

STRUKTUR KOMUNITAS MIKROBA TANAH DAN IMPLIKASINYA DALAM MEWUJUDKAN SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN

Prihastuti

Balai Penelitian Tanaman Kacang-Kacangan dan Umbi-Umbian
Jalan Raya Kendalpayak Kotak Pos 66, Malang

Abstract

Soils are made up of organic and an organic material. The organic soil component contains all the living creatures in the soil and the dead ones in various stages of decomposition. Biological activity in soil helps to recycle nutrients, decompose organic matter making nutrient available for plant uptake, stabilize humus, and form soil particles.

The extent of the diversity of microbial in soil is seen to be critical to the maintenance of soil health and quality, as a wide range of microbial is involved in important soil functions. That ecologically managed soils have a greater quantity and diversity of soil microbial. The two main drivers of soil microbial community structure, i.e., plant type and soil type, are thought to exert their function in a complex manner. The fact that in some situations the soil and in others the plant type is the key factor determining soil microbial diversity is related to their complexity of the microbial interactions in soil, including interactions between microbial and soil and microbial and plants.

The basic premise of organic soil stewardship is that all plant nutrients are present in the soil by maintaining a biologically active soil environment. The diversity of microbial communities has on ecological function and resilience to disturbances in soil ecosystems. Relationships are often observed between the extent of microbial diversity in soil, soil and plant quality and ecosystem sustainability. Agricultural management can be directed toward maximizing the quality of the soil microbial community in terms of disease suppression, if it is possible to shift soil microbial communities.

Keywords: *structure, microbial, implication, sustainable agriculture*

PENDAHULUAN

Pada kenyataannya, tanah harus dipandang sebagai bagian tubuh yang hidup, karena di dalamnya merupakan reservoir biota tanah yang masing-masing mempunyai peranan penting untuk mencapai kondisi keseimbangan ekosistem (Doran, *et al.*, 1996). Keberadaan mikroba di dalam tanah memainkan peranan penting pada siklus biogeokimia dan sangat responsif untuk daur ulang senyawa organik. Mikroba tanah mempengaruhi kondisi ekosistem di dalam tanah oleh kontribusinya dalam penyediaan nutrisi tanaman (Timonen *et al.*, 1996), kesehatan tanaman (Fillion, *et al.*, 1999), struktur tanah (Dodd, *et al.*, 2000) dan kesuburan tanah (Yao, *et al.*, 2000 dan O'Donnell *et al.*, 2001).

Kriteria kesuburan tanah ditentukan oleh kombinasi tiga faktor yang saling berinteraksi, yaitu faktor fisis, khemis dan biologis. Karakteristik fisis dan khemis tanah dapat dipahami lebih sempurna daripada karakteristik biologis-nya. Oleh karenanya lebih banyak diketahui status fisis dan khemis tanah, dan sedikit informasi tentang status biologis tanah. Memang ada sedikit kesulitan

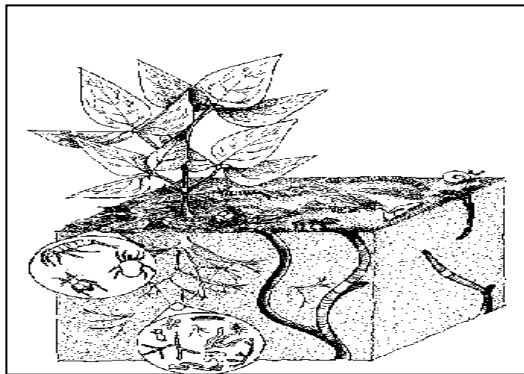
dalam menentukan status biologis tanah, karena substansinya bersifat hidup, dinamis dan dapat mengalami perubahan pada ruang dan waktu. Sifat dinamis pada status biologis tanah ini memberikan peluang besar dalam pengelolaannya. Status biologis tanah dapat memberikan peringatan dini adanya degradasi tanah, sehingga memungkinkan untuk menerapkan praktek-praktek pengelolaan lahan yang lebih berkelanjutan (Loreau *et al.*, 2001).

Aspek biologis tanah sangat kompleks dan membutuhkan pemahaman yang lebih baik, karena belum banyaknya informasi tentang jumlah dan keanekaragaman mikroba tanah, serta bagaimana tingkat aktivitasnya dalam mempertahankan tanah yang subur dan produktif (Fitter *et al.*, 2005). Mikroba di dalam tanah yang mempunyai kemampuan dalam penyediaan nutrisi tanaman menjadi bagian penting para agronomis di bidang pertanian. Kegiatan introduksi mikroba dalam bentuk agensia hayati menjadi pilihan untuk dilakukan dalam upaya reduksi pupuk kimia dan mewujudkan sistem pertanian berkelanjutan (Prihastuti, 2008).

Tanah sebagai media tumbuh tanaman memerlukan perhatian untuk dikelola kesinambungannya. Bagaimana tanah dapat berfungsi pada kondisi alami? Bagaimana suatu ekosistem asli dapat menghasilkan produk tanaman tanpa kehadiran pupuk dan pengolahan tanah? Bagaimanakah prinsip daur kehidupan pada fungsi tanah ini? Jawaban dari pertanyaan ini meyakinkan bahwa tanah akan memberikan manfaat dan tetap produktif pada masa sekarang dan untuk generasi masa depan.

TANAH SEBAGAI RESERVOIR MIKROBA

Tanah dapat dipandang sebagai suatu kesatuan kehidupan daripada hanya suatu tubuh tanah saja. Komponen organik tanah mengandung semua bentuk kehidupan dalam tanah dan yang sudah mati maupun yang sedang mengalami proses dekomposisi (Loreau *et al*, 2001). Gambar 1 menunjukkan irisan *top soil* dengan organisme yang terkandung di dalamnya, yang mempunyai peranan mengatur siklus hara di dalam tanah yang dibutuhkan oleh tanaman. Keberadaan mikroba di dalam tanah secara alami mempunyai peranan untuk menjaga fungsi tanah dan mengendalikan produktivitasnya, karena sebagai kunci dalam berbagai proses kehidupan tanah, seperti pembentukan struktur tanah, dekomposisi bahan organik, mengubah zat racun, siklus C, N, P dan S (van Elsas dan Trevors, 1997).



Gambar 1. Tanah dengan organisme yang mengatur siklus hara dari tanah ke tanaman dan sebaliknya (Sullivan, 2004).

Beberapa jenis mikroba tanah yang mempunyai arti penting dalam kestabilan ekosistem di dalam tanah adalah:

1. Bakteri

Bakteri merupakan kelompok mikroba tanah yang paling dominan, mencapai separuh

dari biomassa mikroba dalam tanah. Dalam setiap gram tanah subur mengandung sedikitnya satu juta organisme bersel satu ini dan jumlah populasi bakteri akan semakin menurun dengan bertambahnya kedalaman tanah. Jumlah populasi dan jenis bakteri ditentukan oleh kondisi tanahnya, yang berfungsi sebagai lingkungan tumbuhnya (Tabel 1).

Tabel 1. Perkiraan jumlah populasi dan jenis bakteri pada tiga jenis tanah yang berbeda.

Tipe tanah	Jumlah populasi bakteri (sel/g tanah)	Jumlah spesies bakteri (/g tanah)
Padang gurun	10×10^6	100
Padang rumput	60×10^7	15-40.000
Hutan	10×10^{10}	1.000.000

Sumber: Anonim (2010)

Banyak jenis bakteri yang berbeda dapat ditemukan di dalam tanah, masing-masing mempunyai peranan tertentu dalam lingkungan tanah. Salah satu manfaat utama bakteri adalah menyediakan nutrisi tanaman. Beberapa spesies bakteri melepaskan nitrogen, belerang, fosfor, dan *trace elemen* dari material organik. Peranan bakteri yang lain adalah memecah tanah mineral, melepaskan kalium, fosfor, magnesium, kalsium dan besi. Masih ada spesies lain yang berperan dalam membuat dan melepaskan hormon pertumbuhan tanaman dan untuk merangsang pertumbuhan akar (Schloss and Handelsman, 2006).

Beberapa jenis bakteri penambat nitrogen dari perakaran tanaman kacang-kacangan bekerja melalui asosiasi dengan tanaman. Bakteri ini bertanggung jawab untuk mengubah nitrogen dari amonium menjadi nitrat dan kembali lagi tergantung pada kondisi tanah tertentu. Manfaat bakteri untuk tanaman yang lainnya adalah meningkatkan kelarutan nutrisi, memperbaiki struktur tanah, melawan penyakit akar dan menetralkan racun tanah. Bakteri penting di dalam dinamika air, siklus hara dan supresiv patogen (Anonim, 2010). Beberapa bakteri mempengaruhi pergerakan air, melalui kemampuannya menghasilkan substansi yang dapat membuat ikatan dengan partikel tanah menjadi agregat kecil yang meningkatkan infiltrasi air dan kapasitas menahan air. Beberapa bakteri mampu mengubah energi dari bahan organik menjadi bentuk yang lebih berguna untuk tanaman dan penting untuk

menjaga kehilangan hara (seperti nitrogen) dari zona perakaran.

2. Jamur

Jamur di dalam tanah hadir dalam berbagai jenis, ukuran dan bentuk yang berbeda. Beberapa spesies muncul sebagai benang-benang dan membentuk seperti koloni, sementara yang lain adalah satu-sel yang disebut ragi/yeast. Jamur benang dan jamur kancing (*mushrom*) disebut juga fungi. Banyak jamur yang membantu tanaman melalui pemecahan bahan organik atau pelepasan nutrisi dari mineral tanah. Jamur umumnya cepat untuk menjajah potongan-potongan besar bahan organik dan memulai proses dekomposisi. Beberapa jamur menghasilkan hormon tanaman, sedangkan yang lain menghasilkan antibiotik, termasuk penisilin. Bahkan ada jenis jamur yang berbahaya sebagai perangkap nematoda parasit tanaman (Cutler and Hill, 1994).

Semua faktor lingkungan yang mempengaruhi penyebaran bakteri dan aktinomisetes juga mempengaruhi penyebaran jamur dalam tanah. Kualitas dan kuantitas bahan organik yang ada dalam tanah mempunyai pengaruh langsung terhadap jumlah jamur dalam tanah, oleh sifat nutrisinya yang heterotrofik. Jamur yang umum dijumpai pada tanah yang lebih dangkal jarang dijumpai di permukaan tanah, yang dapat dijelaskan berdasarkan ketersediaan bahan organik dan rasio antara oksigen dan karbondioksida dalam tanah pada kedalaman yang berbeda-beda.

3. Mikoriza

Beberapa jamur dapat membentuk interaksi mutualistik dengan akar tanaman yang dikenal dengan sebutan mikoriza (*mycorrhizae*). Dalam interaksi ini jamur secara nyata terintegrasi ke dalam akar tanaman. Bentuk asosiasi ini memberikan keuntungan pada kedua belah pihak. Jamur akan mendapatkan keuntungan nutrisi dari akar tanaman, sebaliknya jamur akan menyediakan nutrisi kepada tanaman dan tidak menyebabkan penyakit pada tanaman inang. Akar dijajah oleh mikoriza cenderung kurang ditembus oleh nematoda pemakan akar, karena hama tidak dapat menembus jaringan jamur tebal. Mikoriza juga memproduksi hormon dan antibiotik yang meningkatkan pertumbuhan akar dan memberikan penekanan terhadap penyakit yang menyerang akar tanaman

(Champbell, 1989). Manfaat bagi jamur dari bentuk asosiasi tanaman ini adalah dapat mengambil nutrisi dan karbohidrat dari akar tanaman yang menjadi inangnya.

Pembentukan mikoriza diawali dengan terserangnya akar tanaman oleh suatu jenis jamur tanah, yang distimulir oleh senyawa organik tertentu dari tanaman ke dalam tanah. Proses infeksi jamur ke dalam sel tanaman dengan memakai *haustoria* dan berkembang di dalam sel. Interaksi mikoriza berbeda dengan interaksi dalam rizosfer antara tanaman dengan mikroba tanah lainnya, terutama dalam hal spesifisitas dan sistem organisasi jaringan tubuhnya. Mosse (1981) menyatakan bahwa infeksi akar oleh mikoriza tergantung pada tingkat nutrisi tanaman dan daya adaptasi mikoriza pada tanah dan iklim yang ada. Melalui infeksi akar oleh mikoriza dapat meningkatkan perluasan serapan akar untuk menyerap secara optimum unsur hara terutama P bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Beberapa penelitian menyatakan bahwa penggunaan mikoriza memberikan interaksi positif terhadap tanaman inang, antara lain dalam bentuk: (1) meningkatkan penyerapan unsur hara, terutama P (Baas *et al*, 1989), (2) menahan serangan patogen (Wilson dan Trinik, 1983), (3) toleran terhadap logam berat dan zat-zat yang bersifat racun terhadap tanaman (Koomen *et al*, 1990), (4) memperbaiki struktur tanah dan tidak mencemari lingkungan, serta (5) pemupukan sekali seumur tanaman (Aher, 2001). Peranan mikoriza yang besar dalam biosintesis tanaman, memberikan prospek yang baik untuk diaplikasikan ke lahan-lahan marginal dan untuk reklamasi lahan bekas tambang.

4. Aktinomisetes

Aktinomisetes adalah organisme tanah yang memiliki sifat-sifat yang umum dimiliki oleh bakteri dan jamur, tetapi juga memiliki ciri khas yang cukup berbeda yang membatasinya menjadi satu kelompok yang jelas berbeda. Meskipun tidak seperti kebanyakan bakteri, mereka juga melakukan peran penting di dalam tanah, antara lain membantu menguraikan bahan organik menjadi humus, melepaskan nutrisi. Aktinomisetes juga memproduksi antibiotik untuk melawan penyakit akar (Fitter *et al*, 2005). Aktinomisetes bertanggung jawab atas aktivitas biologis di dalam tanah. Jumlah aktinomisetes

akan meningkat oleh adanya bahan organik yang mengalami dekomposisi. Persentase aktinomisetes dalam populasi mikroba tanah total akan meningkat dengan makin meningkatnya kedalaman tanah hingga mencapai horison C profil tanah.

PEMELIHARAAN STRUKTUR KOMUNITAS MIKROBA TANAH

Sekalipun sejak tahun 1960-an para ahli mikrobiologi telah mengkaji peranan diversitas mikroba tanah terhadap fungsi kestabilan ekosistem, namun perhatiannya kurang begitu tinggi terhadap fungsi ekologi dan resiliensi ekosistem tanah (Harrison, *et al.*, 1968). Hubungan yang sering dikaji adalah diversitas mikroba tanah, kualitas tanah dan tanaman, serta keberlanjutan ekosistem. Sekalipun demikian yang terdokumentasi hanyalah hubungan antara tingkat supresiv tanah terhadap penyakit tanaman dan diversitas atau kelimpahan komunitas mikroba tanah (Abawi and Widmer, 2000; Nitta, 1991).

Pengelolaan tanah mempengaruhi struktur komunitas mikroba tanah telah banyak dilaporkan (Tabel 2.). Penggunaan pestisida (Heilmann *et al.*, 1995), amandemen dengan khitin (Hallmann, *et al.*, 1999), kompos atau kotoran ternak (Schönfeld *et al.*, 2002) dan introduksi mikroba mutan (De Leij *et al.*, 1995; Mahhaffee dan Klooper, 1997) akan mempengaruhi struktur komunitas mikroba di dalam tanah. Sifat fisikokimia tanah (Kennedy dan Smith, 1995), distribusi ukuran partikel tanah (Ranjard *et al.*, 2001), keberadaan dan umur spesies tanaman (Garland, 1996;

Grayston *et al.*, 1998) dan rotasi tanaman (Villich, 1997) adalah faktor kunci determinatif struktur komposisi mikroba tanah.

Jenis tanaman dan tanah mempengaruhi struktur komunitas mikroba, namun informasi detail mengenai interaksinya masih belum dapat diperoleh dan masih membutuhkan kajian lanjut. Komunitas mikroba tanah sangat sulit untuk dikarakterisasi, karena adanya diversitas fenotipik dan genotipik, heterogenitas dan kriptisitas. Populasi bakteri pada tanah *top soil* adalah $>10^9$ sel/g tanah (Torsvik dan Ovreas, 2002) dan sebagian besar tidak dapat dikulturkan. Biomassa mikroba yang dapat dikulturkan dan dikaji lanjut diperkirakan $<5\%$ nya (Borneman dan Triplett, 1997; Torsvik *et al.*, 1990).

Tanah hadir dengan tingkat heterogenitas mikroba yang tinggi, terdiri dari komponen fraksi padat yaitu pasir, lempung, liat dan bahan organik (van Elsas dan Trevors, 1997). Kehadiran mikroba dalam tanah tersebut menunjukkan kebutuhannya akan kondisi abiotik dan nutrisi yang tersedia dalam biosfer. Dalam suatu sistem yang stabil dapat dihipotesakan bahwa tanah dapat dihuni oleh mikroba yang mampu beradaptasi pada lingkungan tanah tersebut. Pada akhirnya mikroba tersebut berfungsi sebagai katalisator biokimia pada proses-proses yang berlangsung di dalam tanah, yang menyebabkan terjadinya perubahan di dalam tanah. Ada tiga faktor utama yang mendukung terjadinya dinamika di dalam tanah yaitu jenis tanaman, jenis tanah dan teknik pengelolaannya (Loreau *et al.*, 2001).

Tabel 2. Dampak pengelolaan lahan terhadap stuktur komunitas mikroba tanah.

Pengelolaan Tanah	Dampak	Sumber
Sistem pertanian konvensional, organik dan masukan rendah	Meningkatkan biomasa mikroba tanah, oleh adanya input bahan organik yang tinggi dalam sistem pertanian konvensional dan masukan rendah	Bossio <i>et al.</i> , 1998
Aplikasi herbisida 2,4-D pada tiga jenis tanah berbeda	Populasi mikroba perombak 2,4-D yang sama pada ke tiga jenis tanah	Tiedje <i>et al.</i> , 1999
Aplikasi pupuk N dan drainase	Pemupukan N mempengaruhi struktur komunitas <i>Eubacteria</i> dan aktinomisetes, sedangkan drainase tanah mempengaruhi komunitas aktinomisetes dan <i>Pseudomonas</i>	Clegg <i>et al.</i> , 2003
Penggunaan padang rumput dengan perbaikan penuh, semi dan tanpa perbaikan	Tidak ada perbedaan struktur komunitas mikroba dari masing-masing perlakuan	McCaig <i>et al.</i> , 2001
Tanah sawah yang dibajak dan tidak	Lahan sawah mempunyai biomasa mikroba yang tinggi dan prevalensi mikoriza peka terhadap pengolahan tanah	Drijber <i>et al.</i> , 2000
Perubahan dari hutan ke padang rumput	Terjadi perubahan pada struktur komunitas bakteri, dan signifikan dengan kandungan G + C yang tinggi	Nusslein and Tiedje, 1999

Padang rumput permanen, lahan pertanian dengan monokultur jagung dan rotasi	Terjadi perubahan pada stuktur komunitas mikroba yang cukup signifikan, padang rumput permanen mempunyai diversitas mikroba paling tinggi	Van Elsas <i>et al</i> , 2000
---	---	-------------------------------

Pemeliharaan struktur komunitas mikroba di dalam tanah merupakan hal menarik yang perlu dikaji dalam upaya mendukung terwujudnya sistem pertanian berkelanjutan. Pembacaan kondisi tanah yang benar dan akurat, baik dari aspek fisis, khemis dan biologis akan banyak membantu dalam penentuan teknik pengelolaannya. Tanah merupakan media tumbuh tanaman juga berperan sebagai lingkungan tumbuh mikroba, sehingga kondisi tanah menentukan kualitas tumbuh mikroba tanah dan tanaman di atasnya. Baik mikroba dalam tanah ataupun tanaman mempunyai faktor pembatas di dalam pertumbuhannya. Oleh karenanya untuk mencapai kriteria normal tanah subur, pemeliharaan struktur komunitas mikroba sangat penting dilakukan.

Kandungan bahan organik merupakan indikator paling penting dan menjadi kunci dinamika kesuburan tanah. Bahan organik mempunyai peran yang multifungsi, yaitu mampu merubah sifat fisis, khemis dan biologis tanah. Bahan organik juga mampu berperan mengaktifkan persenyawaan yang ditimbulkan dari dinamikanya sebagai ZPT (zat pengatur tumbuh), sumber enzim (katalisator reaksi-reaksi persenyawaan dalam metabolisme kehidupan) dan biosida (obat pembasmi penyakit dan hama dari bahan organik) (Aryantha, 1998). Bahan organik dapat merubah sifat biologis tanah dengan meningkatkan populasi mikroba di dalam tanah. Populasi mikroba yang meningkat (baik jenis dan jumlahnya) menyebabkan dinamika tanah akan semakin baik dan menjadi sehat alami. Peningkatan populasi mikroba tanah (khususnya jamur bermiselial) akan meningkatkan kemantapan agregasi partikel-partikel penyusun tanah. Mikroba dan miseliana, yang berupa benang-benang berfungsi sebagai perajut/perekat antar partikel tanah, menjadikan struktur tanah menjadi lebih baik dan meningkat ketahanannya dalam menghadapi tekanan erodibilitas (perusakan) tanah (Doran and Zeiss, 2000). Kemampuan merubah sifat biologis tanah ke arah positif dapat meningkatkan populasi mikroba yang menguntungkan tanaman dan menjadikan tanaman tumbuh sehat tanpa perlu penggunaan pupuk buatan dan pestisida.

PENUTUP

Kehidupan mikroba di dalam tanah memegang peranan penting dalam mengendalikan kestabilan ekosistem tanah. Faktor-faktor yang mempengaruhi struktur komunitas mikroba di dalam tanah yaitu jenis tanah dan tanaman, serta pengelolaan tanah. Selain ada mikroba tanah yang bermanfaat bagi tanaman dengan menghasilkan unsur hara dan hormon tumbuh tanaman, ada pula mikroba dalam tanah yang menyebabkan penyakit tanaman. Dalam kondisi ekosistem tanah yang stabil, supresiv mikroba patogen dapat ditekan secara alami.

Dengan memahami kondisi lingkungan tanah dengan baik dari aspek fisis, khemis dan biologis, maka tindakan pengelolaan tanah untuk memelihara kesuburan lahan dapat dilakukan secara tepat. Pengelolaan kesuburan tanah secara ekologis lebih memberikan harapan dalam mewujudkan sistem pertanian berkelanjutan, dengan memperhatikan interaksi antara mikroba dan tanah maupun mikroba dan tanaman oleh pengaruh waktu dan ruang dalam tanah. Pemahaman sejauh mana pengaruh tanaman dalam ruang dan waktu akan menjadi tantangan besar bagi pertanian di masa depan, ditunjang lagi oleh adanya fluktuasi kondisi abiotik tanah (seperti kadar air dan suhu tanah) yang berpengaruh terhadap struktur komunitas mikroba.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2010. Soil fertility and organic components of soils. EFAO,OATI and The Institute for Bioregional Studies. <http://www.mindground.net/loes.html>
- Aher. K. L. 2004. Soil Biology-Nothing But Normal and Natural. www.bio-organics.com
- Abawi G. S. dan T. L. Widmer. 2000. Impact of soil health managment practices on soilborne pathogens, nematodes and root diseases of vegetable crops. *Appl. Soil Ecol.* 15:37-47
- Aryantha, I.P., 1998, Saving the agricultural ecosystem by using microbes, Proceeding of National Seminar on Biological Challenge and Opportunity in Improving the National Economic

- Integrity, IUC Life Sciences of ITB, Bandung 30 of June-1st July 1998.
- Baas, R. C. V. Dijk dan S. R. Troelstra. 1989. Effects of rhizosphere soil, vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate on *Plantago major* L ssp. *Pleiosperma*. Pilger. Plant and Soil. 113: 59-67.
- Borneman J. and E. W. Triplett. 1997. Molecular microbial diversity in soil from Eastern Amazonia: evidence for unusual microorganisms and microbial population shifts associated with deforestation. *Appl. Environ. Microbiol.* 63:2647-53
- Bossio D. A, K. M. Scow, N. Gunpala, and K. J. Graham. 1998. Determination of soil microbial communities: effect of agricultural management, season, and soil type on phospholipid fatty acid profiles. *Microbiol. Ecol.* 36:1-12
- Campbell, R., 1989, Biological control of microbial plant pathogens, Cambridge University Press, Melbourne-Sydney, pp : 41-65.
- Clegg, C. D, R. D. L. Lovell, P. J. Hobbs. 2003. The impact of grassland management regime on the community structure of selected bacterial groups in soil. *FEMS Microbiol. Ecol.* 43:263-70
- Cutler, H.G and R.A Hill, 1994, Natural fungicides and their delivery systems as alternatives to synthetics, in Biological control of postharvest diseases theory and practice : C. L Wilson and M.E Wisniewski (Eds), CRC Press, Tokyo, p. 135-152.
- De Leij FAAM, S. J. Sutton, J. M. Whipps, J. S. Fenlon, dan J. M. Lynch. 1995. Impact of field release of genetically modified *Pseudomonas fluorescens* on indigenous microbial population of wheat. *Appl. Environ. Microbiol.* 61:3443-53
- Dodd, J.C., C. L. Boddington, A. Rodriguez, C. Gonzalez-Chavez, dan I. Mansur. 2000. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) from different genera: form, function and detection. *Plant Soil* 226, 131-151.
- Doran J. W. , M. Sarrantonio, dan M. A. Liebig. 1996. Soil health and sustainability. *Adv. Agron.* 56:2-54
- Doran, J. W and M. R. Zeiss. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* (15). 3-11
- Drijber R. A, J. W. Doran, A. M. Parkhurst, and D. J. Lyon. 2000. Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Biol. Biochem.* 32:1419-30
- Filion, M., M. St-Arnaud, J. A. Fortin. 1999. Direct interaction between the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* and different rhizosphere microorganisms. *New Phytol.* 141, 525-533.
- Fitter, A. H., C. A. Gilligan, K. Hollingworth, A. Kleczkowski, K. M. Twyman, J. W. Pitchford, and The members of the Nerc Soil Biodiversity Programme. 2005. Biodiversity and ecosystem function in soil. *British Ecological Society* (19): 369-377
- Garland JL. 1996. Patterns of potential C source utilization by rhizosphere communities. *Soil Biol. Biochem.* 28:223-30
- Grayston SJ, S. Wang, C. D. Campbell, A. C. Edwards. 1998. Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere. *Soil Biol. Biochem.* 30:369- 78
- O'Donnell, A.G., M. Seasman, A. Macrae, I. Waite, dan J. T. Davies. 2001. Plants and fertilisers as drivers of change in microbial community structure and function in soils. *Plant Soil* 232, 135-145.
- Hallmann J, R. Rodriguez-Kabana, dan J. W. Kloepper. 1999. Chitin-mediated changes in bacterial communities of soil, rhizosphere and roots of cotton in relation to nematode control. *Soil Biol. Biochem.* 31:551-60
- Harrison N.G, J. D. Allan, R. K. Colwell, D. J. Futuyma, and J. Howell. 1968. The relationship between species diversity and stability: an experimental approach with protozoa and bacteria. *Ecology* 1091-101
- Heilmann B, M. Lebuhn, dan F. Beese. 1995. Methods for investigation of metabolic activity and shifts in the microbial community in soil treated

- with a fungicide. *Biol. Fertil. Soils* 19:186–92
- Kennedy AC and K. L. Smith. 1995. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soil. *Plant Soil* 170:75–86
- Koomen, I., E. Mcgratc and Giller. 1990. Mycorrhizal infection of clover is delayed in soils contaminated with heavy metals from past sewage sludge application. *Soil Biology Journal* 22: 871-873
- Loreau, M., S. Naeem, P. Inchausti, J. Bengtsson, J. P. Grime, A. Hector, D. U. Hooper, M. A. Huston, D. Raffaelli, B. Schmid, D. Tilman and D. A. Wardle. 2001. Biodiversity and Ecosystem Functioning: Current Knowledge and Future Challenges. *Science* (294): 804-808
- Mahaffee WF, dan J. W. Kloepper. 1997. Bacterial communities of the rhizosphere and endorhiza associated with field-grown cucumber plants inoculated with plant growth-promoting rhizobacterium or its genetically modified derivative. *Can. J. Microbiol.* 43:344–53
- McCaig, A. E, L. A. Glover, and J. J. Prosser. 2001. Numerical analysis of grassland bacterial community structure under different land management regimens by using 16S ribosomal DNA sequence data and denaturing gradient gel electrophoresis banding patterns. *Appl. Environ. Microbiol.* 67:4554–59
- Mosse, B. 1981. Vesicular-arbuscular mycorrhiza research of phosphate and other nutrients on the development of vesicular arbuscular mycorrhiza in culture. *J. Gen. Microbiol.* 69: 159-166.
- Nitta T. 1991. Diversity of root fungal floras: its implications for soil-borne diseases and crop growth. *Jpn. Agric. Res.* 25:6–11
- Nusslein K, and J. M. Tiedje. 1999. Soil bacterial community shift correlated with change from forest to pasture vegetation in a tropical soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 65:3622–26
- Prihastuti. 2008. Adopsi pupuk hayati di Indonesia: antara harapan dan realita. *Dalam Saleh. N. Rahmianna, A.A., Pardono, Samanhudi, Anam, C dan Yulianto (Penyunting). 2008. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Kacang-Kacangan dan Umbi-Umbian, Surakarta, 7 Agustus 2008. Fakultas Pertanian/Pascasarjana Agronomi Universitas Sebelas Maret Surakarta, Balai Penelitian Tanaman Kacang-Kacangan dan Umbi-Umbian, dan Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Jawa Tengah. Hlm. 76-81 .*
- Ranjard L, F. Poly F, J. C. Lata, C. Mougel, J. Thioulouse, dan S. Nazaret. 2001. Characterization of bacterial and fungal soil communities by automated ribosomal intergenic spacer analysis fingerprints: biological and methodological variability. *Appl. Environ. Microbiol.* 67:4479–87
- Schloss, P. D. and J. Handelsman. 2006. Toward a census of bacteria in soil. *PLoS Computational Biology* (2): 786-793
- Schönfeld J, A. Gelsomino, L. S. van Overbeek, A. Gorissen, K. Smalla, dan J. D. van Elsas. 2002. Effects of compost addition and simulated solarisation on the fate of *Ralstonia solanacearum* biovar 2 and indigenous bacteria in soil. *FEMS Microbiol. Ecol.* 43:63–74
- Sullivan, P. 2004. Sustainable soil management. NCAT. Agric. Spec. ATTRA Pub. 31 p. http://attra.ncat.org/attra.pub/PDF/soil_mgmt.pdf
- Tiedje JM, S. Asuming-Brempong, K. Nusslein, T. L. Marsch, and S. J. Flynn. 1999. Opening the black box of soil microbial diversity. *Appl. Soil Ecol.* 13:109–22
- Timonen, S., R. D. Finlay, S. Olsson, dan B. Soderstrom. 1996. Dynamics of phosphorous translocation in intact ectomycorrhizal systems: non-destructive monitoring using a B-scanner. *FEMS Microbiol. Ecol.* 19, 171–180.
- Torsvik V. and L. Ovreas. 2002. Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. *Curr. Opin. Microbiol.* 5: 240–45
- Torsvik V, J. Goksoyr, and F. D. Daae. 1990. High diversity in DNA of soil bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 56:782–87

- van Elsas J. D dan J. T. Trevors. 1997. *Modern Soil Microbiology*. New York: MarcelDekker
- van Elsas J. D, G. F. Duarte, A. Keijzer-Wolters, and S. Smit. 2000. Analysis of the dynamics of fungal-specific PCR of soil DNA followed by denaturing gradient gel electrophoresis. *J. Microbiol. Methods* 43:133–51
- Villich V. 1997. Assessment of microbial diversity by fatty acid analysis. *Dev. Plant. Pathol.* 11:71–74
- Wilson, J. M. dan Trinik. 1983. Infection development and interaction between VAM fungi. *New Phytol.* 93: 543-553
- Yao, H., Z. He, M. J. Wilson, dan C. D. Campbell. 2000. Microbial biomass and community structure in a sequence of soils with increasing fertility and changing land use. *Microb. Ecol.* 40, 223– 237.