

Artikel Review:

Aplikasi Inokulum Fungi *Trichoderma* spp. Untuk Pertumbuhan dan Penekan Fitopatogen

EGA F.S. BINA*, BAMBANG IRAWAN**, WAWAN A. SETIAWAN, CHRISTINA N. EKOWATI

Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, Bandar Lampung

Diterima: 26 Mei 2022 – Disetujui: 24 September 2022
© 2022 Jurusan Biologi FMIPA Universitas Cenderawasih

ABSTRACT

The growth of a plant is influenced by the availability of nutrients. To meet these nutritional needs, chemical fertilizers are still widely used. In addition to nutritional needs, the growth of a plant is also influenced by pathogenic microorganisms that cause disease. The emergence of diseases in plants causes chemical pesticides to be increasingly used. The continuous use of chemical fertilizers and chemical pesticides can make living organisms susceptible to high toxicity of chemical compounds. In addition, the impact has an impact on improper management of agricultural waste as well as polluting the environment when it has been burned or discharged into water bodies. One alternative to overcome these problems is the application of biological control using *Trichoderma* spp. *Trichoderma* spp. inoculum application can significantly regulate the rate of plant growth and suppress the growth of plant pathogenic microorganisms. *Trichoderma* spp. including plant growth promoting microbes that have the ability to colonize plant roots so as to provide benefits to their host, modulate phytohormonal production, increase soil nutrient availability, stimulate plant growth and tolerance to biotic and abiotic stresses, and resistance to pathogens. Inoculum of *Trichoderma* spp. can be applied to plants through seeds, leaves, roots of seedlings, and soil. Based on literature review, it is known that the application of *Trichoderma* spp. inoculum showed a significant effect on plant growth and suppress the growth of pathogenic microorganisms.

Key words: *Trichoderma* spp.; inoculum; fungi; biofertilizer; biofungicide.

PENDAHULUAN

Peningkatan populasi manusia berbanding lurus dengan kebutuhan pangan. Hal ini mendorong petani untuk memproduksi lebih banyak tanaman. Peningkatan produktivitas tanaman masih banyak bergantung pada penggunaan pupuk kimia (Stewart & Roberts, 2012) dan pestisida (Popp *et al.*, 2012). Penggunaan pupuk kimia dan pestisida yang berlebihan membuat organisme hidup rentan terhadap toksisitas senyawa kimia yang tinggi. Masalah lain

seperti pengelolaan limbah pertanian yang tidak tepat juga mencemari lingkungan ketika telah dibakar atau dibuang ke badan air. Hal ini menimbulkan kebutuhan untuk mengeksplorasi metode alternatif guna meningkatkan pemupukan dan mengelola hama dan penyakit (Kubheka & Ziena, 2020).

Pupuk hayati menjadi pilihan alternatif karena lebih ramah terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Suebrasri, *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2021). *Trichoderma* spp. merupakan salah satu fungi yang dapat menghasilkan berbagai senyawa pemacu pertumbuhan tanaman seperti enzim dan fitohormon (Macías-Rodríguez *et al.*, 2020). Enzim yang dihasilkan dapat membantu tanaman untuk menyerap nutrisi yang tidak dapat diserap oleh tanaman karena bentuknya. Misalnya tanah masam cenderung mengikat fosfor

* Alamat korespondensi:

Jurusan Biologi, FMIPA, Universitas Lampung, Bandar Lampung. Jl. Prof. Soemantri Brodjonegoro, No 1, Bandar Lampung 35145. Email: 94egafebiola@gmail.com; bambang.irawan@fmipa.unila.ac.id

membentuk kompleks beracun yang membuat fosfor tidak tersedia untuk tanaman. Hal ini menyebabkan tanaman tidak dapat menyerap nutrisi yang tersedia. Beberapa enzim yang dihasilkan oleh *Trichoderma* spp. melarutkan fosfat sehingga fosfor tersedia kembali untuk tanaman (Sing *et al.*, 2020). Disisi lain, fitohormon adalah senyawa yang bertanggung jawab untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Beberapa bertanggung jawab untuk pemanjangan tanaman, perkembangan tunas dan akar serta dalam pengendalian hama dan penyakit tanaman (Ren *et al.*, 2018). Sejumlah penelitian melaporkan bahwa *Trichoderma* spp. dapat meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman melalui produksi hormon pertumbuhan seperti IAA dan GA3 (Zhang *et al.*, 2019).

Biopestisida juga menjadi alternatif untuk meminimalkan kerusakan akibat pestisida kimia terhadap lingkungan, hewan, dan manusia. *Trichoderma* penting dan banyak digunakan dalam pengelolaan patogen tanaman di bidang pertanian. Strain *Trichoderma* dapat menjajah tanah dan akar inang, menghuni ruang fisik dan menghindari multiplikasi fitopatogen, memproduksi enzim perusak dinding sel, memproduksi metabolit antimikroba yang membunuh patogen, induksi pertahanan tanaman mekanisme, mempromosikan perkembangan tanaman dan meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman biotik dan abiotik (Konappa *et al.*, 2022).

KEMAMPUAN INOKULUM FUNGI *Trichoderma* spp. DALAM MENINGKATKAN PERTUMBUHAN TANAMAN DAN MENEKAN FITOPATOGEN

Genus *Trichoderma* merupakan fungi multifungsional yang memiliki kontribusi besar atas kemampuannya di antara berbagai strain. Pada umumnya, *Trichoderma* ditemukan pada berbagai ekosistem seperti hutan dan tanah pertanian.

Strain *Trichoderma* dapat diidentifikasi dengan ciri morfologi dimana pada awalnya, strain *Trichoderma* tampak putih dan seperti kapas, kemudian berkembang menjadi jumbai kompak hijau kekuningan sampai hijau tua terutama di tengah tempat tumbuh atau di zona seperti cincin konsentris pada permukaan agar-agar. Konidiofornya berulang kali bercabang, tersusun tidak teratur dalam lingkaran, muncul sebagai kelompok divergen, biasanya membengkok asimetris, berbentuk labu/silindris hingga pialides hampir subglobose. Konidia ellipsoidal hingga globose umumnya berwarna hijau, terkadang hialin mengelompok secara agregat di terminal pialides (Zhu & Zhuang, 2015).

Trichoderma termasuk ke dalam famili Hypocreaceae. Berdasarkan tinjauan yang dilakukan oleh Bissett (1991), berdasarkan morfologi yang mencakup karakteristik sistem percabangan konidiofornya, *Trichoderma* dapat dikelompokkan menjadi lima bagian yaitu *Saturnisporum*, *Pachybasium*, *Longibrahiautum*, *Trichoderma*, dan *Hypocreanum*. Umumnya, ciri morfologi digunakan untuk mengklasifikasikan spesies *Trichoderma*. Waghunde *et al.* (2016) menyatakan bahwa spesies yang termasuk dalam genus *Trichoderma* berjumlah sekitar 10.000 spesies.

Trichoderma spp. memiliki berbagai kemampuan di antaranya meningkatkan pertumbuhan tanaman dan membunuh/menghambat patogen tanaman (El Komy *et al.*, 2015). Selain itu, *Trichoderma* spp. juga dapat mendetoksifikasi senyawa beracun dan mempercepat degradasi bahan organik (Amira *et al.*, 2011). Pada ekosistem tanah, *Trichoderma* spp. berperan sebagai dekomposer alami karena kemampuannya mempercepat pertumbuhan, kemampuannya dalam penyerapan unsur hara dan kemampuannya memodifikasi rizosfer. *Trichoderma* spp. juga mampu mentolerir lingkungan yang tidak menguntungkan dan memiliki kemampuan destruktif yang kuat terhadap mikroorganisme patogen tanaman (Benítez *et al.*, 2004).

Untuk meningkatkan pertumbuhan, *Trichoderma* spp. melepaskan senyawa mirip hormon yang mendorong perkembangan akar dan pertumbuhan tanaman (Cai *et al.*, 2015). Pertumbuhan tanaman yang cepat menginduksi populasi mikroba melalui sekresi eksudat akar dalam jumlah yang signifikan, yang pada gilirannya meningkatkan ketersediaan nutrisi untuk konsumsi mikroba (Carvalhais *et al.*, 2015). *Trichoderma* spp. dapat diaplikasikan dengan berbagai cara yang salah satunya digunakan sebagai pupuk hayati. Penggunaan *Trichoderma* spp. sebagai pupuk hayati didasarkan pada kemampuan *Trichoderma* spp. untuk merangsang pertumbuhan tanaman banyak tanaman dengan cara menghasilkan hormon pertumbuhan tanaman dan senyawa volatil, berkontribusi melarutkan fosfat yang tidak tersedia untuk tanaman, dan berperan mempromosikan penyerapan nutrisi yang dibutuhkan oleh tanaman.

Trichoderma pertama kali dilaporkan sebagai penekan patogen pada awal 1930-an dalam pengendalian *Armillaria mellea* penyebab busuk akar pada jeruk (Pellegrini *et al.*, 2014). *Trichoderma* adalah fungi antagonis yang memiliki kemampuan biokontrol terhadap berbagai jamur fitopatogen seperti *Phytophthora*, *Rhizoctonia*, *Sclerotium*, *Phythium*, *Fusarium*, *Sclerotinia*, dan *Galumannomyces* (Rocha-Ramirez *et al.*, 2020). Spesies *Trichoderma* spp. telah menjadi perhatian khusus sebagai biokontrol karena pertumbuhannya yang cepat dan kemampuan memanfaatkan substrat yang berbeda, spesies dari genus ini sering merupakan komponen dominan dari mikoflora tanah di berbagai ekosistem. Kemampuan untuk menghasilkan enzim hidrolitik, metabolit sekunder, dan degradasi xenobiotik juga merupakan keuntungan tambahan (Zin & Badaluddin, 2020). Kompetisi untuk nutrisi dan relung ekologi, mikoparasitisme dan antibiosis adalah mekanisme biologis utama yang terlibat dalam aktivitas antagonis langsung mereka terhadap jamur patogen tanaman (Marzano *et al.*, 2013). *Trichoderma* spp. juga dapat

mencapai efek antagonisme tidak langsung pada patogen target dengan berinteraksi dengan jaringan inang, menginduksi resistensi inang yang melindungi terhadap patogen, mendorong pertumbuhan tanaman dan akar serta meningkatkan toleransi stres tanaman. Banyak agen biokontrol yang sukses menggunakan kombinasi mode aksi yang berbeda untuk menghasilkan tingkat antagonisme yang lebih tinggi (Adnan *et al.*, 2019).

METODE INOKULASI

Inokulum *Trichoderma* spp. dapat diinokulasikan pada tanaman dengan beberapa metode yang berbeda yaitu inokulasi pada benih, akar, tanah, dan daun. Inokulasi daun merupakan metode yang paling jarang digunakan, sementara inokulasi benih adalah metode yang paling sering digunakan (Arora *et al.*, 2020). Keberhasilan inokulum dipengaruhi oleh variasi komposisi, jumlah eksudat akar selama pertumbuhan tanaman, dan juga cekaman lingkungan.

Inokulasi Benih

Inokulasi benih merupakan alternatif untuk perlakuan benih secara kimiawi. Metode ini dilakukan dengan merendam benih dalam larutan mikroorganisme dengan konsentrasi yang diketahui (Lopes *et al.*, 2018). Proses perkecambahan biji melepaskan karbohidrat dan asam amino yang melimpah dalam bentuk eksudat biji (Ahmad & Kibret, 2014). Dengan metode ini, organisme diperkenalkan bersama dengan benih yang diinokulasi di tanah menggunakan eksudat sebagai sumber nutrisi dan menjajah akar, segera setelah mereka muncul (Ammor *et al.*, 2008). Interaksi mikroba pemacu pertumbuhan dengan akar tanaman memodulasi tingkat fitohormon yang dihasilkan oleh tanaman. Fitohormon merupakan senyawa organik yang memodulasi pertumbuhan tanaman dan mampu menginduksi toleransi tanaman terhadap berbagai cekaman biotik dan abiotik (Khan *et al.*, 2020).

Mikroba menjajah jaringan tanaman dan mensintesis fitohormon, seperti giberelin yang meningkatkan perkecambahan (Bhat *et al.*, 2017). Mikroba pemacu pertumbuhan juga mampu menghasilkan senyawa antimikroba yang melindungi benih terhadap fitopatogen penyebab pembusukan benih (Souza *et al.*, 2015). Dalam metode inokulasi benih, inokulum tetap terbengkalai di dalam tanah, sampai diaktifkan oleh ujung akar yang sedang tumbuh. Dalam kondisi lapangan, seringkali perlu diinokulasi ulang untuk mempertahankan kepadatan sel yang efektif (Martínez-Viveros *et al.*, 2010).

Inokulasi Akar

Metode inokulasi akar dilakukan dengan merendam akar dalam larutan mikroorganisme (Romeiro, 2007). Setelah diinokulasi, bibit ditanam pada substrat yang tepat untuk perkembangannya. Metode ini memungkinkan standarisasi ukuran tanaman, karena inokulasi dapat dilakukan pada bibit dengan ukuran yang sama. Keuntungan lain dari metode inokulasi ini adalah inokulum ditempatkan langsung dalam kontak dengan akar inang, meningkatkan kolonisasi akar (Ahemad & Kibret, 2014). Metode ini lebih disukai digunakan pada spesies tanaman dengan perbanyakannya aseksual, karena mikroba pemacu pertumbuhan memiliki kemampuan untuk mensintesis fitohormon pertumbuhan seperti auksin, yang selain mendorong pertumbuhan tanaman, juga dapat melawan fitopatogen yang mengganggu kelangsungan hidup tanaman setelah tanam (Ahemad & Kibret, 2014).

Inokulasi Tanah

Metode inokulasi tanah dilakukan dengan memasukkan mikroba pemacu pertumbuhan langsung ke dalam tanah, dengan cara *drenching*, inkorporasi tanah (dicampur dalam substrat) atau mikrokapsul (Romeiro, 2007). Dalam perendaman tanah, larutan mikroorganisme ditambahkan sedekat mungkin dengan akar inang. Hal ini diperlukan karena di rizosfer inilah mikroba pemacu pertumbuhan akan dapat melakukan

beberapa fungsi penting untuk mendorong perkembangan tanaman, seperti pelarutan fosfat, sintesis siderofor dan fitohormon (Gouda *et al.*, 2018). Menurut Hernández-Montiel *et al.* (2017), inokulasi tanah dengan mikrokapsul menawarkan perlindungan dan viabilitas yang lebih besar, karena pelepasannya bertahap, meningkatkan daya rekat, stabilitas, dan kolonisasi akar.

APLIKASI INOKULUM *Trichoderma* spp. PADA TANAMAN

Menurut Hyakumachi & Kubota (2003), *Trichoderma* spp. dapat merangsang pertumbuhan tanaman secara langsung sebagai pupuk hayati. Dampak utama dari aplikasi inokulum sebagai pupuk hayati pada tanaman biasanya ditunjukkan pada pertumbuhan tanaman, kualitas hasil akhir dan produktivitas. Sebagian besar temuan melaporkan bahwa *Trichoderma* spp. meningkatkan kesehatan tanaman secara keseluruhan, menghasilkan hormon pertumbuhan tanaman dan senyawa volatil, berkontribusi melarutkan fosfat yang tidak tersedia untuk tanaman, serta berperan mempromosikan penyerapan nutrisi makro dan mikro yang dibutuhkan oleh tanaman.

Kelaurutan Fosfat

Fosfor merupakan unsur yang esensial bagi pertumbuhan dan perkembangan suatu tanaman. Unsur ini dapat ditemukan pada tanah namun beberapa kondisi menyebabkan unsur ini tidak cukup tersedia untuk tanaman sehingga penggunaan pupuk tambahan harus dilakukan. Ketersediaan fosfor untuk tanaman tergantung pada bentuknya. Tanah yang bersifat asam mengikat fosfor sehingga membuat fosfor tidak tersedia untuk tanaman (Goh *et al.*, 2013). Oleh karena itu, jumlah yang dibutuhkan oleh tanaman mungkin tidak tercapai sehingga menimbulkan kekurangan atau tidak cukupnya fosfor di dalam tanah (Singh *et al.*, 2020). Beberapa mikroorganisme memediasi proses ini dengan

melarutkan fosfat, mengubahnya kembali menjadi bentuk yang tersedia untuk pemanfaatan tanaman. Spesies *Trichoderma* telah dilaporkan sebagai salah satu organisme tersebut. Spesies seperti *Trichoderma harzianum* (Mercl *et al.*, 2020) dan *Trichoderma reesei* (Gaspiretti *et al.*, 2012) melarutkan fosfat melalui produksi enzim yang disebut fitase. Spesies *Trichoderma* lainnya seperti *Trichoderma koningiopsis* melarutkan fosfat dengan memproduksi enzim alkaline fosfatase (Eslahi *et al.*, 2020).

Produksi Hormon Pertumbuhan Tanaman Dan Senyawa Volatil

Hormon pertumbuhan tanaman juga disebut fitohormon. Fitohormon terlibat pada banyak

proses tanaman termasuk komunikasi, manajemen stres biotik dan abiotik, dan proses lainnya. Pemanjangan akar dan tunas membutuhkan fitohormon sehingga dapat berlangsung dengan baik pada kecepatan yang tepat yang memengaruhi tingginya produktivitas. Adanya *Trichoderma* meningkatkan produksi beberapa hormon pertumbuhan seperti asam indole-3-asetat (IAA) dan asam gibberelat (Bader *et al.*, 2020). Hormon tersebut penting dalam mendorong pertumbuhan tanaman yang bertanggung jawab atas pemanjangan tanaman (Singh *et al.*, 2019). Di sisi lain, *Trichoderma* juga memerikan pengaruh baik dalam memacu tingkat perkecambahan dan meningkatkan kekuatan bibit. Hal tersebut ni juga terkait dengan keseimbangan dari fitohormon.

Tabel 1. Aplikasi inokulum *Trichoderma* spp. sebagai pupuk hayati untuk pertumbuhan beberapa jenis tanaman.

Strain <i>Trichoderma</i>	Pengaruh	Tanaman Target	Sumber Referensi
<i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Trichoderma asperellum</i> , <i>Trichoderma hamatum</i> , dan <i>Trichoderma atroviride</i>	Peningkatan hasil produksi sebesar 37%; peningkatan aktivitas enzim dalam tanah (urease sebesar 25,1%, fosfatase sebesar 13,1%, dan katalase sebesar 14,0%, menyediakan lebih banyak nitrogen dan fosfor anorganik ke dalam tanah.	Sawi putih	Ji <i>et al.</i> (2020)
<i>Trichoderma brevicompactum</i> , <i>Trichoderma gamsii</i> dan <i>T. harzianum</i>	Menghasilkan asam asetat indole-3.	Tomat	Bader <i>et al.</i> (2020)
<i>T. harzianum rifai</i> ; <i>T. asperellum</i> T42	Meningkatkan penyerapan fosfor.	Tomat	Yu <i>et al.</i> (2021)
<i>Trichoderma erinaceum</i>	Meningkatkan kecepatan perkecambahan, meningkatkan vigor tanaman, dan meningkatkan hasil tanaman.	Padi	Swain <i>et al.</i> (2021)
<i>Trichoderma simmonsii</i>	Hasil tanaman mengalami peningkatan sebesar 67%, meningkatkan toleransi terhadap tekanan abiotik.	Paprika	Rokni <i>et al.</i> (2021)
<i>T. asperellum</i> T34	Meningkatkan penyerapan unsur Fe dan Cu oleh tanaman.	Timun	Santiago <i>et al.</i> (2013)

Tabel 2. Aplikasi inokulum *Trichoderma* spp. sebagai biopestisida untuk pertumbuhan beberapa jenis tanaman.

Strain <i>Trichoderma</i>	Fungi Patogen	Tanaman Target	Mekanisme Serangan	Sumber Referensi
<i>Trichoderma pseudokoningii</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>	Timun	Antibiosis metacaspase- independen Kematian sel apoptosis.	Mei <i>et al.</i> (2019)
<i>T. asperellum</i>	<i>Pseudomonas syringae</i>	Tomat	Resistensi yang diinduksi	Morán-Diez <i>et al.</i> (2020)
<i>T. virens</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Kapas	Kolonisasi dan antibiosis	Gajera <i>et al.</i> (2020)
<i>T. brevicrasum</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Timun	Mikoparasitisme	Zhang <i>et al.</i> (2020)

Peningkatan penyerapan unsur hara pada suatu tanaman dapat mendorong pertumbuhan tanaman. Mikroorganisme memainkan peran utama dalam mempercepat penyerapan unsur hara. *Trichoderma* merupakan salah satu mikroorganisme yang berperan dalam penyerapan nutrisi (Eke *et al.*, 2019). Inokulum *Trichoderma viride* yang diaplikasikan pada tanaman tebu menghasilkan peningkatan nitrogen, kalium, fosfor dan karbon organik (Yadav *et al.*, 2009). Ketersediaan dan juga serapan unsur hara ditingkatkan dengan kehadiran *Trichoderma* di rizosfer. Penyerapan nutrisi ditingkatkan karena konversi unsur hara yang dibutuhkan tidak tersedia untuk tanaman ke bentuk yang tersedia. Misalnya pada tanah masam, pupuk kimia yang digunakan diubah menjadi bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman, membentuk kompleks yang bahkan dapat menjadi racun bagi tanaman seperti kompleks aluminium (Valentinuzzi *et al.*, 2016). Kemampuan untuk menjajah akar dengan baik merupakan keunggulan *Trichoderma* dibandingkan mikroorganisme lain. Oleh karena itu *Trichoderma* memberikan hasil pemupukan yang lebih baik dan berkelanjutan karena tersedia dalam sistem akar sebagai endofit serta penjajah akar untuk waktu yang lebih lama daripada pupuk kimia.

Pupuk kimia akan habis karena tidak berkembang biak seperti mikroorganisme. Keberlanjutan adalah salah satu manfaat potensial yang diberikan *Trichoderma* spp. sebagai pupuk hayati.

Woo *et al.* (2014) menyebutkan bahwa *Trichoderma* spp. adalah agen biokontrol yang paling umum digunakan terhadap spektrum yang luas dari akar, pucuk, dan patogen pascapanen. Siemering *et al.* (2016) melaporkan dalam artikelnya bahwa akar menjadi habitat utama jamur, terutama di sepanjang permukaan akar dan di bawah lapisan terluar sel akar. Untuk membentuk jamur di dalam dan di akar tanaman, *Trichoderma* efektif diterapkan selama penyemaian. Beberapa peneliti melaporkan bahwa perlakuan benih merupakan teknik yang berhasil memastikan kolonisasi pada *Trichoderma* spp. pada akar untuk memberikan manfaat tanaman (Gava & Pinto, 2016). Terdapat mekanisme utama pengendalian hayati oleh *Trichoderma* spp. yang bekerja pada patogen. Mekanisme pertama yaitu pengenalan dan invasi terhadap spesies mirip jamur patogen tanaman melalui gangguan dinding sel dan penyerapan nutrisi yang dilepaskan (Bhat *et al.*, 2017). Mekanisme kedua yaitu dengan menginduksi ketahanan tanaman terhadap penyakit melalui perubahan arsitektur akar selama interaksi dengan patogen (Kumar *et*

al., 2019). Mekanisme ketiga yaitu menyerang nematoda simpul akar dan kista dengan menghancurkan telur nematoda dan juvenil fase kedua, juga beberapa segmen nematoda dewasa (Heidari & Olia, 2016).

Antibiosis Sebagai Mekanisme Pengendalian Patogen

Antibiosis melibatkan produksi berbagai senyawa antimikroba oleh strain *Trichoderma* yang menghambat atau mengurangi pertumbuhan dan proliferasi fitopatogen (de la Cruz-Quiroz *et al.*, 2020). Kebanyakan strain *Trichoderma* juga menghasilkan metabolit toksik yang mudah dan tidak mudah menguap yang menghambat kolonisasi oleh mikroorganisme yang diserang seperti produksi asam harzianik, alamethicin, trikolin, peptaibol, dan antibiotik (Chilosi *et al.*, 2020). Fenomena ini telah diamati pada berbagai jamur termasuk *Trichoderma*, yang dapat menghasilkan banyak senyawa dengan sifat antagonis termasuk enzim pengurai dinding sel seperti selulase, xilanase, pektinase, glukonase, lipase, amilase, arabinase, dan protease, metabolit volatil seperti 6-n-pentyl-2H-pyran-2-one (6-PAP) (Mukhopadhyay *et al.*, 2020) dan beberapa antibiotik seperti trichodermin, trichodermol, gliovirin, gliotoxin, viridin, herzianolide, pyrones, peptaibols, ethylene dan formic aldehyde. Secara umum, galur *T. virens* dengan efisiensi terbaik sebagai agen biokontrol dapat menghasilkan gliovirin (Bansal *et al.*, 2021).

Mikoparasitisme

Mikoparasitisme merupakan kontak langsung fungi antagonis dengan fungi patogen. Peristiwa ini diawali dengan pengenalan patogen, serangan serta penetrasi sel inang berikutnya, dan kematian (Gajera *et al.*, 2020). Spesies *Trichoderma* awalnya menghasilkan enzim pengurai dinding sel pada tingkat rendah dalam upaya untuk mengidentifikasi mangsanya. Setelah dikenali, pertumbuhan ke arah area target patogen diinduksi bersama dengan produksi yang lebih tinggi dari enzim pendegradasi dinding sel,

terutama kitinase, glukonase dan protease (Almeida *et al.*, 2021). Spesies *Trichoderma* kemudian akan menempel pada mangsanya dengan mengikat karbohidrat yang ada di *Trichoderma* ke lektin jamur, diikuti dengan melingkar di sekitar hifa patogen dan perkembangan apressoria untuk menembus hifa, yang kemudian diserang dan didegradasi melalui produksi hidrolitik, enzim dan metabolit sekunder. Enzim pendegradasi dinding sel lain yang merupakan polimer hidrolisis seperti -1,6-glukan dan -1,3-glukan dilaporkan lebih lanjut memastikan disintegrasi lengkap miselia jamur atau konidia (Chao & Wen-Ying, 2019).

Persaingan di Rizosfer

Kekurangan nutrisi adalah penyebab kematian mikroorganisme yang paling umum, sehingga ketersediaan dan kompetisi yang terbatas untuk nutrisi mikro dan makro mengakibatkan kontrol biologis fitopatogen jamur (Poveda & Baptista, 2021). *Trichoderma* menunjukkan kemampuan penyerapan dan mobilisasi nutrisi yang lebih baik dari tanah dibandingkan dengan mikroorganisme rizosfer lainnya; oleh karena itu, biokontrol patogen jamur menggunakan *Trichoderma* melibatkan koordinasi berbagai strategi, seperti kompetisi nutrisi, yang dianggap sebagai faktor penting (Usman *et al.*, 2018). Pada sebagian besar jamur berfilamen, penyerapan zat besi sangat penting untuk kelangsungan hidup. Pada keadaan kekurangan zat besi, sebagian besar jamur mengekskresikan khelator spesifik besi-besi dengan berat molekul rendah, yang disebut siderofor, untuk memobilisasi besi lingkungan (Devi *et al.*, 2016). Strain *Trichoderma* tertentu dapat menghasilkan siderofor dengan menjebak ion besi dari relung bersama yang menghambat pertumbuhan dan aktivitas patogen jamur seperti *Botrytis cinerea* (Deng *et al.*, 2019).

Priming Mekanisme Resistensi Pada Tanaman

Selama interaksi tanaman-patogen, tanaman telah mengembangkan berbagai mekanisme

pertahanan untuk mengatasi serangan konstan oleh patogen yang menyerang. Namun, pertahanan tanaman juga dapat dipicu oleh agen biokontrol (Macías-Rodríguez *et al.*, 2020). Sifat rizokompeten spesies *Trichoderma* memungkinkan untuk menjajah akar, memicu sistem kekebalan tanaman (resistensi sistemik yang diinduksi), dan pra-aktivasi (priming) dari mekanisme pertahanan molekuler terhadap beberapa fitopatogen kuat dan kondisi tantangan stres (Alizadeh *et al.*, 2013). Selanjutnya, kolonisasi jamur yang menguntungkan ini mendorong pertumbuhan tanaman dan juga meningkatkan tanaman inang terhadap berbagai tekanan abiotik dan biotik (Singh *et al.*, 2019). Priming memfasilitasi reaksi yang lebih cepat dan lebih kuat jika stres berulang. Respons yang diperkuat terhadap serangan patogen termasuk dalam kategori pertahanan yang diinduksi, sedangkan respons terhadap abiotik disebut sebagai aklimatisasi, meskipun respons ini pada awalnya serupa. Mereka juga dapat ditingkatkan dengan perawatan priming (Lucini *et al.*, 2019).

KESIMPULAN

Trichoderma spp. berperan penting dalam bidang pertanian yang mana kemampuannya dapat digunakan sebagai pupuk hayati yakni penyediaan nutrisi bagi tanaman. Selain itu, *Trichoderma* spp. juga memiliki berbagai mekanisme kontrol untuk berbagai biofungisida yang menekan patogen tanaman. Oleh karena itu, aplikasi inokulum *Trichoderma* spp. sebagai pupuk hayati dan biofungisida dapat menjadi alternatif dalam menggantikan penggunaan pupuk kimia dan fungisida untuk membuat tanaman yang berkelanjutan dan meningkatkan hasil dan kualitas produk.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnan, M., W. Islam, A. Shabbir, K.A. Khan, H.A. Ghramh, Z. Huang, H.Y.H. Chen, and G. Lu. 2019. Plant defense against fungal pathogens by antagonistic fungi with *Trichoderma* in focus. *Microbial Pathogenesis*, 129: 7-18.
- Ahemad, M., and M. Kibret. 2014. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. *J. King Saud Univ.* 26: 1-20.
- Alizadeh, H., K. Behboudi, M. Ahmazadeh, M. Javan-Nikkhah, C. Zamioudis, C.M.J. Pieterse, and P.A.H.M Bakker. 2013. Induced systemic resistance in *Cucumber* and *Arabidopsis thaliana* by the combination of *Trichoderma harzianum* Tr6 and *Pseudomonas* sp. Ps14. *Biological Control.* 65: 14-23.
- Almeida, D.A., M.A.C. Horta, F.J.A. Ferreira, N.F. Murad, and A.P. de Souza. 2021. The synergistic actions of hydrolytic genes reveal the mechanism of *Trichoderma harzianum* for cellulose degradation. *J. Biotechnol.* 334: 1-10.
- Amira, R.D., A.R. Roshanida, M.I. Rosli, M.S.F. Zahrah, J.M. Anuar, and C.N. Adha. 2011. Bioconversion of empty fruit bunches (EFB) and palm oil mill effluent (POME) into compost using *Trichoderma virens*. *Afr. J. Biotechnol.* 10: 18775-18780.
- Ammor, M.S., C. Michaelidis, and G.J. Nychas. 2008. Insights into the role of quorum sensing in food spoilage. *J. Food Prot.* 71: 1510-1525.
- Arora, N.K., T. Fatima, I. Mishra, and S. Verma. 2020. *Microbe-based inoculants: Role in next green revolution in environmental concerns and sustainable development.* Springer. Singapore.
- Bader, A.N., G.L. Salerno, F. Covacevich, and V.F. Consolo. 2020. Native *Trichoderma harzianum* strains from Argentina produce indole-3 acetic acid and phosphorus solubilization, promote growth and control wilt disease on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of King Saud University-Science.* 32(1): 867-873.
- Bansal, R., S. Pachauri, D. Gururajiah, P.D. Sherkhane, Z. Khan, S. Gupta, K. Banerjee, A. Kumar, and P.K. Mukherjee. 2021. Dual role of a dedicated GAPDH in the biosynthesis of volatile and non-volatile metabolites: novel insights into the regulation of secondary metabolism in *Trichoderma virens*. *Microbiological Research.* 253: 126862. doi: 10.1016/j.micres.2021.126862.
- Benítez, T., A.M. Rincón, M.C. Limón, and A.C. Codon. 2004. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *Int. Microbiol.* 7: 249-260.
- Bhat, M.A., R. Rasool, and S. Ramzan. 2019. Plant growth promoting Rhizobacteria (PGPR) for sustainable and eco-friendly agriculture. *Acta Sci. Agric.* 3: 23-25.
- Bissett, J. 1991. A revision of the genus *Trichoderma*. II. Infrageneric classification. *Canadian Journal of Botany.* 69(11): 2357-2372.
- Cai, F., W. Chen, Z. Wei, G. Pang, R. Li, W. Ran, and Q. Shen. 2015. Colonization of *Trichoderma harzianum* strain SQR-T037 on tomato roots and its relationship to plant growth, nutrient availability and soil microflora. *Plant Soil.* 388: 337-350.

- Carvalhais, L.C., P.G. Dennis, D.V. Badri, B.N. Kidd, J.M. Vivanco, and P.M. Schenk. 2015. Linking jasmonic acid signaling, root exudates, and rhizosphere microbiomes. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 28: 1049-1058.
- Chao, W., and Z. Wen-Ying, 2019. Evaluating effective trichoderma isolates for biocontrol of *Rhizoctonia solani* causing root rot of *Vigna unguiculata*. *Journal of Integrative Agriculture.* 18(9): 2072-2079.
- Chilosi, G., M.P. Aleandri, E. Luccioli, S.R. Stazi, R. Marabottini, C. Morales-Rodríguez, A.M. Vettraino, A. Vannini. 2020. A suppression of soil-borne plant pathogens in growing media amended with espresso spent coffee grounds as a carrier of *Trichoderma* spp.. *Scientia Horticulturae.* 259 (2020): 108666. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108666>.
- Eke, P., L.N. Wakam, P.V.T. Fokou, T.V. Ekounda, K.P. Sahu, T.H.K. Wankeu, and F.F. Boyom. 2019. Improved nutrient status and *Fusarium* root rot mitigation with an inoculant of two biocontrol fungi in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Rhizosphere.* 12(2019): 100172. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2019.100172>
- El Komy, M.H., A.A. Saleh, A. Eranthodi, and Y.Y. Molan. 2015. Characterization of novel *Trichoderma asperellum* isolates to select effective biocontrol agents against tomato Fusarium Wilt. *Plant Pathol.* 31: 50-60.
- Eslahi, N., M. Kowsari, M. Motallebi, M.R. Zamani, and Z. Moghadasi. 2019. Influence of recombinant *Trichoderma* strains on growth of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by increased root colonization and induction of root growth related genes. *Scientia Horticulturae.* 261(2020): 108932. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108932>.
- Gajera, H., D. Hirpara, D. Savaliya, and B.A. Golakiya. 2020. Extracellular metabolomics of *Trichoderma* biocontroller for antifungal action to restrain *Rhizoctonia solani* Kuhn in cotton. *Physiological and Molecular Plant Pathology.* 112(2): 101547.
- Gaspiretti, C., E. Nordlund, J. Jänis, J. Buchert, and K. Kruus. 2012. Biochimica et biophysica acta extracellular tyrosinase from the fungus *Trichoderma reesei* shows product inhibition and different inhibition mechanism from the intracellular tyrosinase from *Agaricus bisporus*. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics.* 1824(4): 598-607.
- Gava, C.A.T., and J.M. Pinto. 2016. Biocontrol of melon wilt caused by *Fusarium oxysporum* Schlecht f.sp. melonis using seed treatment with *Trichoderma* spp. and liquid compost. *Biol. Control.* 97: 13-20.
- Goh, T.B., R.E. Karamanos, and J. Lee. 2013. Effects of phosphorus form on short-term solubility and availability in soils. *Communications In Soil Science and Plant Analysis.* 44(1-4): 136-144.
- Gouda S., R.G. Kerry, G. Das, S. Paramithiotis, H.S. Shin, and J.K. Patra. 2018. Revitalization of plant growth promoting Rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiol.* 206: 131-140.
- Heidari, F., and M. Olia. 2016. Biological control of root-knot nematode *Meloidogyne javanica* using vermicompost and fungus *Trichoderma harzianum* on tomato. *J. Plant Pathol.* 52: 109-124.
- Hernández-Montiel, L.G., C.J. Chiquito-Contreras, B. Murillo-Amador, L. Vidal-Hernández, E.E. Quiñones-Aguilar, and R.G. Chiquito-Contreras. 2017. Efficiency of two inoculation methods of *Pseudomonas putida* on growth and yield of tomato plants. *Soil Sci Plant Nutr.* 17: 1003-1012.
- Hyakumachi, M. and M. Kubota. 2003. *Fungi as plant growth promoter and disease suppressor.* In: *Fungal biotechnology in agricultural, food and environmental application.* Arora D. K. (ed) Marcel Dekker.
- Ji, S., Liu, Z., Liu, B., Wang, Y., and Wang, J. 2020. The effect of *Trichoderma* biofertilizer on the quality of flowering Chinese cabbage and the soil environment. *Scientia Horticulturae.* 262(2020): 109069. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109069>.
- Khan, N., A. Bano, S. Ali, and M.d.A. Babar. 2020. Crosstalk amongst phytohormones from planta and PGPR under biotic and abiotic stresses. *Plant Growth Regul.* 90: 189-203.
- Konappa, N., S. Krishnamurthy, U.C. Arakere, S. Chowdappa, and N.S. Ramachandrapa. 2020. Efficacy of indigenous plant growth-promoting *Rhizobacteria* and *Trichoderma* strains in eliciting resistance against bacterial wilt in a tomato. *Egyptian Journal of Biological Pest Control.* 30(106): 1-13.
- Kubheka, B.P., and L.W. Ziena. 2022. *Trichoderma*: A biofertilizer and a bio-fungicide for sustainable crop production. Intechopen. London.
- Kumar, R., K. Kumari, K.C. Hembram, L. Kandha, and B.K. Bindhani. 2019. Expression of anendo A-1, 3-glucanase gene from *Trichoderma harzianum* in rice induces resistance against sheath blight. *J. Plant Biochem. Biotechnol.* 28: 84-90.
- Kumar, S., S.S. Diksha, Sindhu, and R. Kumar. 2021. Biofertilizers: an ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences.* 3(2022): 100094. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100094>.
- Lopes, M. J., M.B.D. Filho, T.H.R. Castro, and G.B. Silva. 2018. Light and plant growth-promoting rhizobacteria effects on *Brachiaria brizantha* growth and phenotypic plasticity to shade. *Grass and Forag Sci.* 73: 493-499.
- Lucini, L., G. Colla, M.B.M. Moreno, L. Bernardo, M. Cardarelli, V. Terzi, P. Bonini, and Y. Roupheal. 2019. Inoculation of *Rhizoglomusir regulare* or *Trichoderma atroviride* differentially modulates metabolite profiling of wheat root exudates. *Phytochemistry.* 157: 158-167.
- Macías-Rodríguez, L., H.A. Contreras-Cornejo, S.G. Adame-Garnica, R. Del-Val, J. and Larsen. 2020. The interactions of *Trichoderma* at multiple trophic levels: inter-kingdom. *Microbiological Research.* 240: 126552.

- Martínez-Viveros, O., M.A. Jorquera, D.E. Crowley, G. Gajardo, and M.L. Mora. 2010. Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by Rhizobacteria. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 10: 293–319.
- Marzano, M., A. Gallo, and C. Altomare. 2013. Improvement of biocontrol efficacy of *Trichoderma harzianum* Vs. *Fusarium oxysporum* F.sp. *Lycopersici* through UV-induced tolerance to fusaric acid. *Biological Control.* 67(3): 397–408.
- Mei L.I., M.A. Guang-shu, L. Hua, S.U. Xiao-lin, T. Ying, H. Wen-kun, M. Jie, and J. Xiliang. 2019. The effects of *Trichoderma* on preventing *Cucumber Fusarium Wilt* and regulating cucumber physiology. *J Integr Agric.* 18(3): 607–617.
- Mercl, F., M. García-Sánchez, M. Kulhánek, Z. Košnář, J. Száková, and P. Tlustoš. 2020. Improved phosphorus fertilisation efficiency of wood ash by fungal strains *Penicillium* sp. PK112 and *Trichoderma harzianum* OMC08 on acidic soil. *Applied Soil Ecology.* 147(2020): 103360. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.09.010>.
- Mukhopadhyay, R., and D. Kumar. 2020. *Trichoderma*: A beneficial antifungal agent and insights into its mechanism of biocontrol potential. *Egypt J. Biol Pest Control.* 30: 133. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00333-x>.
- Pellegrini, A., D. Prodorutti, and I. Pertot. 2014. Use of bark mulch pre-inoculated with *Trichoderma atroviride* to control Armillaria Root Rot. *Crop Protection.* 64: 104-109.
- Popp, J., K. Pető, and J. Nagy. 2012. Pesticide productivity and food security. A review. *Agronomy Sustain Dev.* 33: 243–255.
- Poveda, J., and P. Baptista. 2021. Filamentous fungi as biocontrol agents in olive (*Olea europaea* L.) diseases: Mycorrhizal and endophytic fungi. *Crop Protection.* 146(2021): 105672. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105672>.
- Ren, W., J. Xie, X. Hou, X. Li, H. Guo, N. Hu, L. Kong, J. Zhang, C. Chang, and Z. Wu. 2018. Potential molecular mechanisms of overgrazing-induced dwarfism in sheepgrass (*Leymus chinensis*) analyzed using proteomic data. *BMC Plant Biol.* 18: 81. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1304-7>.
- Rocha-Ramirez, V., C. Omero, I. Chet, B.A. Horwitz, and A. Herrera-Estrella. 2002. *Trichoderma atroviride* G-protein alpha-subunit gene *tga1* is Involved in mycoparasitic coiling and conidiation. *Eukaryot Cell.* 1(4): 594–605.
- Rokni, N., H.S. Alizadeh, E. Bazgir, M. Darvishnia, and H.M. Najafgholi. 2021. The tripartite consortium ff *Serendipita indica*, *Trichoderma simmonsii*, and bell pepper (*Capsicum annum*). *Biological Control.* 158: 104608. doi: 10.1016/j.biocontrol.2021.104608.
- Romeiro, R.S. 2007. *Controle biológico de doenças de plantas: procedimentos*. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa. Brazil.
- Santiago, A.D., A.M. García-lópez, J.M. Quintero, M. Avilés, and A. Delgado. 2013. Soil biology & biochemistry effect of *Trichoderma asperellum* strain T34 and glucose addition on iron nutrition in *Cucumber* grown on calcareous soils. *Soil Biology and Biochemistry.* 57: 598–605.
- Siemering, G., M. Ruark, and A. Geven. 2016. *The value of Trichoderma for crop production*. University of Wisconsin-Extension, Cooperative Extension. Madison.
- Singh, B., I. Boukhris, K. Pragma, A.N. Yadav, and A. Farhat-Khemakhem. 2020. Contribution of microbial phytases to the improvement of plant growth and nutrition: A review. *Pedosphere.* 30(3): 295-313.
- Singh, S., A. Tripathi, D. Maji, A. Awasthi, P. Vajpayee, and A. Kalra. 2019. Evaluating the potential of combined inoculation of *Trichoderma harzianum* and *Brevibacterium halotolerans* for increased growth and oil yield in *Mentha arvensis* under greenhouse and field conditions. *Elsevier.* 131: 173-181.
- Souza, R., A. de Ambrosini, and L.M.P. Passaglia. 2015. Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genet Mol Biol.* 38: 401–419.
- Stewart, W.M., and T.L. Roberts. 2012. Food security and the role of fertilizer in supporting it. *Elesvier*. Amsterdam.
- Suebrasri, T., H. Harada, S. Jogloy, J. Ekprasert, and S. Boonlue. 2020. Auxin-producing fungal endophytes promote growth of sunchoke. *Rhizosphere.* 16(2020): 100271. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100271>.
- Swain, H., T. Adak, A.K. Mukherjee, P.K. Mukherjee, P. Bhattacharyya, S. Behera, T.B. Bagchi, R. Patro, S. Shasmita, A. Khandual, M.K. Bag, T.K. Dangar, S. Lenka, and M. Jena. 2021. Novel *Trichoderma* strains. Isolated from tree barks as potential biocontrol agents and biofertilizers for direct seeded rice. *Microbiological Research.* 214: 83-90.
- Valentinuzzi, F., S. Cesco, N. Tomasi, and T. Mimmo. 2016. Rhizosphere effect of aluminium exposure on the release of organic acids and genistein from the roots of *Lupinus albus* L. plants. *Rhizosphere.* 1: 29-32.
- Waghunde, R. 2016. *Trichoderma*: A significant fungus for agriculture and environment. *African Journal of Agricultural Research.* 11(22): 1952-196.
- Woo, S., M. Ruocco, F. Vinale, and M. Nigro. 2014. *Trichoderma*-based products and their widespread use in agriculture. *The Open Mycology Journal.* 8(1): 71-126.
- Yadav, R.L., A. Suman, S.R. Prasad, and O. Prakash. 2009. Effect of *Gluconacetobacter diazotrophicus* and *Trichoderma viride* on soil health, yield and N-economy of sugarcane cultivation under subtropical climatic conditions of India. *European Journal of Agronomy.* 30(4): 296-303.
- Yu, Z., Z. Wang Y. Zhang, Y. Wang, dan Z. Liu. 2021. Biocontrol and growth-promoting effect of *Trichoderma asperellum* TaspHu1 isolate from *Juglans mandshurica* rhizosphere soil. *Microbiological Research.* 242: 126596. doi: 10.1016/j.micres.2020.126596.

- Zhang, Y., and W. Zhuang. 2020. *Trichoderma brevicrassum* strain TC967 with capacities of diminishing *Cucumber* disease caused by *Rhizoctonia solani* and promoting plant growth. *Biological Control*. 142(2020): 104151. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104151>.
- Zhu, Z.X., and W.Y. Zhuang. 2015. *Trichoderma* (Hypocrea) species with green ascospores from China. *Persoonia*. 34: 113-129.
- Zin, N. A. and Badaluddin, N. A. 2020. Biological Functions of *Trichoderma* spp. For Agriculture Applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65 (2): 168-178.