UMSIDA PRESS

Sutarman

MIKROBIOLOGI TANAH

ISBN 978-602-5914-96-6

9

786025

914966

MIKROBIOLOGI TANAH

Oleh
Sutarman

UMSIDA PRESS

Diterbitkan oleh
UMSIDA PRESS
Jl. Mojopahit 666 B Sidoarjo

ISBN:

Copyright©2019

Sutarman
All rights reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang.
Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian
atau seluruh isi buku ini ke dalam bentuk apapun,
secara elektronik, maupun mekanis, termasuk fotokopi,
merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya,
tanpa izin tertulis dari penerbit.
[Berdasarkan UU No. 19 Tahun 2000 tentang Hak Cipta
Bab XII Ketentuan Pidana, Pasal 27, Ayat (1), (2), dan (6)]

MIKROBIOLOGI TANAH

Penyusun

Sutarman

Dosen Program Studi Agroteknologi

Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah
Sidoarjo

Penerbit

UMSIDA PRESS

(Anggota IKAPI No. 18/Anggota Luar Biasa/JTI/2019)

P3I Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

Kampus 1 Universitas Muhamamdiyah Sidoarjo

Jl. Mojopahit 666 B Sidoarjo, Jawa Timur, Indonesia

Telp. +62 31 8945444

Fax +62 31 8949333

<https://p3i.umsida.ac.id>

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas tersusunnya Bahan Ajar berjudul Mikrobiologi Tanah: Bagi Peningkatan Kesuburan Lahan Kering sebagaimana mestinya.

Buku ini disusun berdasarkan hasil kajian literatur yang bersumber pada berbagai artikel jurnal nasional dan Internasional relevan terkait serta merupakan salah satu luaran Hibah Kemenristekdikti dalam skema Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi 2018-2019.

Buku selain dapat digunakan sebagai materi kuliah Kesuburan Tanah dan Pengelolaan Pupuk, juga dapat dimanfaatkan bagi bahan ajar mata kuliah Bioteknologi Pertanian mengingat di dalamnya terdapat Bab mengenai agensia biofertilizer dan agensia biokontrol serta bioteknologi tanah.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada: Rektor Universitas Muhammadiyah Sidoarjo (UMSIDA), Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UMSIDA atas dukungan moril dan fasilitas yang disediakan bagi penyusunan buku ini.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat.

Sidoarjo, Agustus 2019

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang dan Lingkup	1
1.2 Kompetensi dan Capaian Pembelajaran	8
BAB 2. KOMPONEN MIKROBA TANAH	12
BAB 3. EKOLOGI	20
3.1 Ekologi Fungi	20
3.2 Ekologi Bakteri	31
BAB 4. SITOLOGI DAN FISILOGI	35
4.1 Sitologi dan Perkembang Biakan	35
4.1.1 Fungi	35
4.1.2 Bakteri	38
4.2 Fisiologi Mikroba Tanah	39
4.2.1 Fisiologi Fungi	41
4.2.2 Fisiologi Bakteri	49
BAB 5. FUNGI EFEKTIF	53
4.1 Mikoriza	53
4.2 Trichoderma	60
4.3 Agen Biofertilizer Lain	61
4.4 Agen Biokontrol dan Fungi Efektif Lain	65
BAB 6. BAKTERI EFEKTIF	70
6.1 Bakteri Nodul Akar	70
6.2 Bakteri Efektif Lain	74
BAB 7. APLIKASI BIOTEKNOLOGI TANAH	78
7.1 Prinsip Aplikasi Bioteknologi Tanah	78
7.2 Isolasi dan Formulasi Agensia Hayati	80
7.3 Aplikasi Bioteknologi Tanah	84

DAFTAR PUSTAKA	90
----------------------	----

DAFTAR TABEL

	Halaman
1. Kompetensi, capaian pembelajaran dan pokok bahasan Mikrobiologi Tanah	9
2. Karakteristik klas dan sub klas fungi	36
3. Karakteristik tanah-tanaman-fungi mikoriza ericoid, ektomikoriza, dan endomikoriza	54

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1. Beberapa fungi tanah yang bermanfaat	15
2. Analisis spesifisitas primer dengan menggunakan elektroforesis gel	17
3. Pohon filogenetika umum	18
4. Hubungan antara distribusi bioma sepanjang gradien lingkungan di lintang utara bumi dan peran asosiasi mikoriza dalam pengambilan N dan P	29
5. Siklus hidup <i>Saccaromycess</i>	37
6. Siklus hidup <i>Mucor</i>	37
7. Siklus hidup bakteri sebagai bentuk vegetatif yang membelah terus dan sebagai spora untuk bertahan	39
8. Penampilan akar bibit cengkeh tanpa mikoriza dan terinfeksi fungi ektomikoriza	56
9. Spora fungi endomikoriza <i>Glomus coronatum</i> dan <i>Glomus sp.</i>	57
10. Tahapan proses nodulasi akar oleh bakteri bintil akar	71
11. Diagram reaksi yang terjadi pada nodul akar selama fiksasi N	72
12. Tahapan-tahapan metodologis atas proses menyeluruh penentuan aktivitas biomassa dan keragaman mikroba	82

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Lingkup

Mikroba tanah adalah komponen utama biota tanah dan sangat menentukan status kesuburan dan kesehatan tanah. Mikroba tanah dipelajari dalam dalam kajian Mikrobiologi Tanah (*Soil Microbiology*) yaitu ilmu yang mempelajari mikroorganisme tanah dan berbagai proses di dalamnya.

Banyak komponen biota tanah yang dipelajari dalam ilmu mikrobiologi tanah yaitu meliputi: bakteri, fungi, protozoa, serta mikroflora dan mikrofauna lainnya dengan propagul mandiri terbesar memiliki ukuran di sekitar 10^{-4} m atau tidak lebih dari 100 μm (milimikron). Dengan ukuran kurang dari 0,1 mm, maka sulit mata manusia dapat melihat bentuk dan keberadaan jasad mikro ini. Propagul mandiri dimaksud yaitu individu tunggal bisa dalam bentuk spora satu sel misalnya fungi *Aspergillus* atau bentuk spora bersel banyak misalnya fungi *Fusarium* sp. bersel 3-4; sementara itu untuk potongan hifa fungi (sebagai propagul mandiri) berukuran diameter sekitar 2-4 μm . Penggunaan mikroskop sebagai alat bantu dapat memperbesar ukuran obyek yang tampak di lensa okuler hingga 1.000 kali; sementara itu bagi pemula untuk melihat jasad nematoda *Meloidogyne* betina cukup dengan menggunakan lup pada perbesaran 10 kali. Struktur propagul berukuran besar bisa dilihat dengan mata yaitu

terlihat seperti potongan benang kain, namun kita tidak bisa melihat komponen penyusun sesungguhnya yang merupakan miselium yang menyatu membentuk kumpulan atau agregat. Fungi mikoriza *Scleroderma columnare* yang bersimbiosis dengan akar *Pinus merkusii* akan tampak sebagai benang-benang putih di perakaran pinus sesungguhnya merupakan untaian hifa eksternal yang tumbuh dari akar secara masif membentuk kumpulan miselium di dalam tanah. Pada pertumbuhan simbiosis yang sempurna pada tanaman pinus tingkat tiang hingga pohon sering kali menghasilkan struktur seperti *mushroom* dan disebut tubuh buah (mengandung spora) yang muncul di permukaan tanah sekitar perakaran pohon pinus.

Dari sekian banyak jenis mikrob tanah relatif elum terlalu banyak jeni-jenis yang dikaji dan dikembangkan teknologi aplikasinya sebagai bioferilizer oleh para ilmuwan. Dari dunia bakteri sudah dikenal beberapa jenis *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Pseumonas* dan banyak lainnya yang dimanfaatkan sebagai biofertilizer. Sementara itu untuk dunia fungi setidaknya ada dua kelompok besar yaitu fungi *Trichoderma* dan fungi mikoriza. Potensi spesies *Trichoderma* sebagai agent biokontrol penyakit tanaman pertama kali ditemukan pada awal 1930an (Howell, 2003), dan saat ini lebih banyak dikenal dan diaplikasikan oleh petani dibandingkan dengan pemanfaatannya sebagai biofertilizer. Fungi mikoriza adalah fungi yang mampu bersimbiosis mutualistis dengan tumbuhan (terutama pada lahan kering). Fungi mikoriza arbuskula berkontribusi

penting dalam menjaga kualitas dan produktivitas tanaman sekaligus menjamin terpenuhinya daya dukung lahan bagi pertanian berkelanjutan (Gianinazzi *et al.*, 2010). Perannya membantu tanaman dalam penyerapan air dan nutrisi dari sumbernya yang seringkali tidak terjangkau bulu-bulu akar, membuatnya layak disebut sebagai agent bioferilizer.

Dua sarana penting yang digunakan dalam usaha tani yaitu pupuk dan pestisida tidak bisa dilepaskan dari keberhasilan produksi tanaman. Peningkatan produksi serelaia dari tahun 1960-2000 misalnya diikuti oleh peningkatan pemupukan N dan P serta peningkatan produksi dan import pestisida pada negara-negara penghasilnya. Praktek pertanian dapat mengurangi kemampuan ekosistem untuk menyediakan barang dan jasa. Aplikasi pupuk dan pestisida yang tinggi (Gbr. 1b, c) dapat meningkatkan nutrisi dan racun dalam air tanah dan badan air, menimbulkan biaya kesehatan dan pemurnian air, dan menurunkan hasil perikanan dan produktivitas tempat wisata, menurunkan kualitas tanah berkontribusi eutrofikasi habitat perairan, mengubah komposisi dan mengurangi keanekaragaman hayati dalam sistem non-pertanian, juga menurunkan kemampuan ekosistem untuk menyediakan beberapa layanan kepada kehidupan atau menurunkan daya dukungnya bagi kehidupan (Tilman *et al.*, 2002).

Berbagai mikroba saat ini banyak dikembangkan sebagai agensi biofertilizer yang dapat berperan sebagai

pupuk bagi kebutuhan tanaman. Kelebihan penggunaan mikroba sebagai biofertilizer adalah kemampuannya berkembang biak pada lingkungan yang sesuai sehingga tidak diperlukan perlakuan aplikasi seperti halnya pada pemberian pupuk kimia.

Dua kelompok besar fungi yaitu *Trichoderma* dan mikoriza sudah dipahami sebagai kelompok utama fungi yang berperan besar di dalam upaya manusia untuk memperbaiki atau memulihkan kesuburan tanah dan daya dukung lahan bagi kegiatan budidaya. Meskipun sejak tahun 1990-an pemanfaatan fungi *Trichoderma* dan fungi Mikoriza sebagai biofertilizer sudah dimulai, namun bioteknologi berbasis pemanfaatan kedua fungi ini masih terus berkembang secara progresif. Di luar aspek rekayasa genetika dalam pemanfaatan kedua fungi ini, kiranya berbagai riset yang bersifat menginventarisir, menyeleksi, dan menguji perannya sebagai biofertilizer serta penciptaan formulasi bagi kepentingan aplikasi yang kompatibel secara bioekologi dan pengembangan teknologi konservasinya masih merupakan ladang yang sangat luas untuk digarap baik oleh para peneliti (dosen dan mahasiswa) maupun para praktisi tidak saja di Indonesia tapi juga di seluruh dunia.

Salah satu kata kunci dalam pemanfaatan bakteri *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter* serta fungi *Trichoderma* dan Mikoriza adalah *biofertilizer* yang didefinisikan sebagai pupuk hayati.

Laporan tentang menurunnya kualitas lahan pertanian di Indonesia dibuktikan dengan makin tergantungnya lahan

pada input bahan kimia yang mengancam daya dukung lingkungan bagi kelestarian produksi tanaman dan produktivitas lahan. Menurut Suriadikarta dan Simanungkalit (2006) sebagian besar lahan pertanian telah mengalami degradasi tingkat kesuburannya yang ditandai dengan kandungan C organik rata-rata di dalam tanah yang relative sangat rendah yaitu kurang dari 2 %. Penyebabnya adalah pencemaran oleh bahan kimia pupuk dan pestisida yang digunakan secara masif dalam rangka untuk memenuhi target produksi dan mencegah kegagalan panen akibat gangguan hama dan patogen serta gulma. Ketergantungan pada pestisida dan pupuk kimia mendorong peningkatan laju degradasi dari waktu ke waktu dengan konsekwensi terancamnya eksistensi mikroorganisme tanah sebagai agen pendukung kesuburan tanah dan kesehatan tanaman.

Berbagai penelitian di perguruan tinggi dan lembaga penelitian yang fokus pada kesuburan tanah banyak diarahkan pada inventarisasi, isolasi, pengujian efektivitas dalam meningkatkan dan memulihkan kesuburan tanah, serta perbanyakan dan produksi masaal. Banyak hasil penelitian yang menunjukkan trend positif membantu memulihkan kesuburan tanah, namun banyak pula yang efektivitasnya diragukan ketika diaplikasikan ke lapangan. Belum bisa dipastikan sejauhmana pestisida dan pupuk kimia mempengaruhi potensi keragaan fungi *soil borne* dalam merehabilitasi kesuburan tanah. Namun berbagai upaya harus terus ditumbuh-kembangkan termasuk

mengembangkan pencarian sumber plasmanutraf mikroba tanah efektif misalnya dengan menginventarisasi dan menguji isolat-solat mikroba tanah termasuk dari kelompok bakteri efektif dan fungi efektif yang berasal dari lahan yang bukan diusahakan secara intensif bagi tanaman pertanian misalnya lahan hutan tanaman dan/atau lahan konservasi.

Keberhasilan pemulihan kesuburan tanah dan lahan pertanian berarti mengandung indikasi meningkatnya aktivitas mikroba tanah yang menguntungkan; hal ini pastilah sejalan dan/atau berbanding lurus dengan peningkatan rata-rata hasil dekomposisi bahan organik yang merupakan substrat bagi berbagai biota tanah, dengan asumsi input bahan organik ke dalam tanah menjamin kebutuhan rata-rata mikroba tanah. Peningkatan kesuburan tanah secara biologi sudah tentu akan meningkatkan kesuburan secara kimia dan fisika tanah. Aktivitas mikroba yang optimal akan saling terkait dengan peningkatan total hasil dekomposisi bahan organik dan pada gilirannya akan meningkatkan status nutrisi di dalam tanah baik unsur-unsur makro, mikroa, dan *trace* element.

Level optimal kesuburan tanah yang pulih atau meningkat dari kondisi yang miskin akan menjamin kualitas lahan secara keseluruhan, mengingat tiap tanaman dan/atau tumbuhan yang hidup di lahan yang diusahakan akan memberikan kontribusi bagi jaminan keberlangsungan hidup yang optimal bagi biota tanah. Dalam kondisi ini siklus hara yang baik akan terjaga dan rantai makanan dalam ekosistem di lahan tersebut akan

terpelihara dengan baik pula. Kondisi ini sudah tentu akan memberikan jaminan bagi kelestarian daya dukung lahan bagi upaya membangun ketahanan pangan masyarakat.

Marjinalisasi lahan sebagai akibat *mismanagement* dalam penerapan agroteknologi sudah tentu akan memarjinalkan masyarakat yang tinggal di desa pertanian dan/atau di desa pinggiran hutan yang sebagian besar sesungguhnya sangat tergantung pada kesuburan tanah. Kemiskinan terstruktur yang terjadi dalam masyarakat pedesaan ini tentunya akan semakin menggeser kemampuan kita dalam mencapai peningkatan kesejahteraan, maka jika berlangsung lama bukan saja akan menimbulkan krisis pangan dan krisis ekonomi, tapi juga berakibat terjadinya krisis sosial dan krisis kepercayaan kepada pemerintah dan kaum elit termasuk para ilmuwan di perguruan tinggi.

Untuk mencegah sumber ancaman ketahanan pangan yang dapat dipersempit mencegah degradasi lahan, maka pengembangan riset dan implementasi teknologi biofertilizer mutlak dilakukan. Penelitian dan pengembangan potensi agent pupuk hayati bagi beberapa mikroba tanah, terutama dan konteks ini adalah fungi *Trichoderma* dan fungi Mikoriza sangat mutlak diperlukan.

1.2 Kompetensi dan Capaian Pembelajaran

Materi Perkuliahan

Adapun materi perkuliahan yang terdistrusi dalam tiap minggu selama satu semester adalah meliputi:

1. Lingkup Mikrobiologi Tanah
2. Komponen Mikroba Tanah
3. Bioekologi
4. Sitologi dan Fisiologi
5. Fungi tanah
6. Bakteri Tanah
7. Aplikasi Bioteknologi Tanah

Kompetensi dan Capaian Pembelajaran

Kompetensi dan capaian pembelajaran Mikrobiologi Tanah dengan masing-masing pokok dan sub pokok pembahasannya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kompetensi, capaian pembelajaran dan pokok bahasan Mikrobiologi Tanah

No	Kompetensi Dasar	Capaian Pembelajaran	Pokok Bahasan
1	Mahasiswa memahami lingkup dan pentingnya	Mahasiswa mampu menerangkan batasan, lingkup, dan manfaat Mikrobiologi Tanah	Lingkup Mikrobiologi Tanah

	Mikrobiologi Tanah		
2	Mahasiswa memahami komponen mikroba penting tanah bagi bidang pertanian	Mahasiswa dapat menyebutkan dan menjelaskan ciri-ciri umum fungi dan bakteri penting bagi bidang budidaya pertanian	Komponen mikroba tanah
3	Mahasiswa memahami dan mampu menjelaskan secara umum ekologi mikroba penting tanah	Mahasiswa dapat menjelaskan ekologi secara fungi dan bakteri umum serta asosiasi dan simbiosis di rhizosfer fungi dan bakteri penting tanah bagi budidaya pertanian	Bioekologi mikroba
4	Mahasiswa memahami dan mampu menjelaskan secara umum sitologi dan fisiologi mikroba penting tanah	Mahasiswa dapat menjelaskan sitologi dan perkembangbiakan termasuk fisiologi fungi dan bakteri penting tanah bagi budidaya pertanian	Sitologi dan Fisiologi

Tabel 1. Kompetensi, capaian pembelajaran dan pokok bahasan Mikrobiologi Tanah (lanjutan)

No	Kompetensi Dasar	Capaian Pembelajaran	Pokok Bahasan
5	Mahasiswa memahami ekofisiologi dan teknologi pemanfaatan	Mahasiswa dapat menjelaskan karakteristik dan pemanfaatan fungi penting	Fungi tanah

	mikoriza dan fungi potensial tanah pertanian	meliputi; fungi mikoriza, trichoderma, dan fungi efektif lainnya yang mendukung pertumbuhan tanaman	
6	Mahasiswa memahami karakteristik dan pemanfaatan bakteri biofertilizer dan agensia pendukung pertumbuhan tanaman	Mahasiswa dapat menjelaskan karakteristik dan pemanfaatn bakteri penting atanh meliputi; bakteri bintil akar, agensi biofertilizer, dan bakterieffektif lainnya yang mendukung pertumbuhan tanaman	Bakteri tanah
7	Mahasiswa memahami aplikasi bioteknologi yang memanfaatkan mikroba penitng tanah bagi budidaya pertanian	Mahasiswa dapat menjelaskan prinsip aplikasi bioteknologi tanah serta mampu mengaplikasikannya dalam mendukung pertumbuhan dan kesehatan tanaman budidaya pertanian	Aplikasi Bioteknologi Tanah

PERTANYAAN

1. Kajian mikrobiologi tanah (*soil microbiology*) sangat pentng bagi pengembangan bioteknologi tanah, Mengapa? Jelaskan!
2. Dalam konteks degradasi lahan yang ditunjukkan oleh kandungan bahan organik tanah yang rendah, sejauh mana peran mata kuliah Mikrobiologi Tanah

bagi mengatasi masalah ancaman degradasi lahan?
Jelaskan!

3. Mengapa praktek pertanian saat ini mengancam kesuburan dan daya dukung lahan?

DAFTAR PUSTAKA

- AlAskar AA & Rashad YM. 2010. Arbuscular mycorrhizal fungi: a biocontrol agent against common bean *Fusarium* root rot disease. *Plant Pathol. J.* 9, 31–38.
- Alguacil MM, Torrecillas E, García-Orenes F & Roldán A. 2014. Changes in the composition and diversity of AMF communities mediated by management practices

in a Mediterranean soil are related with increases in soil biological activity. *Soil Biol. Biochem.* 76, 34–44.

Al-Taweil HI, Osman MB, Aidil AH & Wan-Yussof WM. 2009. Optimizing of *Trichoderma viride* cultivation in submerged state fermentation. *Am. J. Appl. Sci.* 6, 1277–1281.

Altieri MA & Nicholis C.I. 2005. Agroecology and the Search for a Truly Sustainable Agriculture. Mexico. United Nations Environments Programme.

Bai C, He X, Tang H, Shan B & Zhao L. 2009. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi, glomalin and soil enzymes under the canopy of *Astragalus adsurgens* Pall. in the Mu Us sandland, China. *Soil Biol. Biochem.* 41, 941–947.

Barea JM, Palenzuela J, Cornejo P, Sánchez-Castro I, Navarro-Fernández C, López-García A, Estrada B, Azcón R, Ferrol N. & Azcón-Aguilar C. 2011. Ecological and functional roles of mycorrhizas in semi-arid ecosystems of Southeast Spain. *J. Arid Environ.* 75, 1292–1301.

Bedini S, Avio L, Argese E & Giovannetti M. 2007. Effects of long-term land use on arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein. *Agric. Ecosyst. Environ.* 120, 463–466.

Benítez T, Rincón AM, Limón MC & Codon A. 2004. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *Int. Microbiol.* 7 (4), 249–260.

Buysens C, César V, Ferrais F, De Boulois HD & Declerck S. 2016. Inoculation of *Medicago sativa* cover crop with *Rhizophagus irregularis* and *Trichoderma harzianum* increases the yield of subsequently-grown potato under low nutrient conditions. *Applied Soil Ecology* 105, 137–143.

Camenzind T, Homeier J, Dietrich K, Hempel S, Hertel D, Krohn A, Leuschner C, Oelmann Y, Olsson PA, Suarez JP & Rillig MC. 2016. Opposing effects of nitrogen

versus phosphorus additions on mycorrhizal fungal abundance along an elevational gradient in tropical montane forests. *Soil Biology & Biochemistry* 94, 37-47.

- Cavallazzi JRP, Filho OK, Stürmer SL, Rygiewicz PT & de Mendonça MM. 2007. Screening and selecting arbuscular mycorrhizal fungi for inoculating micropropagated apple rootstocks in acid soils. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 90, 117-129. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s11240-006-9163-6>.
- Chowdappa P, Kumar SPM, Lakshmi MJ & Upreti KK. 2013. Growth stimulation and induction of systemic resistance in tomato against early and late blight by *Bacillus subtilis* OTPB1 or *Trichoderma harzianum* OTPB3. *Biol. Control* 65, 109-117.
- Dix NJ & Webster J. 1995. *Fungal ecology*. Chapman & Hall. London.
- Driver JD, Holben WE & Rillig MC. 2005. Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.* 37, 101-106.
- Dubey SC, Suresha M, & Singha B. 2007. Evaluation of *Trichoderma* species against *Fusarium oxysporum* f. sp. ciceris for integrated management of chickpea wilt. *Biol. Control* 40, 118-127
- Dwidjoseputro D. 2005. Dasar-dasar mikrobiologi. Jambatan. Jakarta.
- Foyer CH & Noctor G. 2004. Photosynthetic nitrogen assimilation and associated carbon and respiratory metabolism. Kluwer Academic Publisher. London.
- Geisseler D & Horwath WR. 2009. Relationship between carbon and nitrogen availability and extracellular enzyme activities in soil. *Pedobiologia* 53, 87-98.
- Gerbore J, Benhamou N, Vallance J, Le Floch G, Grizard D, Regnault-Roger, C & Rey P. 2014. Biological control of plant pathogens: advantages and limitations seen

through the case study of *Pythium oligandrum*. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 21, 4847–4860.

- Gianinazzi S, Gollotte A, Binet MN, van Tuinen D, Redecker D & Wipf D. 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza* 20, 519–530.
- Gravel V, Antoun H & Tweddell RJ. 2007. Growth stimulation and fruit yield improvement of greenhouse tomato plants by inoculation with *Pseudomonas putida* or *Trichoderma atroviride*: possible role of indole acetic acid (IAA). *Soil Biol. Biochem.* 39, 1968–1977.
- Griffin DH. 1994. Fungal physiology. 2nd ed. Wiley-Liss, Inc. New York.
- Harman GE. 2006. Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp. *Phytopathology* 96, 190–194.
- Heinemeyer A, Hartley IP, Evans SP, Carreira De La Fuente JA & Ineson P. 2007. Forest soil CO₂ flux: uncovering the contribution and environmental responses of ectomycorrhizas. *Glob. Change Biol.* 13, 1786–1797. doi:<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01383.x>.
- Howell CR. 2003. Mechanisms employed by *Trichoderma* species in the biological control of plant diseases: the history and evolution of current concepts. *Plant Dis.* 87, 4–10
- Hu X, Roberts DP, Xie L, Yu C, Li Y, Qin L, Hu L, Zhang Y, & Liao X. 2016. Use of formulated *Trichoderma* sp. Tri-1 in combination with reduced rates of chemical pesticide for control of *Sclerotinia sclerotiorum* on oilseed rape. *Crop Protection* 79, 124–127.
- Jindapunnapat K, Chinnasri B & Kwankuae S. 2013. Biological control of Root-knot nematodes (*Meloidogyne enterolobii*) in guava by the fungus *Trichoderma harzianum*. *J. Dev. Sustainable Agric.* 8, 110–118.

- Kuzyakov Y & Larionova AA. 2005. Root and rhizomicrobial respiration: a review of approaches to estimate respiration by autotrophic and heterotrophic organisms in soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 503–520. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/jpln.200421703>.
- Legaya N, Grassein F, Binet MN, Arnoldi C, Personeni E, Perigon S, Polyd F, Pommier T, Puissant J, Clément JC, Lavorel S & Mouhamadou B. 2016. Plant species identities and fertilization influence on arbuscular mycorrhizal fungal colonisation and soil bacterial activities. *Applied Soil Ecology* 98, 132–139.
- Lichtfouse, E. 2010. Sustainable Agriculture Reviews 3. Sociology, Organic Farming, Climate Change, and Soil Science. Netherlands. Springer.
- Lievens, B., Brouwer, M., Vanachter, A.C.R.C., Cammue, B.P.A., Thomma, B.P.H.J., 2006. Real-time PCR for detection and quantification of fungal and oomycete tomato pathogens in plant and soil samples. *Plants Sci.* 171, 155–165.
- Martinson GO, Corre MD & Veldkamp E. 2013. Responses of nitrous oxide fluxes and soil nitrogen cycling to nutrient additions in montane forests along an elevation gradient in southern Ecuador. *Biogeochemistry* 112, 625–636.
- Moyano F, Kutsch W & Schulze E. 2007. Response of mycorrhizal, rhizosphere and soil basal respiration to temperature and photosynthesis in a barley field. *Soil Biol. Biochem.* 39, 843–853. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.10.001>.
- Noortasiah, 2005. Pemanfaatan Bakteri Rhizobium pada tanaman kedelai di lahan lebak. Buletin Teknik Pertanian, 10 (2): 57-60.
- Nottingham AT, Turner BL, Winter K, van der Heijden MGA & Tanner EVJ. 2010. Arbuscular mycorrhizal mycelial respiration in a moist tropical forest. *New Phytol.* 186,

957–967. doi:<http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03226.x>.

Paul EA & Clarck FE. 1996. Soil microbiology and biochemistry 2nd ed. Academic Press. San Diego.

Pruksakorna P, Araia M, Kotokua N, Vilchèze C., Baughn AD, Moodley P, Jacobs WR Jr. & Kobayashia M. 2010. Trichoderins, novel aminolipopeptides from a marine sponge-derived *Trichoderma* sp., are active against dormant mycobacteria. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters* 20 (12): 3658–3663

Purwaningsih, S. 2005. Rhizobium dari tanah kebun biologi Wamena. *Biodiversitas*. 6(2): 82-84.

Read D & Perez-Moreno J. 2003. Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems - a journey towards relevance? *New Phytologist* 157, 475-492.

Richardson A, Lynch J, Ryan P, Delhaize E, Smith FA, Smith SE, Harvey P, Ryan M, Venklaas E, Lambers H, Oberson A, Culvenor R & Simpson R. 2011. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and Soil* 349, 121-156.

Rillig MC, Wright SF, Nichols KA, Schmidt WF & Torn MS. 2001. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant Soil* 233, 167–177.

Sahebani N & Hadavi N. 2008. Biological control of the root-knot nematode *Meloidogyne javanica* by *Trichoderma harzianum*. *Soil Biol. Biochem.* 40, 2016–2020.

Samuels GJ. 2006. *Trichoderma*: Systematics, the Sexual State, and Ecology. *Phytopathology* 96 (2): 195-206.

Shanmugaiah V, Balasubramanian N, Gomathinayagam S, Monoharan PT & Rajendran A. 2009. Effect of single application of *Trichoderma viride* and *Pseudomonas fluorescences* on growth promotion in cotton plants. *Afr. J. Agric. Res.* 4, 1220–1225.

- Saravanakumar K, Yu C, Dou K, Wang M, Li Y & Chen J. 2016. Synergistic effect of *Trichoderma*-derived antifungal metabolites and cell wall degrading enzymes on enhanced biocontrol of *Fusarium oxysporum* f. sp. cucumerinum. *Biological Control* 94 (2016) 37–46.
- Singh B, Kaur R & Singh K. 2008. Characterization of *Rhizobium* strain isolated from the roots of *Trigonella foenumgraecum* (fenugreek). *African Journal of Biotechnology*. 7 (20): 3671- 3676.
- Six J, Elliott ET & Paustian K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* 32, 2099–2103.
- Smith SE & Smith FA. 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology* 62, 227-250.
- Srivastava R., Khalid A, Singh US & Sharma AK. 2010. Evaluation of arbuscular mycorrhizal fungus, fluorescent *Pseudomonas* and *Trichoderma harzianum* formulation against *Fusarium oxysporum* f. sp. lycopersici for the management of tomato wilt. *Biological Control* 55, 24-31.
- Steinberg PD & Rillig MC. 2003. Differential decomposition of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae and glomalin. *Soil Biol. Biochem.* 35, 191–194.
- Sullivan, P. 2003. Applying the Principles of Sustainable Farming. Fundamental of Sustainable Agriculture. ATTRA.
- Suriadikarta DA & Simanungkalit RDM. 2006. Pendahuluan. In: Simanungkalit RDM, Suriadikarta DA, Saraswati R, Setyorini D & Hartatik W (eds.). *Pupuk organik dan pupuk hayati*. Pp. 1-10. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor.

- Sutarman. 1997. Effect of compost to intensity of mychorryzal infection on the roots of *Pinus merkusii*. *J. Agritek* 5 (2): 79-90.
- Sutarman, S. Hadi, A. Suryani, Achmad, & A. Saefuddin. 2004. Patogenesis hawar daun bibit *Pinus merkusii* yang disebabkan oleh *Pestalotia theae* di pesemaian. *J. Hama dan Penyakit Tumbuhan Tropika* 4(1): 32-41.
- Sutarman & Prihartiningrum AE. 2015. Penyakit hawar daun Pinus merkusii di berbagai persemaian kawasan utama hutan pinus Jawa Timur. *J. HPT Tropika* 15 (1): 44-52.
- Teste FP, Lalibert E, Lambers H, Auer Y, Kramer S & Kandeler E. 2016. Mycorrhizal fungal biomass and scavenging declines in phosphorus impoverished soils during ecosystem retrogression. *Soil Biology & Biochemistry* 92, 119-132.
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R & Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671-677.
- Tomè E, Tagliavini M & Scandellari F. 2015. Recently fixed carbon allocation in strawberry plants and concurrent inorganic nitrogen uptake through arbuscular mycorrhizal fungi. *J. Plant Physiol.* 179, 83-89. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2015.02.008>.
- Van der Heijden MG, Streitwolf-Engel R, Riedl R, Siegrist S, Neudecker A, Ineichen K, Boller T, Wiemken A & Sanders IR. 2006. The mycorrhizal contribution to plant productivity, plant nutrition and soil structure in experimental grassland. *New Phytologist* 172, 739-752.
- Verma M, Brar SK, Tyagi RD, Surampalli RY & Valero JR. 2007. Antagonistic fungi, *Trichoderma* spp.: panoply of biological control. *Biochemistry Engineering Journal* 37, 1-20.
- Vinale F, Sivasithamparam K, Ghisalberti EL, Marra R, Barbetti MJ, Li H, Woo SL & Lorito M. 2008. A novel

role for *Trichoderma* secondary metabolites in the interactions with plants. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 72, 80–86.

Voets L, De Boulois HD, Renard L, Strullu DG & Declerck S. 2005. Development of an autotrophic culture system for the in vitro mycorrhization of potato plantlets. *FEMS Microbiol. Lett.* 248, 111–118.

Wang B & Qiu YL. 2006. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. *Mycorrhiza* 16, 299–363.

Werner D & Newton WE. 2005. Nitrogen fixation in agriculture, forestry, ecology and the environment. Springer. Netherlands.

Widyati E., Irianto R.S.B., Santosa S., Najmullah, & Sutarman. 2001. The impact of carbofuran environmental insecticide against fungi ectomycorrhizal *Pisolithus arrhizus* and *Scleroderma columnare* inoculated on seedlings of *Pinus merkusii* Jung et de Vries. *J. Agritek* 9 (3): 1178–1182.

Yedidiaa I, Benhamoub N, Kapulnikc Y & Cheta I. 2000. Induction and accumulation of PR proteins activity during early stages of root colonization by the mycoparasite *Trichoderma harzianum* strain T-203. *Plant Physiology and Biochemistry* 38 (11): 863–873.

Youssef SA, Tartoura KA & Abdelraouf GA. 2016. Evaluation of *Trichoderma harzianum* and *Serratia proteamaculans* effect on disease suppression, stimulation of ROS-scavenging enzymes and improving tomato growth infected by *Rhizoctonia solani*. *Biological Control* 100, 79–86.