), 763–776. <https://doi.org/10.1111/nph.17240>
- Debnath, A., Ram, R. M., Kumari, A., Saikia, P., & Lagoriya, D. S. (2022). Molecular Aspects of Host–Pathogen Interaction. In *Plant-Microbe Interactions* (pp. 59–78). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003171416-4>
- Deguchi S, Matsuda Y, Takenaka C, Sugiura Y, Ozawa H, Ogata Y. 2017. Proposal of a new estimation method of colonization rate of arbuscular mycorrhizal fungi in the roots of *Chengiopanax sciadophylloides*. *Mycobiology* 45 (1): 15-19. DOI: 10.5941/MYCO.2017.45.1.15.
- Ding, J.-L., Lin, H.-Y., Hou, J., Feng, M.-G., & Ying, S.-H. (2023). The Entomopathogenic Fungus *Beauveria bassiana* Employs Autophagy as a Persistence and Recovery Mechanism during Conidial Dormancy. *MBio*, 14(2). <https://doi.org/10.1128/mbio.03049-22>
- Easterday, C. A., Kendig, A. E., Lacroix, C., Seabloom, E. W., & Borer, E. T. (2022). Long-term nitrogen enrichment mediates the effects of nitrogen supply and co-inoculation on a viral pathogen. *Ecology and Evolution*, 12(1). <https://doi.org/10.1002/ece3.8450>
- Ermarilla, H., Ardi, A., & Dwipa, D. I. (2019). The Effect of Mulch types with Dose of N, P, and K Fertilizer in

- Summed Dominan ratio and biomass weed Arabica (Coffea Arabica L.) Coffee in Indonesia. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 4(1), 41–45. <https://doi.org/10.22161/ijeab/4.1.7>
- Eslahi, N., Kowsari, M., Zamani, M. R., & Motallebi, M. (2022). Correlation Study Between Biochemical and Molecular Pathways of *Trichoderma harzianum* Recombinant Strains on Plant Growth and Health. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(4), 1561–1577. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10396-1>
- Ezziyyani, M., Hamdache, A., Asraoui, M., Requena, M. E., Egea-Gilabert, C., & Candela Castillo, M. E. (2019). Effect of Climate Change on Growth, Development and Pathogenicity of Phytopathogenic Telluric Fungi (pp. 14–21). https://doi.org/10.1007/978-3-030-11878-5_2
- Fendrihan, S., Dinu, S., Sicuia, O. A., & Constantinescu, F. (2016). ASSESSMENT OF SOME ABIOTIC FACTORS ON MICROBIAL BIOPRODUCTS USEFUL IN BIOCONTROL OF PHYTOPATHOGENS. *JOURNAL OF ADVANCES IN AGRICULTURE*, 5(3), 799–803. <https://doi.org/10.24297/jaa.v5i3.5052>
- Ferreira Filho, J. A., Horta, M. A. C., dos Santos, C. A., Almeida, D. A., Murad, N. F., Mendes, J. S., Sforça, D. A., Silva, C. B. C., Crucello, A., & de Souza, A. P. (2020). “Integrative genomic analysis of the bioprospection of regulators and accessory enzymes associated with cellulose degradation in a filamentous fungus (*Trichoderma harzianum*).” *BMC Genomics*, 21(1), 757. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-07158-w>
- Florencio, C., Bortoletto-Santos, R., Favaro, C., Brondi, M., Velloso, C., Klaic, R., Ribeiro, C., Farinas, C., & Mattoso, L. (2022). AVANÇOS NA PRODUÇÃO E

FORMULAÇÃO DE INOCULANTES MICROBIANOS
VISANDO UMA AGRICULTURA MAIS
SUSTENTÁVEL. *Química Nova*.
<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170909>

- Gagliardi, S., Avelino, J., Fulthorpe, R., Virginio Filho, E. de M., & Isaac, M. E. (2023). No evidence of foliar disease impact on crop root functional strategies and soil microbial communities: what does this mean for organic coffee? *Oikos*, 2023(1). <https://doi.org/10.1111/oik.08987>
- Gao, M., Xiong, C., Gao, C., Tsui, C. K. M., Wang, M.-M., Zhou, X., Zhang, A.-M., & Cai, L. (2021). Disease-induced changes in plant microbiome assembly and functional adaptation. *Microbiome*, 9(1), 187. <https://doi.org/10.1186/s40168-021-01138-2>
- Ganuza, M., Azcón, R., & Barea, J. M. (2019). Trichoderma strains: current uses and future prospects. *Biological Control*, 132, 135–144.
- García-Montelongo, A. M., Montoya-Martínez, A. C., Morales-Sandoval, P. H., Parra-Cota, F. I., & de los Santos-Villalobos, S. (2023). Beneficial Microorganisms as a Sustainable Alternative for Mitigating Biotic Stresses in Crops. *Stresses*, 3(1), 210–228. <https://doi.org/10.3390/stresses3010016>
- Ghadimi, M., Sirousmehr, A., Ansari, M. H., & Ghanbari, A. (2021). Organic soil amendments using vermicomposts under inoculation of N₂-fixing bacteria for sustainable rice production. *PeerJ*, 9, e10833. <https://doi.org/10.7717/peerj.10833>
- Giraud, T., Koskella, B., & Laine, A. (2017). Introduction: microbial local adaptation: insights from natural populations, genomics and experimental evolution.

- Molecular Ecology*, 26(7), 1703–1710.
<https://doi.org/10.1111/mec.14091>
- Gomes, E. N., Elsherbiny, E. A., Aleem, B., & Bennett, J. W. (2020). *Beyond Classical Biocontrol: New Perspectives on Trichoderma* (pp. 437–455). https://doi.org/10.1007/978-3-030-41870-0_19
- Gong, Y.-Z., Niu, Q.-Y., Liu, Y.-G., Dong, J., & Xia, M.-M. (2022). Development of multifarious carrier materials and impact conditions of immobilised microbial technology for environmental remediation: A review. *Environmental Pollution*, 314, 120232. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120232>
- Gualtieri, L., Monti, M. M., Mele, F., Russo, A., Pedata, P. A., & Ruocco, M. (2022). Volatile Organic Compound (VOC) Profiles of Different *Trichoderma* Species and Their Potential Application. *Journal of Fungi*, 8(10), 989. <https://doi.org/10.3390/jof8100989>
- Gul, S., & Whalen, J. K. (2022). *Perspectives and strategies to increase the microbial-derived soil organic matter that persists in agroecosystems* (pp. 347–401). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.04.004>
- Guo, Y., Ghirardo, A., Weber, B., Schnitzler, J.-P., Benz, J. P., & Rosenkranz, M. (2019). *Trichoderma* Species Differ in Their Volatile Profiles and in Antagonism Toward Ectomycorrhiza *Laccaria bicolor*. *Frontiers in Microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00891>
- Guo, R., Li, G., Zhang, Z., & Peng, X. (2022a). Structures and Biological Activities of Secondary Metabolites from *Trichoderma harzianum*. *Marine Drugs*, 20(11), 701. <https://doi.org/10.3390/md20110701>

- Guzmán-Guzmán, P., Kumar, A., de los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F. I., Orozco-Mosqueda, Ma. del C., Fadiji, A. E., Hyder, S., Babalola, O. O., & Santoyo, G. (2023). Trichoderma Species: Our Best Fungal Allies in the Biocontrol of Plant Diseases—A Review. *Plants*, 12(3), 432. <https://doi.org/10.3390/plants12030432>
- Hall, I. R. (2018). Taxonomy of VA Mycorrhizal Fungi. In *VA Mycorrhiza* (pp. 57–94). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351077514-4>
- Hang, X., Meng, L., Ou, Y., Shao, C., Xiong, W., Zhang, N., Liu, H., Li, R., Shen, Q., & Kowalchuk, G. A. (2022). Trichoderma-amended biofertilizer stimulates soil resident *Aspergillus* population for joint plant growth promotion. *Npj Biofilms and Microbiomes*, 8(1), 57. <https://doi.org/10.1038/s41522-022-00321-z>
- Haniotis, T. (2001). The Economics of Agricultural Biotechnology. In *Genetically Modified Organisms in Agriculture* (pp. 171–177). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012515422-2/50019-9>
- Harni, R., & Randriani, E. (2022a). IDENTIFIKASI PATOGEN PENYEBAB PENYAKIT JAMUR AKAR PUTIH PADA TANAMAN KOPI ARABIKA GAYO / Identification of Pathogen as the Causal Agent of White Root Disease in Gayo Arabica Coffee Plant. *Jurnal Penelitian Tanaman Industri*, 28(1), 11. <https://doi.org/10.21082/jlitri.v28n1.2022.11-20>
- Harni, R., & Randriani, E. (2022b). IDENTIFIKASI PATOGEN PENYEBAB PENYAKIT JAMUR AKAR PUTIH PADA TANAMAN KOPI ARABIKA GAYO / Identification of Pathogen as the Causal Agent of White Root Disease in Gayo Arabica Coffee Plant. *Jurnal Penelitian Tanaman*

- Industri*, 28(1), 11.
<https://doi.org/10.21082/jlitri.v28n1.2022.11-20>
- Harni, R., & Randriani, E. (2022c). IDENTIFIKASI PATOGEN PENYEBAB PENYAKIT JAMUR AKAR PUTIH PADA TANAMAN KOPI ARABIKA GAYO / Identification of Pathogen as the Causal Agent of White Root Disease in Gayo Arabica Coffee Plant. *Jurnal Penelitian Tanaman Industri*, 28(1), 11.
<https://doi.org/10.21082/jlitri.v28n1.2022.11-20>
- Harman, G. E., et al. (2004). Trichoderma species—opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43–56.
- Haynes, H. M., Pearce, C. I., Boothman, C., & Lloyd, J. R. (2018). Response of bentonite microbial communities to stresses relevant to geodisposal of radioactive waste. *Chemical Geology*, 501, 58–67.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.10.004>
- Hewavitharana, N., Kannangara, S. D. P., & Senanayake, S. P. (2018). Isolation, Identification and Mass production of five Trichoderma spp. on Solid and Liquid Carrier Media for Commercialization. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 6(4), 285–293.
<https://doi.org/10.3126/ijasbt.v6i4.22128>
- Hewedy, O. A., Abdel Lateif, K. S., Seleiman, M. F., Shami, A., Albarakaty, F. M., & M. El-Meihy, R. (2020). Phylogenetic Diversity of Trichoderma Strains and Their Antagonistic Potential against Soil-Borne Pathogens under Stress Conditions. *Biology*, 9(8), 189.
<https://doi.org/10.3390/biology9080189>
- Hicks, L. C., Ang, R., Leizeaga, A., & Rousk, J. (2019). Bacteria constrain the fungal growth response to drying-

rewetting. *Soil Biology and Biochemistry*, 134, 108–112.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.006>

Hori, Y., Fujita, H., Hiruma, K., Narisawa, K., & Toju, H. (2021). Synergistic and Offset Effects of Fungal Species Combinations on Plant Performance. *Frontiers in Microbiology*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.713180>

Huang, B., Chen, Y., Pei, Z., Jiang, L., Zhang, Y., Wang, J., & Wang, J. (2023). Application of microbial organic fertilizers promotes the utilization of nutrients and restoration of microbial community structure and function in rhizosphere soils after dazomet fumigation. *Frontiers in Microbiology*, 13.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1122611>

<https://www.dgwfertilizer.co.id/apa-itu-penyakit-tanaman-mengapa-tanaman-bisa-sakit/>. APA ITU PENYAKIT TANAMAN? MENGAPA TANAMAN BISA SAKIT ?.

Diakses tanggal 2juli 2025.

ICO. (2021). *Annual Coffee Market Report*. International Coffee Organization

İkiz, O., Öztekin, G. B., Tüzel, Y., Karaçancı, Ş., & Tepecik, M. (2022). Trichoderma harzianum Suşlarının Domates Fide Kalitesine Etkileri. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 10(1), 54–65.
<https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i1.54-65.4833>

Ilham, B., Nouredine, C., Philippe, G., Mohammed, E. G., Brahim, E., Sophie, A., Martine, N., & Muriel, M. (2019). Induced Systemic Resistance (ISR) in Arabidopsis thaliana by Bacillus amyloliquefaciens and Trichoderma harzianum Used as Seed Treatments.

Agriculture, 9(8), 166.
<https://doi.org/10.3390/agriculture9080166>

- Islam, SHM, Hossain, A., Hasan, M., Itoh, K., Tuteja, N., 2023. Application of *Trichoderma* spp. as biostimulants to improve soil fertility for enhancing crop yield in wheat and other crops. Biostimulants in Alleviation of Metal Toxicity in Plants Emerging Trends and Opportunities. Biostimulants and Protective Biochemical Agents. Pages 177-206
- Irawan, S., Antriyandarti, E., Suprihatin, D. N., & Pangesti, A. W. (2022). Study the Relationship of Soil Fertility with Land Suitability For Arabica Coffee (*Coffea arabica* L.) Development in Bandar Sub-district, Pacitan District. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1111(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1111/1/012029>
- Jaeggi, M. E. P. da C., Rocha, R. S., Pereira, I. M., Cruz, D. P. da, Silva, R. de K. G. da, Batista, J. N., Parajara, M. do C., Rodrigues, R. R., Entringer, G. C., Gravina, G. de A., Daher, R. F., & Lima, W. L. de. (2020). Alternative Substrate and Recipients for the Production of Arabica Coffee Seedlings. *Journal of Agricultural Science*, 12(5), 82. <https://doi.org/10.5539/jas.v12n5p82>
- Jakubus, M., & Graczyk, M. (2020). Microelement Variability in Plants as an Effect of Sewage Sludge Compost Application Assessed by Different Statistical Methods. *Agronomy*, 10(5), 642. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050642>
- Jangir, M., Sharma, S., & Sharma, S. (2019). Non-target Effects of *Trichoderma* on Plants and Soil Microbial Communities. In *Plant Microbe Interface* (pp. 239–251).

Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-19831-2_10

- Jansa, J., Bukovská, P. and Gryndler, M. (2013) 'Mycorrhizal hyphae as ecological niche for highly specialized hypersymbionts - Or just soil free-riders?', *Frontiers in Plant Science*, 4(MAY), pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00134>.
- Jiang, Z., Lou, Y., Liu, X., Sun, W., Wang, H., Liang, J., Guo, J., Li, N., & Yang, Q. (2023). Combined Application of Coffee Husk Compost and Inorganic Fertilizer to Improve the Soil Ecological Environment and Photosynthetic Characteristics of Arabica Coffee. *Agronomy*, 13(5), 1212. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051212>
- Juroszek, P., Laborde, M., Kleinhenz, B., Mellenthin, M., Racca, P., & Sierotzki, H. (2022). A review on the potential effects of temperature on fungicide effectiveness. *Plant Pathology*, 71(4), 775–784. <https://doi.org/10.1111/ppa.13531>
- Kapeua Ndacnou, M. (2022). *Isolates of Aspergillus, Clonostachys and Trichoderma from Africa as potential biocontrol agents against coffee leaf rust* [Universidade Federal de Viçosa]. <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.194>
- Kalischuk, M., Müller, B., Fusaro, A. F., Wijekoon, C. P., Waterhouse, P. M., Prüfer, D., & Kawchuk, L. (2022). Amplification of cell signaling and disease resistance by an immunity receptor Ve1Ve2 heterocomplex in plants. *Communications Biology*, 5(1), 497. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03439-0>
- Kashyap, A. S., Manzar, N., Meshram, S., & Sharma, P. K. (2023). Screening microbial inoculants and their interventions for cross-kingdom management of wilt

- disease of solanaceous crops- a step toward sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1174532>
- Kononets, Y., & Treiblmaier, H. (2021). The potential of bio certification to strengthen the market position of food producers. *Modern Supply Chain Research and Applications*, 3(1), 41–55. <https://doi.org/10.1108/MS CRA-05-2020-0013>
- Keyes, S., van Veelen, A., McKay Fletcher, D., Scotson, C., Koebernick, N., Petroselli, C., Williams, K., Ruiz, S., Cooper, L., Mayon, R., Duncan, S., Dumont, M., Jakobsen, I., Oldroyd, G., Tkacz, A., Poole, P., Mosselmans, F., Borca, C., Huthwelker, T., ... Roose, T. (2022). Multimodal correlative imaging and modelling of phosphorus uptake from soil by hyphae of mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 234(2), 688–703. <https://doi.org/10.1111/nph.17980>
- Kholikov, I. V., Shepel, R. N., & Nikolaev, I. I. (2023). Issues of normative-legal regulation of chemical and biological security provision. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*, 63(6), 406–416. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-6-406-416>
- King, W. L., Richards, S. C., Kaminsky, L. M., Bradley, B. A., Kaye, J. P., & Bell, T. H. (2023). Leveraging microbiome rediversification for the ecological rescue of soil function. *Environmental Microbiome*, 18(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s40793-023-00462-4>
- Klasek, S. A., Brock, M. T., Calder, W. J., Morrison, H. G., Weinig, C., & Maïgnien, L. (2022). Spatiotemporal Heterogeneity and Intragenus Variability in Rhizobacterial Associations with *Brassica rapa* Growth.

MSystems, 7(3).
<https://doi.org/10.1128/msystems.00060-22>

- Kong, Z., & Liu, H. (2022). Modification of Rhizosphere Microbial Communities: A Possible Mechanism of Plant Growth Promoting Rhizobacteria Enhancing Plant Growth and Fitness. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.920813>
- Korlina, E., Hasyim, A., & Sulastrini, I. (2023). Differences in time of application of Trichoderma sp on shallot varieties on growth and disease development for seed production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1172(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1172/1/012039>
- Koske RE, Gemma JN. 1989. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycol Res* 92 (4): 486-488. DOI: 10.1016/S0953-7562(89)80195-9.
- Kumar, J., Kumar, M., Tomar, A., Vaishali, ., Kumar, P., & Chand, P. (2021a). Morphological and Molecular Characterization of Trichoderma spp. from Rhizosphere Soil and Their Antagonistic Activity against Fusarium spp. *International Journal of Plant & Soil Science*, 100–112. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i1930605>
- Kumar, J., Kumar, M., Tomar, A., Vaishali, ., Kumar, P., & Chand, P. (2021). Morphological and Molecular Characterization of Trichoderma spp. from Rhizosphere Soil and Their Antagonistic Activity against Fusarium spp. *International Journal of Plant & Soil Science*, 100–112. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i1930605>
- Kurek, M., Laridon, Y., Torrieri, E., Guillard, V., Pant, A., Stramm, C., Gontard, N., & Guillaume, C. (2017). A

mathematical model for tailoring antimicrobial packaging material containing encapsulated volatile compounds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 42, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.05.014>

- Kwak, Y. (2021). An Update on Trichoderma Mitogenomes: Complete De Novo Mitochondrial Genome of the Fungal Biocontrol Agent *Trichoderma harzianum* (Hypocreales, Sordariomycetes), an Ex-Neotype Strain CBS 226.95, and Tracing the Evolutionary Divergences of Mitogenomes in *Trichoderma*. *Microorganisms*, 9(8), 1564. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081564>
- Liu, H., Wang, X., Liang, C., Ai, Z., Wu, Y., Xu, H., Xue, S., & Liu, G. (2020). Glomalitin-related soil protein affects soil aggregation and recovery of soil nutrient following natural revegetation on the Loess Plateau. *Geoderma*, 357, 113921. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113921>
- Liu, P.-C., Peacock, W. J., Wang, L., Furbank, R., Larkum, A., & Dennis, E. S. (2020). Leaf growth in early development is key to biomass heterosis in *Arabidopsis*. *Journal of Experimental Botany*, 71(8), 2439–2450. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa006>
- Liu, Z., He, Z., Huang, H., Ran, X., Oluwafunmilayo, A. O., & Lu, Z. (2017). pH Stress-Induced Cooperation between *Rhodococcus ruber* YYL and *Bacillus cereus* MLY1 in Biodegradation of Tetrahydrofuran. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02297>
- Locatelli, G. O., dos Santos, G. F., Botelho, P. S., Finkler, C. L. L., & Bueno, L. A. (2018). Development of *Trichoderma* sp. formulations in encapsulated granules (CG) and

- evaluation of conidia shelf-life. *Biological Control*, 117, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2017.08.020>
- Lorgen-Ritchie, M., Uren Webster, T., McMurtrie, J., Bass, D., Tyler, C. R., Rowley, A., & Martin, S. A. M. (2023). Microbiomes in the context of developing sustainable intensified aquaculture. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1200997>
- Lu, G. H., Xu, H. P., & Pan, T. (2019). Transformation of nitrogenous compounds in the water-sediment-microbiological system from the Yangtze River. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 344(1), 012075. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/344/1/012075>
- Ludlam, J. J., Gibson, G. J., Otten, W., & Gilligan, C. A. (2012). Applications of percolation theory to fungal spread with synergy. *Journal of The Royal Society Interface*, 9(70), 949–956. <https://doi.org/10.1098/rsif.2011.0506>
- Mahboubi, S., Yamina Bouchikh, Ali Latreche, Daniele Da Lio, & Rajaa Chamekh. (2023). Biocontrol and growth promoting effect of *Trichoderma* spp. isolate from rhizosphere soils of some Algerian areas. *South Asian Journal of Experimental Biology*, 13(1), 52–61. [https://doi.org/10.38150/sajeb.13\(1\).p52-61](https://doi.org/10.38150/sajeb.13(1).p52-61)
- Maheshwari, D. K., Dubey, R. C., Agarwal, M., Dheeman, S., Aeron, A., & Bajpai, V. K. (2015). Carrier based formulations of biocoenotic consortia of disease suppressive *Pseudomonas aeruginosa* KRP1 and *Bacillus licheniformis* KRB1. *Ecological Engineering*, 81, 272–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.066>
- Mannai, S., Jabnoun-Khiareddine, H., Nasraoui, B., & Daami-Remadi, M. (2020). Biocontrol of *Pythium* Damping-Off on Pepper (*Capsicum Annuum*) with Selected Fungal

- and Rhizobacterial Agents. *International Journal of Phytopathology*, 9(1), 29–42. <https://doi.org/10.33687/phytopath.009.01.3083>
- Malusa, E., Sas-Paszt, L., Popinska, W., & Zurawicz, E. (2007). The Effect of a Substrate Containing Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Rhizosphere Microorganisms (Trichoderma, Bacillus, Pseudomonas and Streptomyces) and Foliar Fertilization on Growth Response and Rhizosphere pH of Three Strawberry Cultivars. *International Journal of Fruit Science*, 6(4), 25–41. https://doi.org/10.1300/J492v06n04_04
- Marques, E., Abreu, V. P., De Oliveira, D. R., Silva, M. R., Santos, F. H. C., Castro, K. H. M. de, & Cunha, M. G. da. (2022). Antagonism and molecular identification of *Trichoderma* isolated from rhizosphere of medicinal plants. *Journal of Biological Control*, 07–16. <https://doi.org/10.18311/jbc/2022/30065>
- Marsell, A., & Fröschel, C. (2022). Inoculation Strategies to Infect Plant Roots with Soil-Borne Microorganisms. *Journal of Visualized Experiments*, 181. <https://doi.org/10.3791/63446>
- Martínez, Y., Heeb, M., Kalač, T., Gholam, Z., Schwarze, F. W. M. R., Nyström, G., & De France, K. (2023). Biopolymer-based emulsions for the stabilization of *Trichoderma atrobrunneum* conidia for biological control. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(4), 1465–1476. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12381-y>
- Marvasi, M., Gallagher, K. L., Martinez, L. C., Molina Pagan, W. C., Rodríguez Santiago, R. E., Castilloveitia Vega, G., & Visscher, P. T. (2012). Importance of B4 Medium in Determining Organomineralization Potential of Bacterial Environmental Isolates. *Geomicrobiology*

- Journal*, 29(10), 916–924.
<https://doi.org/10.1080/01490451.2011.636145>
- Maurya, M. K., Srivastava, M., Singh, A., Pandey, S., & Ratan, V. (2017). Effect of Different Temperature and Culture Media on the Mycelia Growth of *Trichoderma viride* Isolates. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(2), 266–269.
<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.602.032>
- Medeiros, D. B., Fernie, A. R., & Brotman, Y. (2022). *Metabolomics Approaches for Studying the Trichoderma-Plant Interactions* (pp. 135–154).
https://doi.org/10.1007/978-981-16-9507-0_6
- Mishra, S. N., Singh, S., Para, P. K., Sharma, L., & Bhandari, V. V. S. (2023). A Review: Combination of Fungicide, Polymer Coating and Packaging Materials on Improve Germination Rate and Improve Uniformity of Seedling Emergence of Different Seeds during Storage. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(8), 2142–2157.
<https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i82173>
- MITIOHLO, L., MERZLOV, S., MERZLOVA, G., DUDNYK, O., & ROZPUTNIL, O. (2022). Growth Intensity of *Trichoderma Viride* at Different Doses and Sources of Copper in the Medium. *Scientific Horizons*, 25(10).
[https://doi.org/10.48077/scihor.25\(10\).2022.79-86](https://doi.org/10.48077/scihor.25(10).2022.79-86)
- Morán-Diez, M. E., Martínez de Alba, Á. E., Rubio, M. B., Hermosa, R., & Monte, E. (2021). *Trichoderma* and the Plant Heritable Priming Responses. *Journal of Fungi*, 7(4), 318. <https://doi.org/10.3390/jof7040318>
- Mukherjee, A., Chouhan, G. K., Gaurav, A. K., Jaiswal, D. K., & Verma, J. P. (2021). Development of indigenous microbial consortium for biocontrol management. In

- New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 91–104). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64325-4.00009-2>
- Mulatu, A., Megersa, N., Abena, T., Kanagarajan, S., Liu, Q., Tenkegna, T. A., & Vetukuri, R. R. (2022). Biodiversity of the Genus *Trichoderma* in the Rhizosphere of Coffee (*Coffea arabica*) Plants in Ethiopia and Their Potential Use in Biocontrol of Coffee Wilt Disease. *Crops*, 2(2), 120–141. <https://doi.org/10.3390/crops2020010>
- Meena, A. K., Varma, S., Kumar, V., Sharma, R., & Priyanka. (2020). Impact of climate change on plant diseases and management strategies: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8(2), 2968–2973. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i2at.9203>
- MoEF. (2022). *Indonesia's Long-term Strategy on Low Carbon and Climate Resilience 2050*. Ministry of Environment and Forestry.
- Montagnon, C., Sheibani, F., Benti, T., Daniel, D., & Bote, A. D. (2022). Deciphering Early Movements and Domestication of *Coffea arabica* through a Comprehensive Genetic Diversity Study Covering Ethiopia and Yemen. *Agronomy*, 12(12), 3203. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123203>
- 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>
- Muchtar, M., et al. (2020). *Budidaya Tanaman Kopi Arabika*. Unimal Press.

- Nusantara, A.D., Bertham, Y.H., & Mansur, I. (2015). Bekerja dengan fungi mikoriza arbuskula. Bogor: Seameo Biotrop.
- Nawangsih, A. A., 2006. Seleksi dan Karakterisasi Bakteri Biocontrol Untuk Mengendalikan Penyakit Layu Bakteri (*Ralstonia solanacearum*) Pada Tomat. Program Studi Entomologifitopatolgi Sekolah Pascasarjana Institute Pertanian Bogor. Institut Pertanian Bogor. Bogor
- Pacheco-Trejo, J., Aquino-Torres, E., Reyes-Santamaría, M. I., Islas-Pelcastre, M., Pérez-Ríos, S. R., Madariaga-Navarrete, A., & Saucedo-García, M. (2022). Plant Defensive Responses Triggered by *Trichoderma* spp. as Tools to Face Stressful Conditions. *Horticulturae*, 8(12), 1181. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121181>
- Papavizas, G.C., 1981. Survival of *Trichoderma harzianum* in soil and in pea and bean rhizospheres. *Phytopathology* 71, 121–125
- Parada-Molina, P. C., Barradas-Miranda, V. L., Ortiz Ceballos, G., Cervantes-Pérez, J., & Cerdán Cabrera, C. R. (2022). Climatic suitability for *Coffea arabica* L. front to climate events extreme: Tree cover importance. *Scientia Agropecuaria*, 13(1), 53–62. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.005>
- Parkash, V., Gaur, A., Agnihotri, R., & Aggarwal, A. (2019). *Trichoderma harzianum* Rifai: A Beneficial Fungus for Growth and Development of *Abroma augusta* L. Seedlings with Other Microbial Bio-Inoculants. In *Trichoderma - The Most Widely Used Fungicide*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83533>

- Pozo, M. J., & Azcón-Aguilar, C. (2007). Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Current Opinion in Plant Biology*, 10(4), 393–398.
- Putra, R. A., et al. (2021). Pengaruh Mikoriza dan Trichoderma terhadap Serangan Jamur Akar Putih. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 17(2), 117–123.
- S Nosir, W. (2016). Trichoderma harzianum as a Growth Promoter and Bio-Control Agent against Fusarium oxysporum f. sp. tuberosi. *Advances in Crop Science and Technology*, 04(02). <https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000217>
- Santinato, R., Santinato, F., Limonta Soares, A., & Ribeiro, P. C. (2018). Dose effects of barnyard manure as organic fertilization in the reduction of the exclusive mineral fertilization of N, P, K and S in the coffee culture. *Journal of Microbiology & Experimentation*, 6(4). <https://doi.org/10.15406/jmen.2018.06.00212>
- Sariasih, S., & Aditiawati, P. (2022). Coffee Plants' Endomycorrhizae Potential to increase the growth and nutrient uptake of Arabica Coffee (*Coffea arabica* L.) under Field Condition. *3BIO: Journal of Biological Science, Technology and Management*, 4(2), 120–127. <https://doi.org/10.5614/3bio.2022.4.2.6>
- Sastrini, T., Nurjayadi, M. Y., & Munif, A. (2019). Eksplorasi dan Karakterisasi Bakteri Agens Hayati dari *Imperata cylindrica* untuk pengendalian *Rigidoporus microporus*. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 15(2), 69–76. <https://doi.org/10.14692/jfi.15.2.69-76>
- Sebuliba, E., Majaliwa, J. G. M., Isubikalu, P., Turyahabwe, N., Eilu, G., & Ekwamu, A. (2022). Characteristics of shade trees used under Arabica coffee agroforestry systems in Mount Elgon Region, Eastern Uganda. *Agroforestry*

Systems, 96(1), 65–77. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00688-6>

- Selari, P. J. R. G., Tsui, S., de Almeida, T. T., Olchanheski, L. R., & Dourado, M. N. (2022). Biological Control of Phytopathogenic Fungi: Mechanisms and Potentials. In *Agricultural Biocatalysis* (pp. 3–39). Jenny Stanford Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781003313144-2>
- Semangun, H. (2000). *Penyakit-Penyakit Tanaman Perkebunan di Indonesia*. Gadjah Mada University Press.
- Setiawan, A., Sastrahidayat, I.R., & Muhibuddin, A. (2014). Upaya penekanan serangan penyakit rebah semai (*Sclerotium roflsii*) pada tanaman kedelai (*Glycine max L.*) dengan mikoriza yang diperbanyak dengan inang perantaraan kacang tanah. *Jurnal HPT*, 2(4), 36–43.
- Shahnaz, E., Anwar, A., & Banday, S. (2022). Trichoderma spp. as bio-stimulant: Molecular insights. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 337–350). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85577-8.00020-2>
- Solanki, M. K., Robert, A. S., Singh, R. K., Kumar, S., Pandey, A. K., Srivastava, A. K., & Arora, D. K. (2012). Characterization of Mycolytic Enzymes of Bacillus Strains and Their Bio-Protection Role Against *Rhizoctonia solani* in Tomato. *Current Microbiology*, 65(3), 330–336. <https://doi.org/10.1007/s00284-012-0160-1>
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.). Academic Press.
- Subrata, I. D. N., et al. (2018). Strategi Pengendalian Penyakit Akar Putih. *Jurnal Proteksi Tanaman*, 22(2), 130–137.

- Sullia, S. B. (1991). *Use of Vesicular - Arbuscular Mycorrhiza (VAM) as Biofertilizer for Horticultural Plants in Developing Countries* (pp. 49–53). https://doi.org/10.1007/978-94-011-3176-6_8
- Sulistiyowati, L. (2009). Penyakit akar putih pada tanaman perkebunan dan alternatif pengendaliannya. *Warta Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia*, 25(1), 30–36.
- Supyani, Hadiwiyono, Poromarto, S., Spriyadi, & Permatasari, F. (2023). Negative impact of some fungicide applications on *Trichoderma harzianum* as biocontrol agent of shallot moler disease. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1180(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1180/1/012032>
- Swandi, F., Sulyanti, E. and Darnetty, D. (2024) 'Isolation and Identification of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) Microscopically in the Rhizosphere of Peanut Plants Isolasi dan Identifikasi Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) secara Mikroskopis pada Rhizosfer Tanaman Kacang Tanah', 03(02), pp. 105–115.
- Syafaruddin, Dani, Randriani, E., & Supriadi, H. (2020). Superior varieties of robusta coffee adapted to high elevation based on farmer selection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 418(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/418/1/012020>
- Syamsuddin, A., et al. (2023). Efektivitas Konsorsium Mikroba terhadap Patogen Tanah pada Tanaman Kakao. *Agrivita*, 45(1), 28–37.
- Tiwari, A., Tikoo, S. K., Angadi, S. P., Kadaru, S. B., Ajanahalli, S. R., & Vasudeva Rao, M. J. (2022). Maintenance Breeding. In *Market-Driven Plant Breeding for Practicing Breeders* (pp. 239–271). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5434-4_7

- Vindas-Reyes, E., Chacón-Cerdas, R. and Rivera-Méndez, W. (2024) 'Trichoderma Production and Encapsulation Methods for Agricultural Applications', *AgriEngineering*, 6(3), pp. 2366–2384. Available at: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030138>.
- Vlasenko, V. A., Vlasenko, A. V., & Turmunkh, D. (2020). The aridization effect on the characteristics of the substrate and biotopic distribution of fungi species of the *Polyporus* s.l. genus in the southeast of Western Siberia. *Samara Journal of Science*, 9(1), 25–30. <https://doi.org/10.17816/snv202091103>
- Nair, A., Rao, A. S., Bhanu, L., More, V. S., Anantharaju, K. S., & More, S. S. (2022). Arbuscular mycorrhizae, a treasured symbiont to agriculture. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 45–62). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85163-3.00011-9>
- Nam, B., Lee, H. J., & Choi, Y.-J. (2023). Organic Farming Allows Balanced Fungal and Oomycetes Communities. *Microorganisms*, 11(5), 1307. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051307>
- Nguyen, N. H. (2023). Fungal Hyphosphere Microbiomes Are Distinct from Surrounding Substrates and Show Consistent Association Patterns. *Microbiology Spectrum*, 11(2). <https://doi.org/10.1128/spectrum.04708-22>
- Nieto-Jacobo, M. F., Steyaert, J. M., Salazar-Badillo, F. B., Nguyen, D. V., Rostás, M., Braithwaite, M., De Souza, J. T., Jimenez-Bremont, J. F., Ohkura, M., Stewart, A., & Mendoza-Mendoza, A. (2017). Environmental Growth Conditions of *Trichoderma* spp. Affects Indole Acetic Acid Derivatives, Volatile Organic Compounds, and

- Plant Growth Promotion. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00102>
- Noel, D. J., Keevil, C. W., & Wilks, S. A. (2021). Synergism versus Additivity: Defining the Interactions between Common Disinfectants. *MBio*, 12(5). <https://doi.org/10.1128/mBio.02281-21>
- Noveriza, R., Rahajoeningsih, S., Harni, R., & Miftakhurohmah. (2020). Molecular identification of white root fungal pathogens and in vitro effect of nanopesticide. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 418(1), 012085. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/418/1/012085>
- Olowe, O. M., Nicola, L., Asemoloye, M. D., Akanmu, A. O., Sobowale, A. A., & Babalola, O. O. (2022). Characterization and antagonistic potentials of selected rhizosphere *Trichoderma* species against some *Fusarium* species. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.985874>
- Pandita, D. (2022). Reactive oxygen and nitrogen species: Antioxidant defense studies in plants. In *Plant Perspectives to Global Climate Changes* (pp. 355–371). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85665-2.00022-4>
- Parfenyuk, A., Kosovska, N., Borodai, V., & Turovnik, Y. (2022). Root exometabolites as an ecological factor in the interaction between cultivated plants and soil microorganisms. *Agroecological Journal*, 3, 62–74. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266410>
- Parveen, S. S., & Jeyarani, S. (2022). Laboratory Evaluation of Temperature Effects on Germination, Radial Growth and Sporulation of Entomopathogenic Fungi and on Their Pathogenicity to Red Spider Mite, *Tetranychus*

- urticae Koch. *Indian Journal Of Agricultural Research, Of*.
<https://doi.org/10.18805/IJARE.A-6010>
- Petrillo, C., Castaldi, S., Lanzilli, M., Selci, M., Cordone, A., Giovannelli, D., & Istatico, R. (2021). Genomic and Physiological Characterization of Bacilli Isolated From Salt-Pans With Plant Growth Promoting Features. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.715678>
- Phadke, G. G., Rathod, N. B., Ozogul, F., Elavarasan, K., Karthikeyan, M., Shin, K.-H., & Kim, S.-K. (2021). Exploiting of Secondary Raw Materials from Fish Processing Industry as a Source of Bioactive Peptide-Rich Protein Hydrolysates. *Marine Drugs*, 19(9), 480. <https://doi.org/10.3390/md19090480>
- Podnar, E., Erega, A., Danevčič, T., Kovačec, E., Lories, B., Steenackers, H., & Mandic-Mulec, I. (2022). Nutrient Availability and Biofilm Polysaccharide Shape the Bacillaene-Dependent Antagonism of *Bacillus subtilis* against *Salmonella Typhimurium*. *Microbiology Spectrum*, 10(6). <https://doi.org/10.1128/spectrum.01836-22>
- Poosapati, S., Ravulapalli, P. D., Viswanathaswamy, D. K., & Kannan, M. (2021). Proteomics of Two Thermotolerant Isolates of *Trichoderma* under High-Temperature Stress. *Journal of Fungi*, 7(12), 1002. <https://doi.org/10.3390/jof7121002>
- Poveda, J., & Eugui, D. (2022). Combined use of *Trichoderma* and beneficial bacteria (mainly *Bacillus* and *Pseudomonas*): Development of microbial synergistic bio-inoculants in sustainable agriculture. *Biological Control*, 176, 105100. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105100>

- Poveda, J., Eugui, D., & Abril-Urias, P. (2020). *Could Trichoderma Be a Plant Pathogen? Successful Root Colonization* (pp. 35–59). https://doi.org/10.1007/978-981-15-3321-1_3
- Poveda, J., Rodríguez, V. M., Abilleira, R., & Velasco, P. (2023). *Trichoderma hamatum* can act as an inter-plant communicator of foliar pathogen infections by colonizing the roots of nearby plants: A new inter-plant “wired communication.” *Plant Science*, 330, 111664. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111664>
- Povolo, C., Avolio, R., Doria, E., Marra, A., & Neresini, M. (2022). Development and validation of an analytical method to ensure quality requirements of hydrolysed proteins intended for agricultural use as biostimulants. *Talanta Open*, 5, 100082. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2022.100082>
- Prakash, O. (2022). Lack of kinship with anaerobes is a kind of short-sightedness of agricultural and environmental microbiologists. *Environmental Microbiology Reports*, 14(3), 330–332. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.13058>
- Prakash, V., & Basu, K. (2020). *Mass Multiplication of Trichoderma in Bioreactors* (pp. 113–126). https://doi.org/10.1007/978-3-030-54758-5_5
- Prashanthi, S., Asokhan, M., Janakirani, A., & Patil, S. G. (2022). Constraints for Adoption of CSA Technologies and the Suggested Measures. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 433–438. <https://doi.org/10.9734/ajaees/2022/v40i931024>
- Ptaszek, M., Canfora, L., Pugliese, M., Pinzari, F., Gilardi, G., Trzciński, P., & Malusà, E. (2023). Microbial-Based Products to Control Soil-Borne Pathogens: Methods to Improve Efficacy and to Assess Impacts on

- Microbiome. *Microorganisms*, 11(1), 224.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms11010224>
- Rajan K. Gupta, R. K. G. (2014). EFFECT OF EDAPHIC FACTORS ON THE DIVERSITY OF VAM FUNGI. *International Journal of Researches in Biosciences and Agriculture Technology*.
<https://doi.org/10.29369/ijrbat.2014.02.II.0091>
- Rojas-Sánchez, B., Guzmán-Guzmán, P., Morales-Cedeño, L. R., Orozco-Mosqueda, Ma. del C., Saucedo-Martínez, B. C., Sánchez-Yáñez, J. M., Fadiji, A. E., Babalola, O. O., Glick, B. R., & Santoyo, G. (2022). Bioencapsulation of Microbial Inoculants: Mechanisms, Formulation Types and Application Techniques. *Applied Biosciences*, 1(2), 198–220. <https://doi.org/10.3390/applbiosci1020013>
- Rosolem, C. A., Ritz, K., Cantarella, H., Galdos, M. V., Hawkesford, M. J., Whalley, W. R., & Mooney, S. J. (2017). *Enhanced Plant Rooting and Crop System Management for Improved N Use Efficiency* (pp. 205–239). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.07.002>
- Ruijten, P., Huinink, H. P., & Adan, O. C. G. (2020). *Penicillium rubens* germination on desiccated and nutrient-depleted conditions depends on the water activity during sporogenesis. *Fungal Biology*, 124(12), 1058–1067. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2020.10.006>
- Safronova, V., Sazanova, A., Belimov, A., Guro, P., Kuznetsova, I., Karlov, D., Chirak, E., Yuzikhin, O., Verkhovina, A., Afonin, A., & Tikhonovich, I. (2023). Synergy between Rhizobial Co-Microsymbionts Leads to an Increase in the Efficiency of Plant–Microbe Interactions. *Microorganisms*, 11(5), 1206. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051206>

- Sánchez-Clemente, R., Igeño, M. I., Población, A. G., Guijo, M. I., Merchán, F., & Blasco, R. (2018). Study of pH Changes in Media during Bacterial Growth of Several Environmental Strains. *Environment, Green Technology, and Engineering International Conference*, 1297. <https://doi.org/10.3390/proceedings2201297>
- Sangeetha, V. P., Remya, N. S., & Mohanan, P. V. (2022). Regulatory issues in biological products. In *Biomedical Product and Materials Evaluation* (pp. 309–327). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823966-7.00005-0>
- Shivamurthy, M., & Madhushree, A. (2022). Policy Initiatives for Improving Competencies of Agricultural Extension Graduates for Promotion of Agricultural Innovations. *International Journal of Environment and Climate Change*, 506–511. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2022/v12i121487>
- Scalize, P., Neto, A., & Albuquerque, A. (2018). WATER TREATMENT SLUDGE AS POTENTIAL SOIL AMENDMENT FOR NATIVE PLANTS OF THE BRAZILIAN CERRADO. *Environmental Engineering and Management Journal*, 17(5), 1169–1178. <https://doi.org/10.30638/eemj.2018.116>
- Schalamun, M., & Schmoll, M. (2022). Trichoderma – genomes and genomics as treasure troves for research towards biology, biotechnology and agriculture. *Frontiers in Fungal Biology*, 3. <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.1002161>
- Schreier, J. E., Smith, C. B., Ioerger, T. R., & Moran, M. A. (2023). A mutant fitness assay identifies bacterial interactions in a model ocean hot spot. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(12). <https://doi.org/10.1073/pnas.2217200120>

- Schwab, S. M. (1987). Considerations of vesicular-arbuscular mycorrhiza physiology in breeding for enhanced mineral uptake by plants. In *Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition* (pp. 603–615). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3581-5_56
- Seenivasagan, R., & Babalola, O. O. (2021). Utilization of Microbial Consortia as Biofertilizers and Biopesticides for the Production of Feasible Agricultural Product. *Biology*, 10(11), 1111. <https://doi.org/10.3390/biology10111111>
- Shu-cai, ZENG, Zhi-yao, SU, Bei-guang, CHEN, & Yuan-chun, YU (2005). Efek mikoriza VA (VAM) pada perolehan dan transmisi hara tanaman. *Jurnal Southwest Forestry University*, 25 (1), 72-75.
- Senkovs, M., Nikolajeva, V., Makarenkova, G., & Petrina, Z. (2021). Influence of *Trichoderma asperellum* and *Bacillus subtilis* as biocontrol and plant growth promoting agents on soil microbiota. *Annals of Microbiology*, 71(1), 34. <https://doi.org/10.1186/s13213-021-01647-3>
- Serri, D. L., Pérez-Brandan, C., Meriles, J. M., Salvagiotti, F., Bacigaluppo, S., Malmantile, A., & Vargas-Gil, S. (2022). Development of a soil quality index for sequences with different levels of land occupation using soil chemical, physical and microbiological properties. *Applied Soil Ecology*, 180, 104621. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104621>
- Shahriar, S. A., Islam, M. N., Chun, C. N. W., Kaur, P., Rahim, Md. A., Islam, Md. M., Uddain, J., & Siddiquee, S. (2022). Microbial Metabolomics Interaction and Ecological Challenges of *Trichoderma* Species as

- Biocontrol Inoculant in Crop Rhizosphere. *Agronomy*, 12(4), 900. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040900>
- Sharma, B., & Kumawat, K. C. (2022). Functional Diversity of Microbes in Rhizosphere: A Key Player for Soil Health Conservation Under Changing Climatic Conditions. In *Plant Stress Mitigators* (pp. 469–493). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7759-5_22
- Shi, R., Yu, J., Chang, X., Qiao, L., Liu, X., & Lu, L. (2023). Recent Advances in Research into Jasmonate Biosynthesis and Signaling Pathways in Agricultural Crops and Products. *Processes*, 11(3), 736. <https://doi.org/10.3390/pr11030736>
- Shim, M.-R. (2022). A study on the characteristics of patent licenses in the biohealth industry. *Wonkwang University Legal Research Institute*, 28, 393–432. <https://doi.org/10.22397/bml.2022.28.393>
- Shu-cai, ZENG, Zhi-yao, SU, Bei-guang, CHEN, & Yuan-chun, YU (2005). Efek mikoriza VA (VAM) pada perolehan dan transmisi hara tanaman. *Jurnal Southwest Forestry University*, 25 (1), 72-75.
- Shkrabak, V. S., Zhgulev, E. V., Gavrikova, E. I., & Shkrabak, R. V. (2020). Microbiological air analysis of industrial premises and photocatalysis efficiency for its disinfection. *BIO Web of Conferences*, 17, 00126. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700126>
- Singh, J., Singh Rajput, R., Singh, P., Ray, S., Vaishnav, A., M.Singh, S., & B.Singh, H. (2021). SCREENING, ISOLATION AND CHARACTERIZATION OF HEAT STRESS TOLERANT TRICHODERMA ISOLATES: SUSTAINABLE ALTERNATIVE TO CLIMATE CHANGE. *PLANT ARCHIVES*, 21(1).

<https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2021.v21.no1.235>

- Singh, P., Sharma, A., Nandi, A. K., & Nandi, S. P. (2021). Endophytes from *Argemone mexicana* and *Datura metel* activate induced-systemic resistance in multiple hosts and show host- and pathogen-specific protection. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 30(4), 1016–1019. <https://doi.org/10.1007/s13562-021-00734-5>
- Singh Rawat, V., Verma, M., Verma, H., & Dogra Rawat, C. (2022). Exploring Microbial Potential for Sustainable Agriculture. *Microsphere*, 1(1), 33–41. <https://doi.org/10.59118/BURT3321>
- Stamenkovic-Stojanovic, S., Karabegovic, I., Beskoski, V., Nikolic, N., & Lazic, M. (2019). Bacillus based microbial formulations: Optimization of the production process. *Hemijska Industrija*, 73(3), 169–182. <https://doi.org/10.2298/HEMIND190214014S>
- Stummer, B. E., Zhang, X., Yang, H., & Harvey, P. R. (2022). Co-inoculation of *Trichoderma gamsii* A5MH and *Trichoderma harzianum* Tr906 in wheat suppresses in planta abundance of the crown rot pathogen *Fusarium pseudograminearum* and impacts the rhizosphere soil fungal microbiome. *Biological Control*, 165, 104809. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104809>
- Subhalakshmi, T., & Singh, R. K. I. (2022). Trichoderma: A Beneficial Organism for Agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 11(1), 440–444. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2022.1101.055>
- Sun, L., Lei, Y., & Li, H. (2022). Exploring the Fundamental Factors Behind Algal-Bacterial Symbiosis and Their Impact on Ecological Interactions. *Frontiers in*

- Sylvia, D. M. (2019). Distribution, Structure, and Function of External Hyphae of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi. In *Rhizosphere Dynamics* (pp. 144–167). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429304798-6>
- Tavera-Zavala, D. D., Hernández-Escareño, J. J., Ulibarri, G., & Sánchez-Yáñez, J. M. (2017). Inoculación de *Trichoderma harzianum* en *Zea mays* y su efecto a la adición del fertilizante nitrogenado al 50%. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 8(2), 115–123. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2017.080200115>
- Tawfeeq Al-Ani, L. K., Aguilar-Marcelino, L., Fiorotti, J., Sharma, V., Sarker, M. S., Furtado, E. L., Wijayawardene, N. N., & Herrera-Estrella, A. (2020). Biological Control Agents and Their Importance for the Plant Health. In *Microbial Services in Restoration Ecology* (pp. 13–36). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819978-7.00002-6>
- Teixidó, N., Segarra, G., Casals, C., Usall, J., & Torres, R. (2020). *Formulations to Improve Biocontrol Products Shelf-Life and/or Ecosystem Adaptation* (pp. 257–273). https://doi.org/10.1007/978-3-030-53238-3_15
- Theresa, M., & Radhakrishnan, E. K. (2021). Microbial biocontrol formulations for commercial applications. In *Microbiome Stimulants for Crops* (pp. 179–192). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822122-8.00025-X>
- Thomloundi, E.-E., Tsalgatidou, P. C., Douka, D., Spantidos, T.-N., Dimou, M., Venieraki, A., & Katinakis, P. (2019). Multistrain versus single-strain plant growth promoting microbial inoculants - The compatibility

- issue. *Hellenic Plant Protection Journal*, 12(2), 61–77.
<https://doi.org/10.2478/hppj-2019-0007>
- Tsegaye Redda, E., Ma, J., Mei, J., Li, M., Wu, B., & Jiang, X. (2018). Antagonistic Potential of Different Isolates of *Trichoderma* against *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, and *Botrytis cinerea*. *European Journal of Experimental Biology*, 08(02).
<https://doi.org/10.21767/2248-9215.100053>
- Theresa, M., & Radhakrishnan, E. K. (2021). Microbial biocontrol formulations for commercial applications. In *Microbiome Stimulants for Crops* (pp. 179–192). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822122-8.00025-X>
- Thomloudi, E.-E., Tsalgatidou, P. C., Douka, D., Spantidos, T.-N., Dimou, M., Venieraki, A., & Katinakis, P. (2019). Multistrain versus single-strain plant growth promoting microbial inoculants - The compatibility issue. *Hellenic Plant Protection Journal*, 12(2), 61–77.
<https://doi.org/10.2478/hppj-2019-0007>
- Tsegaye Redda, E., Ma, J., Mei, J., Li, M., Wu, B., & Jiang, X. (2018). Antagonistic Potential of Different Isolates of *Trichoderma* against *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, and *Botrytis cinerea*. *European Journal of Experimental Biology*, 08(02).
<https://doi.org/10.21767/2248-9215.100053>
- Unsoed, P., AS, Y., Sumadi, S., & Simarmata, T. (2017). Viability of *Trichoderma harzianum* Grown on Different Carrier Formulation. *KnE Life Sciences*, 2(6), 95. <https://doi.org/10.18502/kls.v2i6.1024>
- Valero Díaz, A. (2020). Los criterios microbiológicos: principios para su establecimiento y aplicación en la seguridad alimentaria. *Arbor*, 196(795), a537.
<https://doi.org/10.3989/arbor.2020.795n1001>

- Vipul, K., Mohammad, S., Mukesh, S., Anuradha, S., Sonika, P., & Manoj, K. M. (2015). Screening of *Trichoderma* species for virulence efficacy on seven most predominant phytopathogens. *African Journal of Microbiology Research*, 9(11), 793–799. <https://doi.org/10.5897/AJMR2014.7342>
- Vipul, K., Mohammad, S., Mukesh, S., Anuradha, S., Sonika, P., & Manoj, K. M. (2015). Screening of *Trichoderma* species for virulence efficacy on seven most predominant phytopathogens. *African Journal of Microbiology Research*, 9(11), 793–799. <https://doi.org/10.5897/AJMR2014.7342>
- Wang, B., Zhu, L., Yang, T., Qian, Z., Xu, C., Tian, D., & Tang, L. (2022). Poplar agroforestry systems in eastern China enhance the spatiotemporal stability of soil microbial community structure and metabolism. *Land Degradation & Development*, 33(6), 916–930. <https://doi.org/10.1002/ldr.4199>
- Wei, Z., Ahmed Mohamed, T., Zhao, L., Zhu, Z., Zhao, Y., & Wu, J. (2022). Microhabitat drive microbial anabolism to promote carbon sequestration during composting. *Bioresource Technology*, 346, 126577. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126577>
- Wilson, L. (2023). Regulation of Biological Agents and Biotechnology. In *Encyclopedia of Forensic Sciences, Third Edition* (pp. 376–386). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823677-2.00232-4>
- Widyastuti, R., et al. (2016). Pengendalian Biologis Penyakit Akar Putih pada Bibit Tanaman Perkebunan. *Jurnal Agroteknologi Tropika*, 5(2), 98–106.
- Wojciechowska, P. (2022). Organic–Inorganic Hybrid Materials for Active Packaging Applications. In *Bio-*

and Nano-sensing Technologies for Food Processing and Packaging (pp. 63–80). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781839167966-00063>

- Wang, Y., Zhu, X., Wang, J., Shen, C., & Wang, W. (2023a). Identification of Mycoparasitism-Related Genes against the Phytopathogen *Botrytis cinerea* via Transcriptome Analysis of *Trichoderma harzianum* T4. *Journal of Fungi*, 9(3), 324. <https://doi.org/10.3390/jof9030324>
- Weng, W., Yan, J., Zhou, M., Yao, X., Gao, A., Ma, C., Cheng, J., & Ruan, J. (2022). Roles of Arbuscular mycorrhizal Fungi as a Biocontrol Agent in the Control of Plant Diseases. *Microorganisms*, 10(7), 1266. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10071266>
- 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>
- Xu, K., Li, X.-Q., Zhao, D.-L., & Zhang, P. (2021). Antifungal Secondary Metabolites Produced by the Fungal Endophytes: Chemical Diversity and Potential Use in the Development of Biopesticides. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.689527>
- Yoo, D., & Chavas, J. (2023). Dynamic modeling of biotechnology adoption with individual versus social learning: An application to US corn farmers. *Agribusiness*, 39(1), 148–166. <https://doi.org/10.1002/agr.21772>
- Yuan, J., Raza, W., & Shen, Q. (2018). *Root Exudates Dominate the Colonization of Pathogen and Plant Growth-Promoting*

Rhizobacteria (pp. 167–180). https://doi.org/10.1007/978-3-319-75910-4_6

Yuanjing, W., & Yunfei, L. (2023). Research on the Application of Data Analysis in Agricultural Products E-Commerce. *2023 IEEE International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT)*, 616–620.

<https://doi.org/10.1109/ICCECT57938.2023.10141359>

ZAW, M., & MATSUMOTO, M. (2020). Plant Growth Promotion of *Trichoderma virens*, Tv911 on Some Vegetables and Its Antagonistic Effect on Fusarium Wilt of Tomato. *Environment Control in Biology*, *58*(1), 7–14. <https://doi.org/10.2525/ecb.58.7>

Zeng, X., Jiang, H., Yang, G., Ou, Y., Lu, S., Jiang, J., Lei, R., & Su, L. (2022). Regulation and management of the biosecurity for synthetic biology. *Synthetic and Systems Biotechnology*, *7*(2), 784–790. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2022.03.005>

Zeyad, M. T., Rajawat, M. V. S., Kumar, M., Malik, A., Anas, M., Ansari, W. A., Singh, B. N., Singh, D., & Saxena, A. K. (2021). Role of Microorganisms in Plant Adaptation Towards Climate Change for Sustainable Agriculture. In *Microbiomes and the Global Climate Change* (pp. 247–266). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4508-9_14

Zhao, J., Pan, F., Xiao, X., Hu, L., Wang, X., Yan, Y., Zhang, S., Tian, B., Yu, H., & Lan, Y. (2023). Summer Maize Growth Estimation Based on Near-Surface Multi-Source Data. *Agronomy*, *13*(2), 532. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020532>

BIODATA PENULIS

Henik Sukorini, Ir., MP., Ph.D., lahir di Blitar, 24 Januari 1967, dosen di Fakultas Pertanian-Peternakan Universitas Muhammadiyah Malang. Lulus Sarjana (S1) Ilmu Hama dan Penyakit tanaman (1991) Universitas Brawijaya Malang dan Magister (S2) Ilmu Hama dan Penyakit tanaman. Lulus Program Doktor (S3) dari Kasetsart University, Bangkok, Thailand pada tahun 2013. Beberapa penelitian yang ditulis (1) Biodiesel Industrial Waste Based On *Jatropha Curcas* L As A Fungicide To Control *Fusarium Oxysporum* And *Alternaria Solani*, 2021 (2) Exploration and Effectiveness of *Trichoderma* sp. from Jember and Trenggalek, East Java, Indonesia Cacao Plantation as A Biological Control of *Phytophthora palmivora*, 2021 Jurnal Internasional Web Of Conference (3) Variability of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* from different altitudes in East Java, Indonesia, 2021 Jurnal Internasional Web Of Conference. (4) Storage fungi and ochratoxin A associated with arabica coffee bean in postharvest processes in Northern Thailand (Food Control, 2021). (5) Molecular Characteristic of *Fusarium oxysporum* from Different Altitudes in East Java, Indonesia (Jordan Journal of Biological Sciences, 2021) (6) Controlling Basal Stem Rot in Oil Palm Plantation by applying Arbuscular Mycorrhiza fungi and *Trichoderma* spp (KnE life Science, 2021). Publikasi yang lain di tahun 2021 hingga 2025 dapat dilihat di link Google Scholar <https://scholar.google.com/citations?user=eLHTn1cAAAAJ&hl=id>

Implementasi *Trichoderma harzianum* dan VAM

untuk Mengendalikan Penyakit
Akar Putih pada Kopi Arabika

Buku ini menguraikan tentang efektifitas dua agen hayati, yaitu jamur *Trichoderma harzianum* Rifai dan jamur akar yaitu mikoriza. Penyakit akar putih merupakan penyakit utama pada tanaman kopi dan karet, jamur pathogen ini merupakan jamur tanah sehingga sangat sulit dikendalikan. Jamur tular tanah hanya efektif dikendalikan dengan jamur tanah juga. Sampai saat ini, penelitian tentang kombinasi kedua jamur ini belum pernah dilakukan sehingga buku ini dapat dijadikan sumber referensi bagi para peneliti lainnya atau sumbangsih informasi bagi keilmuan agroteknologi khususnya dalam pengendalian penyakit.

Bildung



+6281227475754



Bildung



@sahabatbildung



bildungpustakautama@gmail.com



www.penerbitbildung.com

ISBN 978-634-7056-86-3



9

786347

056863