



UMSIDA PRESS

Sutarman

MIKROBIOLOGI TANAH



MIKROBIOLOGI TANAH

Oleh
Sutarman



UMSIDA PRESS

Diterbitkan oleh
UMSIDA PRESS
Jl. Mojopahit 666 B Sidoarjo

ISBN: 978-602-5914-96-6
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 mikroba tanah relatif elum terlalu banyak jenis-jenis yang dikaji dan dikembangkan teknologi aplikasinya sebagai biofertilizer oleh para ilmuwan. Dari dunia bakteri sudah dikenal beberapa jenis *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas* 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 mutualistik 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 biofertilizer.

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 mikroorganismen 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. Balum 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 ketahaan 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 mulak 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 umum fungi dan bakteri 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?

BAB 2

KOMPONEN MIKROBA TANAH

Dalam bab ini dibahas karakteristik mikroba yang biasa hidup di dalam tanah atau *soil borne* terutama dari jenis fungi dan bakteri yang berpotensi sebagai biofertilizer.

Sebagai organisme yang hidup di tanah, maka karakteristiknya selalu berkaitan dengan *niche*-nya sebagai mikroba *soil borne*.

Untuk mendeterminasi jenis serta mempelajari aktivitas dan keragaman mikroba tanah diperlukan berbagai metode mulai dari yang sederhana hingga yang kompleks di mana tidak tiap laboratorium mikrobiologi di kampus dapat menyediakannya.

Dengan cara sederhana saja, isolasi dari tanah mungkin saja tidak bisa mengandalkan media umum seperti *potato dextrose agar* tetapi menggunakan berbagai media yang lebih spesifik. Ketika isolat sudah diperoleh, maka tidak cukup dengan pengamatan mikroskopis saja. Diperlukan berbagai teknik dan metode baik yang mendeteksi struktur dinding sel, senyawa ekstraselular yang dihasilkan, aktivitas enzim, bahkan yang paling bisa dipercaya adalah dengan menggunakan teknik yang memanfaatkan marka molekular.

Berbagai faktor fisik seperti topografi, bahan induk, tipe tanah, kelembaban tanah, pH tanah, status CO₂ dan O₂ tanah, *bulk density*, variasi dan cakupan suhu, jumlah dan distribusi curah hujan, riwayat vegetasi, dan bahan organik tanah bukan saja memengaruhi dinamika kehidupan dan keragaman mikroba, tetapi juga berpengaruh terhadap pemilihan metode dan teknik dalam mendeterminasi jenis mikroba.

Untuk bakteri dan sebagian fungi dapat ditumbuhkan pada media buatan, tetapi beberapa jenis mikroba obligat

tidak dapat ditumbuhkan pada media buatan tapi pada organisme hidup pasangan simbiotiknya. Fungi endomikoriza misalnya tidak bisa ditumbuhkan pada media buatan. Spora yang diperoleh dengan cara dekantasi dengan ukuran saringan misalnya 30-80 mesh ditumbuhkan dan diperbanyak pada tumbuhan inang seperti jagung dan rumput bahia.

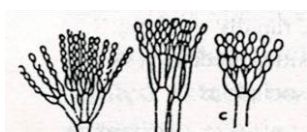
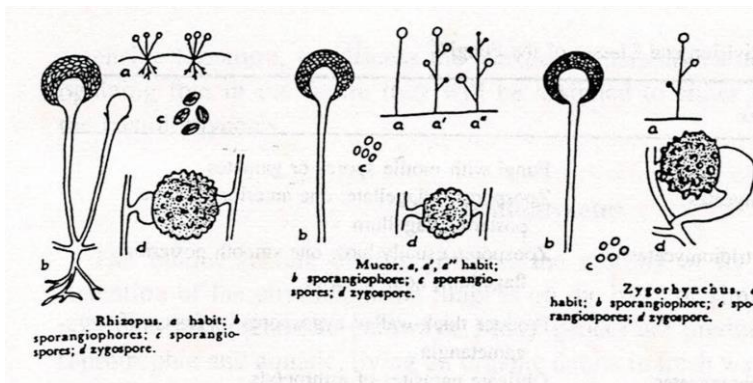
Beberapa klas taksonomis fungi tanah yang bermanfaat baik sebagai biofertilizer, biopestisida, dan sebagai dekomposer bahan organik adalah meliputi:

- (i) Chytridiomycetes: banyak genus fungi ini berperan sebagai dekomposer selulosa, khitin, dan keratin, biasa hidup pada sampah organik di dalam air segar, lumpur, dan tanah basah;
- (ii) Zygomycetes, fungi ini biasanya sebagai saprotrofik di dalam tanah, pada jamur yang membusuk, dan kotoran hewan; fungi endomikoriza biasanya berada pada klas ini;
- (iii) Ascomycetes, fungi ada yang uniselular dan disebut yeast dan biasa hidup di permukaan tanaman (pada daun, buah, dan bunga); fungi ini juga ada yang menghasilkan senyawa yang dapat menghambat fungi lain (*Penicillium*) dan toksin (*Aspergillus*);
- (iv) Basidiomycetes, jenis-jenis fungi ini ada yang menghasilkan tubuh buah yang dapat dimakan manusia, ada yang bersifat menghasilkan toksin, dan sebagian berperan sebagai perombak lignin

yang dominan pada kayu; fungi ektomikoriza masuk dalam klas ini;

- (v) Deuteuromycetes, berbagai fungi perombak bahan orgaik, agen biofertilizer, dan dan agensia pengendali hayati baik terhadap seranga hama (misalnya *Metarhizium*) dan patogen (mosalnya *Trichoderma*);
- (vi) *Lichenized fungi* atau disebut juga *Liken* atau biasa disebut *lumut kerak* adalah asosiasi simbiotik antara fungi (*mycobiont*) dengan alga (phycobiont) atau sianobakteri (*microbiont*) yang tumbuh secara erat membentuk thalus. Liken tumbuh di mana-mana di permukaan tanah baik di lahan pertanian maupun di permukiman, di batuan, dan bisa di dalam air.

Beberapa jenis fungi yang sering di temukan di lingkungan pertanian dan bermanfaat bagi kegiatan budidaya pertanian saat ini telah banyak dikembangkan di antaranya: *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Rhizophus*, dan *Penicillium* (Gambar 1).

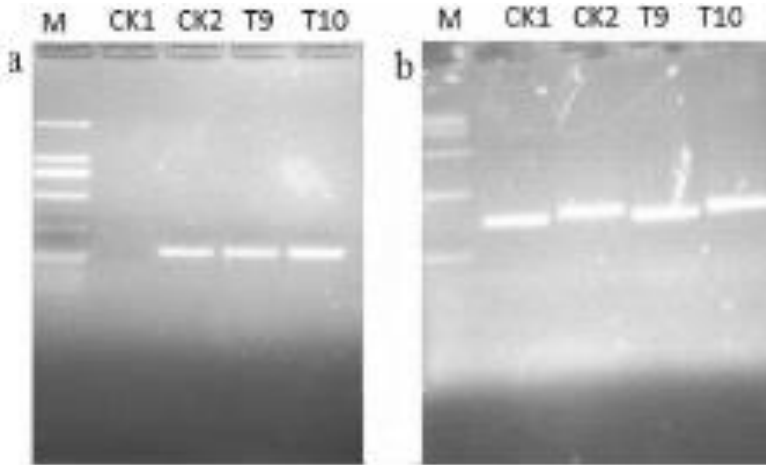


Gambar 1. Beberapa fungi tanah yang bermanfaat (Paul dan Clarck, 1996)

Hingga dua dekae yang lalu, para ahli lebih mengandalkan ciri-ciri morfologi untuk mendeterminasi jenis mikroba. Kesamaan bentuk, warna, dan karakteri fisik lainnya bisa jadi dianggap variasi dari satu spesies. Sebagai contoh dari sekitar 89 spesies *Trichoderma* telah diberi nama, sementara itu beberapa spesies *Hypocrea* telah dikaitkan sebagai *anamorf Trichoderma*. Namun dengan kemajuan teknologi di mana mulai digunakan teknologi biologi molekular, maka ternyata berdasarkan analisis filogenetik diperoleh 11 spesies *Hypocrea* yang *anamorf Trichoderma* dan disimpulkan bahwa *Trichoderma* dan *Hypocrea* adalah *congeneric* atau keduanya dari keluarga yang sama (Samuels, 2006). Dengan kemajuan teknologi biomolekular, maka analisis filogenetik molekular saat ini dapat menjelaskan adanya perbedaan dan/atau sebarah jauh tingkat kekerabatan suatu jenis dengan yang lain.

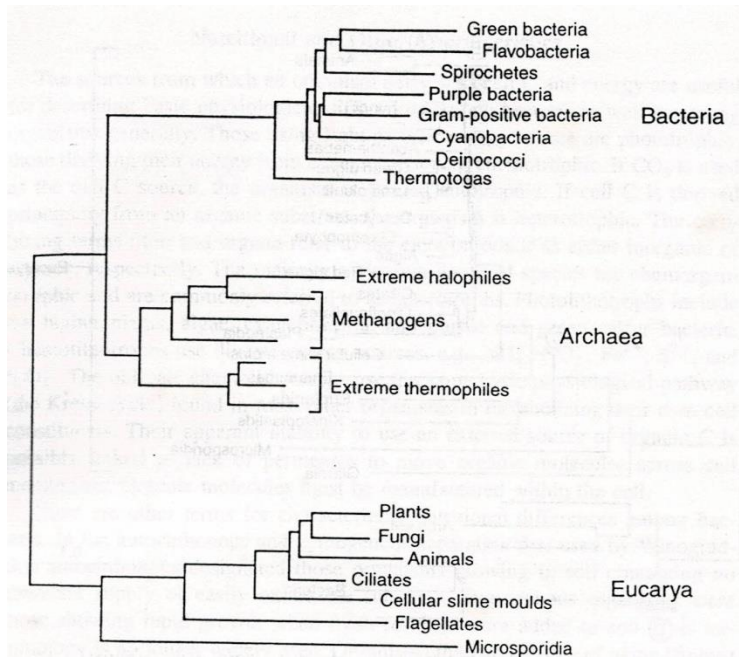
Untuk memudahkan identifikasi spesies, daftar strain diidentifikasi berdasarkan marka molekular tertentu.

Untuk mendeteksi kolonisasi *Trichoderma* dan eksistensi efek penekanan terhadap patogen yang menyerang tanaman tertentu misalnya juga dapat dideteksi dengan menggunakan teknik yang memanfaatkan marka molekular spesifik. Untuk tujuan tersebut, penggandaan sekuen ITS (internal transcription spacer) CCTCC-RW0014 yang merupakan sekuen DNA ini khas tertentu fungsi *T. asperellum* dan patogen yang berasosiasi dalam suatu serangan penyakit busuk pada mentimun, digunakan metode RT-qPCR dengan primer spesifik untuk *Trichoderma*: TriITSF (50-GGGTGTTTTACGGACGTGGA-30) dan Tri-ITSR (50-CCTGTCCGAGCGTCATTCA-30) dan untuk patogen *Fusarium*: FOC-ITSF (50-GAAGTTGGGGTTTAACGGCG-30) dan FOC-ITSR (50-GCCTGTTCGAGCGTCATTTC-30) (Lievens *et al.*, 2006). Hasil pengujian disajikan pada Gambar 2. Pola pita yang ditunjukkan berbeda dengan menggunakan primer yang berbeda yang berbeda. Pada perlakuan kontrol (tidak menggunakan patogen) tampak tidak ada pita dibandingkan dengan yang diinokulasi patogen (kolom disebelahnya). Dari gambar tersebut ditunjukkan pita yang menunjukkan eksistensi keberhasilan *Trichoderma* dalam mengendalikan patogen.



Gambar 2. Analisis spesifisitas primer dengan menggunakan elektroforesis gel: (a) amplifikasi gen ITS dari FOC oleh primer spesifik FOC-ITSF dan FOC-ITSR; (B) amplifikasi gen ITS dari *T. asperellum* CCTCC-RW0014 oleh primer spesifik Tri-ITSF, Tri-ITSR. Kolom CK1 (diinokulasi tanah steril); kolom CK2 (tanah diinokulasi dengan FOC); kolom T9 (tanah diinokulasi dengan *T. asperellum* CCTCC-RW0005 dan FOC); kolom T10 (tanah diinokulasi dengan *T. asperellum* CCTCC-RW0014 dan FOC).

Hal yang sama juga berkembang dalam taksonomi bakteri, dengan memanfaatkan teknologi biomolekular, maka para ahli telah berhasil menyusun filogenetika umum yang dapat menunjukkan sejauhmana hubungan kekerabatann organisme dalam dunia bakteri terhadap organisme lainnya (Gambar 3)(Paul dan Clarck, 1996).



Gambar 3. Pohon filogenetika umum

Dunia bakteri dibagi menjadi beberapa sub divisi, yaitu:

- (i) Bakteri ungu, meliputi berbagai jenis yaitu bakteri non sulfur ungu, rhizobacteria, agrobacteaia, reicktetsia, nitrobacter, *Thiobacillus*, *Nitrosovibrio*, fluorescent pseudomonadsm bakteri sulfur ungu *Desulvofibrio*, dan *Myxobacteria*;
- (ii) Eubakteria gram positif, meliputi: *Actinomyces*, *Streptomyces*, *Arthrobacter*, *Clostridium*, *Bacillus*, *Heliobacterium*, dan *Megasphaera*;

- (iii) Cyanobacteria meliputi *Oscillatoria*, *Nostoc*, dan *Gleobacter*;
- (iv) Bakteri sulfur hijau: *Chlorobium* dan *Chloroherpeton*;
- (v) Bakteroid dan flavobacteria;
- (vi) Bakteri nonsulfur hijau.

PERTANYAAN

1. Mengapa mikroba *soil borne* menjadi penting dalam penciptaan biofertilizer tertentu? Apa bisa mikroba air borne dimanfaatkan sebagai agensia biofertilizer?
2. Sebut dan jelas kan klas fungi yang dapat dimanfaatkan sebagai agensia biofertilizer?
3. Apa keuntungan memanfaatkan marka molekular dalam mendeterminasi jenis mikroba tanah? Jelaskan.
4. Sebut dan jelaskan sub divisi dunia bakteri yang berpotensi sebagai bakteri efektif?

BAB 3 EKOLOGI

Ekologi mikroba tanah adalah kajian tentang kehidupan mikroba di dalam tanah yang sangat dipengaruhi oleh lingkungan baik biotik maupun abiotik. Dengan lingkungan biotik fungi dapat berinteraksi dengan berbagai kelompok makhluk hidup baik yang bersifat heterotrof maupun autotrof.

3.1 Ekologi Fungi

Dengan tumbuhan fungi berinteraksi secara erat misalnya pada simbiosis tanaman dengan fungi mikoriza atau berinteraksi secara tidak erat misalnya *Trichoderma* dengan tumbuhan dan mikroorganisme lainnya. Sesama mikroba baik fungi mikoriza maupun *Trichoderma* yang bisa dianggap sebagai agen biofertilizer dalam perspektif keagronomian bisa saling mempengaruhi dalam konteks membentuk simbiosis di mana interaksi keduanya akan menghasilkan kondisi *condusive soil* yang memberi keuntungan bagi tanaman yang dibudidayakan, mikroba lain yang menguntungkan, di samping bagi kedua fungi ini secara tidak langsung. Dengan lingkungan abiotik, eksistensi *Trichoderma* dan fungi mikoriza sering dianggap berhubungan dengan dekomposisi bahan organik tanah yang pada akhirnya memberikan peningkatan kualitas lahan.

Strategi Hidup

Mikroba dari divisi fungi mengembangkan strategi hidupnya di dalam tanah dalam rangka melangsungkan kehidupannya di antara berbagai bentuk interaksinya baik dengan lingkungan biotik maupun abiotik yang di satu pihak dapat menekan kehidupannya tapi di lain pihak dapat mendukung kehidupannya.

Dinamika lingkungan dapat menimbulkan *stress* bagi fungi misalnya terjadi perubahan lingkungan abiotik yang cenderung membatasi ketersediaan sumberdaya bagi keperluan produksi biomasnya, Berbagai kondisi seperti perubahan suhu tanah, pH, dan ketersediaan oksigen dan air yang berada di bawah daya dukung lingkungan yang optimal bagi kehidupan fungi dapat menimbulkan *stress* bagi fungi. Kondisi ini dapat terjadi misalnya pada tanah-tanah yang terpapar lumpur perut bumi (kasus luapan lumpur Sidoarjo), debu dan lahar panas letusan gunung berapi, hujan asam, aibapi dan debu kebakaran hutan dan lahan, penggerusan top soil akibat erosi lahan, dan limbah pabrik (baik yang sengaja dibuang atau dianggap sebagai pupuk). Dalam kondisi ini fungi mendapatkan gangguan yang bersifat merusak. Namun di lain pihak fungi juga bisa mendapatkan gangguan dalam bentuk pengkayaan sumberdaya secara tiba-tiba misalnya adanya penebangan atau pengambilan kayu di hutan namun meninggalkan biomassa berjumlah besar dalam bentuk tajuk-dedaunan dan ranting-cabang pohon. Peningkatan biomassa di permukaan tanah itu bukan saja meningkatkan bahan baku nutrisi bagi satu jenis fungi tertentu, tapi juga bagi

berbagai mikroba lain yang mungkin akan mengganggu, mengingat kemampuan berbagai mikroba menghasilkan senyawa ekstraselular yang dapat mempengaruhi aktivitas mikroba lainnya.

Dalam menghadapi berbagai kondisi lingkungan, fungi mengembangkan strategi seleksi K (*K-selection*) dan strategi seleksi r (*r-selection*) (Dix dan Webster, 1995). Strategi seleksi K adalah cara fungi tumbuh dengan padat populasi yang sesuai daya dukung lingkungannya, sedangkan strategi seleksi r, fungi tumbuh pada padat populasi dengan laju peningkatan populasi atau biomasanya sesuai laju intrinsiknya. Pada strategi seleksi r, yaitu ketika sumberdaya melimpah, maka fungi akan meningkatkan laju pertumbuhan biomassa hingga mencapai laju intinsiknya. Pada kondisi yang berbeda misalnya bahan organik di tanah kurang tersedia, maka fungi mengembangkan strategi seleksi K yaitu tumbuh hanya sebatas daya dukung bahan organik yang tersedia; pada kondisi ini bisa jadi fungi lebih banyak menghasilkan klamidospora dan pertumbuhan hifa terhenti. Secara sederhana misalnya dapat kita lihat pada pertumbuhan *Trichoderma* yang ditumbuhkan di media PDA. Mulai hari kedua tampak pertumbuha hifa berwarna putih dengan laju yang tinggi, namun pada hari ke-6 petumbuhan melambat di mana miselium sudah hampir mengisi seluruh permukaan media di cawan petri. Ketika laju pertumbuhan melewati maksimal, maka tampak koloni mulai berwarna hijau yang menandakan spora dihasilkan. Pada kasus di

mana media tumbuh diberi gangguan misalnya pH yang di luar optimal, maka fungi bisa mempercepat periode sporulasi. Gambaran tersebut dapat dijadikan pendekatan dalam memahami bagaimana fungi mengembangkan strategi dalam menghadapi dinamika lingkungan.

Berdasarkan strategi hidup sebagai respons fungi dalam menghadapi proses kehidupannya bersama-sama dengan tanaman dan lingkungan biotik lainnya serta lingkungan abiotik, Dix dan Webster (1995), mengelompokkan fungi dan/atau strategi hidupnya sebagai berikut:

- (i) Fungi seleksi-R (fungi *ruderal*): strategi yang dikembangkan oleh fungi ini adalah pertumbuhan miselium yang cepat agar mampu dengan cepat mengkolonisasi sumber makanan baru, atau mempercepat reproduksi aseksual; contoh jenis fungi tanah yang mengembangkannya strategi seleksi R adalah genus *Mucor* dan *Rhizopus*;
- (ii) Fungi seleksi-S (fungi toleran stress): strategi yang dikembangkan oleh fungi untuk mengatasi atau beradaptasi terhadap cekaman/*stress* yang disebabkan oleh adanya satu faktor atau kombinasi faktor-faktor seperti: keterbatasan air, keterbatasan nutrisi, adanya kondisi anaerob, dan suhu tinggi di tanah. *Trichoderma harzianum* misalnya membentuk lapisan tipis pada hifa (*gossamer*) yang kemudian menjadi klamidospora;

- (iii) Fungi seleksi-C (fungi kombatif): fungi memiliki/mengembangkan kemampuan untuk mengambil sumberdaya sekunder dan untuk melindungi domain pengambilan sumberdaya misalnya dengan mengambil-alih domain pengambilannya sumberdaya mikroba lain. Berbagai fungi pelapuk kayu dari klas Basidiomycetes memiliki strategi seleksi C. Tingkatan penerapan seleksi C ini juga bervariasi ada yang sangat kombatif (*most combative*) seperti *Hypholoma fasciculatus*, *Lenzites betulina*, dan *Sistotrema brinkmannii* hingga yang kadang-kadang bersifat kombatif (*least combative*) seperti: *Armillaria bulbosa*, *Lopadostoma turgidum*, dan *Xylaria hypoxylon* sehingga domain pengambilan sumberdaya/nutrisi bisa diambil-alih oleh spesies lain;
- (iv) Strategi sekunder: satu jenis fungi dapat mengembangkan salah satu atau lebih dari ketiga strategi tersebut (Seleksi-R,-S, dan -C) sesuai dengan dinamika perubahan lingkungan. *Trichoderma* misalnya di dalam tanah atau pada kayu di atas tanah akan tumbuh cepat dengan menghasilkan spora dan enzim selulosa untuk mempercepat proses dekomposisi (seleksi R). Pada saat yang sama fungi ini juga mengembangkan strategi seleksi C atau bersifat sebagai fungi kombatif mengambil alih domain pengambilan

sumberdaya mikroba lain. *T. harzianum* mengembangkan strategi seleksi-S dengan mampu hidup atau toleran terhadap kondisi lingkungan yang sangat miskin nutrisi. *T. viridae* dan *T. polysporum* pada daun cemara dengan suhu tinggi diambil-alih oleh *T. hamatum* dan *T. koningii*; hal sebaliknya terjadi ketika suhu rendah yaitu . *T. viridae* dan *T. polysporum* mengambil alih penguasaan sumberdaya.

Implementasi strategi penentuan seleksi dalam kehidupan fungi agent biofertilizer sering diuji bagi berbagai kepentingan pemanfaatannya. Berbagai riset dilakukan untuk mengetahui sejauh mana tipe seleksi fungi dapat dimanipulasi untuk kepentingan agronomis dan pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi pemanfaatan mikroba menguntungkan termasuk terkait fungi *Trichoderma* dan fungi mikoriza. Dari kajian tentang strategi fungi dalam mengembangkan tipe seleksi-nya, maka lahir berbagai penelitian dengan tema ekologi fungi. Bagaimana fungi merespons pengaruh lingkungan dalam bentuk perubahan fisik dan kimia tanah serta pertumbuhan dan produktivitas vegetasi yang ditumbuhkan di atasnya akan memberikan informasi penting bagi peneliti dan praktisi budidaya tanaman.

Berbagai contoh hasil riset implementatif terkait respons fungi terhadap lingkungannya telah dipublikasikan oleh para peneliti dan telah banyak memberikan inspirasi bagi penelitian lebih lanjut dan implementasinya. Aktivitas

fungi mikoriza arbuskula misalnya mempengaruhi keanekaragaman tanaman dan produktivitas ekosistem dengan memainkan peran kunci dalam padang rumput yaitu dengan meningkatkan nutrisi tanaman dan struktur tanah yang sudah tentu akan mempengaruhi komunitas tumbuhan (van der Heijden *et al.*, 2006). Penggunaan mikroba agen biokontrol bukan saja mengendalikan patogen dan mencegah infeksi akar oleh patogen tetapi dapat meningkatkan resistensi dan pertumbuhan tanaman tanpa mengganggu keanekaragaman hayati mikroflora di rizosfer (Gerborne *et al.*, 2014). Respons fungi *Trichoderma* terhadap variasi pengaruh lingkungan biotik berkaitan dengan kelimpahan populasinya. Kelimpahan populasi mikroba tanah akan mempengaruhi kemampuannya dalam melangsungkan perannya di rhizosfer. Makin tinggi kepadatan populasi *Trichoderma* sampai pada batas kepadatan populasi rata-rata tertentu akan semakin efektif mengendalikan *Meloidogyne* spp. (Jindapunnapat *et al.*, 2013; Sahebani and Hadavi, 2008).. Kepadatan populasi suatu spesies akan menunjukkan kinerja yang mungkin tidak sama dengan spesies yang lain meski dari genus yang sama. Hasil penelitian Al-Hazmi dan TariqJaveed (2016) yang menggunakan empat kepadatan (10^4 , 10^6 , 10^8 dan 10^{10} spora/g tanah) inokulum dua spesies *Trichoderma* menunjukkan peningkatan populasi makin meningkatkan pertumbuhan tanaman tomat sejalan dengan kemampuan menekan nematode *Meloidogyne* dan menurunkan keparahan puru akar; sementara itu *T. harzianum*

memberikan efek yang lebih baik dibandingkan dengan *T. viride* pada kepadatan inokulum tertinggi (10^{10} spora/g tanah)

Asosiasi dan Simbiosis

Dalam konteks kesuburan tanah, berbagai bentuk asosiasi mikroba dengan tanaman akan memberi keuntungan bersama pada kedua belah pihak baik bersifat obligat atau fakultatif.

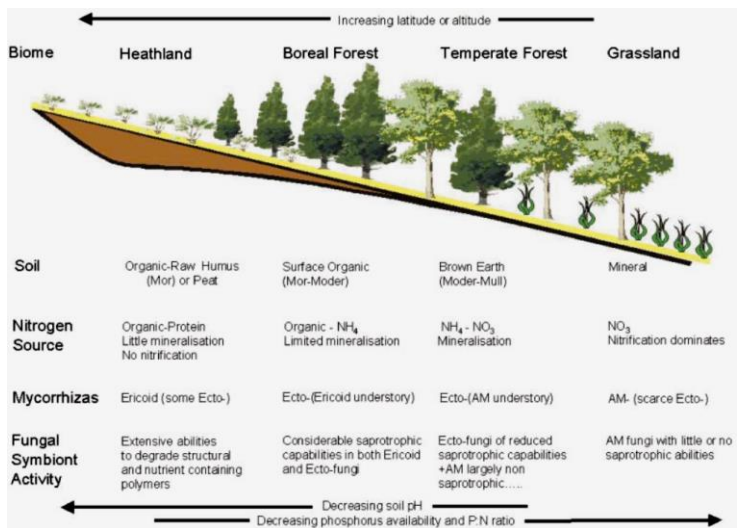
Berbagai bentuk kerjasama secara ekologi akan menciptakan kondisi yang kondusif baik bagi kehidupan masing-masing organisme untuk tumbuh dan berkembang-biak.

Fungi mikoriza arbuskula (FMA) dapat mempengaruhi keanekaragaman tanaman dan produktivitas ekosistem. Berbagai penelitian aplikasi FAM pada berbagai agroekosistem telah memberikan hasil yang menunjukkan peran fungi ini dalam meningkatkan efisiensi budidaya tanaman. Penelitian yang dilakukan van der Heijden *et al.* (2006) memperlihatkan FMA memainkan peran kunci dalam padang rumput dengan meningkatkan nutrisi tanaman dan memperbaiki struktur tanah.

Fungi tanah secara umum berperan dalam menentukan siklus karbon di pertanaman maupun pada kawasan hutan. Sementara itu hutan memainkan peran penting dalam siklus karbon global, yang dianggap sebagai penyerap karbon yang penting dan berkelanjutan. Dalam hal ini diketahui bahwa mikroba tanah berperan dalam suplai CO₂ tanah. Selama musim gugur komponen sumber

penyuplai dalam aliran CO₂ tanah adalah organisme heterotrof tanah dengan kontribusi hingga 60%, hifa ektomikoriza (EM) 25%, dan akar 15 % (Heinemeyer *et al.*, 2007). Lebih lanjut dikemukakan bahwa respirasi hifa EM sangat berpengaruh dalam mengurangi kelembaban tanah dan sangat tergantung pada pasokan asimilat dari tanaman namun tidak bertanggung-jawab langsung terhadap perubahan suhu tanah. Pada penelitian berbeda menunjukkan bahwa respirasi hifa mikoriza arbuskula memberikan bagian yang signifikan dalam respirasi akar barley yaitu sebesar 25 % dan berkontribusi dalam total asimilasi karbon sebesar 4,8 % (Moyano *et al.*, 2007).

Read dan Perez-Moreno (2003) mendeskripsikan hubungan *altitude* dan *latitude* mulai dari padang rumput hingga daerah pedalaman dengan aktivitas simbiosis fungi yang melibatkan perubahan-perubahan reaksi kimia dan ketersediaan N-P tanah (Gambar 4).



Gambar 4. Hubungan antara distribusi bioma sepanjang gradien lingkungan di lintang utara bumi dan peran asosiasi mikoriza dalam pengambilan N dan P (Read dan Perez-Moreno, 2003).

Makin meningkat ketinggian tempat dan lintang di blahan utara bumi, maka pH tanah makin menurun dan ketersediaan serta rasio P/N makin menurun. Sumber nitrogen pada padang rumput didominasi oleh nitrifikasi NO_3 ; sedang pada hutan beriklim (*temperate forest*), hutan boreal (*boreal forest*), dan daerah pedalaman (*heathland*) masing-masing mineralisasi $\text{NH}_4\text{-NO}_3$, mineralisasi terbatas $\text{NH}_4\text{-organik}$, dan tanpa nitrifikasi dengan sedikit mineralisasi sedikit protein-organik. Adapun mikoriza mulai dari padang rumput, hutan *temperate*, hutan boreal, hingga *heathland* masing-masing adalah mikoriza arbuskula (ektomikoriza langka), ektomikoriza (cukup banyak mikoriza arbuskula), ektomikoriza (ericoid cukup banyak), ericoid (kadang-kadang ektomikotiza). Untuk aktivitas simbiosis fungi berturut-turut yaitu: (i) pada padang rumput didominasi oleh fungi mikoriza arbuskula dengan sedikit atau tidak memiliki saprotropik, (ii) pada hutan *temperate* yaitu didominasi fungi ektomikoriza yang kemampuan saprotropiknya teredeksi dan adanya mikoriza arbuskula non saprotropik yang meluas ditemukan, (iii) pada hutan boreal yang fungi mikroizanya memiliki kemampuan saprotropik baik sebagai ericoid maupun ektomikoriza, dan (iv) pada *heathland* didominasi oleh fungi ericoid yang memiliki kemampuan mendegradasi secara struktursl polimer nutrisi.

Studi yang telah dilakukan pada hutan tropis pegunungan dengan gradien elevasi antara 1000-3000 m dpl menunjukkan bahwa pertumbuhan panjang akar dan kelimpahan fungi mikoriza arbuskula (FMA) tergantung pada ketersediaan hara tanah dan/atau karakteristik tanah (Tessa Camenzind *et al.*, 2016). Informasi lain yaitu mengenai nitrifikasi bersih yang terbesar terjadi pada situs di ketinggian 1.000-m dpl. dan tidak dipengaruhi oleh penambahan nutrisi, sementara itu nitrifikasi bersih yang tidak terdeteksi pada ketinggian 2.000 dan 3000-m dpl tapi terdeteksi pada tahun kedua; berkaitan dengan itu, status N awal tanah dapat dipengaruhi oleh ada atau tidak adanya lapisan organik, kelembaban tanah dan suhu yang merupakan representasi gradien elevasi (Martinson *et al.*, 2013).

3.2 Ekologi Bakteri

Kehidupan bakteri bukan hanya dipengaruhi oleh lingkungan tetapi organisme ini dapat mempengaruhi lingkungan di sekitarnya.

Faktor lingkungan yang mempengaruhi kehidupannya adalah:

- (i) Suhu, bakteri dapat hidup pada berbagai kisaran suhu tergantung pada jenisnya: bakteri termofilik dapat hidup pada suhu hingga 55-65 °C, bakteri mesofil dengan suhu optimal 25-40 °C, dan bakteri psikrofil dengan suhu optimal 10-20 °C namun bisa hidup pada 0-20 °C;

- (ii) Kelembaban atau kadar air lingkungan, meski pada dasarnya bakteri menyukai air/kelembaban namun bagi bakteri anaerob tidak dapat hidup tanpa oksigen;
- (iii) Perubahan nilai osmosis lingkungan, bakteri memerlukan kondisi isotonik artinya tekanan osmotik selnya sama dengan lingkungan; bakteri akan mengalami plasmolisis jika ditempatkan pada lingkungan air yang pekat (oleh garam dan gula) atau sebaliknya pada air suling akan menyebabkan selnya pecah karena kemasukan air;
- (iv) Sinar, gelombang caya yang optimal adalah 390-760 m μ ; pada panjang di bawahnya seperti sinar ungu dan sinar-X, bakteri akan mengalami kematian;
- (v) Pengaruh mekanik, sel bakteri akan pecah pada guncangan 9.000 kali per detik; pembiakan bakteri terhenti pada 600 atm dan sel-selnya akan mati pada 6.000 atm, sedangkan spora akan mati pada tekanan 12.000 atm;
- (vi) Berbagai senyawa kimia, ada yang bersifat membunuh atau *desinfektan* (seperti alkohol, detergen, antibiotik) ada yang bersifat menghambat pembiakan atau antiseptik atau bakterostatik seperti zat warna dan detergen pada konsentrasi rendah.

Dalam kehidupannya baik secara langsung maupun tidak langsung. Berbagai kemungkinan bentuk interaksinya adalah meliputi:

- (i) Netralisme atau tidak saling mengganggu, tidak saling bersaing memperebutkan sumberdaya lingkungannya;
- (ii) Kompetisi, hidup bersaing organisme lain dalam memperebutkan sumberdaya untuk pemenuhan kebutuhan hidup;
- (iii) Antagonisme, yaitu hidup berlawanan dengan organisme lain, misalnya *Pseudomonas aeruginosa* menghasilkan pigmen biru piosianin yang dapat meracuni bakteri lain; *Streptococcus lactis* akan menghasilkan asam susu yang dapat menghambat *Bacillus subtilis*;
- (iv) Komensalisme, satu spesies bakteri hidup bersama dengan spesies lain yang saling menguntungkan, misalnya bakteri *Acetobacter* memanfaatkan alkohol sebagai hasil samping yang tidak dibutuhkan oleh *Saccaromyces*;
- (v) Mutualisme, yaitu hubungan yang saling menguntungkan namun jika terpisah masing-masing tidak mendapatkan keuntungan, misalnya antara bakteri *Rhizobium* (bakteri bintil akar) dengan tanaman polong-polongan (*Leguminosae*);
- (vi) Sinergisme, adalah hubungan dalam bentuk hidup bersama di mana aktivitas keduanya menghasilkan kegiatan yang menguntungkan bagi kedua belah

- pihak; campuran mikroba di dalam ragi akan saling bersinergi dalam proses pembuatan tape;
- (vii) Parasitisme, dalam hal ini terjadi antara virus atau bakteriofage yang memparasit bakteri sebagai inangnya.

PERTANYAAN

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan *condusive soil*?
2. Bagaimana strategi hidup fungi dalam melangsungkan kehidupannya? Jelaskan!
3. Jelaskan secara singkat bioekologi fungi mikoriza yang menunjukkan perannya membantu tanaman?
4. Sebut dan jelaskan faktor lingkungan yang mempengaruhi bakteri tanah?
5. Dapatkah bakteri mempengaruhi lingkungan? Jelaskan dan beri contohnya!
6. Sebut dan jelaskan bentuk-bentuk simbiosis bakteri dengan lingkungan biotiknya!

BAB 4

SITOLOGI DAN FISILOGI

4.1 Sitologi dan Perkembangbiakan

Secara individu semua jenis bakteri bersel tunggal, sementara kecuali yeast (*Saccaromyces*) dan bentuk sporan, semua fungi bersel banyak.

4.1.1 Fungi

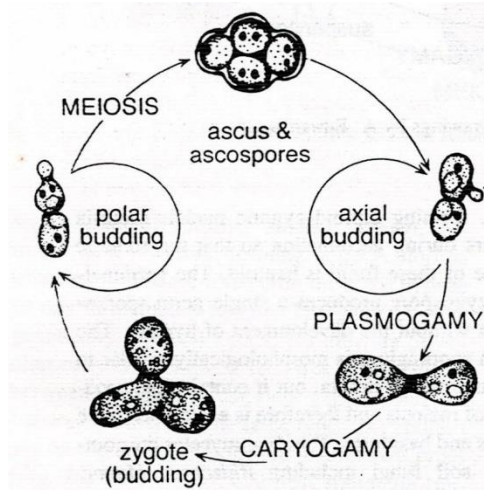
Spora yang berkecambah tumbuh menjadi hifa yang akan saling menganyam membentuk miselium. Hifa fungi ada yang bersekat ada yang tidak bersekat. Hifa membentuk tubuh somatik yang umumnya tidak

terderensiasi. Diferensiasi muncul selama proses reproduksi dan beberapa fungi menghasilkan struktur somatik yang berbeda-beda di antara kelas dan sub kelas fungi (Tabel 2)

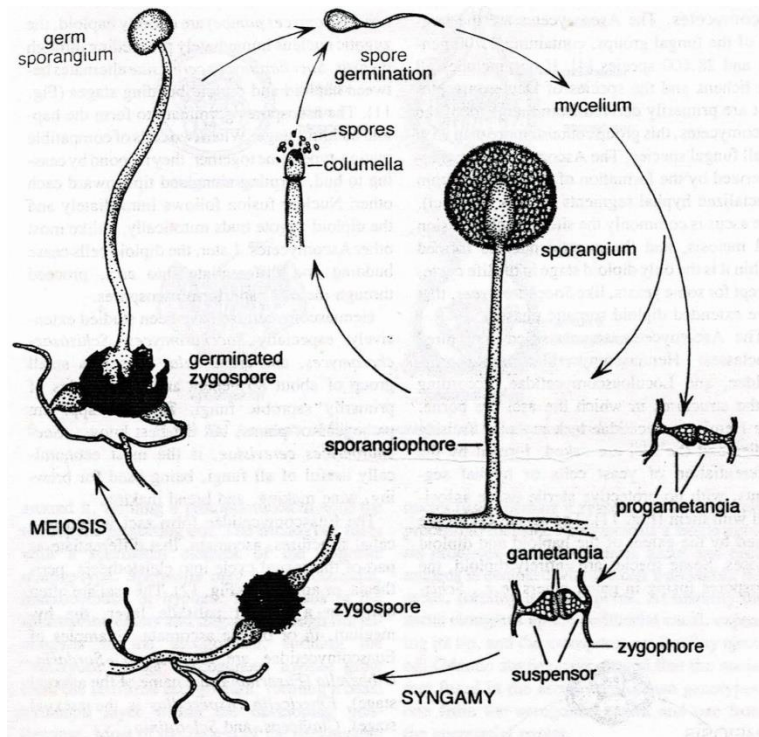
Pada fungi yeast siklus hidupnya (Gambar 5) berbeda dengan fungi pada umumnya seperti *Neurospora* dan *Mucor* (Gambar 6) (Griffin, 1994). Pada siklus seksual *Saccaromyces*, dimulai dengan askospora berkecambah membentuk tunas haploid; pada saat dua sel kompatibel kawin melalui plasmogami (penggabungan sitoplasma) dan dilanjutkan kariogami (penggabungan inti) maka dihasilkan tunas zigot yang kemudian tumbuh menjadi tunas polar; setelah melakukan meiosis maka terbentuk askus dan askospora kembali.

Tabel 2. Karakteristik klas dan sub klas fungi

Klas/sub klas	Perkawinan		Meiosis		Spora aseksual	Talus
	Plasmogami	Kariogami	Tempatnya	Produknya		
Acrasiomycetes	Amuba	Makrokista	Makrokista	Amuba	Spora sorocarp	Pseudoplasmodium
Myxomycetes	Sel kembara atau amuba	Zigot	Sporangium	Sporangiospor	Tidak ada	Plasmodium
Oomycetes	Gametangia	Oospora	Anteridium oogonium	Inti anteridial, Zoospora atau gamet	Zoospora	Miselium non septat atau seperti sitrid
Chytridiomycetes	Gamet motil	Zigot	Sporangium resisten	Spora sporangium berkecambah	Zoospora	Miselium non septiat atau seperti sitrid
Zygomycetes	Gametangia	Zigospora	Zigospora	Zigospora	Sporagiospora	Miselium non septiat atau seperti sitrid
Hemiascomycetes	Sel yeast	Zigot	Askus	Askospora	Tunas yeast	Yeast atau miselium septat
Euascomycetes	Anteridium atau konidium dan askogonium	Askus	Askus	Askospora	Konidia	miselium septat atau yeast
Loculoascomycetes	konidium dan askogonium	Askus	Askus	Askospora	Konidia	miselium septat atau yeast
Teliomycetidae	Spermatia dan hifa reseptif	Teliospor	Basidium	Basidiospor	Aeiospora dan uredinispore	miselium septat atau yeast
Eubasidiomycetes	Hifa	Basidium	Basidium	Basidisospor	Konidia atau tidak ada	



Gambar 5. Siklus hidup *Saccaromyces*



Gambar 6. Siklus hidup *Mucor*

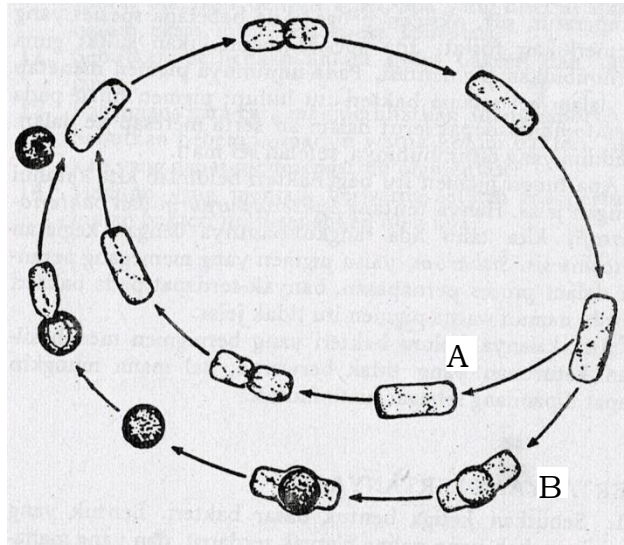
4.1.2 Bakteri

Bakteri adalah mikroba bersel tunggal yang bentuknya variasi dari tiga macam yaitu: basil serupa tongkat pendek, kokus menyerupai bola-bola kecil serta spiril yang berbentuk seperti spiral. Ukuran diameter selnya bervariasi mulai 2,5-5,0 μm untuk bakteri bentuk kokus serta berukuran lebar 0,2-2,0 μm dan panjang 1-15 μm untuk bentuk basil.

Dinding sel bakteri seperti tumbuhan yaitu mengandung selulosa, hemiselulosa, dan khitin. Di bawah dinding sel adalah membran sitoplasma yang membungkus isi sel yaitu protoplasma dan memegang peranan penting dalam pembelahan sel. Sel bakteri juga dilapisi lendir yang jika menebal lapisannya itu disebut kapsula. Selain berfungsi sebagai pertahanan, kapsula sering mengindikasikan virulensi bakteri. Inti sel bakteri tidak seperti fungi dan tumbuhan yaitu tidak memiliki membran atau dinding inti.

Dalam siklus hidupnya dan dalam keadaan normal dan nutrisi tersedia sel bakteri akan terus menerus membelah, namun ketika keadaan tidak menguntungkan, maka sel bakteri membentuk spora (Gambar 7). Itulah sebabnya apabila satu koloni dipanasi 10-15 $^{\circ}\text{C}$ di atas suhu maksimumnya, maka sel-sel vegetatifnya akan mati tetapi sel yang dalam bentuk spora masih bisa bertahan dan

akan berkembang biak dengan cepat ketika lingkungannya kondusif kembali.



Gambar 7. Siklus hidup bakteri sebagai bentuk vegetatif yang membelah terus (a) dan sebagai spora untuk bertahan (b) (Dwidjoseputro, 2005).

4.2 Fisiologi Mikroba Tanah

Proses metabolisme dalam sel mikroba meliputi pengambilan dan penyusunan persenyawaan yang kompleks dari persenyawaan sederhana yang disebut anabolisme dan pembongkaran persenyawaan kompleks menjadi senyawa sederhana yang disebut katabolisme.

Sebagian besar mikroba adalah organisme heterotrof yang memanfaatkan senyawa organik meskipun organisme ini butuh mineral seperti Na, K, Mg, Fe, S, P, Cl dan lainnya. Sebagian besar bakteri dan semua jenis fungi membutuhkan gula dari luar tubuhnya sebagai sumber

energi, berbeda dengan tumbuhan yang memproduksi gula smelalui proses fotosintesis.

Untuk memecah senyawa karbohidrat bermolekulbesar, mikroba menghasilkan berbagai jenis enzim untuk menghasilan gula sederhana yang menjadi sentral sumber energi. Enzim milase dihasilkan mikroba untuk merombak amilum $(C_6H_{10}O_5)_n$ suatu kompleks persenyawaan karbohidrat menjadi maltosa $(C_{12}H_{22}O_{11})$, oleh maltase yang dihasilkan mikroba akan merombak senyawa maltosa menjadi monosakarida glukosa $(C_6H_{12}O_6)$ yang siap menjadi sumber energi. Melalui proses respirasi gula akan dioksidasi menghasilkan energi yang tangkap oleh ADP dengan mengikat satu atom P menjadi ATP yang kaya energi dan akan digunakan oleh sel bagi berbagai kebutuhan proses metabolisme lainnya. Mikroba juga memiliki selulase untuk menguraikan polisakarida selulosa menjadi selobiosa yang pada akhirnya melalui rangkaian proses enzimatik beriktunya akan diubah menjadi glukosa. Mikroba juga melengkapi dirinya dengan enzim-enzim lipase untuk merombak lemak, enzim-enzim kelompok proteinase untuk merombak protein, dan berbagai enzim lainnya.

Aktivitas enzim mikroba dan kemampuan menghasilkan berbagai senyawa ekstraselular banyak diperelajari dan dimanfaatkan oleh para ahli bagi keperluan mendukung produksi tanaman dan perlindungan kesehatan tanaman. Berbagai teknik penginduksian dan manipulasi lingkungan hingga rekayasa genetika

dikembangkan dalam rangka menghasilkan mikroba efektif yang dapat dimanfaatkan sebagai agensia pupuk hayati, pembenah tanah, penginduksi ketahanan tanaman, dan perlindungan tanaman.

4.2.1 Fisiologi Fungi

Selain memiliki kemampuan menghasilkan metabolit anti mikroba, mikoparasit, kemampuan berkompetisi secara spasial, menghasilkan metabolit sekunder, juga menghasilkan berbagai enzim yang dapat dikembangkan bagi keperluan produksi masal seperti selulase, hemiselulase, protease, dan β -1,3-glukanase (Verma *et al.*, 2007), *Trichoderma* produksi senyawa spesifik dan metabolit, seperti faktor pertumbuhan tanaman, enzim hidrolitik, siderophores, antibiotik, dan karbon dan nitrogen permeases (Benítez *et al.*, 2004). *Trichoderma* spp. menghasilkan berbagai jenis enzim di antaranya kitinase dan β -1,3 glukanases yang membuatnya memiliki kemampuan mikoparasit (Harman, 2006).

Trichoderma berkemampuan mensintesis berbagai senyawa yang berbeda seperti protein, enzim, antibiotik yang dapat meningkatkan kemampuannya mengendalikan fungi patogen (Al-Taweil *et al.*, 2009). *Trichoderma* spp menghasilkan sejumlah senyawa aktif secara biologi termasuk enzim yang dapat mendegradasi dinding sel meliputi selulase, kitinase, dan glukanase (Vinale *et al.*, 2008).

Trichoderma juga ternyata memiliki kemampuan memnginduksi peningkatan aktivitas enzim yang dapat digunakan untuk pertahanan tanaman dari serangan patogen. *T. harzianum* meningkatkan kadar enzim peroksidase, polifenol oksidase dan superoksida dismutase serta induksi hormon pertumbuhan dan enzim pertahanan pada tanaman tomat (Chowdappa et al., 2013). Akar tanaman mentimun yang diperlakukan dengan pemberian *Trichoderma harzianum* T-203 ternyata telah terjadi penngkatan aktivitas enzim kitinase (EC 3.2.1.14), β -1,3-glucanase (EC 3.2.1.6), cellulase (EC 3.2.1.4) and peroxidase (EC 1.11.1.7) sampai pada 72 jam setelah inokulasi; aktivitas kitinase pada bagian akar baru memungkinkan lokalisasi *Trichoderma* di ruang antarsel jaringan akar memberikan peluang terjadinya peningkatan sistem pertahan tanaman terhadap patogen (Yedidiaa et al., 2000).

Secara *in vitro* terbukti bahwa *T. harzianum* menginduksi enzim antioksidanyang ditunjukkan dengan meningkatnya aktivitas askorbat peroksidase (APX), guaiacol peroksidase (GPX), superoksida dismutase (SOD) dan katalase (CAT) serta meningkatkan pertumbuhan tanaman kentang (Youssef et al., 2016). Perkecambahan benih tomat meningkat 22-48% dan waktu yang diperlukan untuk proses perkecambahan dipercepat (-2,5 hari) bila diaplikasikan dengan *T. harzianum* dan *Pseudomonas fluorescent* (Srivastava et al., 2010).

Kemampuan fungi *Trichoderma* Peran yang mendapat banyak perhatian para peneliti adalah menghasilkan senyawa ekstraselular yang dapat berperan sebagai hormon pertumbuhan bagi tanaman. *T. atroviride* dan *P. putida* ternyata menghasilkan indole acetic acid (IAA) yang disimulasi secara in vitro dengan penambahan l-tryptophan, tryptamine and tryptophol ($200 \mu\text{g ml}^{-1}$) di dalam medium kultur; secara in vivo kedua fungi ini ternyata dapat meningkatkan bobot basah tunas dan akar bibit tomat yang ditumbuhkan dalam kondisi adanya penambahan konsentrasi l-tryptophan sampai 0.75 mM (Gravel et al., 2007)

Aktivitas enzim pada makhluk hidup sangat dipengaruhi oleh suhu dan pH reaksinya. Hal yang sama juga berlaku pada aktivitas enzim *Trichoderma* yang bekerja secara ekstraselular. Saravanakumar et al. (2016) memperlihatkan perbedaan aktivitas enzim kitinase, selulase, protease, dan $\beta(1-3)$ glukukanase dalam proses pendegradasian dinding sel tanaman pada pH dan suhu yang berbeda.

Fungi *Trichoderma* juga menghasilkan toksin yang dapat menekan patogen termasuk bakteri yang dapat mengganggu tanaman. Oleh karenanya fungi ini berperan membantu memelihara kesehatan tanaman. Tiga aminolipopeptida dari trichoderins berhasil diisolasi dari *Trichoderma* sp. sebagai bahan anti dorman mikobakterial berpotensi sebagai anti mikobakterial terhadap *Mycobacterium smegmatis* dan *M bovis* BCG, dan *M*

tuberculosis dengan kadar antara 0,02-0 µg/ml (Pruksakorna et al., 2010).

Fisiologi Fungi Mikoriza

Kemampuan mendifusikan ion NO_3^- , NH_4^+ , dan PO_4^{3-} oleh fungi mikoriza arbuskula masing-masing sebesar $10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ det}^{-1}$, $10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ det}^{-1}$, dan $10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ det}^{-1}$; sementara itu pada lahan kering dengan tingkat difusi P 10 sampai 100 kali lebih rendah dibandingkan lahan basah, pengambilan P oleh tanaman tanpa mikoriza tidak mungkin bisa dilakukan Paul & Clark (1995). Lebih lanjut disampaikan bahwa asosiasi dengan ektomikoriza akan menimbulkan perubahan fisik akar terutama terbentuknya mantel yang dapat melindungi akar dari serangan fungi patogen seperti *Phytophthora*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, dan nematode.

Pada tanah-tanah bermasalah misalnya yang memiliki pH yang rendah dan tingkat Al dan Mn yang membutuhkan tinggi input pupuk dan pemberian bahan organik sudah tentu akan meningkatkan biaya produksi tanaman. Inokulasi fungi mikoriza arbuskula merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi biaya produksi tanaman. Kerja fisiologi fungi akan meningkatkan efisiensi penggunaan sumberdaya berupa pupuk kimia dan membantu meningkatkan kinerja pertumbuhan tanaman yang diwujudkan dalam peningkatan tinggi tanaman, bobot kering pucuk dan akar, rasio pucuk:akar. Inokulasi fungi mikoriza *Glomus. etunicatum* dan *S. pelusida* juga secara signifikan mengubah konsentrasi unsur-unsur P, Zn, Cu,

Ca, S, Na, N, K, Fe dan Al dalam jaringan, dengan demikian tampak nyata bahwa fungi ini efektif mempromosikan pertumbuhan tanaman dan serapan hara (Cavallazzi *et al.*, 2007).

Penggunaan ^{13}C sebagai penanda translokasi C pada tanaman yang melibatkan kerja fungi mikoriza menunjukkan bahwa rata-rata 10% C dialokasikan ke organ di bawah tanah yaitu akar dan hifa mikoriza, sedangkan 4,3% dialokasikan untuk hifa mikoriza dalam 24 jam setelah pelepasan C pada tanaman; sementara itu dengan menggunakan label nitrogen anorganik diketahui bahwa 23% N yang diserap dipertahankan di miselium fungi (Tomè *et al.*, 2015). Hasil penelitian juga menunjukkan adanya korelasi positif antara tingkat fotosintesis tanaman dan kapasitas penyerapan hifa.

Fungi mikoriza juga memiliki kemampuan untuk mendegradasi bahan organik. Read dan Perez-Moreno (2003) menyebutkan berbagai enzim yang dihasilkan oleh fungi mikoriza ericoid yang dapat digunakan mulai untuk mendegradasi dinding sel tanaman, oksidasi asam fenolik dan tanin, hidrolisis lignin.

Read dan Perez-Morenos (2003) juga mempromosikan suatu model keterlibatan fungi mikoriza dalam pengambilan N dan P (Gambar 4.4). Dengan berbagai enzim yang dapat dihasilkan mikoriza, maka peluang pendegradasian sisa tanaman, sampah organik, biji, jaringan tanaman, jasad meso dan mikro fauna, serta jasad miselia dan bakteri di dalam tanah cukup signifikan.

Sejauh mana ini dapat berjalan tentunya memerlukan penelitian yang mendalam. Jika diuraikan pada level persenyawaan bahan organik Berbagai di bawahnya yaitu dalam bentuk makromolekul struktural seperti lignin, polifenol, selulosa, dan pekin serta makromolekul nutrisi seperti kitin, protein, kompleks polifenol-protein, dan fosfolipid, maka makin tampak bahwa potensi pendegradasiian bahan organik itu oleh mikoriza makin jelas terlihat. Pengujian dekomposisi makromolekul oleh fungi mikoriza juga memerlukan penelitian lebih lanjut. Adapun terhadap bahan intermedit seperti asam amino, gula amino, heksafosfat inositol, dan DNA perlu pengujian kemampuan fungi mikoriza dalam mendegradasinya. Pada akhirnya sesungguhnya peran fungi mikoriza adalah dalam pengambilan N dan P dalam bentuk amonium (NH_4), nitrat (NO_3), dan fosfat (PO_4) ini yang diharapkan akan menjadi titik kritis dalam meninjau sejauh mana fungi mikoriza menyumbangkan nutrisi N dan P bagi tanaman simbiotnya.

Secara fisiologi peran mikoriza sesungguhnya bukan hanya berkontribusi mensuplai N dan P, tetapi juga berbagai nutrisi lain yang disalurkan oleh hifa fungi dari mikro- dan mesopori tanah yang tidak terjangkau oleh bulu akar. Namun demikian secara kuantitatif suplai nutrisi oleh fungi mikoriza tidak halus sama tergantung lingkungannya. Seacara latitude dan altitude terdapat perbedaan baik sumber N, mineral dan bahan organik, jenis mikoriza, serta aktivitas fungi simbiotnya.

Percobaan lapang dilakukan pada agroekosistem semi-kering Mediterania untuk menilai pengaruh praktek pengelolaan yang berbeda terhadap komposisi dan keragaman fungi mikoriza arbuskula (FMA) di dalam tanah. Pada percobaan yang dilakukan di Mu Kami Sandland, barat laut China, dari tanah rhizosfer kedalaman 50 cm tanaman *Astragalus adsurgens* Pall diketahui bahwa *A. adsurgens* Pall. bisa membentuk hubungan simbiosis yang kuat dengan FMA serta kepadatan spora secara signifikan dan berkorelasi positif dengan karbon organik tanah (SOC), asam fosfatase tanah, dan fraksi dua macam protein *Bradford-reaktive* tanah (glomalin) (Bai *et al.*, 2009). Lebih lanjut disampaikan beberapa kesimpulan yaitu: (i) kolonisasi arbuscules dan vesikula berkorelasi positif dengan aktivitas protease, (ii) fraksi protein tanah dimaksud juga juga secara signifikan dan berkorelasi positif dengan faktor edafis yaitu karbon organik tanah, nitrogen tersedia, dan fosfor serta enzim tanah (misalnya urease dan asam fosfatase), (iii) tingkat kandungan glomalin di tanah gurun yang sedikit lebih rendah daripada yang di tanah asli dan subur, namun rasio protein terhadap karbon organik tanah jauh lebih tinggi dari tanah lahan pertanian. Glomalin diduga merupakan parameter biokimia yang berguna untuk penilaian kesuburan tanah biologis dalam pertanian berkelanjutan (Bedini *et al.*, 2007). Persentase kolonisasi fungi mikoriza pada akar jagung dan kandungan glomalin lebih tinggi pada laha yang dikelola secara organik dan akan meningkat sejalan dengan waktu transisi menuju

sistem pertanian organik; selain itu peningkatan kadar glomalin dalam sistem pertanian organik yang subur berkorelasi kuat dengan jumlah inokulum potensial fungi mikoriza di dalam tanah (Bedini *et al.*, 2013). Pada percobaan *in vitro* yang dilakukan Driver *et al.* (2005) diketahui bahwa sekitar 80% glomalin yang dihasilkan oleh fungi berada dalam hifa dan spora dibandingkan dengan yang dilepaskan ke dalam medium kultur; lebih lanjut dinyatakan bahwa bahwa glomalin yang terkandung di tanah dilepas dari hifa dan bukan melalui sekresi, juga perlu didalami kajian tentang kontribusi protein dalam kehidupan miselium fungi mikoriza.

Fungi mikoriza arbuskula (FMA) adalah simbiosis obligat pada kebanyakan tanaman. Selain menjadi komponen utama dari biomassa mikroba tanah, hifa FMA menghasilkan glomalin yaitu senyawa *glycoproteinaceous* yang sangat berkorelasi dengan stabilitas agregat tanah; Glomalin, diukur dengan uji protein Bradford (Steinberg dan Rillig, 2003)

Pada kebun apel, respirasi tanah disumbang oleh respirasi mikoriza sebesar 11,6%, sumbangan respirasi akar 12,4%, sedangkan respirasi bahan organik tanah sebesar 73,3% dari R_{soil} . Di rhizosfer apel, respirasi bahan organik tanah (SOM) dan mikoriza meningkat secara signifikan pada akhir musim panas dan musim gugur, mungkin karena efek *priming* akar dari degradasi SOM atau stimulasi respirasi mikoriza (Gambar 4.5) (Tomè *et al.*, 2016).

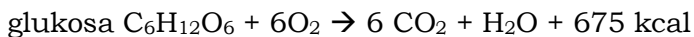
4.2.2 Fisiologi Bakteri

Manipulasi lingkungan dalam rangka memanfaatkan karakteristik bakteri yang menguntungkan harus memperimbangkan cara bakteri melaksanakan respirasi terkait dengan ada tidaknya atau seberapa banyak ketersediaan oksigen.

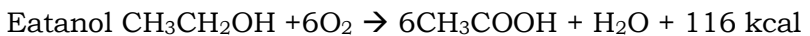
Secara umum respirasi bakteri ada dua macam yaitu secara aerob atau membutuhkan oksigen dan secara anaerob atau tanpa oksigen. Namun demikian dalam dunia bakteri yang bersifat heterotrof ditemukan variasi, sehingga ada bakteri yang bersifat aerob, hanya anaerob, anaerob fakultatif (pada saat tertentu bersifat aerob) dengan derajat bervariasi pula.

Respirasi Aerob

Pada respirasi aerob bakteri menggunakan glukosa atau zat organik lain sebagai substrat untuk dioksidasi menjadi karbondioksida dan air dengan reaksi kimia berikut:

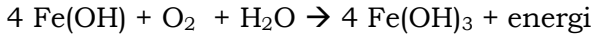
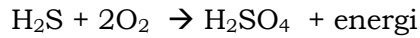


Pada genus lain misalnya *Azotobacter*, substrat yang dioksidasi berupa etanol, namun energi yang dihasilkan rendah:



Untuk bakteri autorof yang tidak menggunakan gula atau zat organik sebagai sumber energi, menggunakan

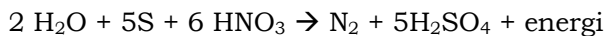
senyawa anorganik sebagai substratnya dengan contoh reaksi kimianya sebagai berikut:



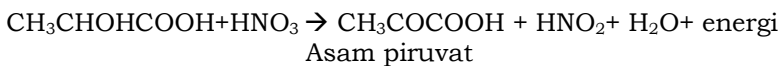
Respirasi Anaerob

Respirasi anaerob dilakukan oleh jenis bakteri yang tidak membutuhkan oksigen bebas dalam melaksanakan respirasinya; bila terpapar oksigen bebas, bakteri tipe ini akan mengalami kematian. Ada jenis bakteri anaerob lain yang meskipun terpapar oksigen bebas tidak mati namun tidak menggunakannya untuk proses respirasi. *Streptococcus lactis* tidak dapat memanfaatkan O_2 yang bebas karena tidak memiliki enzim untuk mereduksi oksigen.

Respirasi anaerob dapat terlaksana secara intramolekul. Karakteristiknya hampir serupa dengan respirasi aerob namun pada respirasi anaerob intramolekul oksigen tidak diperoleh dari udara bebas melainkan dari suatu senyawa; jadi yang direduksi bukan oksigen melainkan suatu senyawa lain. Penerima hidrogen dapat berupa senyawa seperti nitrat, nitrit, karbonat, atau sulfat. Energi yang diperoleh dari proses respirasi anaerob tidak banyak.

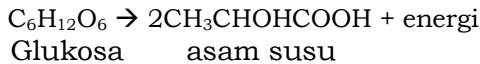


S dioksidasi menjadi SO_4 , HNO_3 direduksi menjadi N_2



HNO_3 direduksi menjadi HNO_2 , $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$ dioksidasi.

Pada mikroba lain respirasi intramolekul berlangsung tanpa oksidasi sama sekali, yaitu bagian dari suatu molekul kehilangan atom-atom H, sedangkan bagian yang lain dari molekul tersebut mendapat tambahan atom-atom H. *Lactobacillus* mengubah glukosa menjadi asam susu dan energi:



Senyawa Yang Dihasilkan Bakteri

Secara umum berbagai senyawa yang dihasilkan berbagai macam bakteri dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- (i) Gas, hasil perombakan melalui respirasi dan fermentasi oleh bakteri adalah meliputi: karbondioksida (CO_2), hidrogen (H_2), metan (CH_4), nitrogen (N_2), hidrogensulfida (H_2S), dan amoniak (NH_3); senyawa yang dihasilkan tergantung jenis bakterinya
- (ii) Senyawa asam yang dihasilkan meliputi: asam sulfat (HSO_4), asam nitrat (HNO_3), asam susu ($\text{CH}_3\text{CHOH.COOH}$), asam asetat (CH_3COOH), dan berbagai asam lemak ($\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{COOH}$). Masing-masing senyawa bisa dihasilkan dari masing-masing sel bakteri dari jenis yang berbeda;
- (iii) Toksin yang dihasilkan adalah: adalah senyawa yang bersifat racun bagi organisme lain yang dikeluarkan oleh bakteri dan disebut eksotoksin dan senyawa racun yang terdapat di dalam selnya

dan disebut endotoksin. Jenis toksin yang dikeluarkan oleh satu jenis pada jenis bakteri yang lain.

PERTANYAAN

1. Jelaskan secara skematis perbedaan siklus hidup fungi *Saccaromyces* (yeast) dengan *Mucor*?
2. Apa perbedaan sel normal pada bakteri dengan sel sebagai spora? Jelaskan!
3. Aktivitas enzim yang dihasilkan mikroba menjadi perhatian para peneliti. Mengapa? Jelaskan!
4. Apa yang menjadi keunggulan fungi *Trichoderma*? Jelaskan!
5. Apa yang menjadi keunggulan fungi mikoriza? Jelaskan!
6. Jelaskan perbedaan respirasi aerob dan respirasi anaerob pada bakteri?
7. Apa saja senyawa yang dihasilkan bakteri sehingga beberapa di antaranya diunggulkan sebagai bakteri efektif?

BAB 5

FUNGI EFEKTIF

5.1 Mikoriza

Biologi dan Pengelompokannya

Berdasarkan karakteristik infeksi fungi mikoriza pada perakaran, para ahli mengklasifikasikan bentuk simbiosis antara fungi mikoriza ini dengan perakaran tanaman menjadi: (i) ektomikoriza yang menunjukkan bahwa fungi menyelubungi bagian luar akar, tidak menginfeksi sel tapi masuk di ruang antar ruang antarsel, (ii) endomikoriza atau dikenal juga sebagai mikoriza arbuskula, yang menunjukkan fungi menginfeksi hingga ke bagian dalam sel akar, dan (iii) ericoid mikoriza yaitu fungi mikoriza yang berasosiasi dengan tanaman anggrek atau tanaman semak. Secara umum berbagai karakteristik khas di mana ketiga kelompok utama mikoriza tersebut dapat ditemukan atau berhabitat dipresentasikan oleh Paul dan Clark (1996) seperti tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik tanah-tanaman-fungi mikoriza ericoid, ektomikoriza, dan endomikoriza (Paul & Clark, 1996)

Karakteristik	Mikoriza Ericoid	Ektomikoriza	Mikoriza Arbuskula
	Karakteristik tanah		
pH	3,5-4,2	4,2-5,4	>4,5

Ketersediaan nutrisi	N dan P organik, tanah tercuci	Mineral lapisan (humus)	N dan P sampah	N sangat rendah dan ketersediaan P rendah, humus tipis di permukaan
Akar	Hifal yang keluar dari akar pendek untuk mencapai permukaan humus	Akar dengan akar mengalami perubahan bentuk	ektensif bulu-bulu yang mengalami perubahan bentuk	Efek adanya infeksi pada akar tidak nampak, akar berasosiasi dengan mineral tanah
Karakteristik tanaman				
Tipe tanaman	Semak kerdil dengan perakaran ekstensif, <i>Calluna, Larix, Vaccinium</i>	Hutan tropis hingga temperat; <i>Betula, Pinus-Picea, Quercus,</i>	<i>Fagus-Dipterocarpaceae,</i> Leguminaceae	Rerumpunan, tanaman pertanian, <i>Ulmus, Acer, Fraxinus,</i> Leguminaceae
Karakteristik fungi				
Hifa	Bersekat, dekat dengan akar, masuk ke dalam sel	Ekstensif ada tidak bersekat, tidak masuk ke dalam sel tapi membentuk mantel	ada yang bersekat ada juga tidak bersekat, tidak masuk ke dalam sel tapi membentuk vesikel dan arbuskula.	Ekstensif tidak bersekat, masuk ke dalam sel, membentuk vesikel dan arbuskula.
Fisiologi	Memiliki enzim protease, polifenoloksidase, mendegradasi bahan humus	Mndegradasi protein, menyimpan nutrisi di dalam mantel, melindungi akar terhadap infeksi patogen		Menyerap nutrisi, berinteraksi dengan organisme tanah
Klasifikasi	Klas Ascomycetes (kadang Basidiomycetes)	Ascomycetes, Basidiomycetes, Zygomycetes		Glomales

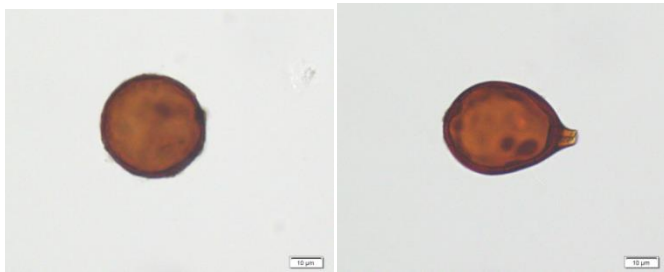
Beberapa temuan dari survey yang dilakukan terhadap 659 makalah yang sebagian besar diterbitkan sejak 1987 terkait kejadian mikoriza yang melibatkan 3.617 spesies dan 263 keluarga tanaman darat telah memberikan pemahaman tentang peran mikoriza sebagai berikut: (i) Sekitar 80% spesies dan 92% keluarga tanaman darat bermikoriza, (ii) mikoriza arbuskular (AM) adalah jenis dominan dan merupakan leluhur dari mikoriza pada

tanaman darat, (iii) pembentukan ektomikorisa (ECM) dan jenis turunannya secara independen sebagai hasil proses evolusi paralel berkali-kali dari AM, dan koevolusi antara tanaman dan fungi diduga berkontribusi bagi diversifikasi di antara tanaman inang dan simbiannya, dan (iv) *mycoheterotrophy* dan hilangnya hubungan simbiosis mikoriza terjadi karena evolusi berkali-kali secara independen melalui evolusi paralel (Wang dan Qiu, 2006). Pada endomikoriza tidak dijumpai adanya perubahan bentuk pada akar dan hampir tidak ada bedanya dengan tanpa infeksi mikoriza, kecuali adanya hifa eksternal yang nampak keluar dari jaringan akar, kolonisasi fungi ektomikoriza di rambut akar akan menimbulkan perubahan bentuk dan tampak kasar karena adanya struktur mantel yang melingkupi akar. Perbedaan yang menunjukkan adanya perubahan bentuk jika dibandingkan tanpa infeksi fungi ektomikoriza dapat dilihat pada Gambar 8 pada rambut akar bibit cengkeh.



Gambar 8. Penampilan akar bibit cengkeh tanpa mikoriza (kiri) dan terinfeksi fungi ektomikoriza (kanan) (foto: koleksi Nindya dan Sutarman)

Fungi ektomikoriza menggunakan spora untuk memulai siklus hidupnya. Sebagaimana fungi dari klas Ascomycetes, Basidiomycetes, dan Zygomycetes, spora dan hifa segarnya dapat dibiakkan pada media buatan, akan tetapi fungi endomikoriza yang didominasi klas Glomales tidak dapat dibiakkan pada media buatan tapi membutuhkan media hidup atau sel inang sebagai sarana untuk pertukaran nutrisi antara fungi dan sel akar tanaman, Spora fungi ektomikoriza berukuran relatif sama dengan fungi patogen yaitu kurang dari 10 μm , sementara itu spora fungi endomikoriza rata-rata berukuran di atas 100 μm yaitu 149 μm (*Glomus coronatum*) dan 141 μm (*Glomus* sp) (Gambar 9).



Gambar 9. Spora fungi endomikoriza *Glomus coronatum* (kiri) dan *Glomus* sp. (kanan) (foto: koleksi Sutarman).

Pengelompokkan mikroiza yang didasarkan pada pertimbangan morfologi saat ini sudah bergeser pada pemanfaatan marka molekular. Alguacil *et al.* (2014) telah melakuka identifikasi fungi mikoriza arbuskula melalui serangkaian kegiatan yang dimulai dari ekstraksi DNA yang

diperoleh dari smapel tanah, yang dilanjutkan dengan amplifikasi subunit kecil (SSU) rRNA dengan perangkat PCR, kloning, sekuensing, dan analisis filogenetik. Dari tiga puluh lima *phylotypes* fungi arbuskula yang berbeda di suatu agroekosistem mediterania diidentifikasi, kemudian dikelompokkan dalam lima keluarga yaitu: Glomeraceae, Paraglomeraceae, Diversisporaceae, Ambisporaceae, dan Claroideoglomeraceae.

Berdasarkan kajian terhadap praktek manajemen pertanian yang berbeda diketahui bahwa keragaman fungi mikoriza arbuskula berkorelasi positif dengan parameter tanah yang terkait dengan aktivitas biologis; perlakuan yang melibatkan membajak tanah sangat mengubah komposisi komunitas FMA tetapi tidak mempengaruhi secara signifikan keragaman dan kelimpahan FMA, namun penambahan herbisida mengakibatkan penurunan keragaman FMA; penambahan jerami gandum tampaknya menjadi strategi manajemen yang paling-cocok sehubungan upaya untuk meningkatkan keanekaragaman FMA dan aktivitas biologis tanah (Alguacil *et al.*, 2014).

Peran dan Pemanfaatan Fungi Mikoriza

Fungi mikoriza meningkatkan ketersediaan fosfor bagi tanaman melalui hifa extraradicalnya yang menyerap nutrisi di luar zona deplesi akar. Meskipun demikian fungi mikoriza arbuskula (FMA) tidak meningkatkan produktivitas total tanaman (Van Der Heijden *et al.*, 2006). Lebih lanjut dikemukakan peran FMA, yaitu: meningkatkan akuisisi nitrogen oleh beberapa spesies

tanaman, meningkatkan biomassa tanaman meskipun sangat tergantung pada musim, meningkatkan status nutrisi dan memperbaiki struktur tanah padang rumput.

Sebagian besar tanaman darat memiliki sistem simbiosis dengan mikoriza pada perakarannya yang akan membantu tanaman dalam penyerapan nutrisi di samping penyerapan nutrisi langsung melalui epidermis akar dan akar rambut. Nutrisi yang diserap hifa akan ditranslokasikan ke ke dalam sel kortikal akar, di mana arbuscules atau kumparan hifa menyediakan *interface* simbiosis atau sarana penghubung sistem translokasi pertukaran senyawa antara fungi dan tanaman (Smith dan Smith, 2011).

Peningkatan penyerapan unsur hara tanaman yang difasilitasi oleh fungi mikoriza akan meningkatkan respon tanaman dalam bentuk pertumbuhan vegetatif dan peningkatan pertumbuhan fase generatif yang pada akhirnya meningkatkan produksi tanaman. Buysens *et al.*, (2016) menunjukkan fungi Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) dan *Trichoderma* spp. dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dan meningkatkan ketahanan terhadap cekaman biotik dan abiotik pada banyak tanaman pertanian. Inokulasi fungi mikoriza meningkatkan panen kentang yaitu jumlah umbi lebih banyak dan ukuran umbi kentang lebih besar,

Produksi pertanian sering dibatasi oleh fosfor rendah (P) ketersediaan. Di negara-negara berkembang, yang

memiliki akses ke pupuk P terbatas, ada kebutuhan untuk mengembangkan tanaman yang lebih efisien di tanah rendah P. Dalam sistem pertanian intensif, penggunaan tanaman yang efisien dalam penyerapan P diperlukan untuk meminimalkan penggunaan P sekaligus mengurangi potensi hilangnya P ke lingkungan. Ada tiga strategi di mana tanaman dan mikroorganisme dapat meningkatkan efisiensi penggunaan P, yaitu: (i) strategi meningkatkan pengambilan P dengan menurunkan level kebutuhan P kritis bagi pertumbuhan tanaman sehingga memungkinkan usaha pertanian dapat berjalan pada level P yang rendah di lapang; (ii) strategi “penambangan” P dengan meningkatkan desorpsi, solubilisasi atau mineralisasi P dari sumber yang tersedia dalam tanah dengan menggunakan eksudat akar (anion organik, fosfatase), dan (iii) meningkatkan efisiensi pemanfaatan P internal melalui penggunaan tanaman yang menghasilkan lebih banyak hasil/biomassa per unit serapan P (Richardson *et al.*, 2011).

5.2 Trichoderma

Trichoderma Sebagai Fungi Efektif

Pemanfaatan peran *Trichoderma* untuk pengendalian penyakit bukan hanya aspek antagonistiknya saja, tetapi sebagian diarahkan memanfaatkan perannya dalam menginduksi respons tahan tanaman baik secara lokal maupun sistemik terhadap patogen dan stress lingkungan di samping fungsi dekomposisi bahan organik membantu suplai nutrisi bagi tanaman.

Inventarisasi *Trichoderma* di bawah tegakan pinus relative belum dilakukan secara ekstensif padahal tanah lapisan atas tapak pertanaman pinus kaya residu tanaman. Hasil isolasi pada tanah di salah satu persemaian pinus di Jawa Timur diperoleh *T. harzianum* yang selanjutnya digunakan untuk pengujian efek antagonisme terhadap patogen *damping off* (Sutarman dan Prihatiningrum, 2015). Oleh karenanya hasil inventarisasi dapat dimanfaatkan bagi kebutuhan penelitian pengendalian hawar daun bibit pinus non kimia yang lebih operasional.

Potensi *Trichoderma* sebagai agensia pengendali hayati *P. theae* sangat besar mengingat meski sebagai patogen tular udara namun perilaku penyebarannya lebih mendekati patogen tular tanah. Percikan ketika penyiraman dan/atau hujan memungkinkan patogen bersama-sama dengan spora *Trichoderma* akan tersebar ke permukaan daun yang berkelembaban tinggi dan berinteraksi secara antagonistik.

Berbagai karakter *Trichoderma* yang membuatnya sangat potensial sebagai agen biokontrol, adalah: kecepatan tumbuh yang tinggi dan mampu memanfaatkan berbagai bahan organik dalam rangka memanfaatkan sumber energinya, memiliki kemampuan berkompetisi dan sekaligus sebagai parasit bagi fungi patogen, menghasilkan antibiotik, serta menghasilkan berbagai enzim yang dapat menghambat patogen termasuk menghasilkan enzim kitinase yang dapat merusak dinding sel fungi patogen.

Trichoderma juga dapat bertindak sebagai biofertilizer karena kemampuannya menghasilkan nutrisi dari proses degradasi bahan organik dan menghasilkan senyawa ekstraselular yang berperan sebagai hormon bagi tanaman seperti auksin dan turunannya.

5.3 Agen Biofertilizer Lain

Fungi agen biofertilizer adalah jenis fungi yang aktivitasnya dapat berperan sebagai pupuk secara tidak langsung. Dalam hal ini fungi memiliki kemampuan merombak bahan organik menjadi komponen penyusunnya hingga dihasilkan senyawa yang mampu menghasilkan ion yang dapat dipertukarkan oleh tanaman. Kemampuan merombak bahan organik ditunjukkan pula oleh kemampuan enzim perombak yang dihasilkannya.

Proses perombakan bahan organik di alam dapat kita saksikan pada seongok sampah atau limbah pertanian yang mengalami perubahan selama kurun waktu tertentu menjadi bahan dengan struktur dan tekstur yang berbeda dibandingkan kondisi awal. Perombakan dimaksud tidak ditanggung-jawabi oleh satu jenis mikroba saja tetapi saling berhubungan dengan berbagai jenis mikroba lain baik dari jenis bakteri maupun fungi.

Berbagai spesies dari kelas Basidiomycetes dan Deuteromycetes bahkan dari kelas lain bisa dijumpai dalam satu ongkolan limbah pertanian yang membusuk, seperti *Mucor*, *Absidia*, *Coprinus*, *Dactylomyces*, *Aspergillus*, dan *Humicola*.

Tidak mudah untuk memisahkan dan menentukan kekuatan atau daya rombak masing-masing spesies mikroba dari satu ongkongan bahan organik yang membusuk. Namun demikian para ahli banyak yang menyukai meneliti satu spesies bahkan isolat tertentu untuk memastikan kemampuannya sebagai biofertilizer secara individu.

Kemampuan lain yaitu menghasilkan senyawa ekstraselular tertentu yang dapat mendukung pertumbuhan tanaman bahkan mendorong aktivitas mikroba efektif lainnya di dalam rhizosfer selalu menjadi pertimbangan penting dalam mencari dan mendeterminasi kandidat agensia hayati biofertilizer.

Dua jenis fungi yang paling sering menjadi perhatian para ahli dan praktisi pertanian di antaranya adalah: fungi *Trichoderma* dan fungi mikoriza. Namun saat ini berbagai kandidat agensia biofertilizer lain dari duni fungi sudah mulai banyak bermunculan seperti: berbagai spesies dan isolat *Aspergillus* dan *Fusarium* non patogenik. Jika berbasis varian dari spesies atau isolat, maka akan tampak betapa masih banyak “jenis” fungi potensial yang belum tereksplorasi.

Proses dekomposisi bahan organik sekaligus bersifat pemupukan atau penambahan/pemulihan nutrisi ke dalam tanah yang difasilitasi oleh aktivitas mikroba yang dibuktikan adanya proses respirasi. Heinemeyer *et al.* (2007) menunjukkan aktivitas respirasi dalam bentuk aliran CO₂ tanah yang ditanggung-jawabi oleh organisme heterotrof tanah (60%) dan hifa ektomikoriza (25%), serta

akar 15 %. Fakta lain menunjukkan bahwa 25% respirasi akar barley ditanggung-jawabi oleh respirasi hifa mikoriza arbuskula yang berkontribusi sebesar 4,8 % total asimilasi karbon (Moyano *et al.*, 2007).

Fungi mikoriza *ericoid* sebagaimana tipe mikoriza yang lain berperan dalam pendegradasian bahan organik; hal itu karena fungi menghasilkan berbagai enzim yang dapat digunakan untuk mendegradasi dinding sel tanaman yang merupakan bahan organik (Read dan Perez-Moreno, 2003).

Karakteristik tanah ternyata sangat mempengaruhi kualitas simbiosis yang direpresentasikan oleh pertumbuhan panjang akar dan kelimpahan fungi mikoriza arbuskula (FMA) (Camenzind *et al.*, 2016). Di lain pihak status N tanah terkait dengan biofertilisasi berbasis endomikoriza sangat dapat dipengaruhi kualitas lapisan organik di samping suhu dan kelembaban tanah yang merupakan representasi ketinggian tempat (Martinson *et al.*, 2013).

Aktivitas metabolisme dekomposer dalam proses dekomposisi bahan organik di dalam tanah akan menyumbangkan suatu dinamika perubahan laju respirasi dan aktivitas mikroba tanah yang berkontribusi terhadap *turn over* bahan organik tanah (Kuzyakov dan Larionova, 2005) yang diukur melalui tingkat respirasi rhizosfer. Terkait itu maka, ketersediaan bahan organik di dalam tanah menjadi sangat penting untuk konservasi mikroflora tanah, mengingat pula bahwa beberapa jenis mikroba memiliki tingkat respirasi yang lebih besar dari pada akar

tanaman seperti dicontohkan oleh Neumann dan Matzner (2014) bahwa tingkat respirasi akar halus lebih rendah dari miselium fungi ektomikoriza. Respirasi karbon miselia fungi mikoriza arbuskula pada hutan tropis basah mencapai 1,4 ton/ha per tahun atau rata-rata $14 \pm 6\%$ respirasi tanah dan $26 \pm 12\%$ respirasi akar (Nottingham *et al.*, 2010).

Biofertilisasi oleh mikroorganisme merupakan representasi hubungan antara *turn over* C-N tanah dan aktivitas enzim ekstraseluler seperti selulase (*exocellulase* dan β -glukosidase) dan protease (Geisseler dan Horwath (2009).

Biofertilisasi bahan organik oleh fungi mikoriza ditandai adanya glomalin yaitu senyawa glikoprotein yang diproduksi hifa fungi mikoriza arbuskula; kandungan C dan N glomalin ternyata mencapai antara 4-5% C dan N tanah (Rillig *et al.*, 2001).

Mikroorganisme bukan hanya penyumbang nutrisi di dalam tanah, tapi juga berperan dalam siklus dan pembentukan makroagregat tanah; model konseptualnya dapat dijelaskan bahwa: bahan organik tanah dalam jangka panjang dilindungi oleh mikroagregat tanah dan stabilisasi bahan organik tanah ditanggung-jawabi oleh makroagregat tanah (Six *et al.*, 2004).

5.4 Agen Biokontrol dan Fungi Efektif Lain

Dengan melihat pola pertumbuhan intensitas serangan hawar daun bibit pinus yang dicirikan oleh penyebaran spasial bibit yang terinfeksi dan bibit sudah mulai terserang

sebelum pasca *damping off* berakhir (Sutarman *dkk.*, 2004), maka tindakan seleksi secara dini dan memisahkan tanaman sakit menjadi prioritas pertama ketika kegiatan persemaian dimulai.

Pemanfaatan *Trichoderma* sebagai agen biokontrol yang diaplikasikan sebagai biopestisida untuk menekan patogen *damping off* merupakan tindakan penting untuk mencegah kegagalan dalam produksi bibit pada awal kegiatan persemaian. *Trichoderma* menghasilkan berbagai enzim hidrolitik dan antibiotik (Benítez et al., 2004; Harman. 2006, Chowdappa *et al.*, 2013) yang dapat menekan dan memparasitasi patogen. Efektivitas daya tekan *Trichoderma* terhadap *Fusarium*, yang percobaan ini sebagai patogen *damping off* berbahaya, telah terbukti pada tanaman palawija dan hortikultur (AlAskar & Rashad, 2010; Dubey et. al., 2007; Saravanakumar et al., 201). Aplikasi mikroba agen biokontrol selain dapat meningkatkan resistensi tanaman terhadap serangan patogen tapi juga membantu meningkatkan tanaman (Gerbore *et al.*, 2014). *T. harzianum* dapat meningkatkan daya kecambah tomat (Srivastava et al., 2010) dan melindungi bibit pinus dari seranga patogen *damping off*. Aplikasi *Trichoderma* ternyata juga memperlihatkan perannya sebagai biofertilizer yang menginduksi ketahanan bibit terhadap seranga patogen (Sutarman & Prihartiningrum, 2015). Peningkatan ketahanan tanaman yang diinduksi oleh *Trichoderma* juga ditunjukkan pada beberapa tanaman hortikultur (Buysen *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2016; Yousef *et al.*, 2016) .

Fungi penting lain yang terlibat dalam sistem persemaian dan rhisofer lahan hutan pinus adalah fungi ektomikoriza. Pinus adalah spesies yang sangat bergantung pada fungi ektomikoriza pasangan simbiornya. Fungi mikoriza simbion di akar pinus ini memiliki efek positif bagi kehidupan organisme di rizosfer sebagai mana yang diberikan fungi endomikoriza pada tanaman pangan. Aktivitas fungi mikoriza mempengaruhi aktivitas biologi tanah (Alguacil et al., 2014) dan produktivitas ekosistem perakaran (Van der Heijden et al., 2006). *Scleroderma clumnare* dan *Pisolithus arrhizus* merupakan fungi ektomikoriza yang kelimpahannya di rhzosfer dan perakaran pinus (Sutarman, 1997; Widyati et al., 2001) berkontribusi besar dalam siklus karbon hutan (Heinemeyer et al., 2007; Barea et al., 2011). Dengan demikian pemanfaatan fungi ektomikriza dalam proses awal pembuatan bibit mutlak diperlukan.

Dalam sistem agrogorestri digunakan tumpang sari antara tanaman pinus muda (usia 1-5 tahun) dan beberapa tanaman hortikultur strategis, maka penggunaan pupuk organik sangat penting. Bahan organik merupakan sumber karbon dan nutrisi bagi mikroba saprofitik tanah. *Trichoderma* dapat hidup dengan baik sebagai dekomposer di berbagai bentuk bahan organik (Howell, 2003; Hu et al., 2016). Oleh karenanya memperkaya bahan organik tanah pada lahan agroforestri bukan saja meningkatkan kepadatan populasi *Trichoderma* tetapi juga menyediakan nutrisi dan senyawa ekstraselular yang berperan sebagai

fitohormon (Verma *et al.*, 2007; Bravel *et al.*, 2007) yang dapat mengoptimalkan pertumbuhan pinus dan tanaman hortikultur sebagai pasangan dalam tumpangsari.

Secara keseluruhan beberapa tahapan yang dapat diimplementasikan dalam memitigasi serangan patogen pada persemaian dan tanaman pinus dalam sistem agroforestri adalah sebagai berikut:

- (i) Aplikasi *Trichoderma* dalam perlakuan benih hingga pengecambahan pinus dengan target untuk meeliminasi gangguan patogen damping off. Tahap ini juga dapat diterapkan pada benih tanaman hortikultur;
- (ii) Penggunaan fungi ektomikoriza sebagai bagian komponen media perkecambahan dan media tumbuh bibit pinus;
- (iii) Aplikasi *Trichoderma* sebagai *biofungisida* untuk perlindungan bibit tanaman baik pinus maupun tanaman pasangan tumpangsarinya yang diaplikasikan melalui penyemprotan;
- (iv) Aplikasi *Trichoderma* sebagai bioferilizer yang diformulasi dalam bahan organik untuk diaplikasikan sebagai pemupukan yang bertujuan menginduksi ketahanan tanaman terhadap serangan patogen sekaligus menyumbangkan zat pengatur tumbuh bagi tanaman dan nutrisi bagi pertumbuhan tanaman;

Seleksi dini bibit tanaman dengan cara memisahkan dan memusnahkan tanaman sakit, sehingga penularan dapat dicegah.

PERTANYAAN

1. Jelaskan pula apa perbedaan endomikoriza dan ektomikoriza?
2. Jelaskan peran dan pemanfaatan fungi mikoriza?
3. Jelaskan peran trichoderma sebagai fungi efektif?
4. Jelaskan apa perbedaan agensia biofertilizer dan mikroba efektif? Jelaskan!
5. Jelaskan peran fungi sebagai agen biokontrol?

BAB 6

BAKTERI EFEKTIF

6.1 Bakteri Nodul Akar

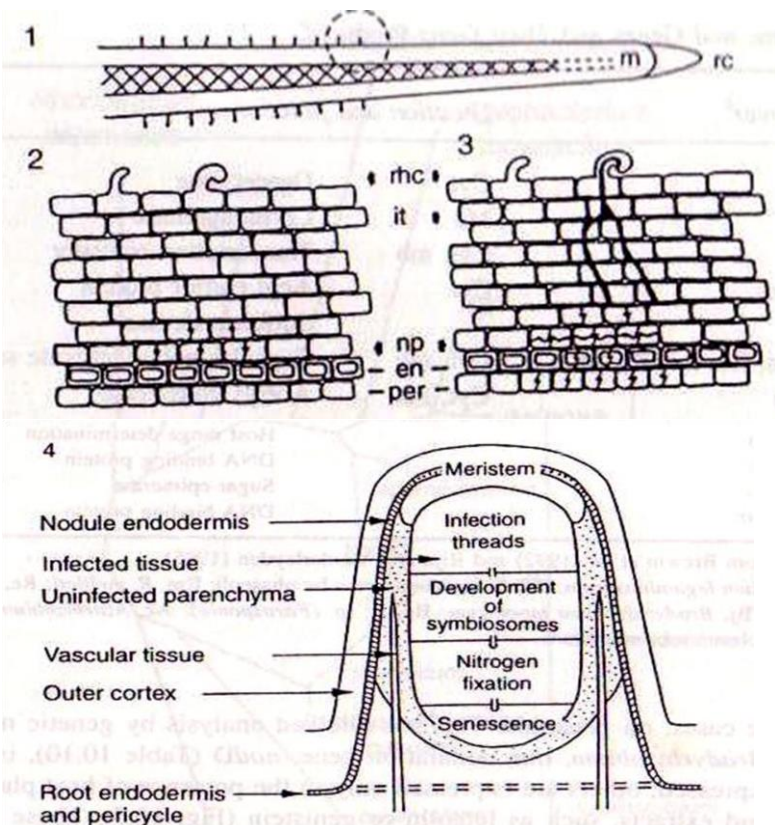
Banyak spesies dan strain bakteri nodul akar pada berbagai tanaman polong-polongan, di antaranya adalah yang biasa bersimbiosis dengan akar kedele yaitu dari genus *Rhizobium* dan *Bradyrhizobium* (Paul dan Clark, 1996).

Nodulasi akar oleh bakteri bintil akar diilustrasikan seperti pada Gambar 10 dengan tahapan:

1. Terbentuknya zone infeksi (tanda lingkaran) pada bulu-bulu akar yang tumbuh pada bagian yang mengarah ke meristem ujung (m) dan tudung akar (root cap (rc))
2. Potongan melintang korteks akar menunjukkan respons awal tanaman untuk mendifusi (menyerap) molekul sinyal dari rhizobia, kemudian rambut akar melingkar (rhc), dan menginduksi penebalan sel kortikal menghasilkan primordium nodul (np) di

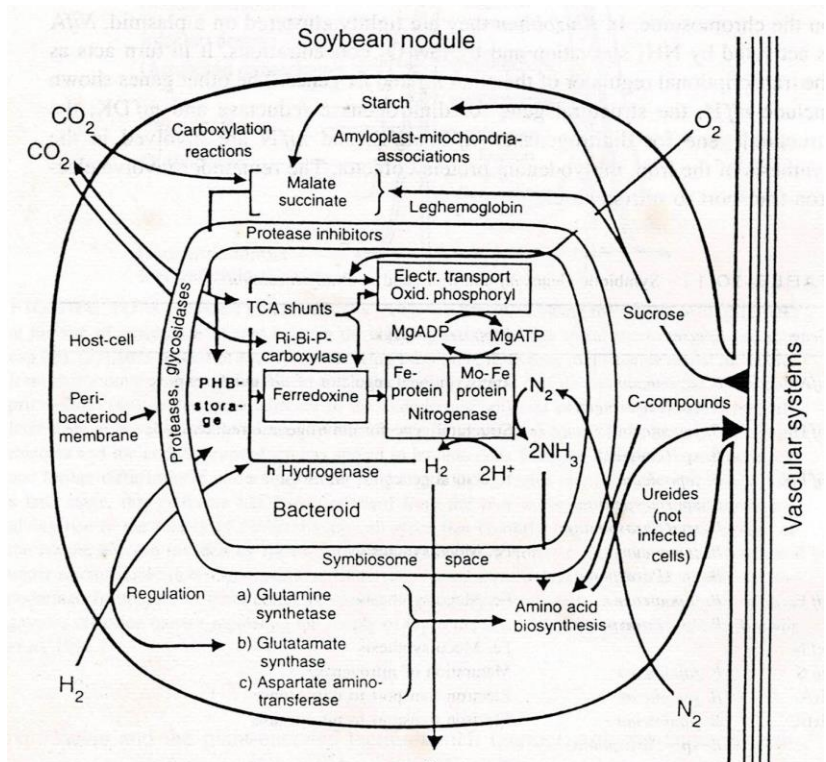
dalam jaringan ke arah endodermis dan perisikel (per)

3. Tahap perkembangan berikutnya adalah tumbuhnya benang-benang infeksi (it = infection threads) sebagai saluran trans-selular yang mengandung rhizobia dan promordium nodul (np) menyebar hingga meliputi endodermis dan perisikel yang kemudian mengalami diferensiasi ke daerah meristem;
4. Pada tahap akhir, meristem tumbuh ke arah luar (menjauh) dari meristem apikal yang tidak terinfeksi. Pusat nodul dipenuhi oleh sel-sel rhizobia yang kemudian mengalami diferensiasi menjadi jaringan untuk fiksasi nitrogen yang berfungsi pada kondisi mikroaerobik (O_2 rendah).



Gambar 10. Tahapan proses nodulasi akar oleh bakteri bintil akar; meliputi: terbentuknya zone infeksi (1), respons awal rambut akar (2), tumbuhnya benang-benang infeksi (3), dan terbentuknya jaringan untuk fiksasi nitrogen (Paul dan Clark, 1996)

Reaksi-reakasi yang berlangsung di dalam nodul akar selama proses fiksasi nitrogen diperlihatkan pada Gambar 11. Dari reaksi tersebut tampak gas N_2 yang berasal dari udara masuk melalui pori-pori tanah kemudian menembus membran sel dan setelah melalui proses yang kompleks dan membutuhkan gas O_2 pada akhirnya akan dihasilkan uride yang akan dikirim ke jaringan tanaman; imbal baliknya bakteri memperoleh gula sebagai sumber energi dari tanaman.



Gambar 11. Diagram reaksi yang terjadi pada nodul akar selama fiksasi N (Paul dan Clark, 1996)

Seperti halnya fungi *Trichoderma* dan endomikoriza, bakteri nodul akar berperan dalam meningkatkan kesuburan tanah, menghasilkan hormon tumbuhan (Altieri dan Nicholls, 2005). Bakteri nodul akar berperan penting dalam siklus N di alam yaitu dalam bentuk fiksasi nitrogen dari udara dan mengubahnya menjadi bentuk yang diperlukan bagi tanaman dan (Foyer dan Noctor, 2004). Simbiosis mutualistik di dalam tanah yang ditunjukkan oleh bakteri *Rhizobium* dengan tanaman kedelai (*Glycine max* L. Merr.) merupakan bagian dalam peranannya mendaur hara nitrogen (Sullivan, 2003).

Kelimpahan substrat yang dikeluarkan tanaman dalam bentuk berbagai metabolit, hormon, dan enzim-enzim perombak senyawa organik sangat diperlukan bagi berbagai mikroba tanah di daerah rizosfer (Singh *et al.*, 2008). Di antara banyak ragam senyawa ekstraselular yang dihasilkan tanaman di rhosfer, di antaranya merupakan senyawa yang bersifat sebagai sinyal atau *inducer* yang dikenal bakteri dan jenis-jenis senyawa tersebut akan menentukan kecocokan dengan bakteri pasangan simbiosis tanaman (Werner dan Newton, 2005; Singh *et al.*, 2008).

Mengingat ketergantungan kebutuhan N tanaman polong-polongan 50% dari tanah (Paul dan Clark, 1996), maka sumbangan N lewat simbiosisnya sangatlah penting. Untuk itu penelitian pemanfaatan bakteri nodul akar sebagai *biofertilizer* telah lama dilakukan para ahli dan sudah terbukti manfaat aplikasi *biofertilizer* bakteri nodul akar dalam memperbaiki kesuburan tanah, meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman, serta menekan pertumbuhan patogen (Altieri dan Nicholls, 2005; Purwaningsih, 2005), bahkan dapat meningkatkan produksi kedelai sebesar 25-30% di lahan masam Sumatera (Noortasiah, 2005).

Spesies dari *Rhizobium* yang dikenal saat ini di antaranya: *R. meliloti*, *R. leguminosarum*, dan *R. fredii*. Spesies lain bakteri nodul akar dari genus *Bradyrhizobium* dengan spesies yang terkenal pada kedelai yaitu *B. Japonicum*.

6.2 Bakteri Efektif lain

Agen Biokontrol

Berbagai bakteri telah diketahui memiliki kemampuan sebagai agen biokontrol di mana pemanfaatannya untuk menekan dan/atau mengendalikan organisme lain yang bersifat sebagai parasit atau hama secara agronomis atau merusak lingkungan. Dengan demikian bakteri yang memiliki kemampuan sebagai agen biokontrol dapat mendukung kesehatan dan produktivitas tanaman.

Mekanisme biokontrol yang dilakukan oleh bakteri adalah meliputi:

- (i) Antagonisme, yaitu menekan organisme target dengan antibiotik, enzim, biosida;
- (ii) Kompetisi, yaitu menekan dengan cara mengurangi ketersediaan sumberdaya bagi organisme target
- (iii) Eksploitasi, yaitu menekan dengan memparasit atau mempredasi organisme target

Beberapa jenis bakteri yang sudah yang sudah dikomersialisasikan sebagai agen biokontrol adalah:

- (i) *Pseudomonas fluorescens* digunakan untuk pengendalian rebah kecambah (*damping off*) pada kapas;
- (ii) *Streptomyces*, untuk mengendalikan busuk fungi pada gandum dan kapas;
- (iii) *Bacillus thuringiensis* untuk membunuh berbagai larva serangga pada berbagai tanaman;

- (iv) *Bacillus popilliae* untuk mengendalikan kumbang Jepang;
- (v) *Xanthomonas* spp. untuk mengendalikan gulma rumput biru.

Agen Biofertilizer dan Bakateri efektif lain

Beberapa bakteri terutama dari kelompok Rhizobacteria dapat berperan sebagai biokontrol tetapi melalui mekanisme pendukung pertumbuhan tanaman atau *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) sehingga akan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap organisme pengganggu, Varian *P. fluorescens* dan *Bacillus subtilis* sudah ada yang dikomersilkan sebagai PGPR seperti gandum, kapas, dan kacang-kacangan.

Beberapa bakteri yang memiliki karakteristik sebagai pengoksidasi nitrogen berpotensi dikembangkan sebagai bakteri efektif yang dapat diarahkan sebagai biofertilizer.

Berdasarkan reaksi yang bisa dilansungkannya, maka bakteri pengoksidasi nitrogen ini dikelompokkan menjadi:

- i) Pengoksidasi NH_4^+ menjadi NO_2^- yaitu *Nitrosomonas europaeae*, *N. briensi*, *N. nitrosus*, *N. oceanus*, dan *N. mobilis*;
- ii) Pengoksidasi NO_2^- menjadi NO_3^- yaitu *Nitrobacter vulgaris*, *N. hamburgensis*, *N. mobilis*, *N. gracilis*, dan *N. marina*.

Bakteri peroksidasi dalam hal tertentu mungkin tidak diperlukan karena akan mengubah NH_4^+ yang mestinya

banyak dipertukarkan oleh tanaman menjadi dalam bentuk lain yang tidak bisa diserap tanaman.

Beberapa bakteri justru akan meningkatkan ketersediaan NH_4^+ di dalam tanah dengan meningkatkan populasinya; genus-genus bakteri ini di antaranya adalah dari kelompok: (i) organotrops, seperti genus *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, dan *Flavobacterium*, (ii) chemolitotrops seperti *Thiobacillus* dan *Nitrosomonas*, (iii) diazotrops seperti *Rhizobium*, *Azospirillum*, dan *Rhodopseudomonas*.

PERTANYAAN

1. Jelaskan tahap dalam nodulasi akar dan fiksasi nitrogen?
2. Jelaskan secara diagramatis reaksi-reaksi yang terjadi dalam nodul akar selama fiksasi nitrogen?
3. Mengapa porositas tanah menjaid sangat penting dalam upaya menjamin keberlangsungan fiksasi N oleh bakteri nodulakar? Jelaskan!
4. Jelaskan mekanisme biokontrol yang dialkukan oleh bakteri tertentu?

5. Sebutkan dan berikan contoh genus dari tiap-tiap kelompok bakteri yang dapat meningkatkan ketersediaan NH_4^+ ?

BAB 7

APLIKASI BIOTEKNOLOGI TANAH

7.1 Prinsip Bioteknologi Tanah

Aplikasi bioteknologi haruslah mengacu pada upaya untuk mengkonservasi daya dukung lingkungan bagi produksi tanaman yang optimal secara berkelanjutan.

Bioteknologi di bidang pertanian oleh sebagian kalangan dianggap sesuatu yang mengkhawatirkan akan berdampak negatif bagi keseimbangan makhluk hidup. Begitu juga dengan bioteknologi tanah dan aplikasinya.

Bioteknologi tanah juga harus mempertimbangkan perlindungan dan konservasi terhadap kesuburan tanah dan plasma nutfah bahkan keanekaragaman hayati baik di dalam maupun di permukaan tanah. Aplikasi mikroba yang keliru dapat berdampak luas menimbulkan degradasi dan kelangkaan pada jenis-jenis mikroba tertentu yang sebelumnya berperan penting dalam ekosistemnya. Plasma nutfah nya menunjukkan pada varietas-varietas, strain-strain yang menjadi sumber bagi pelepasan varietas tetentu dan penciptaan varietas baru jika dimungkinkan.

Pengembangan dan aplikasi biteknologi tanah juga harus mempertimbangkan Etika lingkungan yaitu Standar dan penilaian moral dan penerapan konsep norma-norma dan nilai-nilai yang dapat digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Dalam hal ini produk bioteknologi baru tdak boleh menjadi ancaman bagi mikroba lain yang sudah ada dan mapan dalam suatu ekosistem termasuk agroekosistem sebagai eksositem buatan.

Beberap prinsip etika lingkungan hidup yang harus dipegang teguh adalah: (i) sikap hormat terhadap alam, bertanggung jawab, kasih sayang dan kepedulian terhadap alam, (ii) tidak melakukan aktivitas dan bersikap yang merugikan, (iii) hidup sederhana dan selaras dengan alam, berkeadilan dan demokratis, integritas moral.

Dalam perkebangannya bioteknologi tanah saat ini masih didominasi oleh produk yang bersifat konvensional dan sejauh ini belum dikonfirmasi adanya dampak negatif

dalam aplikasinya. Namun demikian para peneliti dan pengguna harus tetap waspada dan selalu mencatat setiap perubahan yang terjadi selama aplikasi bioteknologi tanah.

Tidak seperti pada aplikasi bahan kimia yang berpotensi berbahaya ketika diberikan pada lahan secara berlebihan atau di luar rekomendasi aplikasi, pada aplikasi produk bioteknologi tanah termasuk aplikasi biofertilizer relatif aman bagi kelestarian sumberdaya lahan.

Sebagai catatan penting yang harus diingat petani dan masyarakat pengguna terkait aplikasi biofertilizer adalah:

- (i) Kelebihan dosis aplikasi biofertilizer ini tidak akan berpengaruh negatif terhadap tanaman, dalam hal tanah yang “miskin hara” atau kurang subur, dosis dapat ditingkatkan dari rekomendasi disebutkan di atas;
- (ii) Dengan aplikasi biofertilizer atau *effective microorganisms* yang terkandung dalam pupuk organik dan biofertilizer, berarti petani dan masyarakat pengguna telah memperkaya biologi tanah lahan pertanian yang selanjutnya dapat membantu meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman;
- (iii) Dengan aplikasi biofertilizer atau *effective microorganisms*, maka petani dan masyarakat pengguna selain memperkaya biologi tanah juga mendorong proses pemulihan keberdayaan mikroba tanah yang membantu tanaman sekaligus menambah nutrisi bagi tanaman;

- (iv) Dengan aplikasi biofertilizer atau *effective microorganisms*, maka petani dan masyarakat pengguna juga telah mendorong perwujudan kesehatan tanah dan tanaman terlindungi dari berbagai ancaman patogen penyebab penyakit tanaman.

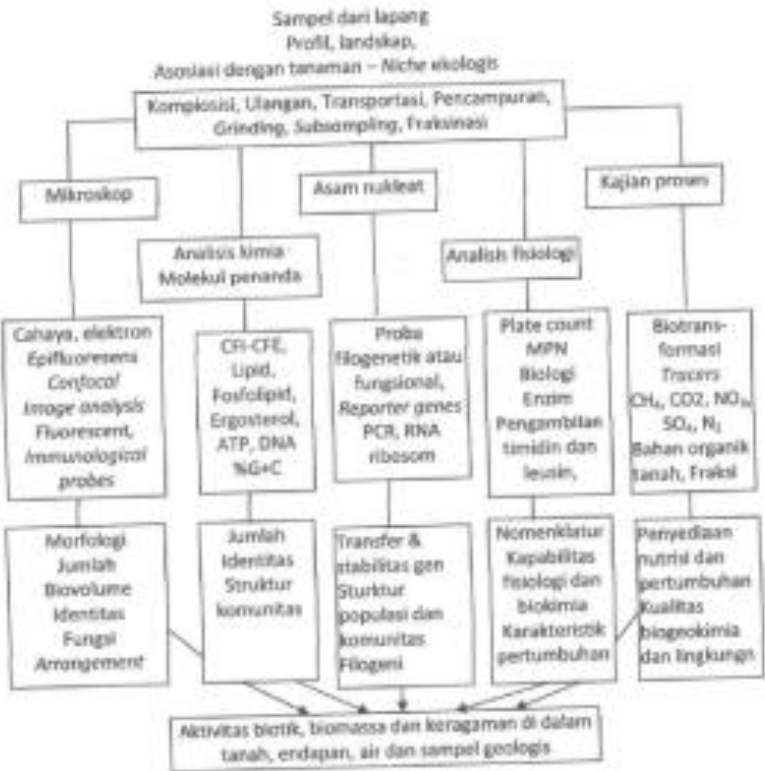
7.2 Isolasi dan Formulasi Agensia Hayati

Di dalam pengembangan bioteknologi berbasis aplikasi fungi tanah senantiasa didahului oleh serangan kegiatan yang bersifat mendeteksi dan menentukan keberadaan fungi tanah, keragaman dan aktivitas biomasnya. Sangat penting untuk memenuhi data atau catatan informasi lingkungan fisik tanah dan lahan di mana sampel yang akan diamati itu diambil. Beberapa informasi yang harus dikumpulkan minimal terdiri atas: topografi, bahan induk, tekstur dan struktur tanah, kelembaban dan suhu tanah, *bulk density*, curah hujan, tipe dan riwayat vegetasi, dan bahan organik tanah

Proses panjang kegiatan riset mulai dari pengumpulan data lingkungan dan pengambilan sampel tanah memerlukan berbagai langkah dan teknik tergantung tujuan yang ingin dicapai. Paul dan Clarck (1996) menggambarkan tahapan-tahapan metodologis atas proses menyeluruh penentuan aktivitas biomassa dan keragaman mikroba (Gambar 12).

Agensia Biofertilizer *Trichoderma*

Strain fungi diisolasi dari tanah (pertanian maupun buka lahan pertanian). Pengenceran tanah diikuti oleh penggunaan media PDA yang dimodifikasi yang terdiri atas filtrat dari rebusan kentang (200g), glukosa (20 g), Rose Bengal (0,035 g), agar (20 gr), chloramphenicol (0,3 g), streptomycin sulfat (0,03 gr), dan 50 % air laut (1 liter) dengan pH 6. Strain *Trichoderma* dimurnikan dengan melakukan pengkulturan kembali pada media PDAm hingga mencapai kemurniannya dan disimpan dalam gliserol 0% pada suhu -80°C di Pusat Koleksi Kultur Trichoderma di Universitas Jiao Tong Shanghai, RRC (Saravanakumar *et al.*, 2016).



Gambar 12. Tahapan-tahapan metodologis atas proses menyeluruh penentuan aktivitas biomassa dan keragaman mikroba

Media yang paling efisien untuk isolasi *Trichoderma* spp. dan *Gliocladium* spp. itu potato dextrose agar dimodifikasi dengan penambahan kloramfenikol, streptomisin dan naik bengal (Vargas Gil *et al.*, 2009).

Agensia Biofertilizer Mikoriza

Metode pengambilan spora AMF yang rangkum dari berbagai sumber oleh Garcia-González *et al.* (2016) meliputi

langkah-langkah sebagai berikut: (i) akar dan tanah dari masing-masing sampel dipisahkan; akar dicuci dengan air, dipotong berukuran 1-2 cm, dibersihkan dengan 10% KOH, diasamkan dengan diencerkan HCl, dan diwarnai dengan larutan trypan blue dalam lactoglycerol 0,05% untuk memperkirakan kolonisasi mikoriza pada akar yang diukur dengan menggunakan metode *grid-line intersect*; (ii) subsampel sampel (2 g) dicampur dengan air suling selama 30 detik; selanjutnya suspensi dituangkan melalui saringan 250- μm dan kemudian saringan 50- μm untuk memisahkan hifa; bahan dibersihkan lagi dalam air, dipindahkan ke gelas kimia, dikocok selama 60 detik dan didiamkan selama 10 menit. Hifa selanjutnya direndam dalam 20 ml *alikuot* tripan biru selama 12 jam, setelah itu ditiriskan di atas lembaran kertas Whatman; setelah itu hifa diamati di bawah mikroskop sekaligus menenentukan/mengukur panjang hifa, dan (iii) Spora fungi mikoriza arbuskula yang diisolasi dari sampel tanah dengan cara penyaringan basah dan *decanting*, kemudian dicampur dengan larutan sukrosa untuk selanjutnya dilakukan sentrifugasi; jumlah spora fungi mikoriza arbuskula per gram tanah dihitung di bawah pengamatan dengan mikroskop.

Agensia Biofertiliser Bakteri

Bakteri *Rhizobium* sesungguhnya adalah organisme heterotrof yang sumber energinya berasal dari oksidasi senyawa-senyawa organik seperti sukrose dan glucose yang dalam sistem simbiosis diperoleh dari tanaman inangnya (Foyer dan Noctor, 2004; Werner dan Newton, 2005; Dakora

et al., 2008; Lichtfouse, 2010). Untuk itu pemberian sumber nutrisi selain N bagi tanaman sangat diperlukan. Pemberian pupuk organik sangat membantu penyediaan nutrisi di samping pupuk anorganik.

Nitrogen menjadi salah satu sentral bagi berbagai kasus kekurangan N pada tanaman legum meskipun kandungan N dalam ruang udara tanah sangat tinggi yaitu dibandingkan gas yang lain yaitu sekitar 80% namun dalam kondisi tidak dapat dimanfaatkan langsung oleh tanaman (Dakora *et al.*, 2008). Ketersediaan gas N₂ menjadi penting bagi keberlangsungan proses yang optimal dalam nodul akar. Menciptakan pori tanah yang menjamin kelancaran pertukaran gas akan menjadi syarat dalam aplikasi agensia biofertilizer khususnya bakteri nodul akar.

Mengingat oksigen juga mutlak diperlukan selama proses fiksasi N, maka tanah yang gembur akan menjamin pertukaran gas dan ketersediaan oksigen di sekitar perakaran.

7.3 Aplikasi Bioteknologi Tanah

Cara aplikasi pupuk hayati (*Biofertilizer*) *Trichoderma* dengan beberapa cara:

- (i) Campurkan biofertilizer sebanyak 200-500 gram ke lapisan atas tanah pertanaman tiap 10 m² luasan lahan pertanian yang diberikan saat olah tanah;
- (ii) Biofertilizer dapat juga diberikan ke dalam lubang tanam tanaman palawija dengan dosis 50-100 gr

per lubang tanam; untuk tanaman keras dapat diberikan 100-250 gr per lubang tanaman; Untuk tanaman pangan/palawija/sayuran pemberian cukup sekali saat atau sebelum tanam;

- (iii) Biofertilizer dapat diberikan sebagai pemupukan dalam proses pemeliharaan tanaman (untuk tanaman keras/perkebunan_ tiap enam bulan yang ditempatkan dalam larikan sekeliling permukaan perakaran dengan dosis 100-300 gr pertanaman.

Pada berbagai pengembangan teknik aplikasi biofertilizer dan berbagai percobaan aplikasinya, *Trichoderma* diformulasi bersamaan dengan produk lainnya atau aplikasinya bersama-sama meski merupakan produk yang terpisah; selanjutnya efek aplikasi agent biofertilizer ini diamati yaitu meliputi penampilan, pertumbuhan, dan produksi tanaman. Integrasi *T. harzianum* (106 spora/ml/10 g biji) dan carboxin (2 g biji kg⁻¹) untuk perlakuan benih mampu meningkatkan perkecambahan biji sampai 12,0-14,0% dan meningkatkan gabah hasil panen dengan 42,6-72,9% sekaligus mengurangi kejadian layu (44,1-60,3%) selama eksperimentasi (Dubey *et al.*, 2007).

Inokulasi bersama dengan mikroba lain telah diteliti dan dikembangkan oleh banyak pihak. *Trichoderma viride* yang disandingkan dengan *Pseudomonas fluorescens* mampu meningkatkan persentase perkecambahan benih, pemanjangan akar, panjang tunas, bobot segar, bobott kering, dan indeks vigor tanaman kapas dengan dan tanpa patogen *Rhizoctonia solani* dan *Macrophomina phaseolina*

jika dibandingkan dengan kontrol (Shanmugaiah *et al.*, 2009).

Inokulasi mikrob satu genus berbeda spesies juga banyak dicobakan untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman. Campuran jamur mikoriza arbuskula yang terdiri *Glomus mosseae*, *G. intraradices*, *G. clarum*, *Gigaspora gigantean*, dan *G. margarita* dalam bentuk suspensi spora (10^6 Unit l^{-1} konsentrasi) digunakan pada pengenceran dari $5\text{ ml } l^{-1}$ air, mampu meningkatkan kandungan senyawa fenolik dan aktivitas enzim pertahanan seperti fenilalanin ammonialyase, polifenol oksidase dan enzim peroksidase (Al Askar dan Rashad, 2010).

Formulasi agent biofertilizer ini sudah banyak dilakukan oleh para peneliti; salah satunya adalah yang dikembangkan oleh Hu *et al.* (2016) yaitu isolat *Trichoderma* Tri-1 yang diformulasi dalam 50% bungkil biji kanola (Wuhan Zhongyou Kangni Technology Co., Ltd., Wuhan), 20% jerami padi, and 30% water (w/w/v).

Pengujian kemampuan *Trichoderma* sebagai agen biofertilizer biasanya berdekatan dengan pengamatan perannya sebagai agen biokontrol. Kedua fungsi *Trichoderma* pada tanaman dapat menjelaskan hubungan timbal balik di antara efek penekanan terhadap patogen dan efek yang mendorong pertumbuhan tanaman dan munculnya ketahanan tanaman terhadap serangan patogen. Kekurangan nutrisi dan pertumbuhan tanaman yang buruk sudah tentu akan menurunkan ketahanan tanaman terhadap serangan patogen. Pada penelitian yang

dilakukan Sutarman (2016) ditunjukkan bahwa pertumbuhan yang baik selalu ditunjukkan oleh rerata indeks penyakit yang lebih kecil. Dengan memodifikasi cara menentukan perlakuan terbaik yang biasa dilakukan oleh De Garmo *et al.* (1984) dalam hal ini total kuantifikasi dari pengujian daya hambat *Trichoderma* terhadap patogen hawar daun bibit pinus serta penginduksian ketahanan tanaman sebagai fungsi *Trichoderma* sebagai agent biofertilizer yang berperan menyehatkan tanaman, maka diperoleh urutan isolat berdasarkan nilai kinerjanya. Metode *de Garmo* itu sendiri biasa digunakan dalam analisis statistika bidang ekonomi teknik. Namun demikian metode ini dapat diterapkan untuk menentukan perlakuan terbaik di mana peneliti berkewenangan menentukan bobot parameter dengan didasarkan dengan nilai ekonomi dampak kinerja mikroba baik yang menguntungkan maupun merugikan.

Teknologi aplikasi mikoriza semakin berkembang sejalan dengan perkembangan cabang ilmu tanaman lainnya yang juga masuk dalam kelompok bioteknologi pertanian. Riset yang menggabungkan teknologi aplikasi mikoriza dan kultur jaringan menuntut pengembangan metode dalam kegiatan percobaannya. Pada percobaan yang dilakukan Voets *et al.* (2005) dapat dicermati metode inokulasi mikoriza pada plantet kentang hasil kultur *in vitro*.

Jenis tanaman mempengaruhi komunitas dan sifat fungsional mikroba tanah yang berkembang di sekitarnya..

Percobaan rumah kaca dilakukan oleh Legaya *et al.* (2016) untuk menilai pengaruh tiga spesies tanaman (*Dactylis glomerata* (L.), *Bromus erectus* (Hudson) dan *Festuca paniculata* (Schinz dan Tellung)) terhadap kolonisasi fungi mikoriza, nitrifikasi bakteri potensial, dan aktivitas denitrifikasi melalui kerja fungsional sistem simbiosis sehubungan dengan pengambilan dan *turn over* nitrogen; ketiga tanaman ditumbuhkan pada tanah padang rumput dengan dan tanpa pemupukan N.

Pemanfaatan mikoriza banyak dilakukan dengan tujuan meningkatkan ketahanan komunitas tumbuhan terhadap tekanan lingkungan, termasuk kekurangan gizi, kekeringan, dan gangguan tanah lainnya. Diharapkan aktivitas dan keragaman fungi mikoriza mempengaruhi tanaman komposisi, struktur, dan dinamika biota tanah. Berbagai penelitian yang mengkaji terkait hal itu adalah seperti yang dilakukan Barea *et al.* (2011) yakni berfokus pada: (i) menganalisis keragaman jamur mikoriza; (ii) menilai interaksi ekologis dan fungsional antara komunitas tanaman dan populasi mikoriza jamur yang terkait; dan (iii) menggunakan teknologi inokulasi mikoriza untuk pemulihan daerah semi-kering terdegradasi.

PERTANYAAN

1. Jelaskan prinsip-prinsip dalam pengembangan dan aplikasi bioteknologi tanah?

2. Sebut dan jelaskan etika lingkungan yang harus dipegang dalam pengembangan dan aplikasi bioteknologi tanah?
3. Adakah dampak negatif kelebihan dosis dalam aplikasi biofertilizer? Jelaskan jawabannya!
4. Jelaskan secara singkat teknik formulasi biofertilizer !
5. Jelaskan cara-cara aplikasi biofertilizer?

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, Vilchêze C., Baughn AD, Moodley P, Jacobs WR Jr. & Kobayashia M. 2010. Trichodermins, 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.
- Shanmugaiyah V, Balasubramanian N, Gomathinayagam S, Monoharan PT & Rajendran A. 2009. Effect of single application of *Trichoderma viride* and *Pseudomonas*

fluorences 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 mycorrhizal 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 ectomychorryzal *Pisolithus arrhizus* and *Schleroderma 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.

ISBN 978-602-5914-96-6



9 786025 914966