

Pemanfaatan Mikroba Penyubur Tanah sebagai Komponen Teknologi Pertanian

Rasti Saraswati¹ dan Sumarno²

Ringkasan

Pemakaian pupuk sintetis yang makin meningkat setiap tahun mengindikasikan terjadinya penurunan efisiensi pemupukan. Berbagai teknik pemupukan dikembangkan untuk mengurangi kehilangan N, namun efisiensi penggunaan pupuk N belum optimal. Efisiensi pemupukan dapat ditingkatkan dengan menggunakan mikroba fiksasi N₂, pelarut hara P dan K, dan pemacu pertumbuhan tanaman. Penggunaan mikroba penyubur tanah dapat menyediakan hara bagi tanaman, melindungi akar dari gangguan hama dan penyakit, menyediakan metabolit pengatur tumbuh dan menstimulasi sistem perakaran agar berkembang sempurna. Teknologi mikroba penyubur tanah yang dikenal sebagai pupuk hayati (pupuk mikroba) merupakan produk biologi aktif yang terdiri atas mikroba penyubur tanah untuk meningkatkan efisiensi pemupukan, kesuburan, dan kesehatan tanah. Dari aspek kemajuan teknologi, pemanfaatan mikroba sebagai pupuk hayati di Indonesia belum sepenuhnya berkembang, terutama karena belum adanya standar dan sistem pengawasan mutu pupuk hayati yang beredar di pasaran. Agar pemanfaatan pupuk hayati berdampak terhadap peningkatan pendapatan petani, maka teknologi pupuk hayati yang dimanfaatkan harus sudah matang, teruji dengan tingkat efisiensi tinggi dan memenuhi baku mutu. Beberapa hal penting yang perlu diperhatikan dalam pengembangan pupuk hayati adalah: (1) pupuk hayati merupakan makhluk hidup yang perlu dipelihara dan memerlukan penanganan yang khusus agar tetap hidup sebelum diaplikasikan dan dapat berkembang di dalam tanah setelah inokulasi, (2) cara pengiriman pupuk hayati kepada pengguna (petani) dan cara penyimpanannya agar mikroba yang dikandungnya tetap hidup. Oleh karena itu, dalam pemanfaatannya diperlukan penyuluhan agar pemanfaatan pupuk hayati berdampak terhadap peningkatan produksi dan pendapatan usahatani. Penggunaan pupuk hayati diharapkan dapat mendukung program kelestarian lahan dan penyelamatan ekosistem. Pemahaman proses dan strategi pemanfaatan pupuk hayati untuk memperbaiki kualitas tanah, dan memelihara keanekaragaman hayati akan menunjang keberlanjutan produktivitas lahan pertanian.

¹ Ahli Peneliti Utama pada Balai Penelitian Tanah

² Profesor Riset pada Puslitbang Tanaman Pangan

Populasi mikroba tanah yang terdiri atas alga biru-hijau, fitoplankton, bakteri, cendawan, dan aktinomiset pada permukaan dan lapisan olah tanah mencapai puluhan juta setiap gram tanah, yang merupakan bagian integral dan pembentuk kesuburan tanah pertanian. Proses daur ulang secara alamiah di permukaan dan lapisan olah tanah yang sangat penting bagi kegiatan pertanian tidak terjadi tanpa aktivitas mikroba. Manfaat mikroba dalam usaha pertanian belum disadari sepenuhnya, bahkan sering diposisikan sebagai komponen habitat yang merugikan, karena pandangan umum terhadap mikroba lebih terfokus secara selektif pada mikroba patogen yang menimbulkan penyakit pada tanaman. Padahal sebagian besar spesies mikroba merupakan mikroflora yang bermanfaat, kecuali beberapa jenis spesifik yang dapat menyebabkan penyakit bagi tanaman. Pada lahan sawah yang tergenang air terdapat lebih dari 20 jenis bakteri fiksasi N_2 dari udara yang hidup secara bebas (Watanabe 1978). Mikroba lain berfungsi sebagai perombak bahan organik (dekomposer), nitrifikasi, denitrifikasi, pelarut fosfat, dan lain-lain.

Cara pandang positif terhadap mikroba akan membangkitkan minat berpikir tentang potensi mikroba yang belum banyak diketahui. Baru sebagian kecil dari ribuan spesies mikroba yang telah diketahui memiliki manfaat bagi usaha pertanian, seperti bakteri fiksasi N_2 udara pada tanaman kacang-kacangan, bakteri dan cendawan pelarut fosfat, bakteri dan cendawan perombak bahan organik, serta bakteri, cendawan, dan virus sebagai agensia hayati. Masih banyak lagi mikroba yang belum teridentifikasi dan diketahui manfaatnya. Saraswati *et al.* (2004) secara umum menggolongkan fungsi mikroba menjadi empat, yaitu (1) meningkatkan ketersediaan unsur hara tanaman dalam tanah, (2) sebagai perombak bahan organik dalam tanah dan mineralisasi unsur organik, (3) bakteri rizosfer-endofitik untuk memacu pertumbuhan tanaman dengan membentuk enzim dan melindungi akar dari mikroba patogenik, (4) sebagai agensia hayati pengendali hama dan penyakit tanaman. Berbagai reaksi kimia dalam tanah juga terjadi atas bantuan mikroba tanah (Yoshida 1978).

Banyak bukti empiris teknologi modern yang memanfaatkan mikroba, seperti pada proses fermentasi substrat untuk menghasikan anggur, bir, dan alkohol, serta pembuatan antibiotik, dan enzim. Pemanfaatan mikroba dalam usaha pertanian masih tertinggal dibandingkan dengan bidang industri biokimia. Namun, disadari atau tidak, mikroba telah banyak berperan dalam sistem usaha pertanian. Proses dekomposisi dan mineralisasi hara yang berasal dari bahan organik dalam tanah dan fiksasi nitrogen oleh rhizobia merupakan kegiatan mikroba tanah yang berperan penting dalam meningkatkan kesuburan tanah. Di samping itu, mikroba sebagai perantara dalam reaksi kimia dan proses fisik secara metabolik di atas permukaan dan dalam tanah dapat mengurangi dampak negatif kontaminasi logam berat. Proses penyehatan tanah dari kontaminasi bahan-bahan kimia secara biologi dapat

mengubah senyawa kimia kompleks atau sederhana menjadi bentuk yang tidak berbahaya. Pemanfaatan bakteri pengakumulasi logam berat di tanah sawah tercemar limbah industri dapat meningkatkan kualitas beras karena jumlah logam berat yang terserap tanaman padi menurun.

Pemanfaatan teknologi mikroba di bidang pertanian dapat meningkatkan fungsi mikroba indigenous (asli alamiah), dalam berbagai sistem produksi tanaman, baik secara langsung maupun tidak langsung. Makalah ini membahas pemanfaatan mikroba sebagai komponen teknologi pertanian.

Konsep Pertanian Ramah Lingkungan

Pertanian ramah lingkungan secara umum diartikan sebagai usaha pertanian yang bertujuan untuk memperoleh produksi optimal tanpa merusak lingkungan, baik secara fisik, kimia, biologi, maupun ekologi. Aspek keberlanjutan sistem produksi merupakan salah satu ciri pertanian ramah lingkungan. Kriteria pertanian ramah lingkungan adalah (1) terpeliharanya keanekaragaman hayati dan keseimbangan ekologis biota pada permukaan dan lapisan olah tanah, (2) terpeliharanya kualitas sumber daya pertanian dari segi fisik, hidrologis, kimiawi, dan biologi mikrobial, (3) bebas cemaran residu kimia, limbah organik, dan anorganik yang berbahaya atau mengganggu proses hidup tanaman, (4) terlestariannya keanekaragaman genetik tanaman budi daya, (5) tidak terjadi akumulasi senyawa beracun dan logam berat yang membahayakan atau melebihi batas ambang aman, (6) terdapat keseimbangan ekologis antara hama penyakit dengan musuh-musuh alami, (7) produktivitas lahan stabil dan berkelanjutan, dan (8) produksi hasil panen bermutu tinggi dan aman sebagai pangan atau pakan (Sumarno *et al.* 2007).

Atas dasar kriteria tersebut, pertanian ramah lingkungan dapat didefinisikan sebagai: Pertanian yang menerapkan teknologi serasi dengan kelestarian lingkungan, ditujukan untuk optimalisasi pemanfaatan sumber daya pertanian, guna memperoleh hasil panen optimal yang aman dan berkelanjutan.

Mikroba berguna (*effective microorganism*) sebagai komponen habitat alam mempunyai peran dan fungsi penting dalam mendukung terlaksananya pertanian ramah lingkungan melalui berbagai proses, seperti dekomposisi bahan organik, mineralisasi senyawa organik, fiksasi hara, pelarut hara, nitrifikasi dan denitrifikasi. Dalam aliran "pertanian input organik", mikroba diposisikan sebagai produsen hara, tanah dianggap sebagai media biosintesis, dan hasil kerja mikroba dianggap sebagai pensuplai utama kebutuhan hara bagi tanaman. Di Amerika Serikat, mikroba tanah dipandang sangat penting, sehingga menjadi salah satu indikator dalam menentukan indeks kualitas tanah (Karlen *et al.* 2006). Semakin tinggi populasi mikroba tanah semakin tinggi aktivitas biokimia dalam tanah dan semakin tinggi indeks kualitas tanah. Populasi mikroba tanah yang tidak bersifat patogenik juga dianggap sebagai salah satu indikator teknologi pertanian ramah lingkungan.

Jenis dan Fungsi Mikroba Penyubur Tanah

Berbagai jenis mikroba mempunyai fungsi dan keefektifan yang berbeda. Untuk meningkatkan keefektifan fungsinya, mikroba sebagai komponen teknologi pertanian disediakan dari strain murni terpilih, yang difungsikan sebagai inokulan. Metode aplikasi dan mutu inokulan merupakan faktor yang sangat menentukan, sehingga upaya mengatasi keragaman keefektifan, mutu inokulan mikroba harus distandardisasi (Zdor & Pueppke 1988, 1990). Teknologi produksi inokulan yang kurang aseptik dapat mempengaruhi keefektifan produk, yang akan mengakibatkan rendahnya kualitas inokulan.

Produk biologi aktif yang terdiri atas mikroba yang berfungsi meningkatkan efisiensi pemupukan, kesuburan, dan kesehatan tanah disebut sebagai pupuk hayati (pupuk mikroba). Pupuk hayati yang telah terstandardisasi merupakan alternatif sumber penyediaan hara tanaman yang aman lingkungan. Pemanfaatan pupuk hayati yang bermutu diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemupukan dan meningkatkan produksi tanaman, menghemat biaya pupuk, dan meningkatkan pendapatan petani. Semakin mahalnya pupuk anorganik dan pestisida serta semakin dipahaminya manfaat pupuk hayati dalam menjaga keseimbangan hara dan produktivitas tanah, maka penggunaan pupuk hayati dan agensia hayati diharapkan akan lebih meningkat pada tahun-tahun mendatang. Berikut ini dibahas enam kelompok mikroba bermanfaat sebagai komponen teknologi pertanian.

Bakteri Fiksasi Nitrogen

Berbagai jenis bakteri fiksasi N_2 secara hayati, antara lain terdiri atas rhizobia, sianobakter (ganggang hijau biru), bakteri foto-autotrofik pada air tergenang dan permukaan tanah, dan bakteri heterotrofik dalam tanah dan zona akar (Ladha and Reddy 1995, Boddey *et al.* 1995, Kyuma 2004). Bakteri tersebut mampu mengikat nitrogen dari udara, baik secara simbiosis (*root-nodulating bacteria*) maupun nonsimbiosis (*free-living nitrogen-fixing rhizobacteria*). Pemanfaatan bakteri fiksasi N_2 , baik yang diaplikasikan melalui tanah maupun disemprotkan pada tanaman, mampu meningkatkan efisiensi pemupukan N. Dalam upaya mencapai tujuan pertanian ramah lingkungan dan berkelanjutan, penggunaan bakteri fiksasi N_2 berpotensi mengurangi kebutuhan pupuk N sintetis, meningkatkan produksi dan pendapatan usahatani dengan masukan yang lebih murah.

Bakteri fiksasi N_2 yang hidup bebas pada daerah perakaran dan jaringan tanaman padi, seperti *Pseudomonas* spp., *Enterobacteriaceae*, *Bacillus*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, dan *Herbaspirillum* telah terbukti mampu melakukan fiksasi N_2 (James and Olivares 1997). Bakteri fiksasi N_2 pada rizosfer tanaman gramineae, seperti *Azotobacter paspali* dan *Beijerinckia* spp., termasuk salah satu dari kelompok bakteri aerobik yang mengkolonisasi permukaan akar (Baldani *et al.* 1997). Di samping itu, *Azotobacter* merupakan bakteri fiksasi

N_2 yang mampu menghasilkan substansi zat pemacu tumbuh giberelin, sitokinin, dan asam indol asetat, sehingga dapat memacu pertumbuhan akar (Alexander 1977). Populasi *Azotobacter* dalam tanah dipengaruhi oleh pemupukan dan jenis tanaman. Jenis bakteri dan ganggang biru pengikat N_2 yang hidup bebas pada lahan sawah disajikan pada Tabel 1.

Kelompok prokariotik fotosintetik, seperti sianobakter, mampu mempertahankan kesuburan ekosistem pada kondisi alami lahan pertanian melalui kemampuannya mengikat N_2 (Albrecht 1998). Demikian pula bakteri diazotrof endofitik yang hidup dalam jaringan tanaman, dapat mengeksploitasi substrat karbon yang disuplai oleh tanaman tanpa berkompetisi dengan mikroba lain. Bakteri ini berlokasi dalam jaringan akar atau berada pada jaringan yang kompak, seperti buku batang dan pembuluh xilem, (James *et al.* 2000). sehingga mampu tumbuh pada lingkungan dengan tekanan O_2 yang rendah yang sangat penting bagi aktivitas enzim nitrogenase (James and Olivers 1997). Beberapa bakteri diazotrof endofitik selain mampu mengikat N_2 juga mampu mensekresikan hormon pertumbuhan asam indol-3-asetat (Ladha *et al.* 1997), dan umumnya tidak menyebabkan penyakit pada tanaman.

Bakteri diazotrof endofitik, *Herbaspirillum*, yang diinokulasikan pada benih padi dalam larutan Hoagland yang mengandung ^{15}N -label dapat meningkatkan 40% total N tanaman. Infeksi *Herbaspirillum* spp pada biji tanaman padi terjadi melalui akar dan stomata, kemudian ditranslokasikan melalui xilem ke seluruh bagian tanaman (Olivares *et al.* 1996).

Bakteri fiksasi N_2 yang hidup bersimbiosis dengan tanaman kacang-kacangan (rhizobia) disebut juga sebagai bakteri bintil akar (*root nodulating bacteria*). Pemanfaatan rhizobia sebagai inokulan pupuk hayati dapat meningkatkan ketersediaan N bagi tanaman, yang dapat mendukung peningkatan produktivitas tanaman kacang-kacangan. Keefektivan inokulasi rhizobia dipengaruhi oleh kesesuaian inokulan rhizobia dengan jenis dan varietas tanaman dan jenis tanah yang diinokulasi, serta dipengaruhi oleh faktor kompetisi dengan rhizobia indigenus. Berdasarkan perkembangan ilmu taksonomi, rhizobium terdiri dari berbagai jenis sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Rhizobium yang dapat menodulasi tanaman kedelai secara efektif dikenal sebagai *Bradyrhizobium japonicum* (Jordan 1982), meskipun pada kenyataannya *B. japonicum* tidak selalu merupakan mikrosimbion tunggal untuk tanaman kedelai. Strain lain yang mampu menodulasi tanaman kedelai adalah *B. elkanii* (Kuykendall *et al.* 1992) dan *Bradyrhizobium liaoningense* (Xu *et al.* 1995). Kemampuan menodulasi tanaman kedelai dari *B. japonicum* lebih tinggi daripada *B. elkanii*.

Sinorhizobium fredii merupakan rhizobia tumbuh cepat yang dapat menodulasi tanaman kedelai dan secara *in vitro* bereaksi asam. Strain tersebut infeksiif dan efektif terhadap varietas kedelai primitif Peking (P117852.B), *Glycine*

Tabel 1. Berbagai jenis bakteri penambat N₂ yang hidup bebas (non simbiotik) pada tanah sawah.

Bacteria (Buchanan dan Gibbons 1974)	
1. Photosynthetic bacteria	Contoh Spesies
<i>Rhodospirillaceae</i>	<i>Rhodospirillum</i> , <i>Rhodopseudomonas</i> , <i>Rhodomicrobium</i>
<i>Chromatiaceae</i>	<i>Chromatium</i> , <i>Ectothiorhodospira</i> , <i>Triospirillum</i>
<i>Chlorobiaceae</i>	<i>Chlorobium</i> , <i>Chloropseudomonas</i>
2. Gram-negative aerobic bacteria	
<i>Azotobacteriaceae</i>	<i>Azotobacter</i> , <i>Azotomonas</i> , <i>Beijerinckia</i> , <i>Derxia</i>
<i>Pseudomonadeceae</i>	<i>Pseudomonas</i> (<i>P. azotogensis</i>)
3. Gram-negative facultative anaerobic bacteria	
<i>Enterobacteriaceae</i>	<i>Klebsiella</i> (<i>K. pneumoniae</i>), <i>Enterobacter</i> (<i>E. cloecae</i>), <i>Escherichia</i> (<i>E. intermedia</i>), <i>Flavobacterium</i> sp.
4. Gram-negative anaerobic bacteria	<i>Desulfovibrio</i> (<i>D. vulgaris</i> , <i>D. desulfuricans</i>)
5. Methane forming bacteria	
<i>Methanobacteriaceae</i>	<i>Methanobacterium</i> , <i>Methanobacillus</i>
6. Spore-forming bacteria	
<i>Bacillaceae</i>	<i>Bacillus</i> (<i>B. polymyxa</i> , <i>B. macerans</i> , <i>B. circulans</i>), <i>Clostridium</i> (<i>C. pasteurianum</i> , <i>C. butyricum</i>), <i>Desulfotomaculum</i> sp.
7. Bacteria analogous to Actinomycetes	
<i>Mycobacteriaceae</i>	<i>Mycobacterium</i> (<i>M. flavum</i>)
Ganggang hijau biru (Prescott 1970)	
1. Heterocyst-forming blue-green algae	Contoh Spesies
<i>Nostocaceae</i>	<i>Anabaena</i> , <i>Anabaenopsis</i> , <i>Aphnizomenon</i> , <i>Aulosira</i> , <i>Chlorogloopsis</i> , <i>Cylindrospermum</i> , <i>Nostoc</i>
<i>Stigonemataceae</i>	<i>Hapalosiphon</i> , <i>Mustigocladus</i> , <i>Stigonema</i>
<i>Scytonemataceae</i>	<i>Microchaete</i> , <i>Scytonema</i> , <i>Tolypotrix</i>
<i>Rivulariaceae</i>	<i>Calothrix</i>
2. Non-heterocyst-forming blue-green algae	
<i>Chloococcaceae</i>	<i>Anacystis</i> , <i>Aphanothece</i> , <i>Gloecapsa</i> , <i>Gloeothece</i> , <i>Microcystis</i>
<i>Eentophysalidaceae</i>	<i>Chlorogloea</i>
<i>Oscillatoriaceae</i>	<i>Lyngbya</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Phormidium</i> , <i>Trichodesmium</i>
<i>ScytonemataceAe</i>	<i>Plectonema</i>

Sumber: Kyoma 2004

Tabel 2. Perkembangan taksonomi rhizobia.

Perkembangan	Referensi
<ul style="list-style-type: none"> • Penamaan <i>Rhizobium leguminosarum</i> untuk semua bakteri bintil akar pada legum 	Frank 1889
<ul style="list-style-type: none"> • Enam spesies bakteri bintil akar pada legum, yaitu : <i>Rhizobium leguminosarum</i> (membentuk bintil pada <i>Lathyrus, Pisum, Vicia and Lens</i>), <i>R. trifolii</i> (membentuk bintil pada <i>Trifolium</i>), <i>R. phaseoli</i> (membentuk bintil pada <i>Phaseolus</i>), <i>R. meliloti</i> (membentuk bintil pada <i>Melilotus, Medicago, Trigonella</i>), <i>R. japonicum</i> (membentuk bintil pada kedele), <i>R. lupin</i> (membentuk bintil pada <i>Lupinus</i>) 	Fred <i>et al.</i> 1932
<ul style="list-style-type: none"> • Bakteri tumbuh cepat dimasukkan pada genus <i>Rhizobium</i> dan bakteri tumbuh lambat dimasukkan pada genus <i>Bradyrhizobium</i> 	Jordan 1982
<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan teknik molekuler untuk mengidentifikasi rhizobia; klasifikasi rhizobia menjadi 5 genus , yaitu <i>Rhizobium, Sinorhizobium, Mesorhizobium, Bradyrhizobium, Azorhizobium</i>, dan satu genus belum teridentifikasi 	Young and Haukka 1996
<ul style="list-style-type: none"> • Tambahkan satu genus baru pada klasifikasi yang ada, yaitu <i>Allorhizobium</i> 	De Lajudie <i>et al.</i> 1998

soja, namun sedikit atau tidak efektif terhadap varietas kedelai komersial yang tumbuh di USA. (Keyser *et al.* 1982, Scholla & Elkan 1984).

Bradyrhizobium dan *Sinorhizobium* dapat menyediakan seluruh kebutuhan N tanaman kedelai, sehingga memegang peranan penting dalam penghematan penggunaan pupuk N.

Mikroba Pelarut Fosfat

Alternatif untuk meningkatkan efisiensi pemupukan P dan untuk mengatasi rendahnya P tersedia atau kejenuhan P dalam tanah adalah dengan memanfaatkan kelompok mikroorganisme pelarut P sebagai pupuk hayati. Mikroorganisme pelarut P adalah mikroorganisme yang dapat melarutkan P sukar larut menjadi larut, baik yang berasal dari dalam tanah maupun dari pupuk, sehingga dapat diserap oleh tanaman.

Berbagai spesies mikroba pelarut P, antara lain *Pseudomonas, Microccus, Bacillus, Flavobacterium, Penicillium, Sclerotium, Fusarium*, dan *Aspergillus*, berpotensi tinggi dalam melarutkan P terikat menjadi P tersedia dalam tanah (Alexander 1977, Illmer and Schinner 1992, Goenadi *et al.* 1993, Goenadi dan Saraswati 1993). Mekanisme pelarutan P dari bahan yang sukar larut

terkait erat dengan aktivitas mikroba bersangkutan dalam menghasilkan enzim fosfatase dan fitase (Alexander 1977) dan asam-asam organik hasil metabolisme seperti asetat, propionat, glikolat, fumarat, oksalat, suksinat, dan tartrat (Banik and Dey 1982), sitrat, laktat, dan ketoglutarat (Illmer and Schinner 1992). Menurut Alexander (1977), mekanisme pelarutan P yang terikat dengan Fe (*ferric phosphate*) pada tanah sawah terjadi melalui peristiwa reduksi, sehingga Fe dan P menjadi tersedia bagi tanaman. Proses utama pelarutan senyawa fosfat-sukar larut karena adanya produksi asam organik dan sebagian asam anorganik oleh mikroba yang dapat berinteraksi dengan senyawa P-sukar larut dari kompleks Al-, Fe-, Mn-, dan Ca- (Basyaruddin 1982). Kemampuan cendawan melarutkan P lebih besar dibanding bakteri. Cendawan dapat melarutkan P hingga dua kali pada pH 4,6-2,9, dan bakteri sekitar 1,5 kali pada pH 6,5-5,1 (Goenadi dan Saraswati 1993)

Penggunaan mikroba pelarut P merupakan salah satu pemecahan masalah peningkatan efisiensi pemupukan P yang aman lingkungan, yang sekaligus dapat menghemat penggunaan pupuk P.

Mikoriza

Mikoriza berperan meningkatkan serapan P oleh akar tanaman. Mikoriza memiliki struktur hifa yang menjalar luas ke dalam tanah, melampaui jauh jarak yang dapat dicapai oleh rambut akar. Pada saat P berada di sekitar rambut akar, maka hifa membantu menyerap P di tempat-tempat yang tidak dapat lagi dijangkau rambut akar. Daerah akar bermikoriza tetap aktif dalam mengabsorpsi hara untuk jangka waktu yang lebih lama dibandingkan dengan akar yang tidak bermikoriza (Simanungkalit 2007).

Berbagai tanaman berbeda ketergantungannya terhadap mikoriza. Pada umumnya hubungan simbiosis antara tanaman dan fungi mikoriza tidak bersifat spesifik, tetapi memiliki spektrum yang luas. Sebagai contoh, 10 spesies cendawan mikoriza dapat mengkolonisasi dan efektif pada jagung dan kedelai (Simanungkalit 1997, Lukiwati dan Simanungkalit 1999). Tanaman dengan akar besar lebih tergantung pada mikoriza daripada tanaman dengan sistem akar yang memiliki rambut akar banyak dan panjang (Baylis 1970). Cendawan mikoriza dapat bersimbiosis dengan tanaman pangan, hortikultura, kehutanan, dan perkebunan.

Bakteri pereduksi sulfat

Degradasi bahan organik di lingkungan anerob dapat terjadi melalui proses reduksi sulfat (Sherman *et al.* 1998). Reduksi sulfat hampir mencapai 100% dari total emisi CO₂ dari sediment mangrove (Kristensen *et al.* 1991). Bakteri pereduksi sulfat yang terdiri atas genera *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfosarcina*, dan *Desulfococcus* mempunyai kemampuan memetabolisme senyawa sederhana, seperti laktat, asetat, propionat, butirat, dan benzoat.

Perkembangan populasi bakteri reduksi sulfat terhambat pada ketersediaan sulfat di ambang batas 2-10 μM per liter. Ketersediaan Fe dan P dalam sedimen mangrove bergantung pada aktivitas bakteri pereduksi sulfat (Sherman *et al.* 1998). Pada saat sulfat direduksi oleh bakteri pereduksi sulfat maka senyawa sulfur H_2S dan HS akan diproduksi dan bereaksi dengan Fe. Fe direduksi dari Fe(III) menjadi Fe(II), yang akan menghasilkan pirit (FeS_2) dan melepas P terlarut. Bakteri pereduksi sulfat merupakan perombak bahan organik utama dalam sedimen anaerob, dan berperan penting dalam mineralisasi sulfur organik dan produksi Fe dan P mudah larut.

Rizobakteri penghasil zat pemacu tumbuh

Beberapa spesies bakteri rizosfer (di sekitar perakaran) yang mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman sering disebut *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) atau Rhizobakteria Pemacu Pertumbuhan Tanaman (RPPT). RPPT terdiri atas genus *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Bacterium*, *Mycobacterium*, dan *Pseudomonas* (Tien *et al.* 1979, Kloepper *et al.* 1980, Kloepper 1983, Schroth & Weinhold 1986, Biswas *et al.* 2000).

Bakteri pemacu tumbuh secara langsung memproduksi fitohormon yang dapat menginduksi pertumbuhan. Peningkatan pertumbuhan tanaman dapat terjadi ketika suatu rizobakterium memproduksi metabolit yang berperan sebagai fitohormon yang secara langsung meningkatkan pertumbuhan tanaman (Tien *et al.* 1979, Schroth & Weinhold 1986, Zakharova *et al.* 1999, Maor *et al.* 2004). Metabolit yang dihasilkan selain berupa fitohormon, juga antibiotik, siderofor, sianida, dan sebagainya. Fitohormon atau hormon tumbuh yang diproduksi dapat berupa auksin, giberelin, sitokinin, etilen, dan asam absisat.

Bakteri pemacu tumbuh secara tidak langsung juga menghambat patogen melalui sintesis senyawa antibiotik, sebagai kontrol biologis. Beberapa jenis endofitik bersimbiosis mutualistik dengan tanaman inangnya dalam meningkatkan ketahanannya terhadap serangga hama melalui produksi toksin, di samping senyawa anti mikroba seperti fungi *Pestalotiopsis microspora*, dan *Taxus walkchiana* yang memproduksi taxol (zat antikanker) (Strobel *et al.* 1999). Miles *et al.* (1998) melaporkan bawa endofitik *Neotyphodium* sp. menghasilkan N-formilonine dan a paxiline (senyawa antiserangga hama).

Mikroba perombak bahan organik

Mikroorganisme perombak bahan organik merupakan aktivator biologis yang tumbuh alami atau sengaja diinokulasikan untuk mempercepat pengomposan dan meningkatkan mutu kompos. Jumlah dan jenis mikroorganisme turut menentukan keberhasilan proses dekomposisi atau pengomposan. Di dalam ekosistem, mikroorganisme perombak bahan organik memegang peranan

penting karena sisa organik yang telah mati diurai menjadi unsur-unsur yang dikembalikan ke dalam tanah dalam bentuk hara mineral N, P, K, Ca, Mg, dan atau dalam bentuk gas yang dilepas ke atmosfer berupa CH₄ atau CO₂. Dengan demikian terjadi siklus hara yang berjalan secara alamiah, dan proses kehidupan di muka bumi dapat berlangsung secara berkelanjutan.

Mikroba perombak bahan organik dalam waktu 10 tahun terakhir mulai banyak digunakan untuk mempercepat proses dekomposisi sisa-sisa tanaman yang banyak mengandung lignin dan selulosa untuk meningkatkan kandungan bahan organik dalam tanah. Di samping itu, penggunaannya dapat meningkatkan biomas dan aktivitas mikroba tanah, mengurangi penyakit, larva insek, biji gulma, dan volume bahan buangan, sehingga dapat meningkatkan kesuburan dan kesehatan tanah.

Pengertian umum mikroorganisme perombak bahan organik atau biodekomposer adalah mikroorganisme pengurai serat, lignin, dan senyawa organik yang mengandung nitrogen dan karbon dari bahan organik (sisa-sisa organik dari jaringan tumbuhan atau hewan yang telah mati). Mikroba perombak bahan organik terdiri atas *Trichoderma reesei*, *T. harzianum*, *T. koningii*, *Phanerochaeta cryosporium*, *Cellulomonas*, *Pseudomonas*, *Thermospora*, *Aspergillus niger*, *A. terreus*, *Penicillium*, dan *Streptomyces*. Fungi perombak bahan organik umumnya mempunyai kemampuan yang lebih baik dibanding bakteri dalam mengurai sisa-sisa tanaman (hemiselulosa, selulosa dan lignin). Umumnya mikroba yang mampu mendegradasi selulosa juga mampu mendegradasi hemiselulosa (Alexander 1977). Menurut Eriksson *et al.* (1989), kelompok fungi menunjukkan aktivitas biodekomposisi paling nyata, yang dapat segera menjadikan bahan organik tanah terurai menjadi senyawa organik sederhana, yang berfungsi sebagai penukar ion dasar yang menyimpan dan melepaskan hara di sekitar tanaman.

Beberapa enzim yang terlibat dalam perombakan bahan organik antara lain adalah β -glukosidase, lignin peroksidase (LiP), manganese peroksidase (MnP), dan lakase, selain kelompok enzim reduktase yang merupakan penggabungan dari LiP dan MnP, yaitu enzim versatile peroksidase. Enzim-enzim ini dihasilkan oleh *Pleurotus eryngii*, *P. ostreatus*, dan *Bjerkandera adusta* (Lankinen 2004). Selain mengurai bahan berkayu, sebagian besar fungi menghasilkan zat yang bersifat racun, sehingga dapat dipakai untuk menghambat pertumbuhan/perkembangan organisme pengganggu, seperti beberapa strain *T. harzianum* yang merupakan salah satu anggota Ascomycetes. Apabila kebutuhan karbon (C) tidak tercukupi, fungi tersebut akan menghasilkan racun yang dapat menggagalkan penetasan telur nematoda *Meloidogyn javanica* (penyebab bengkak akar), sedangkan bila kebutuhan C tercukupi akan bersifat parasit pada telur atau larva nematoda tersebut. Fungi Zygomycetes (Mucorales) sebagian besar berperan sebagai pengurai amylum, protein, lemak, dan hanya sebagian kecil yang mampu mengurai selulosa dan khitin.

Pemanfaatan mikroorganisme perombak bahan organik yang sesuai dengan substrat bahan organik dan kondisi tanah merupakan alternatif yang efektif untuk mempercepat dekomposisi bahan organik dan sekaligus sebagai suplementasi pemupukan. Proses perombakan bahan organik yang terjadi secara alami akan membutuhkan waktu relatif lama (2 bulan) sangat menghambat penggunaan bahan organik sebagai sumber hara. Apalagi jika dihadapkan kepada tenggang waktu masa tanam yang singkat, sehingga pembenaman bahan organik sering dianggap kurang praktis dan tidak efisien. Untuk mengatasi hal tersebut, perlu dilakukan inokulasi mikroba terpilih guna mempercepat proses perombakan bahan organik. Percepatan perombakan sisa hasil tanaman dapat meningkatkan kandungan bahan organik dan ketersediaan hara tanah, sehingga masa penyiapan lahan dapat lebih singkat dan mempercepat masa tanam berikutnya, yang berarti akan meningkatkan intensitas pertanaman. Inokulan perombak bahan organik telah tersedia secara komersial dengan berbagai nama, seperti EM-4, Starbio, M-Dec, Stardek, dan Orgadek.

Pemanfaatan Mikroba Penyubur Tanah sebagai Komponen Teknologi

Pemanfaatan mikroba penyubur tanah sesuai dengan kondisi tanah dan target peruntukannya merupakan alternatif untuk meningkatkan kesuburan tanah, efisiensi pemupukan, produktivitas tanaman, dan mengurangi bahaya pencemaran lingkungan.

Penggunaan mikroba penyubur tanah dapat memberikan berbagai manfaat, yaitu (1) menyediakan sumber hara bagi tanaman, (2) melindungi akar dari gangguan hama dan penyakit, (3) menstimulir sistem perakaran agar berkembang sempurna dan memperpanjang usia akar, (3) memacu mitosis jaringan meristem pada titik tumbuh pucuk, kuncup bunga, dan stolon, (4) sebagai penawar racun beberapa logam berat, (5) sebagai metabolit pengatur tumbuh, dan (6) sebagai bioaktivator.

Badan Litbang Pertanian pada tahun 1997 telah berhasil mengembangkan Pupuk Mikroba Multiguna (PMMg) (*biological nitrogen-phosphorus fertilizer*) yang merupakan perbaikan mutu inokulan rhizobium yang telah ada di pasaran. Pupuk mikroba ini mampu meningkatkan efisiensi pemupukan N dan P untuk tanaman kedelai melalui peningkatan efektivitas fiksasi N_2 simbiosis dan kemampuan melarutkan P, sehingga dapat menggantikan kebutuhan pupuk nitrogen 100% dan pupuk fosfat 50% dari dosis rekomendasi, dengan hasil meningkat 20-40% (Saraswati 1999, Simanungkalit and Saraswati 1999). Selanjutnya pada tahun 2007, diformulasikan nodulin yang merupakan pengembangan PMMg yang berfungsi memacu pembentukan bintil akar dan pertumbuhan tanaman serta memperlebat dan memperkuat perakaran tanaman, dan memacu aktivitas mikroba rizosfer dalam meningkatkan

ketersediaan hara N, P, dan K, sehingga meningkatkan efisiensi pemupukan. Produk mikroba bermanfaat ganda tersebut telah diperkenalkan kepada petani dan mulai diproduksi secara komersial. Beberapa contoh formulasi mikroba berguna dari Badan Litbang Pertanian adalah sebagai berikut:

Percepatan pengomposan dengan teknologi M-Dec

M-Dec merupakan pupuk hayati perombak bahan organik yang mengandung beberapa jenis cendawan perombak selulosa dan lignin, terpilih, asli Indonesia, bersifat multifungsi mempercepat perombakan bahan organik dan menekan penyakit tular tanah.

Pemberian M-Dec dapat mempercepat proses pengomposan (Tabel 3). Dalam waktu 12 hari, nisbah C/N jerami dapat mencapai 17, yang biasanya untuk mencapai nilai tersebut diperlukan waktu kurang lebih dua bulan. Tabel 4 menunjukkan sifat kimia kompos jerami yang dibuat dengan M-Dec.

Tabel 3. Pengaruh M-Dec terhadap penurunan nisbah C/N jerami.

Hari ke -	C/N
0	70
6	22
12	17
18	13
24	12

Sumber: Saraswati (2006).

Tabel 4. Pengaruh dekomposer M-Dec terhadap sifat kimia kompos jerami (Blora, Jawa Tengah 2006).

Parameter	Kandungan hara jerami		
	Kontrol	M-Dec	Urea + kapur
N-organik (%)	0,91	1,51	1,61
N-NH ₄ (%)	0,06	0,05	0,06
N-NO ₃ (%)	0,06	0,08	0,07
N-Total (%)	1,03	1,64	1,74
P ₂ O ₅ (%)	0,69	0,53	0,51
K ₂ O (%)	1,12	2,23	2,59
C-organik (%)	19,09	22,06	22,01
C/N	21	15	14
Kadar air (%)	9,22	10,14	9,46

Urea 1 kg/ton jerami dan kapur 2 kg/ton jerami dan M-Dec 1 kg/ton jerami

Sumber: Subikse (2006)

Tabel 5. Efektifitas perlakuan mikroba penyubur tanah di lahan kering masam, Ultisol Nagara Ratu, Lampung. MK 2005.

Perlakuan	Efektifitas perlakuan terhadap hasil gabah (%)
• 200 kg urea/ha, 250 kg SP36/ha, 150 kg KCl/ha	100
• 100 kg urea/ha, 125 kg SP36/ha, 75 kg KCl/ha + 5 ton kompos serasah jagung- <i>A pinto</i> i –pukan M-Dec/ha + BioNutrient	153
• 100 kg urea/ha, 125 kg SP36/ha, 75 kg KCl/ha + 2,5 ton kompos serasah jagung- <i>A pinto</i> i-pukan M-Dec/ha + BioNutrient	104,9

Sumber: Saraswati *et al.* (2007); pukan = pupuk kandang

Tabel 6. Hasil padi sawah yang diinokulasi dengan BioNutrient. Sukamandi, MK 2007.

Perlakuan	Hasil padi (t/ha)
• 250 kg urea/ha, 75 kg SP36/ha, 50 kg KCl/ha + kompos jerami MDec 2 t/ha	6,12 a
• 125 kg urea/ha, 37,5 kg SP36/ha, 0 kg KCl/ha + kompos jerami M-Dec (2 t/ha) + BioNutrient	6,12 a

Sumber: Saraswati *et al.* (2007)

Peningkatan efisiensi pemupukan NPK pada padi

MTM-BioNutrient (*biological nitrogen-phosphorus-potassium fertilizer*) merupakan pupuk hayati bermanfaat ganda yang mampu menggantikan kebutuhan pupuk N, P, dan K 50% dari takaran rekomendasi pada padi gogo dan padi sawah. Peningkatan hasil padi gogo yang diinokulasi dengan BioNutrient dan kompos serasah jagung-*A pinto*i M-Dec (5 t/ha) mencapai 153% (Tabel 5 dan 6).

Dukungan Kebijakan

Pemanfaatan teknologi mikroba bermanfaat atau pupuk hayati perlu mendapat dukungan kebijakan dari Pemerintah, karena produk teknologi ini belum banyak dikenal petani. Di sisi lain, produk teknologi bermanfaat perlu distandardisasi

mutunya, disertai pengawasan mutu oleh instansi yang memiliki kompetensi. Dengan melalui uji efikasi, produk mikroba penyubur tanah, yaitu pupuk hayati yang efektif, akan mendapatkan izin layak edar, sebagaimana halnya produk pupuk sintetis.

Kebijakan Pemerintah yang disarankan untuk menggalakkan penggunaan produk teknologi mikroba bermanfaat adalah sebagai berikut:

- (1) Dibentuk sistem penilaian dan pengakuan resmi produk teknologi mikroba bermanfaat oleh komisi independen
- (2) Hanya produk yang telah dinyatakan lulus dan diakui yang dapat diproduksi dan dipasarkan kepada petani
- (3) Penggunaan produk teknologi mikroba bermanfaat perlu didukung penyuluhan dan kampanye oleh instansi Pemerintah
- (4) Dalam rangka pengembangan teknologi yang bersifat ekologis dan berkelanjutan, penggunaan teknologi mikroba bermanfaat perlu menjadi bagian integral paket teknologi dalam pembangunan pertanian
- (5) Perlu peningkatan pemahaman petani dan penyuluh terhadap manfaat teknologi mikroba dan teknik penggunaannya
- (6) Perlu memasukkan penggunaan teknologi mikroba bermanfaat dalam teknologi anjuran, sesuai kebutuhan setempat

Dengan adanya kebijakan tersebut diharapkan penggunaan teknologi pupuk hayati dapat berkembang di masa yang akan datang. Penggunaan teknologi pupuk hayati sangat sejalan dengan gerakan Pertanian ramah lingkungan dan berkelanjutan, yang digalakkan sejak awal abad XXI.

Kesimpulan

- (1) Kesadaran masyarakat pertanian tentang manfaat dan pentingnya mikroba berguna dalam usaha pertanian masih rendah, sehingga diperlukan penjelasan, penyuluhan, dan sosialisasi kepada berbagai kalangan, termasuk pejabat pertanian, penyuluh, dan petani.
- (2) Penggunaan mikroba bermanfaat sebagai salah satu komponen teknologi pertanian merupakan teknologi ramah lingkungan, berkelanjutan, dan komplementer terhadap komponen teknologi lain, layak digunakan dalam program peningkatan produktivitas pertanian.
- (3) Untuk menggalakkan penggunaan teknologi mikroba bermanfaat diperlukan kebijakan Pemerintah yang dapat mendukung dan mempopulerkan teknologi tersebut sesuai dengan tujuan peruntukannya.

Pustaka

- Albrecht, S.L. 1998. Eukaryotic Algae and Cyanobacteria. *In*: D.M. Sylvia, J.J. Fuhrmann, P.G. Hartel, and D.A. Zuberer (Eds.). Principles and applications of soil microbiology. Prentice-Hall, Inc. p.94-131.
- Alexander, M. 1977. Introduction to soil microbiology. 2nd Ed. John Wiley and Sons. New York. 467 p.
- Banik, S. and B.K. Dey. 1982. Available phosphate content of an alluvial soil as influenced by inoculation of some isolated phosphate-solubilizing micro-organisms. *Plant and Soil* 69: 353-364.
- Baldani J.I, L. Caruso Vera, L.D. Baldani, Silvia R. Goi, and J. Dobereiner. 1997. Recent advance in BNF with non-legume plants. *Soil Biology and Biochemistry* 29(5/6): 911-922.
- Baylis, G.T.S. 1975. The magnoloid mycorrhiza and mycotrophy in root systems deived from it. p. 373-389. *In*: F.E.Sanders, B.Mosse, and P.B. Tinker (Eds.), *Endomycorrhizas*. Academic Press, London.
- Basyarudin. 1982. Penelaahan serapan dan pelepasan fosfat dalam hubungannya dengan kebutuhan tanaman jagung (*Zea mays L.*) pada tanah Ultisol dan Andisol. Tesis. Fakultas Pasca Sarjana, IPB, Bogor.
- Biswas, J.C., J.K. Ladha, F.B. Dazzo, Y.G. Yanni, B.G. Rolfe. 2000. Rhizobial inoculation influences seedling vigor and yield of rice. *Agron. J.* 92:880-886.
- Boddey, R.M., de O.C. Oliviera, S. Urquiaga, V.M. Reis, F.L. Olivares, V.L.D. Baldani, and J. Dobereiner. 1995. Biological nitrogen fixation associated with sugar cane and rice: contributions and prospects for improvement. *Plant Soil* 174:195-209.
- Eriksson, KEL, R.A. Blanchette, and P. Ander. 1989. Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components. Springer-Verlag Heildeberg. New York.
- Garcia, C., T. Hernandez, F. Costa, and B. Ceccanti. 1994. Biochemical parameters in soils regenerated by the addition of organic wastes. *Wastes Management and Res.* 12:457-466.
- Goenadi, D.H. dan R. Saraswati. 1993. Kemampuan melarutkan fosfat dari beberapa isolat fungi pelarut fosfat. *Menara Perkebunan* 61(3):61-66.
- Illmer, P. and F. Schinner. 1992. Solubilization of inorganic phosphate by microorganisms isolated from forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 24: 389-395.

- James, E. and F.L. Olivares. 1997. Infection and colonization of sugarcane and other graminaceous plants by endophytic diazotrophicus. *Plant Science*. 17:77-119.
- James E.K., P. Gyaneshwara, W.L. Barraquio, N. Mathan, and J.K. Ladha. 2000. Endophytic diazotroph associated with rice. *In: J.K. Ladha, P.M. Reddy (Eds.)*. The quest for nitrogen fixation in rice. IRRI.
- Jordan, D.C. 1984. Famili III. Rhizobiaceae conn 1938, 321AL, p. 234-256. *In: N.R. Krieg and J.E. Holt (Eds.)*. Bergey's manual of systematic bacteriology, vol. 1. The William and Wilkins Co., Baltimore.
- Keyser, H.H., B.B. Bohlool, T.S. Hu, and D.F. Weber. 1982. Fast-growing rhizobia isolated from root nodules of soybeans. *Science* 215:1631-1632.
- Kuykendall, L.D., B. Saxena, T.E. Devine, and S.E. Udell. 1992. Genetic diversity in *Bradyrhizobium japonicum* Jordan 1982 and a proposal for *Bradyrhizobium elkanii* sp. nov. *Canadian J. Microbiol.* 38:501-505.
- Karlen D.L., E.G. Hurley, and A.P. Mallarino. 2006. Crop rotation on soil quality at three northern corn/soybean belt location. *Agron. J.* 98:484-495
- Kloepper, J.W., M.N. Schroth, and T.D. Miller. 1980. Effects of rhizosphere colonization by plant growth-promoting rhizobacteria on potato plant development and yield. *Phytopathology* 70:1078-1082.
- Kloepper, J.W. 1983. Effect of seed piece inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria on populations of *Erwinia carotovora* on potato roots and daughter tubers. *Phytopathology* 73:217-219.
- Kristensen, E., M. Holmer, and N. Bussarawit. 1991. Benthic metabolism and sulfate reduction in a south-east Asian mangrove swamp. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 73:93-103.
- Kyuma, Kazutake. 2004. Paddy soil science. Kyoto Univ. Press and Trans Pacific Press. Kyoto.
- Ladha, J.K. and P.M. Reddy. 1995. Extension of nitrogen fixation to rice: necessity and possibilities. *GeoJournal*. 35:363-372.
- Ladha, J.K, F.J. de Bruijn, and K.A. Malik. 1997. Introducing assessing opportunities for nitrogen fixation in rice: a frontier project. *Plant and Soil*. 194:1-10.
- Lankinen, P. 2004. Ligninolytic enzymes of the basidiomycetous fungi *Agaricus bisporus* and *Phlebia radiata* on lignocellulose-containing media. Academic Dissertation in Microbiology. <http://www.u.arizona.edu/~leam/lankinen.pdf>. [10 Desember 2005].

- Lukiwati, D.R. dan R.D.M. Simanungkalit, 1999. Peningkatan produksi bahan kering, serapan N dan P hijauan jagung dengan inokulan cendawan mikoriza arbuskular. *Sainteks* 6(4):99-106.
- Maor, R., S. Haskin, H. Levi-Kedmi, and A. Sharon. 2004. In planta production of indole-3-acetic acid by *Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. *Aeschynomene*. *App. Environ. Microbiol.* 70:1852-1854.
- Miles, C.O., M.E. diMena, S.W.L. Jacobs, I. Garthwaite, G.A. Lane, R.A. Prestidge, S.L. Marshal, H.H. Wilkinson, C.L. Schardl, O.J.P. Ball, and C.M.Latch. 1998. Endophytic fungi in indigineous Australian grasses associated with toxicity to livestock. *Appl. Environ. Microbiol.* 64:601-606.
- Olivares, F.L., V.L.D. Baldani, V.M. Reis, J.I. Baldani, and J. Dobereiner. 1996. Occurrence of the endophytic diazotrophs *Herbaspirillum* spp. In roots, stems and leaves predominantly of Gramineae. *Biology Fertility Soils*, 21: 197-200.
- Saraswati, R., T. Prihatini, dan R.D. Hastuti. 2004. Teknologi pupuk mikroba untuk meningkatkan efisiensi pemupukan dan keberlanjutan sistem produksi padi sawah. p. 169-189. *Dalam: Fahmuddin Adus et al. (Eds.) Tanah sawah dan teknologi pengelolaannya. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor.*
- Saraswati, R. 1999. Teknologi pupuk mikroba multiguna menunjang keberlanjutan sistem produksi kedelai. *Jurnal Mikrobiologi Indonesia.* 4(1):1-9.
- Saraswati, R., D. Ratih, Hastuti, E. Yuniarti, J. Purwani, dan Elsanti. 2007. Pengembangan teknologi mikroflora tanah multiguna untuk efisiensi pemupukan dan keberlanjutan produktivitas lahan pertanian. Laporan Akhir Tahunan. 2007. (unpublished).
- Scholla, M.H. and G.H. Elkan. 1984. *Rhizobium fredii* sp nov. a fast-growing species that effectively nodulates soybeans. *Int. J. Sys. Bacteriol.* 34:484-486.
- Schroth, M.N. and A.R. Weinhold. 1986. Root colonizing bacteria and plant health. *Hort. Sci.* 21:1295-1298.
- Sherman, R.E., T.J. Fahey, and R.W. Howarth. 1998. Soil-plant interactions in a neotropical mangrove forest: iron, phosphorus, and sulfur dynamics. *Oecologia* 115:553-563.
- Simanungkalit, R.D.M. 1997. Effectiveness of 10 species of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi isolated from West Java and Lampung on maize and soybean, p. 267-274. *In: U.A. Jenie (Ed.). Proc. Indonesian Biotechnology Conference, Vol. II . The Indonesian Biotechnology Consortium, IUC Biotechnology IPB, Bogor.*

- Simanungkalit, R.D.M. and R. Saraswati. 1999. Application of biotechnology on biofertilizer production in Indonesia. Prosiding Seminar of Sustainable Agriculture and Alternative Solution for Food Crisis, PAU-IPB. ISBN:979-95723-0-4,45-57
- Simanungkalit, R.D.M. 2007. Cendawan mikoriza arbuskuler. *Dalam: Pupuk organik dan pupuk hayati*. Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian. p. 159-190
- Strobel, G.A., E. Ford, J.Y. Li, J. Sears, R.S. Sidhu, and W.M. Hess. 1999. *Seimatoantlerium tepuiense* gen. Nov., a unique epiphytic fungus producing taxol from the Venezuelan Guyana. *Syst. Appl. Microbiol.* 22:426-433.
- Subikse, I.G. Made. 2006. Pemanfaatan jerami sebagai penyedia hara dan pembenah tanah pada lahan tadah hujan marginal di kabupaten blora jawa tengah. Laporan akhir kerja sama penelitian Balai Penelitian Tanah-Program Peningkatan Pendapatan Petani Melalui Inovasi (P4MI). Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian. Bogor.
- Sumarno, A. Hasanuddin, dan Suyamto. 2007. Sistem produksi tanaman pangan, padi berciri ekologis dan berkelanjutan. Simposium Tanaman Pangan V. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Bogor, 28-29 Agustus 2007.
- Tien, T.M., M.H. Gaskin, and D.H. Hubell. 1979. Plant growth substances produced by *Azospirillum brasilense* and their effect on the growth of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.). *Appl. Environ. Microbiol.* 37:1016-1024.
- Watanabe, I. 1979. Biological nitrogen fixation in rice soils. p. 465-478. *In: Soils and Rice*. IRRI. Los Banos, Philippines.
- Xu, L.M., C. Ge, Z. Cui, J. Li, and H. Fan. 1995. *Bradyrhizobium liaoningensis* sp. nov. isolated from the root nodules of soybean. *Int. J. Sys. Bacteriol.* 45:706-711.
- Yoshida, T. 1978. Microbial metabolism in rice soils. p. 445-463. *In: Soil and Rice*. IRRI. Los Banos, Philippines.
- Zakharova, EA *et al.* 1999. Bioynthesis of indole-3-acetic acid in *Azospirillum brasilense*. *Eur. J. Biochem.* 259:572-576.
- Zdor, R.E. and S.G. Puepke. 1988. Early injection and competition for nodulation of soybean by *Bradyrhizobium japonicum* 123 and 138. *Appl. Env. Microbiol.* 54,1996-2002.
- Zdor, R.E. and S.G. Puepke. 1990. Competition for nodulation of soybean 123 in soil maintaining indigenous rhizobia. *Soil Biol. and Biochem.* 22:607-613.