



Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
Jl. Ragunan No. 29 Pasar Minggu, Jakarta 12540
Telp.: 62 21 806202, Faks.: 62 21 7800644



PEMBERDAYAAN ORGANISME TANAH UNTUK PERTANIAN RAMAH LINGKUNGAN

SUBOWO G.



BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN PERTANIAN
KEMENTERIAN PERTANIAN
2014



PEMBERDAYAAN ORGANISME TANAH UNTUK PERTANIAN RAMAH LINGKUNGAN

||
=

| |

||
=

Informasi lebih lanjut :
Balai Penelitian Tanah
Jalan Tentara Pelajar No. 12 Cimanggu, Bogor
Tel/fax: 0251 8336757 dan 8321608

E-mail: balittanah@litbang.pertanian.go.id; soil-ri@indo.net.id;
Website: <http://balittanah.litbang.pertanian.go.id>

=
||

| |

||
=

PEMBERDAYAAN ORGANISME TANAH UNTUK PERTANIAN RAMAH LINGKUNGAN

SUBOWO G.



**BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN PERTANIAN
KEMENTERIAN PERTANIAN
2014**



Cetakan I 2014

Hak Cipta dilindungi undang-undang

@Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian 2014

Hak cipta pada Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 2014

Katalog dalam terbitan

BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN PERTANIAN

Pemberdayaan Organisme Tanah untuk Pertanian Ramah Lingkungan,
Subowo.G – Bogor- IAARD Press, 2014

vii, 86 hlm; ill; 17 x 24 cm

ISBN 978-602-1520-91-8

Penanggung Jawab : Kepala Balai Penelitian Tanah
Penyusun : Subowo G.
Redaksi Pelaksana : Joko Purnomo, Sri Erita Aprillani, dan Yayan Supriana
Tata letak : Didi Supardi, Yayan Supriana, dan Nadina A. Indrawan

IAARD PRESS

Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
Jalan Ragunan No. 29, Pasar minggu, Jakarta 12540
Telp: +62 21 7806202, Faks.: +62 21 7800644

Alamat Redaksi:
Pusat Perpustakaan dan Penyebaran Teknologi Pertanian
Jalan Ir. H. Juanda No. 20, Bogor 16122
Telp.: +62 251 8321746, Faks.: +62 251 8326561
e-mail: iaardpress@litbang.pertanian.go.id

Anggota IKAPI No. 442/DKI/2012

SEKAPUR SIRIH

Assalamualaikum warohmatulloh wabarokaatuh,

Puji syukur dipanjatkan kehadlirat Allah SWT atas rachmat dan hidayah-Nya telah meridhoi penulis untuk menulis sebuah buku mengenai sebagian pelaksanaan tugas sebagai peneliti di Balai Penelitian Tanah, Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. Buku yang berjudul *Pemberdayaan Organisme Tanah untuk Pertanian Ramah Lingkungan*, penulis mencoba menyampaikan berdasarkan pengalaman pribadi sebagai anak petani, karya ilmiah hasil penelitian, dan telaah lain dari sumber-sumber yang dapat dipercaya.

Diterbitkannya buku ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai permasalahan pertanian yang berkembang di Indonesia dengan berbasis pada kajian peranan sumber daya hayati tanah sesuai dengan bidang ilmu yang dikuasai penulis. Apa yang terkandung dalam buku ini masih sangat terbatas sesuai dengan kapasitas penulis sebagai seorang peneliti selama 32 tahun.

Penulis sampaikan terima kasih kepada Redaksi Pelaksana, Pejabat Struktural, dan Para Peneliti Lingkup Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, khususnya Balai Penelitian Tanah atas dukungan dan diterbitkannya buku ini. Semoga amalan baik tersebut mendapatkan imbalan setimpal dari Alloh SWT. Atas dukungan semua pihak disampaikan terima kasih, semoga dengan diterbitkannya buku ini memberikan manfaat bagi semua pihak.

Penulis menyadari diterbitkannya buku ini hanyalah merupakan bagian kecil dari permasalahan-permasalahan yang ada di lapangan. Kritik dan saran yang membangun dari para pembaca sangat diharapkan untuk penyempurnaan buku ini.

Bogor, Agustus 2014

Penulis

Subowo G.

KATA PENGANTAR

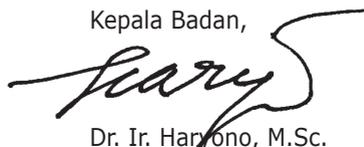
Semenjak tahun 70an Indonesia telah mencanangkan peningkatan produksi pertanian secara intensif untuk memenuhi kebutuhan pangan masyarakat yang semakin meningkat. Penggunaan pupuk anorganik dan pestisida menjadi "wajib" untuk meningkatkan produktivitas tanah dan tanaman. Puncak prestasi produksi pangan dicapai pada tahun 1984, Indonesia telah dinyatakan mampu berswasembada pangan, khususnya beras. Seiring dengan waktu, tingkat produksi pertanian tidak mampu mengimbangi kebutuhan penduduk yang terus mengalami peningkatan. Disinyalir beberapa lahan pertanian intensif telah jenuh produksi (*levelling off*), banyak mengalami alih fungsi ke lahan non pertanian, bahkan sebagian telah mengalami degradasi akibat terganggunya keseimbangan hara tanah dan ekosistem, kandungan bahan organik tanah rendah, populasi organisme tanah didominasi kelompok mikroorganisme, dan peranan fauna tanah hilang.

Upaya pemulihan daya dukung tanah perlu dilakukan dengan memberikan kondisi yang baik untuk berkembangnya populasi organisme tanah, terutama fauna/cacing tanah. Pengembalian bahan organik sisa panen dan aplikasi pupuk anorganik secara berimbang (*budi daya semi-organik*) serta menekan penggunaan pestisida sintetik merupakan langkah penting untuk mencapai sistem budaya pertanian ramah lingkungan. Pelestarian pelaku ekosistem tanah perlu dilakukan, meliputi kelompok organisme autotrof sebagai produsen, kelompok mikroorganisme heterotrof sebagai pengurai, dan kelompok fauna sebagai konsumen. Keseimbangan ekosistem ini akan menciptakan kelestarian daya dukung lahan, dan murah dalam pengelolaan lingkungan.

Buku *Pemberdayaan Organisme Tanah untuk Pertanian Ramah Lingkungan* ini disusun dalam upaya memberikan sumbangsih kepada masyarakat luas dalam upaya mencapai produksi pertanian yang lestari dan ramah lingkungan yang berbasis pada daya dukung hayati lokal/setempat. Para pembaca diharapkan mendapatkan tambahan pengetahuan dan manfaat tentang pentingnya pemberdayaan organisme tanah dalam sistem produksi pertanian. Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian buku ini. Amin.

Bogor, Agustus 2014

Kepala Badan,



Dr. Ir. Harjono, M.Sc.

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
I. PENDAHULUAN	1
II. PERMASALAHAN USAHA TANI DI KAWASAN TROPIKA BASAH.....	5
2.1. Karakteristik tanah tropika basah	5
2.2. Daya dukung sumber daya hayati tanah tropika basah	7
2.3. Permasalahan usaha tani tanah tropika basah	8
III. PERANAN ORGANISME TANAH FUNGSIONAL UNTUK KESUBURAN TANAH.....	12
3.1. Mikroorganisme tanah fungsional	12
3.2. Fauna tanah fungsional	15
IV. ORGANISME TANAH UNTUK PENGENDALIAN BAHAN ORGANIK TANAH	20
4.1. Peranan cacing tanah <i>endogaesis-geofagus</i> dalam konservasi bahan organik tanah.....	21
4.2. Peranan asosiasi <i>Azolla</i> dan Mikroalga Blue Green Algae (BGA) sebagai sumber bahan organik tanah	26
V. ORGANISME TANAH UNTUK PENINGKATAN KESUBURAN TANAH.....	28
5.1. Pemanfaatan organisme tanah untuk peningkatan ketersediaan hara N	30
5.2. Pemanfaatan organisme tanah untuk peningkatan ketersediaan hara P	32
5.3. Pemanfaatan cacing tanah untuk perbaikan sifat fisik tanah	34
5.4. Organisme tanah untuk pencegahan erosi dan pencucian hara.....	36
VI. KELAYAKAN TANAH UNTUK APLIKASI PUPUK HAYATI.....	39
6.1. Kesesuaian populasi organisme tanah <i>native</i> fungsional untuk pertanian	40
6.2. Kandungan bahan organik dan hara tanah	42
6.3. Kandungan enzim <i>nitrogenase</i> dan enzim <i>fosfatase</i> tanah	47
VII. PERKEMBANGAN PUPUK HAYATI	52
7.1. Perkembangan produksi pupuk hayati	52
7.2. Perkembangan pemanfaatan pupuk hayati untuk lahan pertanian	66
7.3. Teknik aplikasi/inokulasi pupuk hayati	71
VIII. PENUTUP	76
IX. DAFTAR PUSTAKA	78

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Pengaruh residu bahan organik pupuk kandang pada tanaman tomat terhadap pertumbuhan dan produksi kacang hijau	6
Tabel 2.	Dinamika populasi cacing tanah <i>Pheretima hupiensis</i> pada beberapa tipe penggunaan lahan di Banten	7
Tabel 3.	Efisiensi pemupukan N untuk tanaman hortikultura semusim antara praktek petani dan introduksi teknologi di Wonosobo, Jawa tengah	8
Tabel 4.	Kandungan hara yang terangkut keluar dari subsistem tanah sawah melalui hasil panen	10
Tabel 5.	Populasi fauna tanah pada beberapa sistem budi daya pertanian	10
Tabel 6.	Pengaruh inokulasi <i>Rhizobium</i> strain NC-92 terhadap pertumbuhan kacang tanah	15
Tabel 7.	Kepadatan rata-rata tahunan <i>Arthropoda</i> (individu/m ²) pada intensitas kebakaran rendah dan tinggi di lahan hutan <i>Pinus helepensis</i> di Yunani	17
Tabel 8.	Kandungan hara makro beberapa sumber bahan organik tanah	20
Tabel 9.	Matrik korelasi populasi organisme tanah terhadap kandungan bahan Organik tanah dan pH tanah	22
Tabel 10.	Pengaruh cacing tanah dan bahan organik terhadap biomas dan hasil jagung di rumah kaca	24
Tabel 11.	Hasil analisa tanah setelah panen jagung, pada tanah Ultisols Lebak di rumah kaca	25
Tabel 12.	Beberapa organisme tanah fungsional penting untuk perbaikan kesuburan tanah	29
Tabel 13.	Pengaruh pengolahan tanah, cara pemberian bahan organik, dan inokulasi <i>P. hupiensis</i> terhadap produksi kedelai pada tanah Ultisols	32
Tabel 14.	Korelasi populasi mikroba pelarut fosfat (MPF) dengan beberapa sifat tanah Ultisols Lampung pada tanaman jagung ..	33
Tabel 15.	Pengaruh cacing tanah terhadap sifat fisik tanah Ultisols	37
Tabel 16.	Sifat fisik dan kimia kascing <i>Pheretima hupiensis</i> dan tanah disekitarnya (Palehumults)	38
Tabel 17.	Perkembangan populasi mikroorganisme perlakuan mikroorganisme penambat N (<i>Azotobacter</i>) selama 3 bulan pengamatan	39
Tabel 18.	Pengaruh inokulasi formulasi pupuk hayati konsorsia terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman kedelai umur 9 MST	43
Tabel 19.	Pengaruh pemupukan dan ameliorasi terhadap populasi organisme tanah dan produksi jagung pada tanah <i>Plinthic Kandiudult</i> , Lampung	45

Tabel 20. Pengaruh pupuk hayati terhadap pertumbuhan dan berat daun segar saat panen di rumah kaca	46
Tabel 21. Pengaruh pemberian N dan inokulasi <i>Bradyrhizobium japonicum</i> terhadap jumlah bintil akar dan produksi kedelai dan kacang hijau	46
Tabel 22. Pengaruh aktivitas enzim <i>nitrogenase</i> terhadap pertumbuhan kedelai pada beberapa sistem budi daya	47
Tabel 23. Pengaruh inokulasi bakteri pelarut P dan pupuk P terhadap aktivitas <i>fosfatase</i> tanah dan P-tersedia tanah <i>Andisol</i> di rumah kaca	49
Tabel 24. Korelasi antara kandungan <i>fosfatase</i> , P -tersedia, dan hasil jagung	50
Tabel 25. Jenis dan populasi konsorsia pupuk hayati dari mikroorganisme	68
Tabel 26. Pengaruh aplikasi pupuk hayati dengan diikuti pemberian sumber energi dan hara serta bahan ikutan lain	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Daur energi dan hara dalam ekosistem tanah	2
Gambar 2. Kandungan nitrogen dalam biomassa dan tanah di ekosistem hutan tropika.....	5
Gambar 3. Bintil akar tanaman <i>Leguminosae</i> tempat simbiose mutualistik dengan bakteri <i>Rhizobium</i> penambat N ₂ -udara	13
Gambar 4. Hubungan pasokan energi dan N kerjasama saling menguntungkan antara bakteri <i>Rhizobium</i> dengan tanaman <i>Leguminosae</i> di dalam bintil akar	13
Gambar 5. Sebaran hife dan spora <i>Endomikorisa - Vesikular Aruskular Mikorisa</i> (VAM)	14
Gambar 6. Klasifikasi ukuran kelompok fauna tanah	16
Gambar 7. Cacing tanah endogaesis-geofagus <i>Pheretima</i> sp.	18
Gambar 8. Habitus simbiose mutualistik BGA dan <i>Azolla</i> sebagai sumber bahan organik tanah kaya N	26
Gambar 9. Daur hara N alami di dalam tanah	31
Gambar 10. Daur hara P dalam tanah untuk tanaman	34
Gambar 11. Hubungan aktivitas pelepasan CO ₂ oleh biomassa organisme tanah dengan kandungan C-organik tanah	44
Gambar 12. Hubungan hasil jagung terhadap kandungan P-tersedia dan enzim fosfatase tanah	50
Gambar 13. Koloni <i>Azotobacter</i> sp penambat N nonsimbiotik pada media agar miring	56
Gambar 14. Zone bening (<i>hallo zone</i>) bakteri pelarut P (kiri) dan fungi pelarut P (kanan) pada media agar padat	62
Gambar 15. Bak pengomposan yang telah ditutup plastik dan pemanenan kompos	75

I. PENDAHULUAN

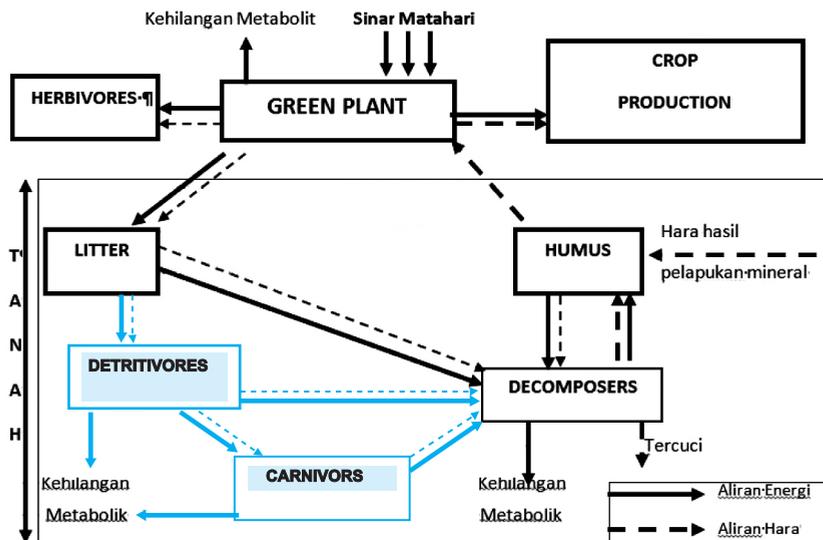
Tanah merupakan suatu sistem kehidupan yang kompleks yang didalamnya antara lain mengandung bahan mineral, bahan organik, air, udara, dan berbagai jenis organisme. Organisme tanah (makro dan mikroorganisme) merupakan salah satu bagian tanah yang memiliki beragam fungsi untuk menjalankan berbagai proses penting bagi kehidupan terestrial. Sebagai negara kepulauan di kawasan vulkanik tropika basah dengan jumlah pulau lebih dari 17 ribu, panjang pantai lebih dari 81 ribu km, dan indeks erupsi lebih dari 99% (Munir 1996) Indonesia memiliki keanekaragaman sumber daya hayati sangat tinggi (*megabiodiversitas*). Pembentukan daratan dipengaruhi oleh kekuatan endogen ataupun vulkanik menghasilkan bentang lahan berombak sampai berbukit. Faktor pembentuk tanah seperti curah hujan tinggi, topografi berombak-bergelombang menyebabkan degradasi lahan seperti erosi dan aliran permukaan berjalan intensif. Penanggulangan degradasi lahan dengan bangunan konservasi tanah dan air serta pengadaan infrastruktur pertanian lainnya menjadi mahal. Pengelolaan sumber daya lahan berbasis daya dukung lokal/setempat dan mengurangi asupan dari luar penting dilakukan untuk mengurangi biaya produksi, sehingga kegiatan usaha tani menjadi murah dan efisien serta dapat menjaga keseimbangan ekosistem dan ramah lingkungan.

Tingginya laju penyegaran mineral oleh aktivitas vulkanik dan curah hujan pada daerah tropika basah mengakibatkan tingginya keanekaragaman hayati dan pembentukan tanah berlangsung intensif, namun tanah cepat mengalami penuaan. Tanah-tanah di daerah tropika basah didominasi oleh tanah-tanah tua seperti Oxisols dan Ultisols dengan lapisan olah tipis. Kesuburan tanah untuk mendukung pertumbuhan tanaman cepat mengalami penurunan dan bahkan cepat mengalami degradasi, kandungan bahan organik dan pH tanah rendah, serta terdapat lapisan bawah yang padat (argilik). Oleh karena itu pengembangan pertanian yang lestari dan ramah lingkungan selayaknya memperhatikan dan memberdayakan sumber daya hayati tanah, mengurangi laju penyusutan bahan organik, mengurangi erosi, dan pencucian hara.

Tipisnya lapisan olah tanah mengakibatkan rendahnya daya dukung tanah untuk tanaman. Tanpa adanya tambahan masukan yang cukup, akar tanaman semusim akan banyak mengalami hambatan dan tanaman tumbuh merana. Demikian juga jelajah akar tanaman tahunan yang berakar dalam akan mengalami hambatan pertumbuhan akibat tertahan oleh lapisan padat di lapisan bawah (*subsoil*). Untuk memperbaiki kondisi fisik tanah ini dapat diupayakan dengan perbaikan stabilitas agregat tanah, perbaikan aerasi tanah di lapisan padat/argilik dan pencampuran kembali tanah lapisan bawah dengan lapisan atas. Perbaikan sifat fisik secara mekanik pada saat menjelang tanam untuk tanaman semusim yang dilakukan di musim hujan dapat merusak struktur agregat tanah, sehingga mudah tererosi. Pada tanaman tahunan, pengolahan tanah secara mekanik dapat merusak perakaran.

Fauna tanah pada lahan pertanian tanaman pangan maupun tanaman tahunan (perkebunan) mampu membuat liang di dalam tanah dapat meningkatkan infiltrasi-perkolasi dan mengurangi erosi tanah serta mempertebal lapisan olah, sistem usaha tani lebih efisien, lestari, dan ramah lingkungan.

Mikroorganisme tanah dan fauna tanah memiliki peranan penting dalam melaksanakan berbagai aktivitas metabolisme yang berlangsung di dalam subsistem tanah. Organisme tanah berperan mempengaruhi kesuburan dan produktivitas tanah melalui perbaikan sifat fisik tanah, peningkatan ketersediaan hara, konservasi bahan organik dan hara tanah, serta dapat berperan sebagai hama penyakit tular tanah ataupun sebagai predator. Di dalam daur hara dan energi di dalam tanah, fauna tanah (*herbifora*, *carnifora*, dan *detritifora*) memiliki peranan penting dalam menghancurkan secara fisik (fragmentasi) bahan organik, selanjutnya oleh mikroba tanah (dekomposer) bahan organik didekomposisi dan dilepaskan sebagai senyawa anorganik (hara) yang dapat diserap oleh tanaman. Fauna tanah di dalam subsistem tanah, berperanan dalam menjaga daur hara dan energi, memaksimalkan nilai fungsi bahan organik, meningkatkan kekhayatan tanah dan organisme tanah serta mengurangi kecepatan kehilangan bahan organik (Gambar 1). Aplikasi bahan organik segar sebagai pakan fauna tanah dapat memberikan nilai tambah peruntukan bahan organik untuk memperbaiki sifat fisik tanah dan memperpanjang daur bahan organik di dalam subsistem tanah.



Gambar 1. Daur energi dan hara dalam ekosistem tanah (modifikasi dari Wallwork 1970).

Organisme autotrof tanah dapat berkembang pesat membutuhkan hara anorganik sebagai sumber makanan dan sinar matahari (*fotoautotrof*) atau dari proses kimia (*chemoautotrof*) sebagai sumber energi. Sementara organisme heterotrof (fauna), yang berperan sebagai pemangsa organisme hidup (*carnifora*) atau pemakan tumbuhan hijau (herbifora) dan pemakan serasah/sisa-sisa bahan organik (*detritifora*) yang membutuhkan bahan organik sebagai sumber hara dan energi menjadi terdesak. Kegiatan pengolahan tanah juga mendesak fauna tanah untuk bermigrasi ke tempat lain, akibatnya (1) populasi organisme tanah didominasi oleh kelompok mikroorganisme (fungi, bakteri), dan (2) rangkaian proses daur energi dan hara di dalam subsistem tanah menjadi pendek yang banyak diperankan oleh kelompok produsen dan pengurai (dekomposer). Organisme dekomposer tanah didominasi oleh kelompok mikroorganisme yang secara langsung merombak bahan organik dengan dilepaskan sebagai CO₂, kandungan bahan organik tanah semakin merosot dan fauna tanah semakin tertekan. Dekomposisi bahan organik pada kondisi aerobik 20–40% C-organik terasimilasi dalam sel dan sisanya sebagai CO₂ ataupun produk samping. Diantaranya adalah C yang terasimilasi dalam pembentukan sel baru pada bakteri aerobik sebanyak 5–10% dan pada bakteri anaerobik hanya sebanyak 2–5% (Alexander 1977). Selanjutnya dikatakan bahwa dalam proses dekomposisi bahan organik, karbon (C) banyak hilang oleh respirasi mikroba tanah (Coleman dan Crossley 1995). Dengan kondisi ini konservasi C-organik tanah menjadi lemah, sehingga laju penyusutan kandungan bahan organik tanah semakin cepat.

Semakin rendahnya kandungan bahan organik tanah serta adanya asupan bahan-bahan pestisida yang berlebihan pada saatnya juga akan menekan populasi mikroorganisme tanah itu sendiri. Akibatnya populasi organisme (makro maupun mikroorganisme) tanah semakin menurun dan konservasi bahan organik tanah semakin rendah. Terganggunya aktivitas hayati/organisme tanah, merupakan salah satu faktor penggerak dinamika kesuburan tanah, menyebabkan terhentinya proses keseimbangan daur hara dan energi subsistem tanah. Akibatnya, tanah menjadi mati dan tidak mampu mendukung secara alami untuk pemulihan pemenuhan kebutuhan tanaman. Pemberdayaan aktivitas organisme tanah perlu diimbangi pemberian amelioran ataupun pupuk (organik maupun anorganik) untuk mendukung aktivitas organisme tanah secara utuh dalam daur hara dan energi subsistem tanah.

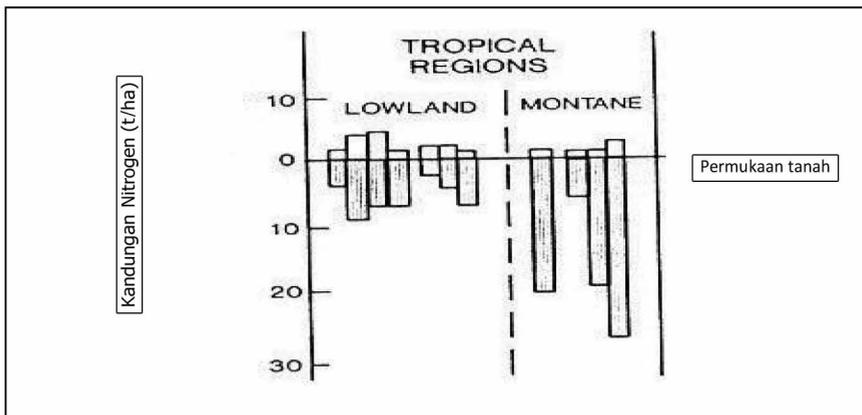
Pemberdayaan sumber daya hayati tanah untuk meningkatkan produktivitas tanah perlu menyediakan media tanah yang sesuai bagi aktivitas masing-masing organisme fungsional target agar dicapai peningkatan efisiensi pengelolaan sumber daya tanah secara lestari. Giller *et al.* (1997) menyatakan bahwa dalam upaya mendukung pengembangan pertanian intensif di kawasan tropika, yang sebagian besar petaninya memiliki kemampuan memberikan input/pupuk lemah/sedikit, pemberdayaan sumber daya hayati tanah relevan

untuk diupayakan. Evaluasi kesesuaian lahan pertanian ataupun perbaikan kesuburan tanah hendaknya juga mempertimbangkan peranan hayati tanah, sehingga seluruh komponen yang mempengaruhi proses produksi tanaman dapat secara menyeluruh diketahui secara tepat dan terarah. Pemberdayaan sumber daya lokal termasuk sumber daya hayati tanah penting untuk diupayakan dalam mendukung pengembangan pertanian ke depan.

II. PERMASALAHAN USAHA TANI DI KAWASAN MEGABIODIVERSITAS TROPIKA BASAH

2.1. Karakteristik tanah tropika basah

Indonesia merupakan salah satu negara *megabiodiversitas* di kawasan tropika basah, tetapi juga memiliki tanah mineral bermasalah dalam kaitannya dengan tingginya laju dekomposisi bahan organik, erosi tanah, dan pencucian hara. Las dan Setiorini (2010) mendapatkan bahwa lahan pertanian di Indonesia $\pm 73\%$ memiliki kandungan C-organik tanah kurang dari 2% atau rendah. Sanchez (1976) mengatakan bahwa rendahnya kandungan bahan organik tanah tropika disebabkan oleh temperatur yang tinggi dan cepatnya laju dekomposisi. Tingginya laju dekomposisi bahan organik tanah mengakibatkan efektivitas nilai fungsi bahan organik menjadi rendah. Wambeke (1992) menyatakan bahwa nilai konstanta laju dekomposisi bahan organik tanah pasiran dengan regim temperatur isohipertermik di Nigeria (tropika) 4 kali lebih tinggi dibanding di Inggris (subtropika). Selanjutnya dikatakan bahwa rata-rata masa fungsional serasah daun di tanah basah selama 12 bulan, tetapi di tanah lahan kering akan berlangsung lebih cepat. Jordan (1985) mendapatkan bahwa kandungan bahan organik tanah yang dicerminkan oleh kandungan Nitrogen (N) di hutan pegunungan lebih tinggi dibanding di hutan dataran rendah (Gambar 2).



Gambar 2. Kandungan Nitrogen dalam biomassa dan tanah di ekosistem hutan tropika (Jordan 1985).

Pada wilayah dengan curah hujan tinggi laju degradasi tanah berlangsung cepat. Tanah umumnya didominasi oleh Oxisols, Ultisols, dan Alfisols (La/ 1995). Kesuburan tanah pada lahan pertanian intensif umumnya rendah akibat

ketebalan lapisan tanah tipis, pH tanah masam, kandungan bahan organik rendah, dan terdapat lapisan padat di bawah lapisan olah. Akibatnya daya dukung tanah untuk pertumbuhan tanaman menjadi rendah. Pemanfaatan sumber daya hayati tanah merupakan strategi penting dalam upaya memperbaiki sifat fisika tanah, laju perkolasi-infiltrasi, mempertahankan kandungan bahan organik tanah, mencegah erosi dan pencucian hara, dan jelajah akar tanaman menjadi semakin luas, serta ketersediaan air tanah menjadi lebih baik.

Ketahanan nilai fungsional bahan organik di kawasan tropika, pada lahan basah lebih tahan dibanding lahan kering dan pada dataran tinggi lebih tahan dibanding di dataran rendah. Sudriatna dan Subowo (2007) mendapatkan bahwa pengaruh residu 5 t/ha bahan organik dari pupuk kandang yang diberikan pada tanaman tomat di Bogor tidak berpengaruh nyata terhadap pertumbuhan kacang hijau yang ditanam musim berikutnya (4 bulan setelah aplikasi bahan organik) (Tabel 1). Untuk itu pengembangan pertanian organik dengan mengandalkan pemberian bahan organik sebagai pemasok hara dan perbaikan kesuburan tanah semata perlu mempertimbangkan ketersediaan bahan organik setempat, daya dukung lahan/tanah, dan jenis komoditi yang akan dikembangkan. Subowo *et al.* (2008) mengemukakan bahwa pengembangan pertanian organik layak dilakukan pada wilayah yang dekat dengan konsumen/pasar, memiliki laju dekomposisi bahan organik tanah rendah, memiliki tingkat kesuburan kimia tanah tinggi, tidak terdapat potensi pencemaran oleh logam berat dan pestisida, serta komoditas yang dikembangkan memiliki kesesuaian lahan sangat sesuai (S-1) dan bernilai ekonomi tinggi.

Tabel 1. Pengaruh residu bahan organik pupuk kandang setelah pertanaman tomat terhadap pertumbuhan dan produksi kacang hijau

No.	Residu bahan organik tanah*	Tinggi tanaman cm	Brangkasan ----- t/ha-----	Biji kering
1.	Kontrol	66,1 a*	1,95 a	1,27 a
2.	Pupuk kandang (Pukan)	74,2 a	2,17 a	1,37 a
3.	Pukan + jerami	73,5 a	2,10 a	1,27 a
4.	Kompos	74,2 a	2,13 a	1,39 a

Keterangan: Bahan organik 5,0 t/ha diberikan 4 bulan sebelumnya pada tanaman tomat.

* Angka yang diikuti dengan huruf yang sama dalam kolom yang sama tidak berbeda nyata pada uji DMRT 5%

Sumber: Sudriatna dan Subowo 2007.

2.2. Daya dukung sumber daya hayati tanah tropika basah

Diperkirakan sekitar 100 – 150 genus dari tumbuhan *monoecious* dan *diecious* dengan 25.000 – 30.000 spesies terdapat di Indonesia (Budiyanto 2013). Keanekaragaman hayati Indonesia dikenal sebagai yang terlengkap di dunia. Itulah sebabnya Indonesia disebut sebagai negara *Megabiodiversitas* atau negara *Megadiversity*. Peningkatan keanekaragaman dan populasi hayati di dalam tanah mampu memperpanjang daur hara, mencegah kehilangan hara N, P, dan K dan selanjutnya dapat dilepaskan kembali ke dalam subsistem tanah. Keanekaragaman sumber daya hayati tanah (fauna tanah/cacing tanah) pada lahan terbuka (padang rumput) dan lahan pertanian tanaman pangan pada umumnya rendah sebagai konsekuensi dari tingginya terpaan radiasi panas matahari, pengolahan tanah intensif setiap musim tanam, penggunaan pupuk buatan dan pestisida yang berlebihan (Tabel 2). Pada musim kemarau fauna tanah yang memiliki mobilitas tinggi bermigrasi ke habitat lain yang lebih sesuai. Lahan dengan tanaman tahunan yang memiliki naungan dan tidak ada pengolahan tanah intensif menjadi habitat utama bagi fauna tanah. Konservasi fauna tanah berperan penting dalam memperpanjang daur hara dan energi serta memiliki kemampuan memperbaiki sifat fisik tanah. Konservasi fauna tanah perlu diupayakan dengan menyediakan habitat yang tepat di sekitar kawasan lahan produksi.

Tabel 2. Dinamika populasi cacing tanah *Pheretima hupiensis* pada beberapa tipe penggunaan lahan di Banten

No	Musim pengamatan	Populasi cacing tanah pada beberapa penggunaan lahan					
		Rumput	Tanaman pangan	Belukar	Pisang	Sengon	Karet
.....ekor/m ²							
1.	Musim Hujan (MH) (Maret)	2	4	7	45	20	50
2.	Peralihan MH-MK (Juli)	-	6	26	17	52	36
3.	Musim Kemarau (MK) (Agustus)	-	1	16	14	19	12
Jumlah		2	11	49	76	91	98

Sumber: Subowo (2002).

Sumber daya hayati tanah (mikroorganisme maupun fauna tanah) pada prinsipnya juga mampu mengendalikan ketersediaan hara tanah utamanya N dari hasil penambatan N₂-udara dan P hasil pelepasan/pelarutan dari jerapan/ikatan P-tanah serta perbaikan sifat fisik tanah, dengan kata lain pemanfaatan sumber daya hayati tanah merupakan langkah yang tepat dan efisien sejalan dengan perkembangan ekosistem tanah untuk mendukung produksi tanaman. Fauna dan fungi tanah merupakan organisme heterotrof yang dalam hidupnya membutuhkan hara dan energi dari senyawa organik tanah. Akar tanaman, alga,

dan sebagian besar bakteri merupakan organisme autotrof yang membutuhkan energi dari sinar matahari dan hara dari senyawa/unsur anorganik. Organisme heterotrof memecahkan senyawa-senyawa organik kompleks dan dilepaskan menjadi senyawa/unsur-unsur sederhana (anorganik) yang selanjutnya dapat dimanfaatkan oleh organisme autotrof sebagai sumber hara. Selain itu, organisme tanah mampu melakukan perbanyakan diri (reproduksi) secara alami, sehingga mempunyai aktivitas yang dapat berlangsung secara terus-menerus sesuai daya dukung.

2.3. Permasalahan usaha tani tanah tropika basah

Dalam upaya pemenuhan kebutuhan pangan nasional, pemerintah telah mencanangkan pengembangan pertanian tanaman pangan semusim secara intensif. Sementara itu, budi daya padi sawah dinilai belum efisien dalam penggunaan air dan pupuk. Efisiensi penggunaan pupuk pada sistem pertanaman padi masih rendah sekitar 30-50% (de Datta 1987) bahkan untuk tanaman hortikultura semusim dengan introduksi teknologi baru efisiensi pemupukan N lebih rendah lagi (19 – 26%) (Tabel 3).

Tabel 3. Efisiensi pemupukan N untuk tanaman hortikultura semusim antara praktek petani dan introduksi teknologi baru di Wonosobo, Jawa tengah

Nama Petani	Komoditi	Input teknologi	Total pemupukan N (kg N/ha)	Efisiensi N (%)
Sudarto	Kubis	Teknologi baru	310	26
		Teknologi petani	849	12
	Kentang	Teknologi baru	415	19
		Teknologi petani	602	15
	Bawang daun	Teknologi baru	403	21
		Teknologi petani	415	7

Sumber: Neve, S.D. (2013)

Untuk menghasilkan 1 kg beras dibutuhkan air $\pm 2,00 - 4,00 \text{ m}^3$ dan hara N sebanyak $\pm 0,02 \text{ kg}$ atau setara $0,043 \text{ kg}$ urea. Tingginya takaran

dan intensitas pupuk dan pestisida serta tidak cukupnya pengembalian bahan organik ke dalam tanah, mengakibatkan biaya produksi meningkat dan resiko gangguan lingkungan juga semakin besar.

Masalah utama kegiatan usaha tani di kawasan tropika basah adalah mengenai kandungan hara tanah rendah, ketersediaan bahan organik tanah, dan kemampuan tanah menahan air (William dan Joseph 1976). Mineral-mineral primer maupun bahan organik tanah akan lebih cepat melapuk dan menghasilkan mineral sekunder serta melepaskan unsur hara yang terkandung didalamnya. Tingginya laju pelapukan, pencucian maupun erosi tanah dapat mempercepat penyusutan ketersediaan hara dan kandungan bahan organik tanah, iluviasi liat ke lapisan bawah, dan tanah lapisan atas banyak mengalami erosi. Perpanjangan daur hara dan energi dalam subsistem tanah perlu ditingkatkan, sehingga hara dan energi di dalam tanah tidak cepat mengalami penyusutan. Keanekaragaman hayati pada subsistem tanah berperan langsung maupun tidak langsung terhadap daur hara dan air, timbulnya hama-penyakit, pertumbuhan, dan kualitas tanaman (Estrade *et al.* 2010).

Kondisi wilayah Indonesia yang berupa kepulauan sangat perlu diupayakan pemberdayaan sumber daya lokal/setempat baik sumber daya biotik maupun abiotik. Perpanjangan daur hara dengan melibatkan organisme tanah setempat secara utuh dari produsen-konsumen-pengurai maupun menekan percepatan kehilangan hara dan meningkatkan nilai fungsional bahan organik. Menurut Moss (1981) ada 3 faktor penting untuk mengatasi permasalahan tanah tropika (1) bahan organik untuk mengendalikan air dan aktivitas kimia tanah, (2) organisme tanah berperan dalam penyediaan dan pengendalian hara, dan (3) pengembangan sistem perakaran untuk pencegahan erosi.

Sebagian besar tanah mineral di Indonesia memiliki kandungan bahan organik rendah, pemberdayaan organisme tanah yang mampu menekan penyusutan bahan organik penting diupayakan. Keracunan Al, cadangan dan ketersediaan hara rendah, agregat tanah rusak oleh pengolahan tanah merupakan faktor yang menyebabkan kualitas tanah masam rendah (Sabiham *et al.* 2010). Disisi lain pengurangan subsidi pupuk buatan (urea, KCl, dan SP-36) diharapkan dapat mendorong pemanfaatan pupuk organik menjadi meningkat.

Hara yang diangkut keluar melalui panen cukup besar dan berlangsung terus menerus, sehingga pengurusan hara dari subsistem tanah pertanian intensif semakin besar (Tabel 4). Pengembangan pertanian semi organik (perpaduan input organik dan anorganik) mampu mengaktifkan organisme tanah kelompok heterotrof maupun autotroph. Berkembangnya organisme autotrof maupun heterotrof tanah dalam sistem pertanian semi organik dapat memperkaya keanekaragaman hayati tanah yang tentunya dapat menyangga stabilitas ekosistem tanah. Pada sistem pertanian semi organik, populasi nematoda tanah (Anwar *et al.* 2008) dan cacing tanah (Anwar *et al.* 2010) lebih tinggi dan berbeda nyata dibanding sistem pertanian organik maupun sistem konvensional (anorganik) (Tabel 5). Akibatnya konservasi kesuburan fisik dan

Tabel 4. Kandungan hara yang terangkut keluar dari subsistem tanah sawah melalui hasil panen

No.	Hara terangkut panen	Gabah		Jerami	
		Bobot (kg/ha)	Proporsi (%)	Bobot (kg/ha)	Proporsi (%)
1.	Nitrogen (N)	14,20	69,60	6,20	30,40
2.	Kalium (K)	2,30	23,30	7,60	76,70
3.	Magnesium (Mg)	2,50	50,50	2,40	49,50
4.	Calsium (Ca)	0,19	10,30	1,60	89,70
5.	Fosfat (P)	0,23	45,00	0,28	55,00

Sumber: Anwar *et al.* (1987).

Tabel 5. Populasi fauna tanah pada beberapa sistem budi daya pertanian

Populasi fauna tanah	Sistem budi daya pertanian			Referensi
	Konvensional*	Semi organik	Organik	
Nematoda (ekor/100 g tanah)	60,5 b**	96,7 a	79,0 ab	Anwar <i>et al.</i> (2008)
Cacing tanah (ekor/dm ³ tanah)	3,5 b	6,5 a	3,8 b	Anwar <i>et al.</i> (2010)

Keterangan: * Sistem budi daya pertanian dengan input pupuk dan pestisida sintetis/buatan.

** Angka yang diikuti dengan huruf yang sama dalam baris yang sama tidak berbeda nyata pada uji DMRT 5%.

kimia tanah dan nilai fungsional bahan organik untuk mendukung pengembangan pertanian berkelanjutan ramah lingkungan dapat berlangsung lebih lama. Pendekatan sistem pertanian semi organik layak untuk dipertimbangkan dalam upaya mencapai pengembangan pertanian ramah lingkungan.

Pada tahun 2010, PBB telah menetapkan sebagai Tahun Keanekaragaman Hayati atau "*International Year of Biodiversity*". Penetapan ini disadari agar efisien dalam memanfaatkan sumber daya lokal yang ada dan tidak merusak lingkungan. Pengembangan komoditas lokal yang telah beradaptasi dengan

habitat disekitarnya akan efektif dalam mengeksploitasi sumber daya dan murah dalam pengelolaannya. Oleh karena itu, pemberdayaan sumber daya hayati tanah fungsional positif yang potensial dan sesuai dengan daya dukung, perlu dikembangkan/dikaji secara lebih mendalam. Keanekaragaman makrofauna tanah dan fungsi ekosistem menunjukkan hubungan yang sangat kompleks dan belum banyak diketahui, serta perhatian untuk melakukan konservasi terhadap keanekaragaman makrofauna tanah masih sangat terbatas (Lavelle *et al* 1994). Sistem pengelolaan lahan merupakan faktor kunci dalam konservasi makrofauna tanah. Alih guna lahan hutan menjadi lahan pertanian atau peruntukan lainnya cenderung menurunkan biodiversitas makrofauna tanah. Pengelompokan daya dukung hayati tanah dalam satu satuan peta tanah (tipologi lahan) yang tepat akan memudahkan dalam pengaturan pola pengelolaan lahan dengan pilihan komoditi yang tepat sesuai dengan kebutuhan masing-masing satuan peta kesesuaian komoditi terhadap pengkayaan hayati tanah.

Dari gambaran di atas menunjukkan bahwa pelestarian dan pemberdayaan sumber daya hayati tanah lokal secara fungsional dalam sistem usaha tani pertanian penting untuk diupayakan agar sistem produksi pertanian menjadi efisien/murah, lestari dan ramah lingkungan.

III. PERANAN ORGANISME TANAH FUNGSIONAL UNTUK KESUBURAN TANAH

Letak geografis Indonesia yang berada di kawasan tropika basah menghasilkan tanah-tanah tua yang dominan dan memiliki sifat fisika cukup baik antara lain dari stabilitas, struktur, hidrolik konduktivitas, dan aerasi, namun memiliki sifat kimia kurang baik yang dicerminkan oleh kekahatan hara, kapasitas tukar kation (KTK) rendah, kapasitas tanah menahan air rendah, sematan P tinggi, dan Al/Fe dapat meracun tanaman (Lal 1995). Perpanjangan daur energi dan hara merupakan langkah yang penting untuk mengurangi laju penyusutan bahan organik tanah dan juga menahan kehilangan hara/pupuk dalam subsistem. Hara bebas yang tidak dimanfaatkan oleh akar tanaman dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme autotrof, sehingga dapat terhindar dari pencucian. Organisme tanah heterotrof seperti fauna, fungi, dan sebagian bakteri tanah dapat memperpanjang daur energi dan hara dari bahan organik dan secara bertahap dilepaskan kembali ke dalam tanah untuk dimanfaatkan oleh organisme lainnya, termasuk tanaman. Fauna tanah juga dapat memperbaiki aerasi tanah, meningkatkan stabilitas agregat tanah, meningkatkan perkolasi-infiltrasi dan menekan erosi tanah. Indonesia yang memiliki megabiodiversitas selayaknya mampu memberdayakan potensi sumber daya hayati tanah fungsional sebagai agen untuk mencegah kehilangan hara dan meningkatkan kesuburan tanah.

3.1. Mikroorganisme tanah fungsional

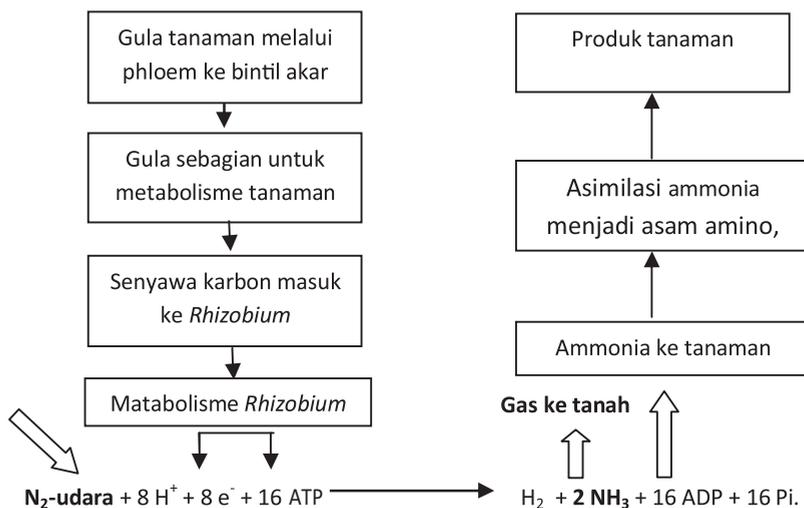
Hasil penelitian pada tanah kawasan vulkanik tropika basah seperti halnya di Indonesia menunjukkan bahwa secara alami keberadaan jenis organisme sudah cukup memadai. Secara fungsional belum seluruhnya organisme tersebut mampu mendukung kebutuhan produksi pertanian sesuai yang diharapkan, sehingga masih diperlukan pengkayaan/inokulasi organisme dari luar (pupuk hayati). Hal ini terjadi karena komoditas pertanian yang dibudidayakan dengan komoditas tertentu pada suatu ekosistem bukan merupakan hasil seleksi alam dari subsistem itu sendiri. Agar tidak terjadi perubahan ekosistem yang ekstrim, pemanfaatan organisme tanah fungsional lokal (*native*) dapat dimanfaatkan secara proporsional.

Inokulasi organisme yang mampu bersimbiose secara mutualistik (saling menguntungkan) dengan tanaman inang dan bersifat kompetitif dengan organisme lain disekitarnya mutlak diperlukan. Inokulasi bakteri *Rhizobium* mampu menambat N_2 -udara apabila bersimbiose dengan tanaman *Leguminosae* dengan membentuk bintil akar (Gambar 3). Dalam simbiosis ini, tanaman legum sebagai tanaman inang memasok energi untuk mendukung aktivitas penambatan N_2 oleh bakteri *Rhizobium* sebagai simbion. Selanjutnya N hasil penambatan oleh bakteri dapat dimanfaatkan oleh tanaman inang untuk mendukung pertumbuhannya/produksi.

Mekanisme dalam kerjasama ini ditunjukkan pada (Gambar 4). Demikian juga keberadaan *Endomikorisa-Vesikular Arbuskular Mikorisa* (VAM) yang hidup bersimbiose pada akar tanaman inang dan mampu meningkatkan serapan hara P (Gambar 5).



Gambar 3. Bintil akar tanaman *Leguminosae* tempat simbiosis mutualistik dengan bakteri *Rhizobium* penambat N_2 -udara. (Foto sumber: Anwar E.K.)



Gambar 4. Hubungan pasokan energi dan N kerjasama saling menguntungkan antara bakteri *Rhizobium* dengan tanaman *Leguminosae* di dalam bintil akar (Hunt 1997)



Gambar 5. Sebaran hifa dan spora *Endomikoriza - Vesikular Arbuskular Mikoriza* (VAM) (Sumber: Simanungkalit)

Apabila jumlah populasi organisme tanah fungsional yang ada tidak mencukupi, maka perlu ditingkatkan populasinya melalui perbaikan sifat-sifat tanah dengan ameliorasi ataupun pemupukan. Apabila jenis organisme fungsional belum tersedia dapat dilakukan inokulasi dengan menggunakan pupuk hayati yang sesuai. Hal ini diharapkan dapat dihindari adanya persaingan (kompetisi) antar spesies ataupun antar jenis organisme yang ada, sehingga tidak mengganggu keseimbangan ekosistem itu sendiri. Interferensi organisme fungsional baru dalam suatu ekosistem dapat mengakibatkan guncangan ekosistem yang bersifat positif maupun negatif. Untuk itu pemberdayaan sumber daya hayati native penting diupayakan dan hindari semaksimal mungkin intervensi organisme baru dari luar. Subowo *et al.* (1984) mendapatkan bahwa pengkayaan/inokulasi populasi *Rhizobium native* hasil dari perbanyakan dengan populasi awal $2.10^3 - 35.10^3$ cfu/g tidak berpengaruh nyata terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman kacang tanah. Sebaliknya inokulasi strain *Rhizobium* NC-92 yang memiliki efektivitas tinggi pada tanah bekas kolam ikan yang belum pernah ditanami tanaman legume dengan populasi *Rhizobium native* $1,5.10^3$ cfu/g mampu meningkatkan produksi kacang tanah >20% dari kontrol (Tabel 6). Penetapan populasi organisme fungsional tanah awal (*native*) penting agar dapat dihindari terjadinya kompetisi tersebut (*inter-spesifik* maupun *intra-spesifik*) dan untuk mengetahui efektivitas dari inokulan yang diintroduksi.

Tabel 6. Pengaruh inokulasi *Rhizobium* strain NC-92 terhadap pertumbuhan kacang tanah

Perlakuan	Berat kering tanaman	Berat kering bintil akar	Berat kering biji
	----- g/tanaman-----		Kg/ha
Inokulasi <i>Rhizobium</i> NC-92	11,3	0,17	674 b*
Tanpa inokulasi/kontrol	9,83	0,16	579 a

Keterangan: * Angka yang diikuti dengan huruf yang sama dalam kolom yang sama tidak berbeda nyata pada uji DMRT 5%.

Sumber : Subowo dan Prihatini (1987).

Sesuai dengan permasalahan pencucian hara N dan penyematan hara P yang tinggi, pemberdayaan beberapa organisme penambat N yang mampu memperkaya N tanah hasil dari penambatan N_2 udara oleh aktivitas enzim nitrogenase maupun organisme pelarut P yang mampu melepaskan sematan P tanah oleh aktivitas enzim *fosfatase* penting untuk diupayakan. Apabila aktivitas organisme fungsional *native* tidak mencukupi dapat dilakukan intervensi secukupnya. Sejalan dengan permasalahan hara makro N dan P yang esensial, aktivitas enzim nitrogenase dan fosfatase disekitar akar dapat dijadikan indikator/parameter aktivitas organisme fungsional *native* penambat N dan pelarut P. Pengetahuan tentang ambang batas kandungan enzim *nitrogenase* dan *fosfatase* di dalam tanah yang layak untuk kepentingan aplikasi pupuk hayati penambat N maupun pelarut P sangat perlu agar dapat dihindari adanya gangguan ekosistem tanah yang telah seimbang (*steady state*). Hal lain yang juga perlu diketahui ambang batas kelayakan aplikasi pupuk hayati adalah kandungan C-organik tanah yang merupakan sumber hara dan energi bagi kehidupan organisme *heterotrof* tanah.

3.2. Fauna tanah fungsional

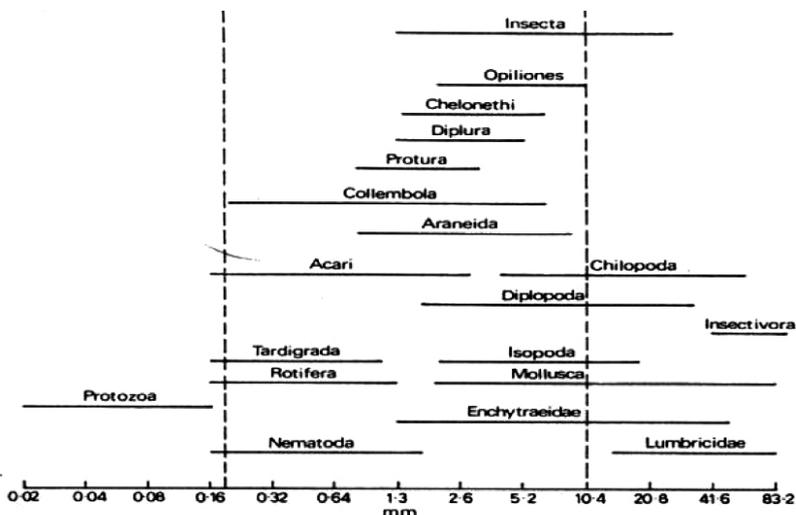
Fauna tanah adalah hewan yang secara permanen merupakan komponen ekosistem tanah yang salah satu atau lebih phase dalam siklus hidupnya berada dalam tanah atau serasah tanah (Richards 1978). Berdasarkan ukurannya fauna tanah dapat dipisahkan ke dalam 3 kelompok (Wallwork 1970), yaitu:

1. Mikrofauna dengan ukuran 20 μ - 200 μ
2. Mesofauna dengan ukuran >200 μ - 1,0 cm
3. Makrofauna dengan ukuran > 1,0 cm.

Di antara fauna yang ditemukan di dalam tanah, kelompok *Arthropoda* mendominasi jenis fauna di dalam tanah (Gambar 6). Keberadaan *Arthropoda* di dalam tanah pada prinsipnya untuk berlindung dari tekanan lingkungan dan

predator, dan memanfaatkan bahan organik sebagai sumber makanan. Peranan Arthropoda terhadap perbaikan kesuburan tanah pada prinsipnya pada perbaikan aerasi tanah, daur hara, dan pengendali hama-penyakit bawaan tanah. Beberapa predator yang hidup di dalam tanah dan mampu menekan perkembangan populasi organisme hama-penyakit ini antara lain dari kelompok insekta tanah (Collembola, Coleoptera, dll). Kelompok fungi tanah *Arthrotrix*, *Dactylaria*, *Dactylella*, dan *Harposporium*, dengan aerasi tanah yang baik mampu hidup di tanah masam lahan kering serta mampu mematikan Nematoda ataupun Protozoa yang banyak berperan sebagai penyakit pada akar tanaman (Alexander 1977). Fungi berperan juga dalam dekomposisi selulosa, hemiselulosa, pektin, dan lignin, sehingga dapat menekan populasi hama-penyakit yang banyak memiliki dinding sel dari bahan-bahan ini.

Mikrofauna Mesofauna Makrofauna



Gambar 6. Klasifikasi ukuran kelompok fauna tanah (Wallwork 1970).

Adanya gangguan lingkungan yang ekstrim, seperti pengolahan lahan, pembakaran, dan aplikasi pestisida, kelompok *Arthropoda* yang memiliki mobilitas tinggi (terbang) akan segera bermigrasi ketempat lain dan yang tidak memiliki mobilitas akan mati. Pada tanah pertanian intensif, yang sering dilakukan kegiatan pembakaran dan pengolahan tanah memiliki populasi fauna tanah rendah. Kegiatan pembakaran lahan selain berdampak menurunkan populasi fauna tanah juga menurunkan kandungan bahan organik tanah (Tabel 7). Pemulihan kepadatan populasi *Arthropoda* tanah akibat kebakaran tinggi/berat (bahan organik tanah terbakar) sangat lambat dibanding pada kebakaran ringan (bahan organik tanah tidak terbakar). Cacing tanah merupakan fauna tanah yang memiliki peranan fungsional penting dalam memperbaiki sifat fisik tanah, daur hara, konservasi tanah, dan bahan organik (Coleman dan Crossley 1996; Lee 1985)

Tabel 7. Kepadatan populasi *Arthropoda* setelah 1 tahun pada intensitas kebakaran rendah dan tinggi di lahan hutan *Pinus helepensis* di Yunani

Arthropoda di dalam tanah	Intensitas kebakaran rendah (bahan organik tanah tidak terbakar)	Intensitas kebakaran tinggi (bahan organik tanah terbakar)
	.....(individu/m ²).....	
<i>Pseudoscorpionida</i>	5,7	3,0
<i>Araneae</i>	5,0	1,6
<i>Acarina</i>	146,0	193,7
<i>Geophilomorpha</i>	2,7	2,1
<i>Lulida</i>	1,6	-
<i>Polyxenida</i>	1,1	2,1
<i>Symphyla</i>	3,2	2,1
<i>Isopoda</i>	1,1	-
<i>Collembola</i>	340,5	151,0
<i>Thysanura</i>	0,5	-
<i>Protura</i>	1,1	4,3
<i>Hemiptera</i>	7,5	1,1
<i>Psocoptera</i>	26,0	4,9
<i>Coleoptera</i>	13,7	1,1
<i>Diplura</i>	0,9	5,7
<i>Embioptera</i>	0,5	-
<i>Dermaptera</i>	0,0	2,7
<i>Coleoptera larva</i>	8,0	5,3
<i>Diptera larva</i>	2,1	1,4
<i>Lepidoptera larva</i>	4,3	-
<i>Neuroptera larva</i>	0,5	-
Rerata kepadatan tahunan	571,8	382,0

Sumber: Radea dan Arianoutsou (2000) dalam Firmansyah dan Subowo (2012).

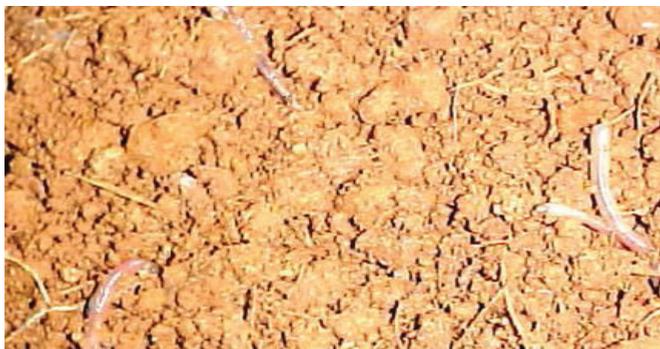
Habitat cacing tanah dapat ditemukan pada tanah lahan kering masam sampai alkali (basa) yang memiliki kecukupan air. Di dalam daur hara dan energi subsistem tanah, cacing tanah berperan sebagai kelompok *detritivor* yang mampu memanfaatkan senyawa organik dan anorganik sebagai sumber hara dan energi. Cacing tanah *endogaisis-geofagus* yang mampu mencerna bahan tanah mineral dengan bahan organik dapat dikatakan sebagai kelompok organisme tanah yang hidup di dua alam/lingkungan, baik lingkungan anorganik maupun lingkungan organik (Gambar 7). Keberadaan cacing tanah dapat mempertahankan berlangsungnya daur hara dan energi dari subsistem tersebut. Selain itu cacing tanah, mampu menghancurkan/mengaduk lapisan tanah bawah yang padat dengan lapisan atas (bioturbasi). Sejalan dengan sifat hidup, kebutuhan lingkungan, luas sebaran, dan kepekaan terhadap lingkungan, banyak pakar menyatakan bahwa keberadaan cacing tanah menunjukkan tingkat kesuburan tanah, sehingga dapat dikatakan cacing tanah dapat digunakan

sebagai indikator kesuburan tanah. Kerapatan biomassa cacing tanah pada sistem pertanian tanpa olah tanah 70% lebih besar dibanding pada sistem pertanian olah tanah konvensional (Parmelee *et al* 1990).

Jenis-jenis cacing tanah *native* biasanya hidup pada tanah-tanah bertekstur halus (liat, liat berdebu atau lempung berdebu) dan jarang ditemukan pada tanah berpasir. Kebanyakan cacing tanah hidup pada pH antara 4,5 – 6,6, tetapi pada tanah dengan kandungan bahan organik tinggi mampu berkembang pada pH 3,0 (Fender dan Mckey-Fender 1990). Berdasarkan jenis makanan, cacing tanah dikelompokkan dalam 3 kelompok, yaitu:

1. *Geofagus* : pemakan tanah
2. *Limifagus* : pemakan tanah subur (mud) atau tanah basah.
3. *Litter feeder* : pemakan bahan organik (sampah, kompos, dan pupuk hijau)

Cacing tanah *endogaesis-geofagus* merupakan jenis cacing tanah yang sepanjang hidupnya aktif di dalam tanah dengan membuat liang-liang, mencerna tanah dan bahan organik, menghasilkan *kascing* di dalam tanah, dan meningkatkan ketersediaan hara serta mengaktifkan kembali fungsional bahan organik fraksi berat untuk dapat memperbaiki kesuburan tanah. Pemberdayaan aktivitas cacing tanah *endogaesis-geofagus* yang mampu mencampur/mengolah tanah selain dapat memperbaiki agregat dan aerasi tanah juga tidak merusak akar tanaman dan meningkatkan infiltrasi-perkolasi air hujan. Cacing tanah *limifagus* pemakan tanah bersama bahan organik fraksi ringan sampai sedang yang ada di dalam tanah. Cacing tanah *litter feeder*/pemakan serasah hanya aktif dipermukaan tanah dan bermanfaat mengolah limbah organik (bahan organik fraksi ringan) dan dihasilkan kompos cacing (*komposcing*).



Gambar 7. Cacing tanah *endogaesis-geofagus Pheretima, sp.* (Sumber: Anwar E.K.)

Pembuatan liang oleh cacing tanah berguna untuk mendukung pergerakan cacing tanah, menghindari dari tekanan lingkungan, dan sebagai tempat untuk menyimpan dan mencerna makanan (Schwert 1990). Setelah melalui pencernaan sisa-sisa bahan yang termakan tersebut dilepaskan kembali sebagai buangan padat (*kascing*). Edwards dan Lofty (1972) dalam Schwert (1990) mengatakan bahwa sebagian besar bahan mineral yang dicerna cacing tanah dikembalikan ke dalam tanah dalam bentuk kotoran (*kascing*) yang mengandung hara lebih tersedia bagi tanaman. *Kascing* cacing tanah meningkatkan kadar Ca, Mg, dan K dapat tukar serta K dan Mo tersedia. Subowo (2002) mendapatkan bahwa *kascing Pheretima hupiensis* pada *Ultisols* menghasilkan indeks stabilitas agregat, pH, KTK, K, dan bahan organik lebih tinggi dibanding tanah disekitarnya, dan *kascing* tersebut didepositkan kembali dalam liang cacing yang ditinggalkan. Hal ini menunjukkan bahwa *P. hupiensis* mampu berperan sebagai agen pengumpul hara tanah dan selanjutnya didistribusikan ke *rhizosfir*, sehingga dapat lebih tersedia bagi tanaman.

Cacing tanah dapat menggemburkan tanah melalui pembentukan liang-liang sekaligus memasukkan bahan organik tanah dari lapisan atas ke dalam tanah. Untuk menghindari dari tekanan lingkungan yang kurang menguntungkan cacing tanah mampu melakukan penggalian liang sampai mencapai lebih dari 1 m (Richard 1978). Liang-liang cacing tersebut juga mampu memasukkan air ke dalam tanah dengan volume yang lebih besar. Meningkatnya infiltrasi air permukaan menyebabkan laju aliran permukaan dan erosi tanah berkurang. Agregat tanah lapisan atas menjadi tetap terjaga dan laju infiltrasi air hujan tetap tinggi. Adanya penggemburan tanah oleh cacing tanah dapat menambah kapasitas tanah mengikat air yang selanjutnya mengurangi erosi, aliran permukaan (*run off*), pencucian hara, menjaga kelembaban tanah serta dapat menyeimbangkan suhu dalam tanah. Liang-liang tersebut juga memperbaiki aerasi tanah, aktivitas respirasi akar tanaman maupun organisme aerobik tetap berlangsung dengan baik. Cacing tanah juga berperan langsung dalam penghancuran fraksi-fraksi organik tanah dan mencampur tanah lapisan atas dan lapisan bawah, sehingga distribusi dan siklus C-organik lebih lama berada di dalam tanah. Keberadaan cacing tanah dapat memperpanjang daur C-organik tanah, sehingga dapat memperpanjang fungsi bahan organik untuk mendukung pertumbuhan tanaman.

IV. ORGANISME TANAH UNTUK PENGENDALIAN BAHAN ORGANIK TANAH

Bahan organik mempunyai peranan penting sebagai bahan pemicu kesuburan tanah, baik secara langsung sebagai pemasok hara bagi organisme autotrof (termasuk tanaman) juga sebagai sumber energi bagi organisme heterotrof (fauna dan fungi tanah). Yusnaini *et al.* (2004) melaporkan bahwa pemberian 20 t/ha pupuk organik dan pupuk buatan/anorganik serta kombinasinya pada tanah lahan kering masam di Taman Bogo, Lampung tidak berpengaruh nyata terhadap sifat kimia tanah. Populasi cacing tanah berbeda nyata dengan populasi tertinggi pada perlakuan pemberian kotoran ayam, dan produksi jagung berbeda nyata dengan produksi tertinggi pada perlakuan kotoran ayam 50% + pupuk NPK 50%. Keadaan ini menunjukkan bahwa pengaruh pemberian bahan organik ataupun pupuk buatan dalam tanah lahan kering masam tidak berpengaruh langsung terhadap ketersediaan hara untuk pertumbuhan tanaman.

Adanya aktivitas organisme tanah, kandungan hara dalam pupuk dan bahan organik dirombak dan dilepaskan kembali sebagai hara yang tersedia bagi tanaman. Salazar *et al.* (2011) menyatakan bahan organik tanah merupakan indikator kualitas tanah yang merupakan sumber hara maupun pembaik fisik dan kimia tanah serta sebagai pendukung aktivitas hayati. Meningkatnya aktivitas organisme tanah mendorong terjadinya perbaikan kesuburan tanah melalui perbaikan fisik, kimia, maupun biologi tanah. Perbaikan sifat fisik, kimia, dan organisme tanah sesuai kebutuhan tanaman (*plant requirement*) akan memperbaiki pertumbuhan dan produksi tanaman. Masalah yang dihadapi kandungan hara bahan organik umumnya rendah (Tabel 8), sehingga aplikasi bahan organik untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman secara langsung menjadi kurang efisien dan perlu upaya secara ketat peningkatan efektivitas fungsi bahan organik di dalam tanah.

Tabel 8. Kandungan hara makro beberapa sumber bahan organik tanah

No.	Jenis bahan Organik	Kandungan hara makro (%)			
		N	P	K	Ca
1.	Jerami padi	0,66	0,07	0,93	0,29
2.	Sekam	0,49	0,05	0,49	0,06
3.	Batang jagung	0,81	0,15	1,42	0,24
4.	Serbuk kayu	1,33	0,07	0,60	1,44
5.	Kotoran sapi perah	0,53	0,35	0,41	0,28
6.	Kotoran sapi daging	0,65	0,15	0,30	0,12
7.	Kotoran unggas	1,50	0,77	0,89	0,30
8.	Kotoran domba	1,28	0,19	0,93	0,59

Sumber: Las dan Setiorini (2010).

Swift *et al* (1979) menyatakan dekomposisi bahan organik merupakan proses pemecahan integratif kompleks di antara organisme tanah (fauna dan mikroorganisme), faktor lingkungan (utamanya temperatur dan kelembaban) dan jenis bahan organik. Apabila tidak tersedia organisme pengurai/dekomposer di dalam tanah, bahan organik tersebut akan tetap teronggok/utuh dan justru dapat mengganggu sistem produksi. Pengendalian pelaku pengurai bahan organik secara baik sesuai tahapannya akan menjamin nilai fungsi bahan organik sebagai sumber energi dan hara, pembaik sifat fisik tanah, dan melangsungkan kehidupan organisme tanah secara efektif dan efisien dalam kurun waktu yang lebih panjang/lama. Perpanjangan daur energi dan hara secara tertutup merupakan langkah yang penting untuk mengurangi laju penyusutan bahan organik tanah, meningkatkan nilai tambah terhadap perbaikan kesuburan tanah dan juga menahan laju kehilangan hara/pupuk dalam ekosistem tanah.

Bahan organik tanah yang rendah dapat menekan populasi organisme tanah dari kelompok detritifora (termasuk cacing tanah), sehingga populasi organisme ini di tanah lahan pertanian intensif umumnya rendah. Penurunan jumlah, kualitas bahan organik serta aktivitas organisme dan keaneka-ragaman fauna tanah merupakan bentuk degradasi tanah yang penting di wilayah tropika basah (Lal 1995). Fungi tanah dapat mengendalikan C-organik tanah, karena dalam proses dekomposisi bahan organik pelepasan C sebagai CO₂ sangat rendah dan 30 – 40% C-organik tersimpan kembali sebagai miselium (Alexander 1977). Pada saatnya setelah organisme tanah mati juga merupakan salah satu sumber bahan organik tanah. Kurang lebih 40% dari 18% kandungan NH₄⁺ dan NO₃⁻ pada tanah yang terdapat cacing tanah *Enchytraeidae* dibanding yang tanpa cacing tanah merupakan hasil dekomposisi cacing tanah yang telah mati (Abrahamsen 1990). Subowo (2002) mendapatkan bahwa pada lahan padang rumput dan lahan tanaman padi gogo yang lebih terbuka dan mendapat pengolahan tanah intensif memiliki populasi cacing tanah *Pheretima hupiensis* lebih rendah dibanding pada kebun pisang, kebun sengon, dan kebun karet yang merupakan tanaman tahunan yang tertutup dan tidak dilakukan pengolahan tanah secara intensif. Pemberdayaan sumber daya hayati tanah untuk kegiatan usaha pertanian di masing-masing tipologi lahan penting diupayakan.

4.1. Peranan cacing tanah *endogaesis-geofagus* dalam konservasi bahan organik tanah

Peranan penting bahan organik di dalam tanah adalah sebagai pemasok hara bagi tanaman, meningkatkan kapasitas pertukaran ion, pemantap agregat, meningkatkan kapasitas tanah menahan air, dan sebagai sumber energi organisme tanah. Cacing tanah yang bersifat *litter feeder*, selektif dalam memilih bahan organik (*palatabilitas*) yang bergantung pada nilai C:N, kandungan lignin, dan polifenol. Cacing tanah yang bersifat geofagus tidak secara nyata dipengaruhi oleh faktor *palatabilitas* tersebut (Hendriksen 1990; Lavelle

dan Barois 1988). Cacing tanah *endogaesis-geofagus* ini dapat melakukan proses pencernaan terhadap segala bentuk C-organik yang ada di dalam tanah dari fraksi ringan sampai berat, selanjutnya diakumulasikan dalam biomassa dan *kascing* yang didepositkan di daerah *rhizosfir*. Bahan organik fraksi ringan yang merupakan C-organik biomassa organisme tanah dan atau bahan organik yang telah mengalami dekomposisi tahap awal merupakan bahan organik aktif sebagai sumber energi dan hara bagi organisme tanah. Bahan organik fraksi sedang merupakan C-organik humus yang telah mengalami dekomposisi lanjut, dan bahan organik fraksi berat merupakan bahan organik yang terjebak dalam ikatan organomineral yang relatif stabil dan sulit untuk dimanfaatkan sebagai sumber hara/energi bagi organisme tanah (Meijboom *et al* 1995).

Seluruh bahan organik tanah dapat diaktifkan kembali nilai fungsionalnya oleh cacing tanah *endogaesis-geofagus*. Dalam *kascing* C-organik dengan indeks stabilitas yang tinggi dapat terlindung dari dekomposisi untuk dilepaskan sebagai CO₂. Nilai fungsi dan sebaran bahan organik untuk mendukung pertumbuhan tanaman menjadi lebih efektif dan lestari. Wibowo (2000) mendapatkan bahwa populasi cacing tanah, bobot basah cacing tanah, jumlah kokon, dan bobot *kascing* berkorelasi nyata dan positif terhadap C-organik tanah. Sementara jumlah fungi dan mikroorganisme tanah tidak berkorelasi nyata terhadap C-organik tanah dan cenderung berkorelasi negatif dengan pH tanah, sehingga bahan organik tanah dan pH tanah menurun/rendah (Tabel 9).

Tabel 9. Matrik korelasi populasi organisme tanah terhadap kandungan bahan organik tanah dan pH tanah

No	Populasi Organisme Tanah	pH Tanah	C-organik Tanah
.....Nilai korelasi.....			
1.	Fungi	-0,52	0,55
2.	Total mikroorganisme	-0,42	0,61
3.	Cacing tanah: - jumlah populasi	-0,09	0,84*
	- bobot basah	0,01	0,83*
	- jumlah kokon	0,29	0,86*
	- bobot kascing	0,51	0,86*

Keterangan: * mempunyai hubungan sangat erat antar dua faktor.

Sumber: Wibowo (2000).

Pelepasan C-organik harian melalui ekskresi mucus dari permukaan tubuh dan pada kotoran cacing tanah adalah 0,2 – 0,5% dari total biomassa cacing tanah (Scheu 1991). Sebanyak 10 – 19% bahan organik yang tercerna oleh cacing tanah

geofagus terasimilasi dalam biomassa, dan sisanya dilepaskan kembali melalui kascing (Lavelle dan Barois 1988). Kandungan C-organik kotoran cacing mencapai 2 kali lebih tinggi untuk lapisan 0 – 5 cm dan 3 kali untuk lapisan 5 – 10 cm dibanding tanah di sekitarnya. Hasil penelitian yang dilakukan Martin (1991) didapatkan bahwa mineralisasi C dari kotoran cacing tanah *Millsonia anomala* (*tropical geophagous earthworm*) di laboratorium lebih dari 4x lebih rendah (3%/tahun) dibanding dengan yang di tanah kontrol (11%/tahun).

Dalam jangka panjang dan dalam kondisi yang baik, *M. anomala* secara nyata menurunkan kecepatan penurunan C-organik tanah. Martin (1991) dan Fragoso *et al.* (1997) juga menyatakan bahwa laju dekomposisi bahan organik tanah menurun akibat C-organik terlindung dalam *kascing* secara fisik yang padat dan hidrofobik. Dekomposisi bahan organik yang lambat, erosi tanah yang rendah, adanya pasokan C-organik dari biomassa tanaman maupun dari eksudat organisme tanah dengan diikuti tingginya efisiensi penggunaan C-organik berperan penting dalam menjaga kelestarian fungsi bahan organik di dalam tanah (Monreal *et al* 1997). Tetap tingginya kandungan C-organik di dalam tanah tropika basah akan mampu mendukung kelanggengan nilai fungsi bahan organik untuk meningkatkan produktivitas tanah untuk tanaman. Dengan kemampuan menekan laju dekomposisi bahan organik, cacing tanah *endogaesis-geofagus* dapat dimanfaatkan mencegah penyusutan bahan organik tanah secara cepat, sehingga sistem usaha tani lebih murah, lestari, dan ramah lingkungan.

Pemberian bahan organik dosis, 0, 2, 5, dan 10 t/ha. Pada tanah Ultisols, dengan kandungan C-organik awal 1,86%, kedalaman 10 cm maupun 20 cm tanpa inokulasi cacing tanah maupun dengan inokulasi cacing tanah mampu meningkatkan berat biomassa tanaman jagung secara nyata (Tabel 10). Pada perlakuan tanpa bahan organik (kontrol) dengan kedalaman aplikasi 10 cm, perlakuan inokulasi cacing tanah *endogaesis Pheretima hupiensis* sebanyak 15 ekor/15 kg tanah/pot memberikan hasil jagung maupun biomassa lebih rendah dibanding tanpa inokulasi cacing tanah. Demikian pula pada perlakuan bahan organik 10 t/ha, pada tanpa cacing tanah lebih tinggi dan berbeda nyata dibanding pada perlakuan inokulasi cacing tanah. Keadaan ini menunjukkan bahwa pada kandungan bahan organik tanah rendah (kontrol), pada tahap awal aplikasi cacing tanah sebagian besar bahan organik dikonsumsi cacing tanah sebagai biomassa cacing tanah dan belum dilepaskan kembali sebagai kascing. Akibatnya fungsi bahan organik untuk perbaikan sifat kimia tanah justru mengalami penurunan. Sedangkan pada pemberian bahan organik yang cukup besar (10 t/ha) aktivitas cacing tanah mengalami penurunan, sehingga fungsi terhadap perbaikan sifat fisik tanah tidak optimal. Hal ini juga terjadi pada aplikasi bahan organik 5,0 t/ha sampai kedalaman 10 cm memberikan hasil lebih rendah dibanding pada perlakuan 2,5 t/ha. Sementara aplikasi bahan organik 5,0 t/ha sampai kedalaman 20 cm yang tentunya memiliki konsentrasi persatuan luas lebih rendah, cacing tanah harus lebih aktif melakukan

penggalian/pengolahan tanah untuk dapat mendapatkan bahan organik tanah yang ada dan memberikan hasil jagung lebih tinggi dibanding pada aplikasi 2,5 t/ha.

Tabel 10. Pengaruh cacing tanah dan bahan organik terhadap berat biomas dan hasil jagung di rumah kaca

Perlakuan (dosis bahan organik) Kedalaman:	Berat biomas				Hasil jagung (jagung pipilan)			
	Tanpa cacing tanah		Dengan cacing tanah		Tanpa cacing tanah		Dengan cacing tanah	
	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
/	--- gr pot ---							
Tanpa b.o*	146,4 g**	-	83,0 h	-	65,4 d	-	34,9 g	-
2,5 t. b.o/ha	173,7 f	163,6 f	205,8 d	223,2 d	72,1 c	63,5 d	84,8 b	70,0 c
5,0 t. b.o/ha	188,7 e	198,8 e	212,8 d	231,7 c	59,3 d	74,8 c	83,7 bc	81,4 b
10 t. b.o/ha	235,9 c	281,4 a	241,5 b	239,7 c	89,3 a	96,3 a	82,9 bc	81,8 b
K.K (%)	13,71				6,80			

Keterangan : * b.o : bahan organik

**Angka yang diikuti dengan huruf yang sama dalam kolom yang sama tidak berbeda nyata pada uji DMRT 5%.

Sumber: Anwar (2007).

Hasil analisis kandungan hara tanah setelah panen (bebas cacing tanah) didapatkan bahwa pada perlakuan dengan cacing tanah memiliki kandungan hara lebih tinggi dibanding pada perlakuan tanpa cacing tanah, terutama kandungan P-tersedia dan N (Tabel 11). Pada kondisi baik/ideal, cacing tanah banyak mengakumulasi fosfat sebagai sumber energi dan sebagai cadangan untuk mengatasi tekanan lingkungan selanjutnya (Subowo *et al.* 2003). Selanjutnya Edwards dan Lofty (1977) menyatakan tekanan lingkungan yang ekstrim (iritasi, fibasi atau rangsangan lainnya) fosfat dilepaskan kembali sebagai fosforesen ataupun luminesen untuk melindungi diri dari tekanan lingkungan tersebut. Tekanan kekeringan menjelang panen jagung mengakibatkan pelepasan kembali fosfat yang terakumulasi dalam biomassa cacing tanah. Adanya dukungan cadangan hara setelah panen tentunya akan mampu mendukung perbaikan produktivitas untuk musim pertanaman berikutnya. Selain itu terjadi akumulasi hara N, P, dan K dalam biomassa cacing tanah pada perlakuan inokulasi cacing tanah akan bermanfaat untuk pertanaman selanjutnya. Neve (2013) juga menyatakan bahwa pada sistem pertanian

konvensional produktivitas cenderung terus mengalami penurunan meskipun diikuti input yang semakin tinggi, namun dalam sistem pertanian ramah lingkungan (organik) produktivitas relatif stabil dengan input rendah. Untuk itu dalam aplikasi bahan organik ke dalam tanah untuk pertanian ramah lingkungan perlu diketahui stabilitas tingkat produksi, dosis aplikasi, cara penempatan, waktu dan masa penggunaan, serta cadangan hara untuk musim pertanaman berikutnya.

Tabel 11. Hasil analisis tanah setelah panen jagung, pada tanah Ultisols Lebak di rumah kaca

Perlakuan	Tanpa cacing tanah			Dengan cacing tanah		
	N	P-tersedia	K	N	P-tersedia	K
	%	----- mg / 100g-----		%	----- mg / 100g-----	
Tanpa BO	0,153	124,35	0,88	0,157	809,81	0,83
2,5 t BO, 10 cm	0,167	2,79,02	0,92	0,197	856,40	0,91
5,0 t BO, 10 cm	0,220	274,30	0,99	0,177	827,51	1,12
10,0 t BO, 10 cm	0,223	192,15	1,67	0,230	697,05	1,54
2,5 t BO, 20 cm	0,150	178,74	0,91	0,183	1002,70	0,85
5,0 t BO, 20 cm	0,163	245,97	1,00	0,150	910,45	0,83
10,0 t BO, 20 cm	0,220	307,82	1,49	0,230	886,22	1,42
Rata-rata	0,185	228,91	1,12	0,189	855,73	1,07

Keterangan: BO = bahan organik

Sumber: Anwar (2007)

Meningkatnya aerasi dan stabilitas agregat tanah oleh aktivitas cacing tanah akan menjaga kelembaban tanah dan melindungi C-organik yang merupakan permasalahan penting pada tanah kawasan tropika. Adanya struktur tanah yang ringan akan memudahkan penetrasi akar tanaman yang selanjutnya juga akan dihasilkan asam-asam organik yang sangat dibutuhkan untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme tanah. Peran cacing tanah *geofagus* yang mampu memakan mineral tanah maupun bahan organik dalam berbagai fraksi (ringan-berat) merupakan salah satu peran penting cacing tanah untuk menjaga kelangsungan fungsional bahan organik sebagai sumber hara dan energi subsistem tanah. Daur hara dan energi di dalam tanah tidak terputus, sehingga efisiensi energi menjadi lebih baik. Melalui ikatan organik dalam cacing tanah ini, organisme *heterotrof* lainnya dapat memanfaatkan sebagai sumber energi baru. Untuk itu kondisi ekosistem subsistem tanah perlu dipulihkan dengan pengkayaan kembali kandungan bahan organik tanah untuk menarik fauna tanah kembali ke dalam tanah. Sebagai wilayah *megabiodiversity* Indonesia layak memberdayakan potensi sumber daya hayati tanah tersebut untuk memberikan sumbangan yang besar dalam mencegah kehilangan bahan organik tanah, meningkatkan kesuburan dan produktivitas tanah yang lestari dan

ramah lingkungan. Di kawasan tropika cacing tanah berperan dalam menekan kecepatan dekomposisi bahan organik yang sangat penting untuk menghambat kehilangan humus dari lahan pertanian (Martin 1991 *dalam* Stork dan Eggleton 1992). Selanjutnya dikatakan bahwa cacing tanah merupakan indikator yang penting bagi kualitas tanah kawasan tropika basah, selain mudah juga murah dalam melakukan determinasi/identifikasi.

4.2. Peranan asosiasi *Azolla* dan mikroalga *Blue Green Algae* (BGA) sebagai sumber bahan organik tanah

Azolla merupakan tumbuhan paku-pakuan akuatik yang hidup di tanah basah bersifat herbaseus/tidak berkayu, fotosintetik, dapat berasosiasi dengan mikroalga *Blue Green Algae* (BGA) penambat N_2 -udara, berkembang di lahan secara permanen sesuai daya dukung tanah, tidak mengganggu tanaman, sebagai *nutrient traps* dan dapat berkembang biak sendiri, sehingga akan memperkaya kandungan bahan organik tanah basah (sawah) (Gambar 8). Tanaman ini rentan terhadap serangan hama-penyakit, temperatur yang tinggi, dan tidak tahan naungan. Temperatur ideal pada 20 - 28oC (Rao 1994). Selanjutnya disampaikan bahwa di Vietnam lapisan *Azolla* setebal 10 cm dapat meningkatkan panen padi \pm 10-25% dibanding pada pertanaman tanpa *Azolla*. Hasil penelitian Subowo *et al.* (1998) didapatkan bahwa mikroalga *Chlorella pyrenoidosa* (BGA) pada tanah sawah bukaan baru mampu tumbuh pada kelarutan Fe 50 ppm, meningkatkan kandungan O_2 terlarut dan meningkatkan oksidasi Fe-bebas menjadi Fe_2O_3 , dan untuk menurunkan Fe-terlarut pada tanah baru tergenang dengan memanfaatkan mikroalga dapat dilakukan dengan memperbaiki kondisi habitat/media. Pemberdayaan asosiasi *Azolla* dan BGA selain dapat meningkatkan kandungan N dan *nutrient traps* juga dapat menurunkan kelarutan besi pada tanah sawah bukaan baru.



Gambar 8. Habitus simbiosis mutualistik BGA dan *Azolla* sebagai sumber bahan organik tanah kaya N [<http://www.wikipedia.com>]

Pada setiap hektar lahan sawah dapat dihasilkan biomassa segar *Azolla* >20 t/ha selama masa inkubasi untuk semaian (± 21 hari) sebelum tanam dengan kandungan N yang tinggi dan mudah terdekomposisi dengan pembedaan. Perbanyak *Azolla* dapat dilakukan di lahan sawah dengan ketinggian genangan 3-5 cm dengan waktu ganda (*doubling time*) sekitar 48 jam. Hal ini ditujukan agar perakaran *Azolla* dapat menyentuh permukaan tanah sawah untuk mendapatkan pasokan hara utamanya P, karena *Azolla* rentan terhadap kekurangan hara P. Selain itu dengan adanya genangan air di lahan sawah yang sangat penting untuk menjaga fisiko-kimia kesuburan tanah sawah juga diharapkan dapat menangkap hara-hara lain yang tercuci/larut dalam air. Apabila pertumbuhan *Azolla* kurang baik, ditandai tepian daun berwarna coklat, perlu ditambahkan hara P sekitar 4-8 kg P_2O_5 /ha. Setelah *Azolla* menutup permukaan tanah, tanah dikeringkan sampai kondisi macak-macak. Biomassa *Azolla* ditanam ke dalam tanah bersamaan dengan pengolahan tanah. Hasil penelitian di India menunjukkan bahwa 10 t *Azolla*/ha setara dengan 25 - 30 kg N/ha dalam bentuk amonium sulfat (Rao 1994). Keberadaan *Azolla* di lahan persawahan dapat menurunkan volatilisasi amoniak dari perairan dan tanah sawah, pengelolaan keharaan *autogenik insitu*, meningkatkan produksi padi, dan menghasilkan biomassa tinggi untuk pembuatan pupuk bokashi dan pupuk organik cair di tingkat petani maupun industri (Widyasunu 2011).

V. ORGANISME TANAH UNTUK PENINGKATAN KESUBURAN TANAH

Kegiatan usaha tani yang selama ini dilakukan lebih banyak berorientasi pada target peningkatan kuantitas produksi untuk memenuhi kebutuhan pangan nasional yang terus meningkat. Pemberian input tinggi dengan aplikasi pupuk anorganik dan pestisida menjadi andalan yang sementara ini dapat diupayakan, meskipun menghadapi resiko-resiko gangguan keseimbangan ekosistem. Organisme autotrof tanah termasuk mikroba dan tanaman yang membutuhkan hara anorganik berkembang pesat, sementara organisme *heterotrof* (fauna) yang membutuhkan bahan organik sebagai sumber energi menjadi terdesak. Populasi organisme tanah didominasi oleh kelompok mikroba. Proses daur energi dan hara di dalam tanah menjadi pendek yang banyak diperankan oleh kelompok produsen dan pengurai (*dekomposer*), sehingga akan semakin mempercepat laju penyusutan kandungan bahan organik tanah. Perbaikan sifat fisik tanah maupun daur hara/bahan organik tanah yang banyak diperankan oleh fauna tanah (termasuk cacing tanah) menjadi hilang. Sudharto *et al.* (1988) mendapatkan bahwa inokulasi cacing tanah di *Haplorthox* Jambi yang baru dibuka secara mekanik tidak mampu hidup sebagai akibat rendahnya kandungan bahan organik tanah dan temperatur yang tinggi.

Peledakan hama penyakit, penurunan kandungan bahan organik tanah, terjadinya gejala jenuh produksi (*levelling off*) serta merosotnya populasi organisme tanah merupakan gambaran telah terjadinya degradasi lahan yang berdampak pada penurunan kemampuan produksi. Bahkan kegiatan pembakaran lahan dalam rangka mempercepat proses penyiapan lahan untuk meningkatkan intensitas pertanaman (IP) semakin memperparah tingkat degradasi lahan. Kegiatan pembakaran pada lahan pertanian tanaman pangan dapat menghasilkan panas 300 – 700°C dan memusnahkan populasi organisme tanah pada kedalaman 0 – 20 cm (Firmansyah dan Subowo 2012). Upaya pemulihan produksi dengan pendekatan input pupuk dan pestisida semata sudah tidak mampu memperbaiki daya dukung tanah dan bahkan sebaliknya terjadinya degradasi tanah pertanian yang semakin meluas. Pemberdayaan mikroba penambat N_2 -udara dan mikroba pelarut P untuk memasok kebutuhan hara N dan P tanaman yang merupakan kendala utama kekurangan hara bagi tanahtanah tropika basah sangat baik untuk didayagunakan.

Anas (2010) mengelompokkan jenis pupuk hayati *biofertilizer* meliputi: (1) mikroba penambat N_2 -udara baik secara simbiotik maupun non simbiotik; (2) mikroba pelarut fosfat (bakteri maupun fungi); (3) mikroba penghasil senyawa pengatur tumbuh; (4) mikroba yang dapat memperluas permukaan akar; (5) mikroba perombak bahan organik (dekomposer); dan (6) mikroba pelindung tanaman

tanaman terhadap hama-penyakit. Adapun beberapa organisme tanah fungsional yang penting dalam penyediaan hara bagi tanaman antara lain seperti pada Tabel 12.

Tabel 12. Beberapa organisme tanah fungsional penting untuk perbaikan kesuburan tanah

No.	Jenis organisme tanah	Peranan dalam kesuburan tanah	Tanaman sasaran/target	Indikator populasi
1. Bakteri :				
	- Rhizobium	- Penambat N-simbiotik	- Tanaman legume	>10 ³ cfu/g tanah
	- <i>Azotobacter sp.</i> ,	- Penambat N hidup bebas.	- Aneka tanaman	>10 ³ cfu/g tanah
	- <i>Azospirillum sp.</i>	- Penambat N hidup bebas.	- Aneka tanaman	>10 ³ cfu/g tanah
	- <i>Nitrosomonas sp.</i> ,	- Penambat N hidup bebas.	- Aneka tanaman	>10 ³ cfu/g tanah
	- <i>Nitrococcus sp.</i>	- Penambat N hidup bebas.	- Aneka tanaman	>10 ³ cfu/g tanah
	- <i>Bacillus sp.</i>	- Pelarut fosfat hidup bebas	- Aneka tanaman	>10 ³ cfu/g tanah
	- <i>Pseudomonas sp</i>	- Pelarut fosfat hidup bebas	- Aneka tanaman	>10 ³ cfu/g tanah
2. Fungi :				
	- <i>Endomikoriza (VMA)</i>	- Pemasok fosfat tanaman lahan kering	- Aneka tnm semusim lahan kering	Ditemukan
	- <i>Ectomikoriza</i>	- Pemasok fosfat tanaman lahan kering	- Aneka tnm tahunan lahan kering.	Ditemukan
	- <i>Aspergillus niger</i>	- Pelarut fosfat tanah kering	- Aneka tnm lahan kering (tnm pangan, hortikultura, perkebunan, hutan, dan pekarangan)	Ditemukan
	- <i>Trichoderma</i>	- Perombak bahan organik		Ditemukan
3. Blue Green Algae :				
	- <i>Nostoc</i> ,	- Penambat N bebas/simbiotk	- Aneka tanaman lahan basah dan sebagai sumber pupuk organik	Ditemukan
	- <i>Anabaena</i> ,	- Penambat N bebas/simbiotk		Ditemukan
	- <i>Oscillatoria</i> .	- Penambat N bebas/simbiotk		Ditemukan
4. Fauna tanah:				
	- Cacing tanah	- Perbaikan fisik dan perombak bahan organik tanah kering	- Aneka tanaman (tanaman pangan, hortikultura, perkebunan, hutan, dan pekarangan)	>10 ekor/m
	- Rayap	- Perombak bahan organik tanah lahan kering		Ditemukan
	- <i>Collembola</i>	- Perombak bahan organik tanah lahan kering		Ditemukan

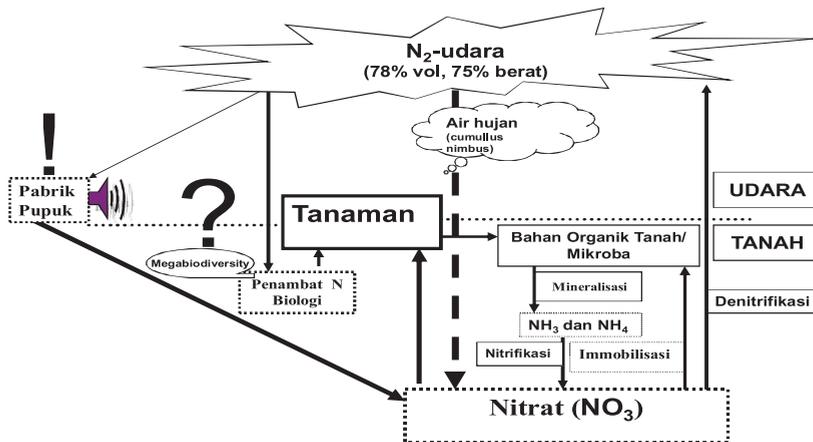
Sumber: Subowo *et al.* (2010).

Belakangan muncul kesadaran pentingnya pemberian bahan organik tanah yang diharapkan dapat meningkatkan kesuburan tanah melalui pengkayaan hara dari hasil dekomposisi bahan organik tersebut. Masalah yang terjadi bahan organik memiliki kandungan hara rendah dan kemampuan produksi bahan organik tanaman semusim yang dapat dikembalikan ke lahan per satuan

luas lahan relatif rendah ($\pm 6,0$ t/ha/musim) sementara kebutuhan per musim $\pm 10,0$ t/ha/musim, sehingga memerlukan tambahan dari wilayah/lahan lain yang juga membutuhkan biaya untuk pengangkutan. Reorientasi pemanfaatan bahan organik sebagai sumber hara secara langsung bagi tanaman perlu kiranya dirubah bahwa bahan organik tidak saja sebagai sumber hara namun juga sebagai sumber energi bagi kehidupan fauna tanah (Subowo 2010). Melalui aktivitas fauna tanah dapat memperbaiki sifat fisik, kimia dan biologi tanah dan selanjutnya dapat memperbaiki pertumbuhan/produksi tanaman. Dengan reorientasi ini upaya meningkatkan efisiensi penggunaan bahan organik untuk meningkatkan produktivitas lahan menjadi lebih efektif. Pemulihan kembali populasi organisme tanah fungsional yang mampu meningkatkan kesuburan tanah dan menekan berkembangnya organisme pengganggu melalui pupuk hayati (*biofertilizer*) merupakan langkah penting yang perlu dilakukan.

5.1. Pemanfaatan organisme tanah untuk peningkatan ketersediaan hara N

Tanaman merupakan organisme autotrof yang dalam pertumbuhannya sangat membutuhkan hara sebagai sumber makanan dan sinar matahari sebagai sumber energi. Keberadaan hara tanah hasil dari pelapukan mineral ataupun perombakan bahan organik oleh organisme tanah mutlak diperlukan sepanjang pertumbuhannya. Apabila terjadi kekurangan/kehakatan hara tanaman akan tumbuh merana dan bahkan tidak mampu berproduksi. Kehakatan hara tanaman antara lain dapat terjadi akibat tingginya laju pencucian hara ataupun laju sematan hara oleh tanah, sehingga ketersediaan hara makro N dan P dalam tanah untuk tanaman rendah. Hara N merupakan hara makro esensial bagi kehidupan autotrof maupun heterotrof, namun ketersediaannya sangat tergantung dari pupuk, bahan organik ataupun hasil penambatan N_2 udara oleh mikroba penambat N. Di dalam tanah hara N sangat mobil dan mudah tercuci oleh aliran air perkolasi, infiltrasi maupun aliran permukaan (*run off*), dan penguapan. Demikian pula halnya peningkatan ketersediaan hara N yang sangat mobil di dalam tanah akan mudah hilang dari subsistem tanah, sehingga pengkayaan dengan memanfaatkan bantuan penambatan N yang dilakukan oleh organisme tanah yang hidup bebas ataupun bersimbiose penting untuk diupayakan (Gambar 9). Nurmayulis dan Maryati (2008) melakukan penelitian di dataran tinggi (1.250 m dpL) didapatkan bahwa perlakuan inokulasi bakteri penambat N-bebas *Azospirillum* sp dapat meningkatkan serapan N dan produksi kentang dibanding tanpa inokulasi. Gunarto *et al.* (1987) mendapatkan bahwa perlakuan inokulasi bakteri penambat N-simbiotik *Bradyrhizobium japonicum* dapat menghilangkan pemakaian pupuk N dan meningkatkan produksi kedelai dan kacang hijau.



Gambar 9. Daur hara N alami di dalam tanah (Rao 1994).

Efisiensi penambatan N yang hidup bebas seperti *Azotobacter* lebih rendah dibandingkan bakteri penambat N simbiosis, hal ini disebabkan adanya faktor pembatas berupa ketersediaan karbon organik dalam tanah (Marschner 1993). Faktor eksternal lainnya yang dapat mempengaruhi penambatan nitrogen adalah kelembaban tanah, pH tanah, cahaya, dan penambahan nitrogen. Jumlah bakteri penambat nitrogen pada perakaran, potensial redoks, dan konsentrasi oksigen yang tinggi dapat mempengaruhi aktivitas penambatan nitrogen (Trooldenier 1977 dalam Hindersah dan Simarmata 2004). *Inokulasi Azotobacter* menaikkan 15-100% hasil tanaman pada ekosistem lahan kering dan mengurangi pupuk hingga 30% pada ekosistem lahan kering (Kader *et al.* 2002). Sementara penggunaan bakteri penambat N (*Azospirillum*) mampu memacu peningkatan hasil pertanian sebesar 30-50% pada kondisi tanah dan iklim yang berbeda pada jangka waktu 20 tahun (Katupitiya dan Vlassak 1990).

Inokulasi cacing tanah *Pheretima hupiensis* (*endogaesis*) pada tanah *Ultisols* dengan diikuti pemberian bahan organik secara vertikal sampai pada lapisan argilik dan pengolahan tanah minimum memberikan hasil kedelai lebih tinggi dibanding dengan perlakuan pemberian bahan organik secara mulsa dan pengolahan tanah dalam (Subowo *et al.* 2002) (Tabel 13). Adanya bahan organik sampai lapisan argilik, cacing tanah memanfaatkannya sebagai sumber makanan dan melakukan pengolahan tanah di lapisan bawah/argilik, sehingga menurunkan kepadatan lapisan argilik dan meningkatkan aerasi tanah. Peningkatan aerasi tanah memberikan dukungan aerasi yang baik bagi

berkembangnya *Rhizobium* dalam bintil akar kedelai untuk melakukan aktivitas penambatan N dan meningkatkan pertumbuhan/produksi kedelai. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh langsung pemberian bahan organik meningkatkan aktivitas cacing tanah, selanjutnya aktivitas cacing tanah memperbaiki aerasi tanah untuk meningkatkan aktivitas penambatan N oleh *Rhizobium* yang selanjutnya dapat memperbaiki pertumbuhan tanaman kedelai.

Tabel 13. Pengaruh pengolahan tanah, cara pemberian bahan organik dan inokulasi *P. hupiensis* terhadap produksi kedelai pada tanah *Ultisols*

No	Cara pemberian bahan organik	Produksi kedelai pada beberapa cara pengolahan tanah :			
		Olah minimum	Olah atas	Olah dalam	Rata-rata
----- t/ha -----					
1.	Vertikal	2,36 bB*	2,17 aB	1,77 aA	2,10
2.	Alur	1,83 aA	2,11 aA	1,95 aA	1,96
3.	Mulsa	1,90 aA	1,88 aA	2,06 aA	1,95
Rata-rata		2,04	2,05	1,93	

* Angka yang diikuti oleh huruf kecil dalam kolom dan huruf besar dalam baris yang sama tidak berbeda nyata pada uji DMRT 5%
Sumber : Subowo *et al.* (2002).

5.2. Pemanfaatan organisme tanah untuk peningkatan ketersediaan hara P

Tanah masam terdegradasi umumnya memiliki kandungan bahan organik rendah, bereaksi masam dan kaya senyawa-senyawa oksida, serta memiliki kapasitas sematan (jerapan) hara-hara anionik polyvalen (seperti fosfat/P) kuat/tinggi. Tingginya sematan hara P mengakibatkan ketersediaan hara P rendah, sehingga tanaman mengalami kekahatan fosfat. Suganda *et al.* (1997) mendapatkan bahwa pada tanah *Ultisols* Banten, fosfat tidak mengalami pencucian, karena terikat kuat (tersemat) oleh oksida-oksida dalam tanah, seperti Al dan Fe. Keberadaan liang-liang cacing tanah yang mampu meningkatkan kadar air tanah dan menurunkan nilai redoks potensial tanah, sehingga secara tidak langsung dapat menurunkan kadar oksida dan meningkatkan kelarutan P. Linquist *et al.* (1997) menyatakan bahwa penyematan P meningkat dari 55 – 245 mg P/kg terjadi pada diameter agregat dari 3,4 – 0,375 mm. Dengan dihasilkannya makroagregat dari kascing berukuran besar, maka kapasitas tanah menyemat P menjadi rendah dan P banyak tersedia.

Populasi mikroba pelarut fosfat (MPF) di daerah rhizosfir tanaman jagung pada tanah Ultisols Lampung berkorelasi nyata dan positif dengan P-tersedia, pH, C-organik, dan kadar air tanah (Tabel 14).

Tabel 14. Korelasi populasi mikroba pelarut fosfat (MPF) dengan beberapa sifat tanah Ultisols Lampung pada tanaman jagung

No	Sifat tanah	Nilai korelasi sifat tanah vs MPF
1.	P- tersedia	0,77**
2.	pH	0,51**
3.	C-organik	0,72**
4.	N-total	0,48 ^{t.n.}
5.	Kadar air	0,54**

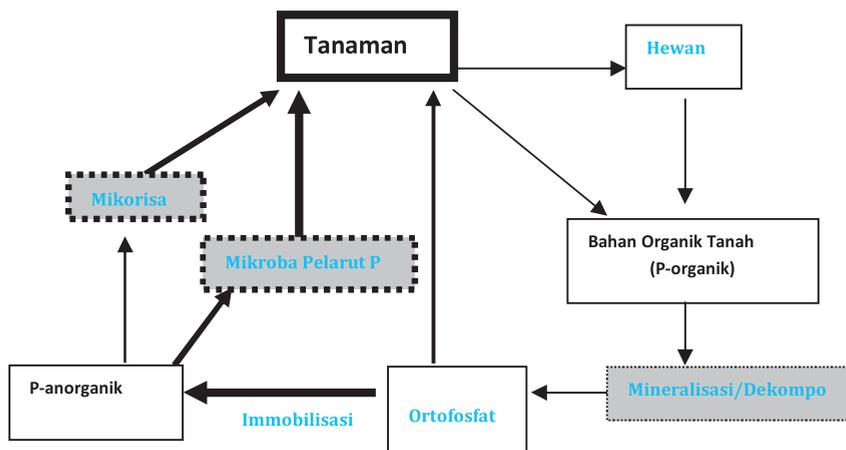
Keterangan: ** : sangat nyata ^{t.n.} : tidak nyata.

Sumber: Niswati *et al.* (2008).

Selain MPF, *vesicular arbuskular mikoriza* (VAM) yang merupakan fungi dan mampu hidup pada tanah masam dengan hifa atau miselium yang dihasilkan, memiliki kemampuan jelajah yang lebih luas dan mampu melarutkan P-tersemat. Mikoriza secara fungsional dapat dibedakan ke dalam 3 kelompok: *endomikoriza* (sebagian hidup di dalam jaringan tanaman), *ektomikoriza* (hidup di luar jaringan tanaman), dan *ektendomikoriza* (dapat hidup di dalam dan di luar jaringan tanaman) (Harley dan Smith 1983). Adanya mikroba pelarut fosfat dan mikoriza, diharapkan meningkat pasokan fosfat dan dapat memperbaiki pertumbuhan tanaman.

Pemanfaatan bakteri pelarut P sebagai pupuk hayati mempunyai keunggulan antara lain hemat energi, tidak mencemari lingkungan, membantu meningkatkan kelarutan P yang terjerap, menghalangi terjerapnya pupuk P oleh Al^{3+} , Fe^{3+} dan Mn^{+2} . Pada jenis-jenis tertentu mikroba ini dapat memacu pertumbuhan tanaman karena menghasilkan zat pengatur tumbuh, menahan penetrasi patogen akar karena sifat mikroba yang cepat mengkolonisasi akar dan menghasilkan senyawa antibiotik (Elfiati 2009). Ketersediaan hara P dalam tanah tanpa dukungan organisme tanah akan sangat sulit untuk dapat tersedia bagi tanaman (Gambar 10).

Dari kondisi ini nampak bahwa cacing tanah, VAM dan mikroba pelarut P (bakteri maupun fungi) potensial untuk dikembangkan dalam menurunkan sematan P dan meningkatkan ketersediaan P pada tanah lahan kering masam.



Gambar 10. Daur hara P dalam tanah untuk tanaman (Rao 1994).

5.3. Pemanfaatan cacing tanah untuk perbaikan sifat fisik tanah

Tanah lahan kering di kawasan tropika basah umumnya memiliki laju pelapukan, erosi dan iluviasi liat cukup tinggi. Tanah lapisan atas memiliki struktur lepas, kandungan bahan organik rendah, pH masam, dan terdapat lapisan bawah padat akibat akumulasi liat. Tanaman semusim berakar dangkal akan banyak mengalami hambatan pertumbuhan. Demikian juga tanaman tahunan yang berakar dalam pada tahap awal pertumbuhan mengalami hambatan akibat tertahan oleh lapisan bawah yang padat. Untuk memperbaiki kondisi fisik tanah ini dapat diupayakan dengan penurunan kepadatan tanah, perbaikan stabilitas agregat tanah, perbaikan aerasi tanah di lapisan bawah dan pencampuran kembali tanah lapisan bawah dengan lapisan atas. Pemanfaatan cacing tanah mampu membuat liang, memperbaiki aerasi, dan mencampur antara tanah lapisan atas dan bawah merupakan langkah yang aman untuk memperbaiki sifat fisik tanah. Perbaikan fisik tanah ini tanpa merusak pertumbuhan akar tanaman dan dapat berlangsung secara terus-menerus sesuai daya dukung penyediaan bahan organik sebagai pakan yang diperlukan.

Cacing tanah *geofagus* yang merupakan organisme tanah heterotrof sangat membutuhkan bahan organik sebagai sumber energi maupun hara bagi kehidupannya. Melalui pencernaan cacing tanah sebagian bahan organik dan tanah mineral dilepaskan kembali ke dalam tanah dalam bentuk *kascing* yang memiliki stabilitas agregat tinggi. *Kascing* merupakan makroagregat yang stabil dan dapat bertahan lebih dari 1 tahun (Blanchart *et al.* 1991 dalam Martin 1991). Marinissen dan Dexter (1990) juga menyatakan bahwa kotoran cacing tanah

lebih stabil dibanding agregat alami dari tanah. Demikian juga dengan aktivitas pencernaannya yang mampu mencampur bahan organik dan mineral tanah dari lapisan bawah dan lapisan atas, sehingga cacing tanah dapat mencegah kehilangan bahan organik dari erosi dan pencucian. Subowo (2002) mendapatkan bahwa populasi *P. hupiensis* berkorelasi nyata dan positif terhadap produksi kedelai, berat bintil dan berat akar lapisan bawah (20 – 30 cm) yang sebelumnya merupakan horizon argilik. Gambaran di atas menunjukkan bahwa keberadaan cacing tanah pada tanah tropika basah akan mampu memperbaiki aktivitas organisme tanah yang selanjutnya dapat memperbaiki kesuburan tanah untuk pertumbuhan tanaman.

Cacing tanah merupakan salah satu fauna tanah yang mampu melakukan perbaikan sifat fisik, kimia dan biologi tanah, namun memiliki mobilitas tinggi dan sangat tergantung pada keberadaan bahan organik, air, dan peka terhadap pestisida. Akibatnya cacing tanah merupakan salah satu organisme tanah yang mengalami kemerosotan populasi sangat tajam pada tanah-tanah pertanian yang diusahakan secara intensif yang berbasis pada asupan pupuk anorganik dan pestisida. Pemulihan kembali populasi cacing tanah pada lahan-lahan pertanian intensif yang telah mengalami kemerosotan produktivitas merupakan langkah penting untuk diupayakan. Melalui liang-liang dan produksi kascing (kotoran cacing) hasil aktivitas cacing tanah ini akan terjadi perbaikan aerasi tanah, peningkatan perkolasi-infiltrasi air, dan peningkatan ketersediaan hara serta konservasi bahan organik tanah.

Di dalam tanah cacing tanah banyak ditemukan pada tanah-tanah pertanian dengan tekstur berliat dan kandungan air cukup tersedia (kapasitas lapang). Apabila terjadi kelebihan air cacing tanah akan membuka liang ke permukaan tanah untuk meningkatkan aerasi tanah. Sebaliknya apabila terjadi pemanasan yang tinggi, cacing tanah akan menutup permukaan liang untuk mencegah terjadinya pemanasan dan penguapan yang berlebihan. Dikeluarkannya *kascing* yang merupakan hasil pencernaan cacing tanah akan meningkatkan ketersediaan hara dari mineral tanah dan bahan organik yang dikonsumsi, sehingga dapat menurunkan kebutuhan pupuk. *Kascing* juga merupakan makroagregat yang stabil yang dapat melindungi hara dan bahan organik dari erosi dan pencucian. Menurunnya kepadatan tanah akibat adanya liang-liang cacing dapat mengurangi biaya pengolahan tanah dan juga dapat menjadi tempat berkembangnya akar dan organisme aerobik tanah yang penting dalam meningkatkan ketersediaan hara tanah.

Dari gambaran di atas menunjukkan bahwa cacing tanah merupakan salah satu pelaku penjaga kesuburan tanah melalui perbaikan fisik tanah untuk dapat mempertahankan tingkat produktivitas tanah. Pasokan pupuk anorganik ataupun pestisida yang berlebihan merupakan faktor utama yang dapat menekan

populasi cacing tanah. Untuk memulihkan produktivitas tanah pertanian yang telah terdegradasi, pengkayaan populasi cacing tanah dengan diikuti pemberian bahan organik tanah merupakan langkah yang penting untuk diupayakan. Senapati et al. (1999) menyatakan agar diperoleh perbaikan kesuburan tanah untuk produksi tanaman diperlukan inokulasi cacing tanah sebanyak 30 ekor/m². Hal ini menunjukkan bahwa tanah dikatakan memiliki kesuburan tinggi dengan dicirikan adanya populasi cacing tanah sebanyak >30 ekor/m². Selain itu cacing tanah juga mampu bereproduksi dan masa hidup yang cukup lama (1 - 10 tahun), akan mampu menjaga pelestarian kesuburan/produktivitas tanah sesuai dengan daya dukung yang diberikan.

5.4. Organisme tanah untuk pencegahan erosi dan pencucian hara

Proses terjadinya erosi tanah diawali oleh adanya aliran permukaan (*run off*) yang dapat mengikis permukaan tanah, sehingga ketebalan tanah lapisan atas menjadi menipis. Hal ini terjadi karena kapasitas resapan air permukaan (*perkolasi-infiltrasi*) lebih rendah dibanding jumlah air permukaan yang ada (air hujan). Tahanan aliran air perkolasi-infiltrasi pada tanah Ultisols diperkuat oleh adanya lapisan argilik. Dariah et al. (2003) mendapatkan bahwa tanah dengan porositas >65% dengan pori makro >24% dan permeabilitas tanah >9 cm/jam, erosi tanah <2 t/ha/tahun. Sedang tanah dengan porositas <60% dengan pori makro <13% dan permeabilitas tanah <3 cm /jam, erosi tanah selama 3 bulan mencapai 37 t/ha (148 t/ha/tahun). Tanpa pemecahan lapisan liat, penipisan tanah lapisan atas terus berlangsung, sehingga aliran permukaan dan erosi tanah semakin kuat. Sebanyak 40 - 70% N, 80 - 90% P, dan 50 -70% K dari pupuk yang diberikan secara konvensional hilang ke lingkungan dan tidak dapat diserap oleh tanaman (Syukur et al 2010).

Melalui organisme tanah yang dalam siklus hidupnya dapat membuat liang dalam tanah (*burrower*) seperti cacing tanah, semut, rayap, jangkrik, dll. akan mampu membuka lapisan padat tersebut dan meningkatkan kapasitas perkolasi-infiltrasi tanah. Fender dan Mckey-Fender (1990) menyatakan bahwa cacing tanah *indigenous* biasanya hidup pada tanah bertekstur halus (liat) dan jarang ditemukan pada tanah berpasir. Pemberdayaan cacing tanah diharapkan dapat mengimbangi laju pemadatan tanah oleh akumulasi liat di bawah permukaan tanah yang berlangsung terus menerus. Cacing tanah dari kelompok pemakan serasah/limifagus dalam membuat liang di dalam tanah dengan mendesak masa tanah. Sedangkan dari kelompok geofagus dengan cara memakan masa tanah (Minnich 1977). Kontruksi liang cacing yang bersambungan dengan dinding yang kuat dan tersebar, dapat berperansebagai tempat mengalirnya air perkolasi-infiltrasi dapat berlangsung baik dan tidak mudah rusak oleh adanya pelarutan air. Subowo (2011) menyatakan bahwa liang-liang cacing tanah meningkatkan infiltrasi dan aerasi serta menurunkan aliran permukaan dan erosi tanah. Wibowo (2000) mendapatkan bahwa populasi cacing tanah berkorelasi nyata dan positif terhadap porositas tanah dengan

persamaan regresi: Porositas tanah(% ruang pori total) = 0,05 populasi cacing tanah (ekor/m²) + 41,41 (R=0,79). Pada kegiatan pengolahan tanah secara mekanik, adanya kelebihan air dapat mengakibatkan tanah terdispersi dan memadat kembali, sehingga dapat menutup pori-pori tanah.

Penurunan kepadatan tanah akan memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah yang selanjutnya berpengaruh terhadap kesuburan tanah. Sudharto et al. (1988) mendapatkan bahwa pemberian cacing tanah setara dengan 9,6 juta ekor/ha pada *Haploorthox* Citayam dapat memperbaiki kegemburan tanah dengan menurunkan bobot isi dan meningkatkan aerasi tanah. Hasil penelitian Anwar (2007) juga didapatkan bahwa perlakuan inokulasi cacing tanah pada tanah Ultisols mampu meningkatkan ruang pori dan menurunkan berat isi tanah (Tabel 15). Hal ini menunjukkan bahwa pemberdayaan organisme tanah yang mampu membuat liang di dalam tanah dapat meningkatkan perkolasi-infiltrasi yang selanjutnya dapat mengurangi aliran permukaan dan erosi tanah. Cacing tanah merupakan kelompok fauna tanah yang penting dan mempunyai peranan dalam memperbaiki produktivitas tanah melalui perbaikan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah (Lee 1985). Adanya liang-liang cacing tanah dapat meningkatkan laju infiltrasi dan perkolasi air, tempat menembus akar tanaman, sehingga dapat meningkatkan jelajah akar tanaman dan mengurangi aliran permukaan dan erosi.

Tabel 15. Pengaruh cacing tanah terhadap sifat fisik tanah *Ultisols*

Perlakuan	Ruang pori tanah	Berat Isi	Pori drainase cepat	Pori drainase lambat	Permeabilitas
	% vol	gr/cc ²	---%vol---		m/jam
Tanpa cacing	72,6	0,75	32,4	4,4	12,4
Dengan cacing	74,9	0,67	37,4	4,6	17,0

Sumber: Anwar (2007).

Tanah-tanah tua banyak dibangun oleh mineral liat 1:1, kandungan bahan organik dan kapasitas tukar kation rendah serta memiliki kemampuan menahan hara dan air rendah, sehingga pencucian hara berlangsung intensif. Subowo et al. (1990) mendapatkan bahwa Ca²⁺ dan NO₃⁻ merupakan kation dan anion yang banyak tercuci melalui air perkolasi pada tanah Ultisols Lebak-Banten. Sehubungan kedua hara ini merupakan unsur makro esensial bagi tanaman, upaya menekan laju pencucian menjadi langkah penting. Abrahamsen (1990) menyatakan bahwa inokulasi cacing tanah pada "mor humus" dapat meningkatkan kandungan NH₄⁺ dan NO₃⁻ ±18% dibanding tanpa pemberian cacing tanah. Sebagian besar bahan mineral/hara yang dicerna cacing tanah dikembalikan ke dalam tanah dalam

bentuk kotoran (*kascing*) yang lebih tersedia bagi tanaman (Edwards dan Loftly, 1972 dalam Schwert, 1990). Subowo (2002) mendapatkan bahwa *kascing* *Pheretima hupiensis* dari Ultisols mempunyai indek stabilitas agregat, pH, KTK, Ca, dan Mg lebih tinggi dibanding tanah disekitarnya (Tabel 16), dan *kascing* tersebut sebagian besar didepositkan kembali dalam liang cacing yang ditinggalkan.

Tabel 16. Sifat fisik dan kimia *kascing Pheretima hupiensis* dan tanah di sekitarnya (*Palehumults*)

Parameter	Kascing <i>P. Hupiensis</i>	Tanah disekitar
A. Sifat Fisik Agregat (%)	90	56
Indeks stabilitas agregat	476	221
B. Sifat Kimia		
pH : H ₂ O	6,70	4,55
KCl	6,00	3,85
Kation dapat tukar (me /100g):		
Ca	13,59	7,61
Mg	1,41	1,05
K	0,43	0,12
Na	0,82	0,11
KTK	13,20	10,12
Al ³⁺	0,00	2,66

Sumber: Subowo (2002).

Demikian pula Brata (1999) mendapatkan bahwa inokulasi *Pheretima, sp.* meningkatkan kandungan hara N, P, K, Ca, Mg, dan menurunkan Al-dd tanah. Hal ini menunjukkan bahwa cacing tanah *endogaesis-geofagus* mampu berperan sebagai agen pengumpul hara dan bahan organik tanah dan selanjutnya didistribusikan ke *rhizosfir*, sehingga dapat lebih tersedia bagi tanaman. Adanya liang cacing yang kaya hara akan memudahkan akar tanaman menembus sampai lapisan bawah, dan organisme aerobik, seperti bakteri *Rhizobium* yang mampu menambat N₂-udara dalam bintil akar tanaman *Leguminosae*.

Pemberdayaan cacing tanah *endogaesis-geofagus* yang mampu hidup di dalam tanah dengan diikuti pemberian bahan organik sampai pada areal jelajahnya akan mampu meningkatkan nilai fungsi bahan organik untuk perbaikan sifat fisik tanah, pelepasan hara, mencegah erosi tanah, mengurangi laju pencucian hara, dan memperpanjang daur hara/bahan organik tanah. Adanya cacing tanah pengolahan tanah dengan tingkat kesuburan dan konservasi tanah yang tinggi dan lestari dapat berlangsung secara alami dan ramah lingkungan.

VI. KELAYAKAN TANAH UNTUK APLIKASI PUPUK HAYATI

Untuk memaksimalkan nilai fungsi aplikasi pupuk hayati perlu diketahui terlebih dahulu kesesuaian kondisi tanah yang akan digunakan terhadap komoditas yang akan dikembangkan. Populasi organisme tanah *native* fungsional positif dikembangkan, sementara populasi organisme fungsional negatif (hama-penyakit) dapat ditekan. Aplikasi pupuk hayati di dalam tanah saat ini lebih berorientasi pada pengkayaan hara makro bagi tanaman dengan organisme perombak bahan organik (*dekomposer*), penambat N, dan pelarut P. Masalah yang harus dihadapi dalam aplikasi pupuk hayati adalah kesiapan tanah/habitat untuk mendukung kehidupan organisme pupuk hayati tersebut. Alexander (1977) menyatakan bahwa organisme tanah alami yang telah beradaptasi dengan habitatnya lebih mempengaruhi aktivitas metabolik komunitasnya. Sementara organisme introduksi hanya mampu hidup dalam waktu singkat dan tidak memiliki kemampuan mengubah kondisi komunitas secara nyata.

Hasil penelitian Subowo *et al.* (2013) didapatkan bahwa aplikasi inokulasi *Azotobacter* penambat N_2 udara pada tanah steril mengalami peningkatan populasi lebih tinggi dibanding pada tanah non steril (Tabel 17). Pada tanah steril tidak mengalami persaingan inter spesifik (persaingan antar spesies), namun pada tanah non steril mengalami persaingan inter maupun intra spesifik (persaingan di dalam spesies yang sama). Akibatnya perkembangan populasi pada tanah non steril cenderung lebih rendah dibanding pada tanah steril. Namun sampai dengan bulan ke-3 sebagian besar populasi mengalami penurunan, baik pada tanah steril maupun non steril. Pada bulan ke-3 perlakuan penambahan bahan organik mencapai 2,00% dan 3,00 % menghasilkan populasi *Azotobacter* lebih tinggi dibanding dengan kontrol dengan kandungan bahan organik (1,24 %).

Tabel 17. Perkembangan populasi mikroorganisme (log populasi) perlakuan mikroorganisme penambat N (*Azotobacter*) selama 3 bulan pengamatan

No.	Perlakuan	Perkembangan populasi <i>Azotobacter</i> (log populasi) bulan ke:							
		Tanah Steril				Tanah Nonsteril			
		0	1	2	3	0	1	2	3
1.	Kontrol(BO alam/1,24%*)	-	6,08	7,30	5,90	4,62	5,26	5,92	4,30
2.	BO pengaturan 2,00%	-	6,04	7,15	7,15	4,62	5,81	6,48	4,98
3.	BO pengaturan 3,00%	-	6,30	6,48	7,32	4,62	7,26	6,58	4,63

Keterangan: *) pengaturan/penambahan Bahan Organik (BO) menggunakan pupuk kandang.

Sumber : Subowo *et al.* (2013).

Untuk itu pemberdayaan organisme tanah *native* menjadi sangat penting, selain telah beradaptasi dengan lingkungannya sehingga tidak mengganggu keseimbangan lingkungan, juga murah dalam aplikasinya. Aplikasi pupuk hayati

hendaknya memperhatikan kondisi daya dukung tanah, terutama populasi organisme nativenya, C-organik tanah sebagai sumber energi bagi kehidupan organisme heterotrof, dan hara tersedia sebagai sumber hara bagi organisme autotrof. Apabila di dalam tanah secara alami (native) telah tersedia agensia hayati yang memadai, cukup dilakukan pembenahan kondisi habitat dengan pemberian amelioran ataupun pupuk. Sementara apabila belum cukup tersedia dapat dilakukan pengkayaan agensia hayati tanah dengan pupuk hayati dan dilengkapi dengan bahan amelioran untuk menjaga kehidupannya. Anwar dan Subowo (2011) menyatakan bahwa pengaruh aplikasi pupuk hayati untuk pertumbuhan tanaman sampai saat ini hasilnya sulit untuk diprediksi tidak seperti halnya untuk aplikasi pupuk anorganik/buatan. Beberapa Upaya penting yang perlu dilakukan untuk pemberdayaan hayati tanah antara lain kesesuaian populasi organisme *native* fungsional untuk pertanian; kandungan bahan organik dan hara tanah dan kandungan enzim nitrogenase dan enzim fosfatase.

6.1. Kesesuaian populasi organisme tanah *native* fungsional untuk pertanian

Langkah-langkah penting yang diperlukan dalam rangka pemberdayaan sumber daya hayati tanah untuk mendukung evaluasi kesesuaian lahan untuk pertanian seperti yang disampaikan Subowo *et al.* (2010) sebagai berikut: Inventarisasi populasi organisme tanah native dan peranannya terhadap tanaman; Evaluasi kesesuaian nilai fungsional organisme tanah terhadap pilihan komoditas dan penerapan kelengkapan data organisme tanah dalam sistem evaluasi kesesuaian lahan.

6.1.1. Inventarisasi populasi organisme tanah native dan peranannya terhadap tanaman

Inventarisasi data organisme dilakukan mengikuti skala pengamatan yang dilakukan untuk pengamatan data tanah lainnya. Pengamatan organisme tanah meliputi jenis, jumlah, dan sebaran vertikal maupun horizontal. Selanjutnya masing-masing jenis dikelompokkan ke dalam kelompok fungsional terhadap kepentingan pertumbuhan tanaman. Kelompok fungsional positif merupakan jenis organisme tanah yang dapat mendukung perbaikan pertumbuhan tanaman target yang meliputi fungsi daur hara, penyediaan hara, dan pengendali hama penyakit (predator). Sedang kelompok fungsional negatif merupakan kelompok yang mempunyai potensi merugikan tanaman, seperti sebagai hama-penyakit ataupun sebagai perantara berkembangnya hama-penyakit (*host intermedier*).

6.1.2. Evaluasi kesesuaian nilai fungsional organisme tanah terhadap pilihan komoditas

Hasil inventarisasi kelompok fungsional organisme tanah di atas selanjutnya dipadukan dengan komoditas pertanian yang layak untuk dikembangkan. Pilihan komoditas yang akan dikembangkan hendaknya dapat meningkatkan kelompok

fungsional positif dan menekan kelompok fungsional negatif dengan mempertimbangkan kondisi aktual alami yang ada. Analisis nilai fungsional penting ini dapat dilakukan dengan menghitung data populasi yang ada yang meliputi nilai kompatibilitas (keeratan hubungan), dominansi dan sebaran/agihan terhadap masing-masing target komoditas yang akan dikembangkan.

- *Nilai kompatibilitas* : ditentukan berdasarkan peluang tingkat keeratan hubungan antara suatu jenis organisme tanah yang ditemukan dengan parameter-parameter kesuburan tanah dengan uji korelasi-regresi. Selain itu juga dikaitkan keeratan hubungannya dengan tanaman target yang akan dikembangkan berdasarkan hasil-hasil penelitian sebelumnya ataupun dengan pemahaman lain yang dapat dipertanggung jawabkan (*expert judgment*). Semakin tinggi tingkat keeratan hubungan memperoleh nilai kompatibilitas paling tinggi (1,0). Organisme yang memiliki fungsional kompatibilitas positif diberi nilai/symbol positif (+), sebaliknya yang negatif diberi nilai/symbol negatif (-).
- *Nilai dominansi* : dihitung dengan melihat perbandingan nilai fungsional dari suatu jenis organisme tanah terhadap nilai fungsional dari organisme lainnya. Hal ini dapat dilihat dengan berdasarkan pada data hasil analisis kesuburan tanah yang mencerminkan besarnya pengaruh dari organisme tanah yang ada. Semakin tinggi peranannya dalam mempengaruhi kesuburan tanah semakin tinggi nilai dominansinya (1,0)
- *Nilai sebaran/agian* : dihitung berdasarkan nilai peluang ditemukannya suatu organisme pada data sampling masing-masing satuan peta tanah (SPT) yang dilakukan di lapangan. Semakin tinggi nilai peluangnya semakin besar nilai indeks sebarannya (1,0).
- ***Nilai fungsional organisme = nilai kompatibilitas x nilai dominansi x nilai sebaran***

Jenis organisme yang memiliki nilai fungsional tinggi memperoleh nilai tinggi dalam menentukan nilai kesesuaian lahan (diutamakan), selanjutnya secara bertahap pada jenis yang memiliki nilai penting rendah.

6.1.3. Penerapan kelengkapan data organisme tanah dalam sistem evaluasi kesesuaian lahan

Untuk melengkapi parameter evaluasi kesesuaian lahan pertanian parameter organisme tanah fungsional seperti pada Tabel 11 sementara ini penting untuk dipertimbangkan. Dengan memasukkan parameter organisme tanah ini, maka hasil evaluasi lahan dapat ditulis sebagai berikut: "misal tanah berliat terdapat populasi bakteri **Rhizobium, Fungi Pelarut Fosfat**, dan **Agromixa** memiliki kesesuaian lahan untuk kedelai S1". Sehubungan bakteri *Rhizobium* dan Fungi Pelarut P memiliki fungsional positif untuk kedelai, maka diberi symbol positif (+).

Sebaliknya Agromixa memiliki fungsional negatif sebagai hama/penyakit kedelai, maka diberi simbol negatif (-). Berdasarkan tambahan data organisme tanah tersebut, maka simbol kesesuaian lahan pada tanah berliat tersebut dapat ditulis:

Kedelai S1, Rhizobium⁺, Fungi Pelarut P⁺, Agromixa.

Agar nilai fungsi parameter organisme tanah untuk masing-masing unit kesesuaian lahan dapat berpengaruh nyata, maka perlu dilengkapi 2 - 5 indikator organisme tanah dengan sekurang-kurangnya 1 (satu) indikator organisme tanah yang berpengaruh positif (+) dan 1 (satu) indikator organisme tanah negatif (-). Semakin lengkap indikator organisme tanah pendekatan evaluasi kesesuaian lahan semakin sempurna. Berdasarkan hasil evaluasi kesesuaian lahan ini, langkah-langkah teknologi pengelolaan lahan dilakukan dengan mengembangkan peranan organisme tanah positif dan menekan organisme tanah negatif melalui aplikasi pupuk hayati.

6.2. Kandungan bahan organik dan hara tanah

Di dalam tanah bahan organik dapat dipilahkan menjadi 3 fraksi/bentuk, yaitu fraksi ringan, fraksi sedang, dan fraksi berat. Sementara organisme tanah pada umumnya hanya mampu menggunakan bahan organik pada fraksi ringan - sedang sebagai sumber hara dan energi. C-organik tanah pada fraksi berat banyak dibangun oleh C-organik dalam ikatan organo-mineral yang sangat kuat dan relatif stabil di dalam tanah, sehingga tidak mampu dimanfaatkan oleh organisme tanah pada umumnya. Penetapan kandungan C-organik tanah yang mampu dimanfaatkan sebagai sumber hara dan energi bagi organisme tanah yang memiliki nilai fungsional untuk kesuburan tanah perlu ditetapkan. Apabila kandungan bahan organik berada dibawah ambang batas fungsional perlu dilakukan penambahan sesuai kebutuhan untuk mendukung aktivitas organisme target yang diharapkan. Sementara apabila kandungan bahan organik telah memadai untuk mendukung aktivitas organisme target dapat langsung diaplikasikan. Hasil penelitian Subowo *et al.* (2013) didapatkan bahwa inokulasi pupuk hayati konsorsia pada tanah *Inseptisols* Ciampea (kontrol) dengan kesuburan tanah rendah tidak memberikan pengaruh nyata, namun dengan adanya penambahan pupuk NPK 25% - 100% inokulasi pupuk hayati konsorsia memberikan pengaruh nyata terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman kedelai (Tabel 18). Di antara formula pupuk hayati konsorsia yang mampu memberikan pertumbuhan vegetatif terbaik adalah B2 (Formula B) yang terdiri atas cacing tanah + *Rhizobium* + *Azotobacter* + Bakteri P dengan penambahan pupuk NPK 100%.

Tabel 18. Pengaruh inokulasi formulasi pupuk hayati konsorsia terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman kedelai umur 9 MST

Perlakuan Anak Petak (Formula PH) (B)	Petak Utama (Pupuk Kimia)(A)					Rata-rata
	A1 (NPK 100%)	A2 (NPK 75%)	A3 (NPK50%)	A4 (NPK25%)	A5 Kontrol	
.....Tinggi tanaman (cm).....						
B1 (Formula A)	90.56 bc*	93.17 bc	88.50 bc	76.03 ab	62.63 a	82.18 B
B2 (Formula B)	121.08 e	104.67 cd	85.67 b	88.83 bc	65.25 a	93.10 A
B3 (Formula C)	107.42 d	94.50 c	91.83 bc	73.50 ab	62.17 a	84.65 B
B4 (Kontrol)	105.00 cd	89.25 bc	86.75 b	79.78 b	62.28 a	84.61 B
Rata-rata	106.01 A	95.39 AB	86.65 B	79.54 B	63.08 C	

Keterangan : Angka yang diikuti oleh huruf kecil yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata 5% DMRT, dan angka pada baris atau kolom yang sama yang diikuti oleh huruf besar yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata 5% DMRT

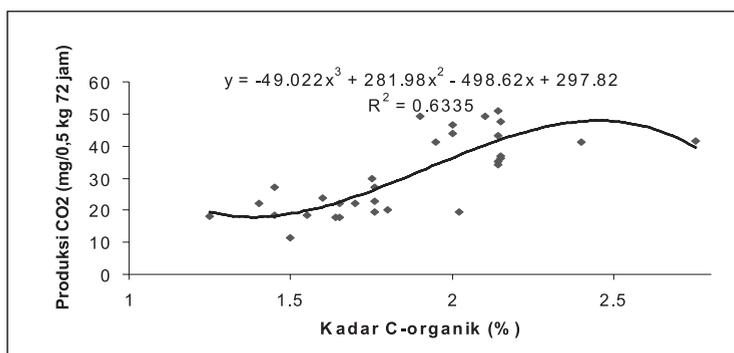
Formula A (*Rhizobium* + *Azotobacter* + Bakteri P +Fungi P); Formula B(Cacing tanah + *Rhizobium* + *Azotobacter* + Bakteri P); Formula C (Cacing tanah + *Rhizobium* + *Azotobacter* + Fungi P)

Sumber : Subowo *et al.* (2013).

Pemberian bahan organik ke dalam tanah juga dapat membantu mengurangi erosi, mempertahankan kelembaban tanah, mengendalikan pH tanah, memperbaiki drainase, mencegah pengerasan dan retakan, meningkatkan kapasitas pertukaran ion, dan meningkatkan aktivitas organisme tanah (Vidyarthi dan Misra 1982). Semua peran tersebut dapat berlangsung setelah bahan organik mengalami perombakan oleh aktivitas organisme tanah. Tanpa adanya aktivitas organisme tanah bahan organik akan tetap utuh (tidak terurai) di dalam tanah dan dapat mengganggu sistem produksi tanaman. Lal (1995) menyatakan penurunan jumlah dan kualitas bahan organik serta aktivitas organisme maupun keanekaragaman spesies fauna tanah merupakan bentuk degradasi tanah yang penting untuk tanah tropika basah. Sebagai wilayah megabiodiversitas selayaknya memberdayakan potensi sumber daya hayati tanah tersebut untuk memberikan sumbangan yang besar dalam upaya meningkatkan kesuburan dan produktivitas tanah.

Hasil penelitian Santosa (2009) menunjukkan bahwa penambahan kadar C-organik tanah di *Ultisols*, dapat meningkatkan aktivitas bakteri pelarut fosfat (BPF) dan mikroba tanah lainnya yang ditunjukkan dengan peningkatan aktivitas dehidrogenase, produksi CO₂-tanah, kadar P-tersedia (Bray I), dan penurunan kadar Al_{dd}. Pada tanah steril dengan kadar C-organik 1,5%, tidak berpengaruh terhadap aktivitas BPF yang ditunjukkan tidak adanya perbedaan aktivitas produksi CO₂-tanah (Gambar 11). Pada kadar C-organik 1,7 – 2,4% terjadi peningkatan produksi CO₂. Selanjutnya pada kadar C-organik >2,4% terjadi penurunan produksi CO₂. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan C-organik

tanah <1,5% sebagian besar fraksi bahan organik tanah merupakan fraksi berat yang terikat kuat/terjerab dalam partikel tanah, sehingga memiliki resistensi terhadap dekomposisi/pelapukan atau dapat dikatakan merupakan bahan organik mati. Pada kadar C-organik >1,7% bahan organik tanah sebagian dibangun oleh fraksi ringan-sedang, sehingga isolat BPF mampu memanfaatkan sebagai sumber energi dan hara untuk meningkatkan kelarutan P. Hasil penelitian Subowo *et al.* (2014) juga didapatkan bahwa pada pengaturan kandungan bahan organik tanah mencapai masing-masing 2,00% dan 3,00% memiliki peningkatan populasi mikroba fungsional penambat N₂ bebas *Azotobacter* lebih besar dibanding pada kandungan bahan organik alaminya (1,24%) (Tabel 17).



Gambar 11. Hubungan aktivitas pelepasan CO₂ oleh biomassa organisme tanah dengan kandungan C-organik tanah (Santosa 2009).

Dari gambaran di atas menunjukkan bahwa kandungan C-organik tanah sangat menentukan keberhasilan dalam aplikasi *pupuk hayati* untuk memperbaiki kesuburan tanah. Perlu kiranya dilakukan evaluasi ambang batas C-organik tanah yang layak untuk aplikasi *pupuk hayati*.

Inokulasi *Vesikular Arbuskular Mikoriza* (VAM) dapat meningkatkan produksi jagung yang mengalami kekeringan sesaat pada fase vegetatif dan generatif (Yusnaini *et al.* 1999). Hamzah dan Nasution (1999) juga mendapatkan bahwa pemberian pupuk dan bahan organik meningkatkan populasi mikroba pelarut-P, *Azotobacter*, *Actinomycetes*, dan produksi jagung (Tabel 19). Untuk dapat meningkatkan dayaguna sumber daya hayati tanah diperlukan dukungan habitat atau pakan sebagai sumber energi maupun hara. Hamim *et al.* (2009) juga mendapatkan bahwa aplikasi pupuk hayati menggunakan bakteri penambat N₂ bebas *Azospirillum sp* dan *Azotobacter sp* serta bakteri pelarut *Pseudomonas sp* dan *Bacillus sp* di rumah kaca dan lapangan untuk tanaman jagung, padi gogo, tomat, dan kentang selama 3 tahun memberikan respon sangat rendah terhadap produksi jika tidak disertai dengan pemberian kompos dan pupuk anorganik

sebagai sumber nutrisi. Pemberdayaan hayati tanah untuk mendukung produksi tanaman perlu pengendalian jenis organisme maupun jumlah populasinya. Pengendalian dapat dilakukan dengan peningkatan populasi dan pengaturan pemberian bahan organik, amelioran ataupun pupuk sesuai kebutuhan organisme yang ingin didayagunakan peranannya.

Tabel 19. Pengaruh pemupukan dan ameliorasi terhadap populasi organisme tanah dan produksi jagung pada tanah *Plinthic Kandiuudult* Lampung

Perlakuan	Populasi organisme tanah setelah panen			Produksi Jagung (t/ha)
	<i>Pelarut-P</i> ($\times 10^4$ cfu/g)	<i>Azotobacter</i> ($\times 10^3$ cfu/g)	<i>Actinomycetes</i> ($\times 10^3$ cfu/g)	
<i>Tanpa pupuk/kontrol</i>				
Kontrol	44	104	103	4,05
Bahan	70	106	119	6,49
Organik (BO)				
Bokashi	62	142	83	6,61
EM-4	55	96	58	5,86
<i>Pupuk NPK</i>				
Kontrol	49	51	70	6,35
Bahan	82	56	78	7,35
Organik				
Bokashi	83	87	63	7,60
Emas	48	89	52	7,25
BO + Bakteri	63	58	58	7,50
-P				
EM-4	52	65	62	6,60

Sumber: Hamzah dan Nasution (1999).

Aplikasi pupuk hayati pada tanah Inceptisols Bogor yang telah memiliki populasi organisme fungsional tanah native cukup tidak memberikan pengaruh lebih baik terhadap jumlah daun dan produksi daun caisim dibanding pemupukan NPK rekomendasi (Tabel 20). Hal ini menunjukkan bahwa organisme fungsional dari pupuk hayati yang diaplikasikan tidak memiliki efektivitas lebih baik dibanding organisme nativenya. Untuk meningkatkan kemampuan menyediakan hara setara dengan aplikasi NPK 100% masih diperlukan pemupukan NPK sebanyak 50-75%. Gunarto *et al.* (1987) juga mendapatkan bahwa inokulasi *Bradyrhizobium japonicum* tanpa pemupukan NPK memberikan pengaruh positif terhadap jumlah bintil akar dan produksi kedelai, sebaliknya inokulasi *Bradyrhizobium japonicum* tanpa pemupukan NPK pada tanaman kacang hijau tidak memberikan pengaruh nyata terhadap jumlah bintil akar maupun produksi dibanding kontrol (Tabel 21). Hal ini menunjukkan bahwa *Bradyrhizobium japonicum* hanya memiliki kompatibilitas/kecocokan dengan tanaman kedelai, sedang untuk kacang hijau tidak *compatible*. Sementara pemberian NPK tanpa

inokulasi *Bradyrhizobium japonicum* pada tanaman kacang hijau mampu memberikan produksi lebih tinggi.

Tabel 20. Pengaruh pupuk hayati terhadap pertumbuhan dan berat daun segar caisim saat panen di rumah kaca

No	Kode	Perlakuan	Jumlah daun			Panen (g/pot)
			1 MST	2 MST	3 MST	
1	P1	Kontrol	3,83 a*	6,17 ab	7,67 a	10,33 a
2	P2	NPK-rekomendasi	4,50 c	6,33 b	9,17 c	13,67 c
3	P3	<i>Pupuk hayati</i>	4,00 ab	6,00 ab	8,00 a	10,67 ab
4	P4	¼ NPK-rekmds + <i>Pupuk hayati</i>	4,17 b	5,50 a	8,33 ab	11,33 b
5	P5	½ NPK-rekmds + <i>Pupuk hayati</i>	4,00 ab	5,67 a	8,83 bc	13,00 c
6	P6	¾ NPK-rekmds + <i>Pupuk hayati</i>	4,17 b	5,50 a	8,33 ab	13,50 c

* Angka yang diikuti dengan huruf yang sama dalam kolom yang sama tidak berbeda nyata pada uji DMRT 5%

Sumber : Subowo dan Elsanti (2012).

Tabel 21. Pengaruh pemberian N dan inokulasi *Bradyrhizobium japonicum* terhadap jumlah bintil akar dan produksi kedelai dan kacang hijau

Perlakuan				Kedelai		Kacang hijau	
P (kg/ha)	K (kg/ha)	N (kg/ha)	Inokulasi	Jumlah Bintil	Hasil Biji (t/ha)	Jumlah Bintil	Hasil Biji (t/ha)
0	0	0	-	13	0,88	13	1,46
0	0	100	-	8	1,18	10	1,51
0	0	0	+	51	1,36	15	1,47
100	100	0	-	26	0,95	21	1,88
100	100	100	-	26	1,25	15	1,99
100	100	0	+	58	1,40	29	1,92

Keterangan: - : tidak dilakukan inokulasi, + : dilakukan inokulasi campuran 3 strain *Bradyrhizobium japonicum*: TAL 102, 377, dan 379.

Sumber: Gunarto *et al.* (1987).

Untuk itu pemberdayaan organisme tanah *native* fungsional positif (bakteri-P, fungi-P maupun organisme penambat N) dengan pemupukan sebagai sumber hara ataupun pemberian bahan organik sebagai sumber energi perlu dipertimbangkan agar lebih efektif dan bernilai guna dibanding dengan pendekatan introduksi semata. Aplikasi *Blue Green Algae-L₂* sebanyak 10 kg/ha + *Azolla pinata* sebanyak 15 t/ha yang diperkaya dengan fosfat dan molibdat memberikan efek signifikan terhadap aktivitas *Nitrogenase*, N-tersedia, serapan

N dan pertumbuhan tanaman padi sawah (Suryaman *et al* 2009). Pada tanah yang belum memiliki daya dukung memadai untuk mendukung aktivitas hayati tanah perlu dilakukan perbaikan habitat agar organisme target dapat berkembang sesuai rencana pengembangan komoditas yang akan dikembangkan.

6.3. Kandungan enzim *nitrogenase* dan enzim *fosfatase* tanah

Masalah utama rendahnya tingkat kesuburan tanah untuk pengembangan pertanian di kawasan tropika basah adalah tingginya laju pencucian hara N dan tingginya sematan P oleh partikel tanah (mineral maupun bahan organik) dan sulit diantisipasi secara fisiko-kimia. Pemberdayaan organisme tanah diharapkan dapat mengatasi permasalahan ini. Banyak jenis mikroba tanah yang mampu menambat N₂-bebas ataupun melepaskan sematan P-tanah melalui enzim-enzim yang dihasilkan baik ekstraseluler maupun intraseluler. Aktivitas enzim di dalam tanah berperan penting sebagai katalisa yang sangat dibutuhkan dalam proses kehidupan mikroorganisme tanah untuk dekomposisi bahan organik, penyedia/daur hara, pembentukan bahan organik tanah dan perbaikan struktur tanah (Wolinska dan Stepniewska 2012).

Diketahuinya besaran enzim *nitrogenase* maupun *fosfatase* dalam tanah diharapkan akan lebih mudah dalam menetapkan perlu tidaknya aplikasi pupuk hayati penambat N₂ maupun pupuk hayati pelarut fosfat dari organisme tanah yang hidup bebas. Hasil penelitian Ghulamahdi *et al.* (2006) pada tanaman kedelai dengan sistem budi daya jenuh air, mampu meningkatkan aktivitas enzim *nitrogenase*, meningkatkan serapan N, P, dan K daun, bobot biji panen dibanding budi daya kering (Tabel 22). Tabel 22 menunjukkan bahwa besarnya aktivitas enzim *nitrogenase* diikuti besarnya serapan N, bobot kering bintil akar, dan bobot kering biji panen.

Tabel 22. Pengaruh aktivitas enzim *nitrogenase* terhadap pertumbuhan kedelai pada beberapa sistem budi daya

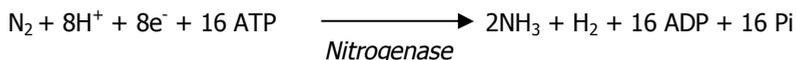
No.	Parameter	Sistem budi daya			
		Jenuh terus	Jenuh kering	Kering	
1.	Aktivitas <i>nitrogenase</i> (μmol/tanaman/jam)	9 MST	6,12 a*	0,58 b	0,09 b
2.	Serapan N 9 MST (mg/tanaman)		125,38 a	59,47 b	47,29 b
3.	Bobot kering bintil akar (g/tanaman)	9 MST	0,97 a	0,08 b	0,07 b
4.	Bobot kering biji kedelai saat panen (g/tanaman)		4,78 a	1,99 b	1,55 b

* Angka yang diikuti dengan huruf yang sama dalam baris yang sama tidak menunjukkan perbedaan yang nyata pada uji DMRT 5%.

MST : minggu setelah tanam.

Sumber : Ghulamahdi *et al.* (2006).

Sebelum aplikasi pupuk hayati penambat N₂ maupun pelarut P pada tanah perlu ditetapkan terlebih dahulu jenis organisme yang sesuai. Hal ini penting karena organisme yang aktif melakukan penambatan N cukup banyak seperti *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *BGA*, dll. Untuk menetapkan pilihan jenis mikroorganismenya yang tepat tidaklah mudah, memerlukan biaya dan waktu yang tidak sedikit untuk identifikasi. Pada prinsipnya bahan aktif untuk melakukan penambatan N₂-bebas oleh organisme tanah diperankan oleh enzim *nitrogenase*. Mekanisme penambatan N₂-bebas oleh enzim *nitrogenase* sbb:



Dari hasil analisis tersebut selanjutnya dapat dipilih organisme penambat N mana yang masih perlu ditingkatkan sesuai daya dukung tanahnya. Namun apabila aplikasi pupuk hayati untuk mikroba simbiotik yang dalam proses penambatan N₂ diperlukan dukungan tanaman lain/inang, pertimbangan kandungan enzim *nitrogenase* tanah dapat diabaikan dan pertimbangan lebih pada hubungan komoditas target dan jenis mikroba penambat N yang digunakan.

Pada tanah-tanah tropika fosfor banyak ditemukan dalam bentuk ikatan organik yang sangat beragam, kompleks, dan sebagian besar tidak dapat dikarakterisasi (Fitriatin *et al.* 2013). Sementara peranan mikroba pelarut fosfat (P) dalam meningkatkan kelarutan P banyak diperankan oleh enzim *fosfatase* dari banyak jenis mikroba tanah atau akar tanaman (Cookson 2003 dalam Fitriatin *et al.* 2013). Evaluasi kelayakan aplikasi pupuk hayati pelarut fosfat berbasis pada spesies mikroba secara langsung semata juga akan sulit dan mahal dalam identifikasinya. Untuk itu penetapan kandungan enzim *fosfatase* dalam tanah yang layak untuk aplikasi organisme pelarut P akan memudahkan dalam aplikasi pupuk hayati pelarut P. Inokulasi bakteri pelarut fosfat (BPF) dengan takaran pupuk P yang berbeda pada tanah *Andisols* mempengaruhi aktivitas enzim fosfatase secara signifikan (Tabel 23). Aplikasi 75 kg P/ha, inokulasi BPF meningkatkan aktivitas fosfatase dan P-tersedia tanah pada 2 MST (minggu setelah tanam) serta meningkatkan hasil jagung tanpa kelobot pada fase generatif akhir. Tabel 23 menunjukkan bahwa hubungan antara kandungan *fosfatase* tanah terhadap P-tersedia, antara kandungan fosfatase tanah terhadap produksi jagung manis, dan antara P-tersedia terhadap produksi jagung manis berkorelasi nyata dan positif (Tabel 24). Selanjutnya hasil uji regresi didapatkan hubungan P-tersedia terhadap hasil jagung lebih nyata dan positif dibanding hubungan *Fosfatase* terhadap hasil jagung seperti pada Gambar 12. Disamping itu, perlu ditetapkan besaran kandungan P-potensial/P-total (P-HCl) yang layak untuk dilepaskan oleh organisme pelarut fosfat. Aplikasi organisme pelarut P menjadi efektif sesuai dengan daya dukung tanahnya.

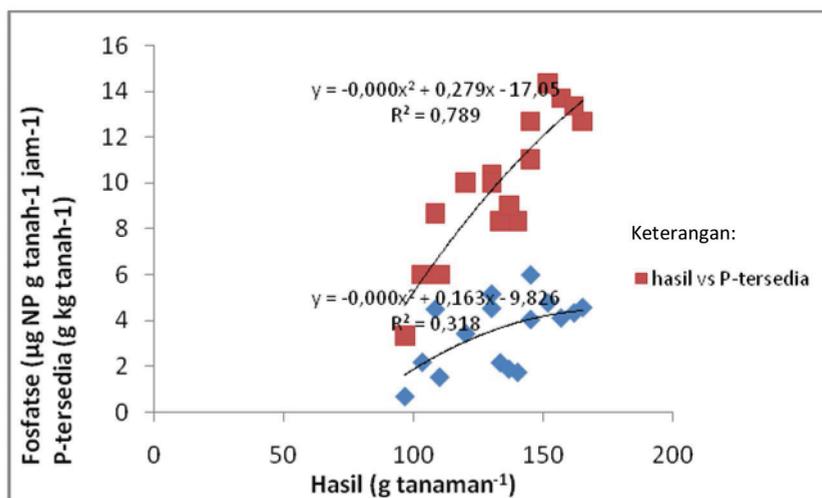
Tabel 23. Pengaruh inokulasi bakteri pelarut P dan pupuk P terhadap aktivitas fosfatase tanah dan P-tersedia tanah *Andisols* di rumah kaca

Isolat	Parameter	Pupuk P (kg P/ha)			
		0	75	112,5	150
1. Tanpa (kontrol)	- Fosfatase ($\mu\text{g NP/g jam}$)	0,67 a*	1,73 a	5,15 b	2,15 a
	- P-tersedia (mg/kg)	3,33	8,33	10,33	8,33
	- Hasil jagung tanpa kelobot (g/tanaman)	96,67 a	140,00 a	130,00 a	133,33 a
2. <i>B. mycooides</i>	- Fosfatase ($\mu\text{g NP/g jam}$)	1,52 b	4,11 b	4,57 ab	1,87 a
	- P-tersedia (mg/kg)	6,00	13,67	12,67	9,00
	- Hasil jagung tanpa kelobot(g/tanaman)	110,00 a	156,67 ab	165,00 b	136,67 a
3. <i>B. laterosporus</i>	- Fosfatase ($\mu\text{g NP/g jam}$)	2,17 b	4,33 b	3,42 a	4,04 b
	- P-tersedia (mg/kg)	6,00	13,33	10,00	12,67
	- Hasil jagung tanpa kelobot (g/tanaman)	103,33 a	161,67 b	120,00 a	145,00 a
4. <i>F. balustinum</i>	- Fosfatase ($\mu\text{g NP/g jam}$)	4,49 c	4,77 b	4,53 ab	5,99 c
	- P-tersedia (mg/kg)	8,67	14,33	10,00	11,00
	- Hasil jagung tanpa kelobot (g/tanaman)	108,33 a	151,67 ab	130,00 a	145,00 a
Rata-rata	- Fosfatase ($\mu\text{g NP/g jam}$)	2,21	3,74	4,41	3,51
	- P-tersedia (mg/kg)	6,00 A	12,42 B	10,75 B	10,25 B
	- Hasil jagung tanpa kelobot (g/tanaman)	104,58	152,50	136,25	140,00

* Angka yang diikuti dengan huruf kecil yang sama dalam kolom yang sama tidak berbeda nyata dan angka yang diikuti dengan huruf besar dalam baris yang sama tidak berbeda nyata pada uji DMRT 5%.
Sumber: Fitriatin et al. (2013).

Tabel 24. Korelasi antara kandungan *fosfatase*, P-tersedia, dan hasil jagung

Parameter	<i>Fosfatase</i> ($\mu\text{g NP/g/jam}$)	P-tersedia (mg/kg)	Hasil Jagung (g/tanaman)
<i>Fosfatase</i> ($\mu\text{g NP/g/jam}$)	1		
P-tersedia (mg/kg)	0,767725	1	
Hasil jagung (g/tanaman)	0,550438	0,88538	1
Batas nyata	05	0,482	0,482
	01	0,606	0,606

Gambar 12. Hubungan hasil jagung terhadap kandungan P-tersedia dan enzim *fosfatase* tanah

Di antara inokulan yang diuji *Flavobacterium balustinum* meningkatkan aktivitas *fosfatase* tanah (4,77 $\mu\text{g NP/g/jam}$) dan P-tersedia (14,33 mg/kg) tertinggi. Pada takaran aplikasi 112,5 kg P/ha – 150 kg P/ha inokulasi BPF terjadi penurunan aktivitas *fosfatase* dan kelarutan P-tersedia. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan ketersediaan P-tanah terjadi pada kandungan enzim fosfatase tanah 0,67 $\mu\text{g NP/g/jam}$ sampai dengan 4,77 $\mu\text{g NP/g/jam}$. Apabila kandungan P dalam tanah rendah, aplikasi P perlu ditambahkan. Sebaliknya apabila P tanah tinggi (>150 kg P/ha) tidak perlu dilakukan aplikasi P. Untuk menjamin adanya peran aktivitas hayati fungsional dari pupuk hayati yang diaplikasikan perlu dilakukan penambahan bahan organik sebagai sumber hara maupun energi untuk mendukung kehidupannya. Peranan penting bahan organik di dalam tanah tidak hanya dari jumlah tetapi juga dari kualitas sebagai sumber

energi dan produksi enzim bagi mikroorganisme tanah (Fortain *et al* 2003 dalam Wolinska dan Stepniewska 2012).

Selain itu agar aplikasi pupuk hayati sesuai dengan sasaran, maka penetapan pilihan jenis pupuk hayati perlu disesuaikan dengan kondisi daya dukung tanah meliputi kandungan C-organik, enzim *nitrogenase* dan enzim *fosfatase* yang dapat diwujudkan dalam bentuk *peta kelayakan aplikasi pupuk hayati*. Di dalam peta kelayakan aplikasi pupuk hayati ini dapat dilengkapi dengan sebaran jenis hama-penyakit bawaan tanah yang ada di dalam masing-masing satuan peta. Hal ini penting selain dapat dimanfaatkan untuk efisiensi aplikasi pupuk hayati juga dalam penentuan kesesuaian pilihan jenis komoditas yang tahan terhadap potensi serangan hama penyakit bawaan tanah. Agar mudah dalam aplikasinya bahan-bahan penera/indikator aktivitas organisme tanah (kandungan C-organik, enzim *nitrogenase*, dan enzim *fosfatase* ataupun sebaran jenis hama-penyakit bawaan tanah) dapat dibuat dalam bentuk penera organisme tanah yang mudah dioperasikan di lapangan (*soil biotest kit*). Ketepatan aplikasi pupuk hayati sesuai kebutuhan dan kelayakan aplikasi akan dapat mencegah terjadinya guncangan perubahan keseimbangan ekosistem dan mendukung pengembangan pertanian ramah lingkungan dan lestari.

VII. PERKEMBANGAN PUPUK HAYATI

Populasi organisme fungsional dalam pupuk hayati dapat berasal dari jenis-jenis makroorganisme maupun mikroorganisme yang memiliki fungsi dapat memperbaiki kesuburan tanah, baik untuk meningkatkan ketersediaan hara ataupun perbaikan sifat fisik tanah dan ketahanan tanaman. Mikroorganisme tanah yang merupakan sel hidup membutuhkan kondisi lingkungan/habitat yang sesuai dan sangat spesifik, karena sangat peka terhadap perubahan lingkungannya. Sementara makroorganisme yang memiliki mobilitas akan menghindari/migrasi dari kondisi yang kurang menguntungkan. Karena belum siapnya kondisi lingkungan/habitat tempat aplikasi hayati tanah sering kali aplikasi hayati tanah di lapangan tidak mampu memberikan respon sesuai yang diharapkan. Demikian pula, tingginya diversitas sumber daya tanah juga menambah gangguan terhadap keberhasilan aplikasi pupuk hayati di Indonesia. Untuk itu pilihan pupuk hayati dapat berisikan organisme tunggal ataupun organisme majemuk/konsorsia.

Dalam proses produksi pupuk hayati tunggal relatif lebih mudah dalam pengendalian kondisi habitat, namun potensi memperbaiki kesuburan tanah dan cakupan target di lapangan lebih sempit. Sebaliknya pupuk hayati majemuk (*konsorsia*) memiliki kemampuan memperbaiki kesuburan tanah lebih luas, namun proses produksi dan pengkondisian habitat relatif lebih sulit. Antar individu organisme fungsional yang terkandung di dalamnya harus tidak bersifat antagonis. Untuk itu dalam proses produksi pupuk hayati majemuk, uji kompatibilitas di antara organisme fungsional target harus dilakukan sebelum digabungkan dalam produk pupuk hayati. Selain itu uji kompatibilitas hendaknya juga dilakukan terhadap organisme *native* yang ada di lapangan, agar nilai fungsional organisme target dapat lebih optimal dan bernilai guna. Media/karier yang digunakan perlu mempertimbangkan kondisi daya dukung tanah yang akan dipupuk, baik populasi organisme eksisting/*native* maupun sifat fisik dan kimia tanahnya. Apabila daya dukung kurang memadai dapat dilakukan pengkayaan dengan pemupukan maupun ameliorasi. Masalah yang tidak kalah penting dalam menjaga kualitas pupuk hayati agar organisme fungsional target tetap memiliki peranan sesuai yang diharapkan, kemasan produk akhir hendaknya mampu melindungi organisme sesuai fungsionalnya dan lama waktu sampai pada aplikasi di lapangan.

7.1. Perkembangan produksi pupuk hayati

7.1.1. Produksi pupuk hayati cacing tanah *endogaesis*.

Pemberdayaan cacing tanah dapat menjadi solusi dalam mengatasi permasalahan dalam rehabilitasi tanah lahan pertanian terdegradasi akibat erosi, pencucian hara, dan kedalaman tanah. Pemberdayaan cacing tanah *endogaesis*

geofagus mampu membuat liang dan melepaskan kacing di dalam tanah potensial untuk dimanfaatkan. Liang-liang oleh cacing tanah *endogaesis geofagus* dapat meningkatkan laju perkolasi-infiltrasi dan menurunkan erosi serta pencucian hara. *Kacing* memperkuat stabilitas agregat tanah, mengkonservasi C-organik tanah dan meningkatkan ketersediaan hara tanah. Marinissen dan Dexter (1990) menyatakan bahwa kotoran cacing tanah lebih stabil dibanding agregat alami dari tanah. Demikian juga dengan aktivitas pencernaannya yang mampu mencampur bahan organik dan mineral tanah, cacing tanah *geofagus* dapat mencegah kehilangan bahan organik dari erosi dan pencucian. Pemberdayaan cacing tanah *endogaesis geofagus* perlu dukungan pengetahuan terkait perilaku, kebutuhan habitat, teknik perbanyakan dan metode aplikasinya. Cacing tanah termasuk hewan tingkat rendah karena tidak mempunyai tulang belakang (invertebrata) dan merupakan hewan tanah yang tidak asing bagi masyarakat, terutama bagi masyarakat pedesaan. Namun saat ini populasinya di dalam tanah lahan pertanian sangat mengawatirkan meskipun mempunyai potensi yang sangat menakjubkan bagi kehidupan dan kesejahteraan manusia.

Cacing tanah merupakan organisme tanah heterotrof, bersifat *hermaprodit biparental*, fototaksis negatif (menjauhi arah datangnya cahaya), aktif di malam hari (*nocturnal*). Cacing tanah juga berkembang biak dengan cara *partenogenesis* (fragmentasi) apabila mendapat tekanan fisik ataupun kimia yang ekstrim. Dalam sistem taksonomi hewan, cacing tanah diklasifikasikan sebagai berikut:

Philum	: <i>Anelida</i> .
Kelas	: <i>Oligochaeta</i> ,
Famili	: 1. <i>Lumbricidae</i> , dan
	2. <i>Megascolecidae</i> .

Untuk reproduksi, dua ekor cacing tanah berkopulasi dengan saling mempertukarkan sel sperma. Cacing tanah setelah melakukan kopulasi akan membentuk kokon sebagai tempat berkembangnya embrio pada klitelum (Schwert 1990). Selanjutnya, kokon dilepaskan ke dalam tanah dan menetas/pecah setelah terbentuk embrio secara sempurna. Kopulasi dan produksi kokon biasanya dilakukan pada bulan-bulan panas (Coleman dan Crossley 1996). Wibowo (2000) mendapatkan bahwa koleksi kokon di Ultisols Lampung sebanyak 22 butir kokon/m² pada musim hujan dan 8 butir/m² di musim kemarau. Baret (1947) dalam Kuhnelt (1976) melakukan pembiakan (rearing) kokon *Eisenia foetida* dalam kotak kayu dengan diisi tanah, anakan cacing tanah menetas dari kokon setelah 2 – 3 minggu inkubasi dan 2 – 3 bulan anakan tersebut telah dewasa. Masa hidup cacing selama 10 tahun dengan setiap pasang cacing mampu menghasilkan 150 kokon/th. Apabila kondisi tidak baik (kekeringan dan panas) kokon dapat bertahan tidak menetas dan menunggu sampai kondisi menjadi lebih baik (Minnich 1977). Cacing tanah

endogaesis hanya mampu menghasilkan kokon yang sedikit (3 – 13 butir/th) demikian pula jumlah individu setiap kokon 1 – 3 ekor. Teknologi produksi kokon berikut karier sebagai bahan pembawa/pelindung yang sesuai untuk produksi pupuk hayati perlu diteliti lebih mendalam. Produksi kokon cacing tanah *endogaesis* sebagai sumber pupuk hayati tanah sampai saat ini belum berkembang dengan baik.

Teknologi produksi *pupuk hayati* cacing tanah dilakukan dengan melakukan budi daya (*rearing*) dan ditempatkan pada kondisi gelap. Bahan hayati cacing tanah yang digunakan berupa kokon maupun cacing tanah dewasa hidup. Nurlaily dan Subowo (2011) mendapatkan media budi daya (*rearing*) cacing tanah *endogaesis* dengan 6 bagian bahan tanah mineral dan 1 bagian bahan organik pupuk kandang masih memberikan respon positif untuk produksi kokon. Rearing cacing tanah *endogaesis* (*Pontoscolex corethrurus*) dalam bak budi daya dapat dihasilkan 12.000 ekor/m²/th (1,6 – 2,8 kg berat) membutuhkan biaya 3,6 euro/kg. Sementara kalau dilakukan dengan koleksi lapang dengan "*hand sorting*" diperlukan biaya 6 – 125 euro/kg cacing hidup (Senapati *et al.* 1999). Selanjutnya dikatakan bahwa campuran media perbanyak cacing tanah *endogaesis* antara tanah dan bahan organik adalah 3 : 1 dengan diberi 40 ppm fosfat. Inokulasi *P. corethrurus* 15 ekor setelah 75 minggu dihasilkan 206 kokon pada kondisi kapasitas lapang. Rearing dapat dilakukan bertahap dari skala kecil (kotak) sampai skala besar (lapangan). Hasil penelitian Kabar dan Anwar (2007) didapatkan bahwa media terbaik untuk rearing *Pheretima hupiensis* adalah media campuran tanah dan isi rumen 2 : 1 dengan tingkat produktivitas 8x selama 11 minggu inkubasi, tingkat mortalitas cacing induk 9% dan pertumbuhan matang gonad 5 minggu. Bahan terbaik sebagai karier kokon adalah gambut halus dengan masa simpan mencapai 4 minggu pada temperatur kamar dengan daya tetas >60%.

Penelitian media rearing cacing tanah *endogaesis* ini, perlu dilakukan ketersediaan bahan media di masing-masing lokasi. Cacing tanah *endogaesis* lokal yang ada dapat diperbaiki habitatnya melalui perlakuan ameliorasi dengan pemberian bahan organik, kapur maupun fosfat alam dengan penempatan di dalam tanah secara bertahap dengan penempatan sesuai dengan target lahan yang ingin diperbaiki tingkat kesuburan tanahnya. Cacing tanah akan terus bergerak sesuai ketersediaan bahan amelioran tersebut.

7.1.2. Produksi pupuk hayati penambat N.

Hara N merupakan faktor pembatas utama pada tanah pertanian tanaman pangan intensif sebagai akibat tingginya laju pencucian, penguapan dan terangkut panen. Aplikasi menggunakan pupuk N dari urea yang cepat tersedia (*fast release*) agar efisien diperlukan intensitas aplikasi tersebut beberapa kali, sehingga memerlukan biaya aplikasi yang mahal. Sementara di dalam tanah telah tersedia organisme penambat N₂⁻ bebas untuk menghasilkan N yang dapat tersedia bagi tanaman. Inventarisasi organisme tanah penambat N₂⁻ bebas perlu

dilakukan dan dibudidayakan/diperbanyak. Pada Tabel 13 telah ditunjukkan beberapa jenis organisme tanah yang mampu menambat N_2^- bebas, baik yang hidup bersimbiose membentuk bintil akar pada *Rhizobium* dengan tanaman inang maupun yang hidup bebas.

A. Pedoman umum produksi pupuk hayati penambat N simbiotik *Rhizobium* dengan tanaman *Leguminosae*.

- Koleksi bintil akar tanaman inang (*leguminosae*) sehat dan efektif dengan ukuran besar dan berwarna merah sampai kecoklatan apabila dibelah.
- Inventarisasi dan identifikasi jenis organisme penambat N_2^- bebas dari bintil akar dengan permukaan bintil akar disterilkan terlebih dahulu dengan etanol 95% dan dibilas dengan air steril sebelum dibelah. Bintil akar yang berwarna merah sampai kecoklatan dan digerus.
- Ambil sebagian suspensi steril tersebut dan oleskan merata dengan ose dalam media Yeast Mannitol Agar (YMA padat) + congo red dalam cawan petri steril.

Media Yeast Mannitol Agar (YMA) padat atau Sari Khamir Manitol (SKM):

KH_2PO_4	: 0,5 g
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	: 0,2 g
Na Cl	: 0,1 g
Manitol	: 10 g
Yeast ekstrak	: 0,5 g
Bacto agar	: 15 g
Congo red	: 10 ml
Akuades	: 1.000 ml

- Inkubasikan pada temperatur ruang bebas dari kontaminan sampai ± 10 hari.
- Amati setiap hari perkembangan pembentukan koloni berwarna bening dipermukaan media. Pemunculan koloni 1 - 7 hari awal inkubasi merupakan jenis cepat (*fast grower*), sedang koloni yang mencul sesudahnya sebagai jenis lambat (*slow grower*).
- Pisahkan masing-masing jenis dan identifikasi.
- Inokulasi dan evaluasi masing-masing jenis kapasitas penambatan N_2^- bebas dan kemampuan interaksi dengan tanaman inang di rumah kaca maupun di lapangan.
- Jenis terpilih perbanyak dalam kultur cair (*Yeast Mannitol Broth*) steril dalam fermentor beraerasi steril. Dalam perbanyakannya ini diharapkan diperoleh populasi yang tinggi ($>10^{10}$ cfu/ml).
- Inokulasikan pada media pembawa/karier yang sesuai (gambut, zeolit, arang, cairan diperkaya dll) sebagai bahan inokulan/pupuk hayati. Pada

pupuk hayati ini sampai pada saat aplikasi populasi organisme masih mencapai $>10^7$ cfu/g atau ml.

Catatan : pada media pembawa dapat ditambahkan kapur atau hara dan energi lain agar tidak mengganggu organisme sampai pada siap aplikasi dengan jumlah populasi masih memadai.

B. Pedoman umum produksi pupuk hayati penambat N simbiotik *Blue Green Algae* dengan *Azolla*.

- Koleksi dan seleksi BGA penambat N_2 .
- Koleksi dan seleksi *Azolla* di lapangan.
- Tanam *Azolla* pada bak perbanyakan pada kondisi tergenang secukupnya sesuai hasil koleksi di lapangan.
- Inokulasikan BGA penambat N_2 hasil seleksi pada bak perbanyakan *Azolla*.
- Inkubasikan beberapa hari sampai pertumbuhan *Azolla* menutup seluruh bak perbanyakan.
- Pupuk hayati simbiotik BGA dengan *Azolla* siap disebar sebagai pupuk organik di lahan pertanian (sawah ataupun lahan kering).

C. Pedoman umum produksi pupuk hayati penambat N bakteri nonsimbiotik.

- Inventarisasi dan identifikasi jenis organisme penambat N_2^- bebas, organisme yang berasal dari tanah yang ekstrim kritis sangat baik untuk digunakan (Gambar 13). Organisme ini memiliki toleransi cekaman lingkungan yang cukup baik, sehingga memiliki spektrum penggunaan lebih luas.



Gambar 13. Koloni *Azotobacter sp* penamabat N nonsimbiotik pada media agar miring. (Sumber: Elsanti)

- Perbanyak pada media kultur yang sesuai untuk masing-masing organisme target (LG medium untuk *Azotobacter*, Nfb untuk *Azospirillum*, dll).

Media LG untuk *Azotobacter* (Hastuti 2007):

KH_2PO_4	: 0,15 g
K_2HPO_4	: 0,05 g
Ca Cl_2	: 0,01 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	: 0,20 g
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	: 2 mg
FeCl_2	: 0,01 g

Brom timol blue (0,5% larutan etanol) : 2 ml

CaCO_3	: 1 g
Sukrosa	: 20 g
Agar	: 15 g
Akuades	: 1 l

Media Nfb semi-padat bebas N (Hastuti 2007):

Asam malat	: 5 g
K_2HPO_4	: 0,5 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	: 0,2 g
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	: 0,02 g

Larutan unsur mikro: 2 ml, terdiri dari :

H_2BO_4	: 1,40 g
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	: 1 g
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	: 0,12 g
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	: 0,4 g
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	: 1,5 g
H_2O	: 1,0 l

Brom timol blue (0,5% larutan dalam 0,2 M KOH) : 2 ml

Larutan Fe EDTA 1,64%

Larutan vitamin: 1 ml, terdiri dari :

Biotin	: 10 mg
Pyridoxol-HCl	: 20 mg
H_2O	: 100 ml
Agar	: 1,75 g
Akuades	: 0,8 l

Atur pH menjadi 6,8 dengan KOH selanjutnya tambah akuades sampai mencapai 1,0 l

- Evaluasi kapasitas penambatan N_2^- bebas dan kemampuan interaksi dengan tanaman untuk meningkatkan produksi di rumah kaca maupun di lapangan.
- Jenis terpilih perbanyak dalam kultur cair yang sesuai dalam fermentor beraerasi steril. Dalam perbanyakannya ini diharapkan diperoleh populasi yang tinggi ($>10^{10}$ cfu/ml).
- Inokulasikan pada media pembawa/karier yang sesuai (gambut, zeolit, arang, cairan diperkaya dll) sebagai bahan inokulan/pupuk hayati. Pada pupuk hayati ini sampai pada saat aplikasi populasi organisme masih mencapai $>10^7$ cfu/g atau ml.

Catatan : pada media pembawa dapat ditambahkan kapur atau hara dan energi lain agar tidak mengganggu organisme sampai pada siap aplikasi dengan jumlah populasi masih memadai.

D. Pedoman umum produksi pupuk hayati penambat N *Blue Green Algae* (BGA) nonsimbiotik.

Blue Green Algae BGA merupakan organisme tanah autotrof fotosintetik yang hidup pada kondisi basah/lembap yang sebagian diantaranya mampu melakukan penambatan N_2 -bebas secara soliter ataupun berasosiasi dengan tanaman air *Azolla*. Penambatan N berlangsung apabila dalam lingkungan hidupnya miskin hara N dan hasil penambatan N tersebut selanjutnya tersimpan dalam biomassa BGA. Biomassa BGA memiliki kandungan N tinggi, sehingga memiliki C:N ratio rendah dan mudah mengalami dekomposisi. Setelah terdekomposisi/perombakan oleh mikroba pengurai, hara N dapat dilepaskan dan dapat tersedia untuk tanaman. Selain itu keberadaan BGA yang dalam aktivitas fotosintetiknya melepaskan O_2 , sehingga dapat meningkatkan nilai redoks potensial tanah sawah dan menurunkan kelarutan Fe^{2+} yang dapat mengganggu pertumbuhan padi sawah, terutama pada tanah lahan sawah bukaan baru. Untuk itu perlu dilakukan produksi/perbanyakannya BGA sebagai bahan pupuk hayati untuk produksi padi sawah dengan langkah-langkah sbb:

1. Koleksi dan seleksi BGA

Untuk mendapatkan bahan inokulan BGA yang baik perlu kiranya diawali dengan inventarisasi jenis BGA yang mempunyai kemampuan tinggi dalam melakukan penambatan N_2 -bebas. Seleksi dilakukan dengan pengambilan contoh tanah di lapangan/lahan sawah. Contoh tanah diencerkan dan ditumbuhkan pada media Fogg's-N (bebas N) padat di laboratorium. BGA yang tumbuh, diidentifikasi dan dipisahkan sesuai dengan jenisnya. Dipilih jenis BGA yang memiliki kemampuan menambat N_2 (Tabel 12) dan

dimurnikan secara bertahap. Selanjutnya ditumbuhkan pada media perbanyakan dan digunakan sebagai *stock* kultur.

Media Fogg's – N.

K_2HPO_4	: 0,2 g
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	: 0,2 g
$CaCl_2 \cdot 7H_2O$	: 0,1 g
Larutan A_5	: 0,1 ml, terdiri dari:
H_3BO_3	: 2,5 g
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	: 1,8 g
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	: 0,2 g
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	: 0,05 g
H_2O	: 1,0 liter

Semua bahan di atas larutkan dalam akuades sampai pada 1 liter dan atur pH sampai mencapai 7,0 dengan HCl atau NaOH.

Tambahkan agar sebanyak 10 – 15 g dalam 1 liter media cair.

2. Perbanyak pada bak kultur

- Siapkan bak kultur dengan ukuran 2 m x 1 m kedalaman 0,25 m dari bahan plastik atau fiberglass berwarna gelap.
- Isikan tanah ayakan/halus sebanyak 8 – 10 kg dan dicampur dengan TSP sebanyak 25 g.
- Aliri air sampai sedalam 5 – 15 cm.
- Periksa pH air sampai netral, apabila masih masam tambahkan kapur sampai pH netral $\pm 7,0$.
- Tambahkan folidol 0,001 ppm atau 0,00075 ppm parathion atau carbofuran 3% granul 25 gram untuk melindungi adanya serangan insekta air.
- Taburkan biakan kultur BGA dari stock kultur pada permukaan air
- Letakkan bak pada tempat terbuka dan terkena langsung sinar matahari.
- Jika terjadi evaporasi yang besar tambahkan air secukupnya.
- BGA akan membentuk lapisan tebal di permukaan tanah.
- Biarkan air menguap melalui evapotranspirasi sampai mengering dan lapisan BGA akan mengelupas dari permukaan tanah.

- Ambillah BGA yang telah mengelupas dan simpan dalam kantong, siap untuk aplikasi di lapangan. Setiap kali panen biasanya dapat di panen sebanyak 1,5 – 2,0 kg bahan inoculan kering atau 0,75 – 1,0 kg/m²
- Apabila masih diperlukan bak perbanyakan ini dapat digunakan kembali dengan mengisi ulang air dan pengaturan pH seperti sebelumnya.
- Proses ini dapat diulang lagi sampai daya dukung tanah tidak memadai lagi (biasanya dapat diulang 3 - 4 kali).
- Apabila diperlukan produksi inoculan yang lebih banyak dapat dilakukan dengan pembuatan bak kultur sesuai dengan jumlah yang dikehendaki .

3. Perbanyakan di lahan sawah (lapang)

- Siapkan lahan seluas 40 m² .
- Buat pematang setebal 15 cm dan tinggi 10 cm.
- Aliri air sampai kedalaman 2,5 cm.
- Taburkan TSP sebanyak 4 kg.
- Berikan 25 g carbofuran 3% granul.
- Inokulasi dengan 5 kg inoculan BGA yang telah dihasilkan dari bak perbanyakan.
- Jika BGA telah tumbuh dengan membentuk lapisan di permukaan tanah, dikeringkan dan siap untuk aplikasi sebagai pupuk hayati di lahan sawah. Pada musim panas produksi pupuk hayati BGA dengan luasan 40 m² ini dapat mencapai 16 – 30 kg per panen.
- Ulangi lagi produksi inoculan sesuai kebutuhan dengan pemberian P dan insektisida.
- Jangan menyimpan pupuk hayati BGA ini bersentuhan langsung dengan pupuk atau bahan kimia lainnya. Jika pada kondisi yang baik (kering) pupuk hayati ini dapat tahan dalam kurun waktu yang lama tanpa mengurangi potensinya.

7.1.3. Produksi pupuk hayati *Vesikular Arbuscular Mikorisa* (VAM)

Jamur *Vesikular Arbuscular Mikorisa* (VAM) merupakan kelompok jamur tanah yang mampu bersimbiose dengan beberapa tanaman, termasuk tanaman pangan dan hortikultura. Berdasarkan struktur tubuh dan cara menginfeksi akar, VAM memiliki jaringan hifa yang masuk ke dalam sel korteks akar, membentuk struktur yang khas seperti oval yang disebut vesikula atau bercabang yang disebut arbuskula, menghasilkan spora di luar jaringan akar, tidak memiliki batang tubuh dan tidak dapat diperbanyak tanpa tanaman inang. Melalui aktivitasnya VAM dapat melepaskan ikatan fosfat dalam tanah dan selanjutnya diserap dan dimanfaatkan bagi tanaman inangnya. Peningkatan hara P sebagai sumber energi bagi tanaman inang tentunya dapat meningkatkan serapan hara

lainnya dan juga dapat melindungi tanaman dari gangguan lingkungan habitatnya, seperti serangan hama-penyakit ataupun cekaman tekanan kekeringan/kebasahan, dll. Hasil penelitian Simanungkalit *et al.* (1992) didapatkan bahwa perlakuan inokulasi VAM meningkatkan bobot kering biji kacang tanah sebesar 26% dibanding tanpa inokulasi VAM.

Sesuai dengan sifat hidupnya, propagasi VAM dapat berasal dari hifa maupun dari spora yang banyak dihasilkan di luar jaringan akar tanaman inang. Untuk itu tatacara produksi inokulan VAM dapat dilakukan sbb:

- Siapkan media tanah dengan kandungan P-potensial tinggi dan P-tersedia rendah untuk pertumbuhan tanaman inang, gunakan tanaman kedelai atau jagung sebagai tanaman inang.
- Tetapkan perlakuan pemupukan dasar yang sesuai dengan kondisi tanah yang digunakan, sehingga dapat memberikan pertumbuhan tanaman inang terbaik.
- Taburkan inokulan VAM pada titik tanam tanaman inang secukupnya sebelum penanaman.
- Pemeliharaan tanaman dengan menjaga tanaman tetap memiliki vigor yang baik dengan memupuk menggunakan larutan Jensen's + *trace elements* sesuai kebutuhan dan menjaga adanya potensi kekeringan ataupun adanya serangan hama-penyakit.

Larutan Jensen's:

CaHPO ₄	: 1,0 g
K ₂ HPO ₄	: 0,2 g
MgSO ₄ .7H ₂ O	: 0,2 g
Na Cl	: 0,2 g
Fe Cl ₃	: 0,1 g
H ₂ O	: 1,0 l

Trace elements :

Bo	: 0,05%
Mn	: 0,05%
Zn	: 0,005%
Mo	: 0,005%
Cu	: 0,002%

Untuk 1 l larutan Jensen's tambahkan 1 ml larutan *trace elements*.

- Pertahankan tanaman berada pada phase vegetatif lebih lama agar tanaman memiliki perakaran yang banyak. Penundaan fase generatif dapat dilakukan dengan merompes/memotong bunga yang terbentuk, sehingga habitus tanaman menjadi lebih besar dan lebat.
- Setelah dipandang cukup, lakukan *stressing* dengan pengeringan untuk merangsang pembentukan spora VAM lebih banyak.
- Setelah kering dan tanaman mati, tanah dapat dibongkar dan dipisahkan antara tanah dan akar + spora mikoriza.

- Akar + spora mikorisa pindahkan ke media karier dapat berupa tanah *Andisol*, zeolit halus ataupun gambut halus dan kering (kadar air <15%). Bahan siap untuk disimpan dan digunakan sebagai sumber inokulan.

7.1.4. Produksi pupuk hayati mikroorganisme pelarut fosfat

Di dalam tanah fosfat sebagian besar terikat secara kuat dalam ikatan organik maupun hidrat oksida mineral sebagai $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (*veriscite*) dan $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (*strengite*) pada kondisi masam dan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada kondisi basa. Adanya asam-asam organik (termasuk enzim *fosfatase*) yang banyak dihasilkan oleh organisme hidup (mikroba pelarut P) (Gambar 15), P tersemat dapat dilepaskan oleh adanya gugus-gugus fungsional anionik yang menarik unsur-unsur logam pengikat fosfat. Fosfat bebas selanjutnya dapat diserap oleh akar tanaman.



Gambar 14. Zone bening (*hallo zone*) bakteri pelarut P (kiri) dan fungi pelarut P (kanan) pada media agar padat. (Foto: Elsanti)

Banyak organisme tanah yang mampu menghasilkan enzim *fosfatase* dan melarutkan hara P-tersemat, baik bakteri maupun fungi (Tabel 12), namun sebaran jenis yang mampu berkembang pada suatu kondisi tanah tertentu sangat terbatas. Untuk itu perlu dilakukan inventarisasi jenis mikroba pelarut fosfat pada masing-masing kondisi tanah dan pertanaman. Jenis yang memiliki potensi pelarutan P tersemat perlu dikembangkan dan dimanfaatkan sebagai pupuk hayati pelarut P.

Cara produksi pupuk hayati pelarut fosfat.

- Inventarisasi dan identifikasi jenis organisme pelarut P, organisme yang berasal dari tanah yang ekstrim kritis sangat baik untuk digunakan. Diharapkan organisme ini memiliki toleransi cekaman lingkungan yang cukup baik, sehingga memiliki spektrum penggunaan lebih luas.
- Perbanyak pada media *Pikovskaya* untuk masing-masing organisme target.

Media *Pikovskaya* :

Glukosa	: 10 g
Ca ₃ (PO ₄) ₂	: 5 g
(NH ₄) ₂ S O ₄	: 0,5 g
MgSO ₄ ·2H ₂ O	: 0,1 g
FeSO ₄	: sedikit
Ekstrak khamir	: 0,5 g
Agar	: 15 g
Air	: 1 l

- Evaluasi kapasitas pelarutan P dengan melihat lebarnya bentukan *halozone* dalam media.
- Evaluasi kemampuan interaksi dengan tanaman untuk meningkatkan produksi di rumah kaca maupun di lapangan.
- Jenis terpilih perbanyak dalam kultur cair yang sesuai dalam fermentor beraerasi steril. Dalam perbanyakannya ini diharapkan diperoleh populasi yang tinggi ($>10^{10}$ cfu/ml).
- Inokulasikan pada media pembawa/karier yang sesuai (gambut, zeolit, arang, cairan diperkaya dll) sebagai bahan inokulan/pupuk hayati. Pada pupuk hayati ini sampai pada saat aplikasi populasi organisme masih mencapai $>10^7$ cfu/g atau/ml.

Catatan : pada media pembawa dapat ditambahkan kapur atau hara dan energi lain agar tidak mengganggu organisme sampai pada siap aplikasi dengan jumlah populasi masih memadai.

7.1.5. Produksi mikroba dekomposer

Dalam proses pengomposan, konsorsia agen hayati tanah seperti fauna tanah, bakteri, fungi, dan aktinomiset berperan penting dalam pendegradasian bahan – bahan organik seperti limbah pertanian, sampah pasar, limbah rumah tangga, limbah pabrik, dan buangan organik lainnya. Pada prinsipnya proses pengomposan bahan organik diawali oleh pemecahan/fragmentasi bahan organik menjadi potongan-potongan lebih kecil oleh fauna tanah. Bahan organik yang telah terfragmentasi, baik berupa kotoran/fecal dan sisa-sisa bahan organik dimanfaatkan oleh organisme lain yang lebih kecil (fungi dan mikroba) dan diurai menjadi bahan-bahan yang lebih halus dan dilepaskan unsur-unsur hara yang terkandung didalamnya. Dengan kompleksnya pelaku perombak bahan organik alami ini, maka dalam upaya mempercepat pemanfaatan kompos pendekatan alami ini sulit untuk diupayakan. Penggunaan mikroba *dekomposer* yang mampu merombak senyawa selulose dan lignin atau dikenal sebagai lignoselulose diharapkan dapat mempercepat proses dekomposisi. Belakangan ini pemanfaatan konsorsia mikroba tanah perombak lignoselulose banyak dilakukan untuk mempercepat proses dekomposisi. Sementara proses fragmentasi bahan organik yang diperankan oleh fauna tanah dilakukan secara mekanik dengan alat

mesin, sehingga nilai tambah aktivitas fauna tanah dalam memperbaiki sifat fisik tanah menjadi hilang.

Mikroba yang potensial menghasilkan enzim lignoselulase antara lain: *Mycobacteriales*, *Actinomycetales*, dan *Eubacteriales* dari kelompok bakteri, sedang dari kelompok cendawan/fungi yang menghasilkan enzim *selulase* antara lain *Aspergillus terreus*, *A. fumigatus*, *A. niger*, *Eupenicillium javanicum*, dll (Rosmimik dan Yuniarti 2007). Berbagai teknologi pengomposan menggunakan dekomposer konsorsia mikroba tersebut telah banyak dikembangkan pada skala kecil, menengah, dan besar. Untuk mempermudah pelaksanaannya pengadaan sumber inokulan konsorsia mikroba untuk proses pengomposan yang lain dapat dilakukan dengan memindahkan sebagian dari mikroba yang telah ada dalam kompos sebelumnya. Pemanfaatan kompos dari bahan organik *in situ* dapat dilaksanakan oleh para petani ataupun pengusaha kompos dengan mudah dan cepat. Proses produksi kompos *in situ* selain dapat menghemat biaya transportasi bahan baku yang bersifat *bulky/voluminous* juga kompos yang sudah matang dapat secara langsung dimanfaatkan untuk tanaman. Oleh karena itu praktek pengomposan dalam jangka panjang diharapkan menjadi salah satu subsistem dalam kegiatan pertanian.

Cara pembuatan pupuk hayati *dekomposer*.

- Isolasi dan identifikasi mikroba lignoselulolitik dari bahan kayu lapuk dengan menumbuhkan pada media basal selulolitik maupun lignolitik.

-Medium basal selulolitik(Rosmimik dan Yuniarti 2007):

KH_2PO_4	: 1 g
K_2SO_4	: 0,5 g
Na Cl	: 0,5 g
FeSO_4	: 0,5 g
NH_4NO_3	: 1 g
CMC	: 200 ml (10 g dalam 200 ml akuades)
Agar	: 20 g

Tepatkan dengan menambah akuades sampai pada volume larutan 1 l, suhu 121°C pada tekanan 0,1 Mpa selama 15 menit. Setelah hangat kuku tuangkan dalam *petridish*.

-Medium basal lignolitik (Rosmimik dan Yuniarti 2007):

KH_2PO_4	: 1 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	: 0,5 g
KCl	: 0,1 g
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	: 0,5 g
NH_4NO_3	: 0,1 g

Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	: 0,05 g
Malt ekstrak	: 2 g
Agar dalam 1 L akuades	: 15 g
Sterilisasi medium basal lignolitik bersama batang pengocok magnetik dalam erlenmeyer dengan autoklaf. Pada suhu ±55°C tambahkan bahan-bahan sbb:	
KOH 1M	: 5 ml
Guaiakol	: 0,4 ml
Indulin AT (alkali lignin)	: 1 g
Antibiotik Clortetrasycline-HCl	: 30 mg
Streptomysin sulfat	: 30 mg
Penisilin G	: 30 mg
Benomil	: 4 mg
Kocok dan tuangkan dalam <i>petridish</i> .	

Mikroba yang mampu memanfaatkan kedua media dapat dipilih sebagai mikroba potensial sebagai inoculan/pupuk hayati dekomposer. Namun demikian apabila masing-masing hanya mampu untuk 1 jenis media, dipilih yang terbaik untuk setiap media.

- Perbanyak mikroba *dekomposer* terpilih dalam media yang sesuai.
- Campurkan masing-masing jenis ke dalam 1 media karier kompos, gambut atau arang.
- Evaluasi kompatibilitas antar jenis mikroba dengan mengamati perkembangan populasi masing-masing mikroba. Apabila masing-masing mampu berkembang menunjukkan adanya kompatibilitas, sebaliknya apabila ada yang mengalami penurunan menunjukkan tidak kompatibel dan harus dicarikan media lain yang sesuai.

7.1.6. Produksi pupuk hayati konsorsia

Interaksi organisme tanah dengan tanaman memiliki hubungan fungsional yang sangat kompleks, baik sebagai pemasok hara, perbaikan aerasi, pengendalian hama-penyakit ataupun sebagai bagian dari hama-penyakit itu sendiri. Masing-masing organisme memiliki fungsi spesifik sesuai dengan kondisi lingkungan setempat. Pembuatan pupuk hayati dari 1 jenis organisme akan lebih mudah dalam sistem produksi, namun nilai pemanfaatannya sangat terbatas/spesifik. Sementara tanaman berinteraksi dengan organisme tanah fungsional dari berbagai macam jenis. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, upaya pembuatan pupuk hayati agar efisien dan berspektrum luas dilakukan penggabungan beberapa jenis organisme fungsional dalam satu sistem produksi

atau dengan kata lain dalam bentuk konsorsia. Hal ini diharapkan agar sistem produksi dapat lebih murah dan penggunaan di lapangan lebih luas.

Semakin banyak jenis organisme fungsional yang dapat disatukan dalam konsorsia akan memiliki nilai guna yang sangat luas dan efektif. Hindari terjadinya kompetisi antar populasi, baik kompetisi/persaingan antar jenis (*interspesifik*) maupun antar sesama jenis (*intraspesifik*). Untuk itu sebelum penggabungan masing-masing organisme diperbanyak pada masing-masing media yang sesuai. Selanjutnya diuji kompatibilitas antar jenis yang akan dikonsorsiasikan pada media konsorsia. Demikian pula dengan pilihan media/karier untuk perbanyakannya juga perlu dikaji kesesuaiannya. Upaya yang sementara ini dilakukan untuk menghindari kompetisi antar jenis dalam konsorsia dengan dibuat *enkapsulasi* untuk melindungi persaingan antar individu mikroorganisme. *Enkapsulasi* masih memerlukan biaya yang relatif mahal dan masih kurang seimbang dengan perbaikan hasil yang didapatkan.

7.2. Perkembangan pemanfaatan pupuk hayati untuk lahan pertanian

Kepemilikan lahan pertanian tanaman pangan yang sempit (<0,2 ha/KK), memaksa petani memanfaatkan lahan secara intensif dengan pola tanam relatif sama sepanjang tahun, keseimbangan hara dalam tanah menjadi terganggu, terutama hara makro (NPK). Untuk mengejar pertanaman berikutnya, bahan organik sisa panen tidak sempat dikembalikan ke lahan. Hara N dan K yang tidak memiliki penyanggaan yang kuat di dalam tanah akan mudah habis tercuci dan hara P yang mudah terfiksasi oleh oksida-oksida logam di dalam tanah akan tersemat (immobilisasi). Rendahnya kandungan bahan organik tanah juga menekan populasi sumber daya hayati tanah yang berperanan penting sebagai agen pengendali kesuburan tanah alami. Selain itu dalam sistem budidaya pertanian intensif sering kali dilakukan aplikasi bahan-bahan pestisida dan pembakaran, sehingga dapat mengganggu populasi organisme tanah bukan target. Jatmiko *et al.* (2006) melaporkan bahwa aplikasi herbisida paraquat untuk persiapan tanam menekan populasi *Rhizobium* tanah, namun tidak menekan populasi jamur *Aspergillus, sp., Penicillium, sp.* dan khamir. Oleh karena itu dalam kegiatan budi daya pertanian tanaman pangan semusim harus selalu diberikan pupuk/hara segar *ataupun pupuk hayati* untuk mendukung peningkatan produksi tanaman.

Organisme tanah pada prinsipnya dapat membantu tanaman dalam menyediakan kebutuhan hara tanah, memperbaiki sifat fisik-kimia tanah, mengendalikan ketersediaan air tanah, dan menekan serangan hama-penyakit tular tanah. Untuk itu pemberdayaan organisme tanah *native* menjadi

sangat penting dan telah beradaptasi dengan lingkungannya, sehingga tidak mengganggu keseimbangan lingkungan dan juga murah dalam aplikasinya. Aplikasi pupuk hayati (*biofertilizer*) hendaknya memperhatikan kondisi daya dukung tanah, terutama C-organik tanah sebagai sumber energi bagi kehidupan organisme heterotrof.

Kesuburan tanah tropika dapat diperbaiki dan dipertahankan dengan memanipulasi sifat biologi tanah (Scholes *et al.* 1994). Lal (1995) juga menyatakan bahwa penurunan jumlah dan kualitas bahan organik tanah serta aktivitas biologi maupun keanekaragaman spesies fauna tanah merupakan bentuk degradasi tanah yang penting di kawasan tropika basah. Perbaikan populasi hayati tanah untuk rehabilitasi tanah terdegradasi hendaknya selalu diikuti pemberian bahan organik sebagai sumber hara dan energi bagi kehidupan hayati tanah. Pengkayaan populasi organisme tanah dapat dilakukan dengan aplikasi pupuk hayati diikuti pemberian amelioran ataupun pupuk untuk mendukung pertumbuhannya. Tiunov *et al.* (2001) menyampaikan bahwa pakan bahan organik dari serasah tanaman kapur (*Tilia cordata*) lebih disukai cacing tanah *Lumbricus terrestris* L. dibandingkan dengan pakan dari tanaman duri (*Fagus sylvatica*) yang ditandai dengan produksi kasing. Pada dinding liang cacing kaya keragaman jenis dan jumlah biomassa dari *Nematoda*, *Protozoa*, *Flegellata*, *Amoeba*, dan *Mikroba*, serta kandungan N dan P lebih tinggi dibanding tanah di luar liang. Hal ini menunjukkan bahwa pengkayaan keanekaragaman hayati dengan diikuti pemberian pakan bahan organik mampu mendorong berkembangnya organisme tanah lainnya. Sementara apabila populasi organisme *native* telah tersedia namun jumlah dan fungsi belum optimal dapat dilakukan perbaikan media tanah/habitat melalui ameliorasi ataupun pemupukan. Namun apabila tidak tersedia/jumlah sedikit dapat dilakukan inokulasi pupuk hayati dengan intensitas yang tinggi.

Perkembangan teknologi aplikasi pemupukan hayati tanah untuk pertanian adalah sebagai berikut:

1. Teknologi pengkayaan hayati tanah pada awalnya dilakukan dengan memindahkan tanah yang kaya hayati tanah fungsional (soil transfer). Teknologi ini dilakukan dengan memindahkan sejumlah tanah yang diyakini mengandung organisme tanah fungsional untuk memperbaiki kesuburan tanah. Melalui teknologi ini terjadi pengkayaan organisme tanah beserta habitat alaminya (hara dan energi) dan keseimbangan ekosistem tanah relatif tidak terganggu, namun memerlukan biaya yang besar untuk pengangkutan tanah.
2. Pengembangan pupuk hayati secara kultur. Teknologi ini dilakukan dengan mengekstrak (mengambil) organisme tanah fungsional yang memiliki kemampuan memperbaiki kesuburan tanah dengan diperbanyak dalam kultur menggunakan media spesifik. Selanjutnya inokulan hasil perbanyakannya ini diaplikasikan di lapangan untuk pengembangan

komoditas tertentu tanpa mempertimbangkan kondisi daya dukung tanah. Jaminan aktivitas organisme fungsional target tidak dapat dipertanggungjawabkan dan sangat tergantung kesiapan tanah menyediakan hara dan energi dan daya adaptasi organisme. Pengembangan pupuk hayati secara kultur ini dapat dilakukan dengan menggunakan organisme tunggal ataupun campuran dari beberapa jenis mikroba (konsorsia). Pupuk hayati dengan organisme tunggal memiliki kemudahan dalam memilih media pembawa (carrier) serta dalam aplikasinya mudah diarahkan sesuai target fungsional yang diperlukan. Namun nilai fungsional yang diperoleh terbatas hanya untuk fungsional organisme tersebut. Sementara pupuk hayati konsorsia di buat dengan target mampu memberikan nilai fungsional yang lebih lengkap sesuai permasalahan lapangan dan komoditas target. Masalah yang dihadapi adalah perpaduan/*compatibilitas*di antara organisme yang dipadukan serta pilihan media yang tepat dan juga kebutuhan jenis organisme riil di lapangan, sehingga organisme dapat tetap hidup dan mampu memberikan fungsinya dengan baik. Berikut contoh pupuk hayati konsorsia mikroba penambat N₂-udara, pelarut P dan perombak bahan organik (Tabel 25).

Tabel 25. Jenis dan populasi konsorsia *pupuk hayati* dari mikroorganisme

No	Jenis mikro	Populasi (cfu/mi)	Jenis fungsional
1.	<i>Rhizobium, sp</i>	$5,0 \times 10^7$	Bakteri penambat N ₂ -udara simbiotik
2.	<i>Azotobacter, sp</i>	$2,3 \times 10^7$	Bakteri penambat N ₂ -udara non simbiotik
3.	<i>Azospirillum, sp</i>	$1,4 \times 10^6$	Bakteri penambat N ₂ -udara non simbiotik
4.	<i>Bacillus, sp.</i>	$2,5 \times 10^6$	Bakteri pelarut P
5.	<i>Aspergillus niger</i>	$3,1 \times 10^4$	Fungi pelarut P
6.	<i>Lactobacillus, sp</i>	$2,7 \times 10^7$	Bakteri perombak bahan organik
7.	<i>Trichoderma</i>	$2,0 \times 10^3$	Fungi perombak bahan organik

Sumber : Subowo (2011).

- Belakangan ini berkembang teknologi aplikasi pupuk hayati dengan diikuti pengkayaan hara dan energi serta bahan amelioran yang mampu meningkatkan ketahanan tanaman dari serangan hama penyakit. Teknologi ini diharapkan aktivitas hayati tanah target memiliki jaminan/dukungan untuk dapat berfungsi sebagai mana seharusnya. Formulasi media produksi pupuk hayati konsorsia BGA-L₂ dan *Azolla* pinata sebagai agen hayati penambat N₂- udara sangat dipengaruhi oleh kecukupan fosfat dan molibdat sebagai co-faktor enzim *Nitrogenase* (Suryatman *et al* 2009).

Masalah yang mungkin timbul adalah terdesaknya organisme tanah fungsional positif *native* oleh organisme baru (*introduksi*), dan pada saat lain apabila pasokan hara dan energi yang dibutuhkan untuk organisme baru ini tidak tersedia akan mengalami kemerosotan populasi. Hasil aplikasi pupuk hayati diikuti bahan amelioran sebagai sumber energi dan hara serta bahan ikutan lain dapat meningkatkan produksi dan kandungan antioksidan Zn, Ca, dan Mg beras pecah kulit (Tabel 26).

Tabel 26. Pengaruh aplikasi pupuk hayati dengan diikuti pemberian sumber energi dan hara serta bahan ikutan lain (proteksi tanaman)

No	Perlakuan**	Produksi GKG (t/ha)	Kandungan antioksidan beras pecah kulit (ppm)*			
			Fe	Zn	Ca	Mg
1.	<i>Pupuk hayati 1</i>	8,94 bc***	237 ab	32 b	0,14 b	0,17 b
2.	<i>Pupuk hayati 2</i>	8,80 b	486 d	30 b	0,19 b	0,17 b
3.	<i>Pupuk hayati 3</i>	9,14 c	415 c	35 b	0,16 b	0,16 b
4.	<i>Pupuk hayati 4</i>	8,62 b	180 a	37 b	0,14 b	0,17 b
5.	P e t a n i	7,18 a	378 bc	15 a	0,01 a	0,10 a

Keterangan: * Hasil analisa Laboratorium Kimia, Balai Tanah, Bogor.

** *Pupuk hayati 1*: pupuk hayati murni; *Pupuk hayati 2*: pupuk hayati murni + energi; *Pupuk hayati 3*: pupuk hayati murni + energi + hara; *Pupuk hayati 4*: pupuk hayati murni + energi + hara + protektan

*** Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji MRT 5%

Sumber: Subowo *et al.* (2012).

- Melihat permasalahan di atas, ke depan aplikasi *pupuk hayati* ke dalam tanah hendaknya juga mempertimbangkan terhadap kelestarian organisme *native* fungsional positif yang telah ada dan juga disediakan habitat yang sesuai untuk mendukung aktivitas organisme target. Penetapan ambang batas kelayakan kandungan enzim *Nitrogenase* dan *fosfatase* yang mencerminkan kesiapan alami organisme *native* untuk melakukan aktivitas pengkayaan penambatan N dan pelarutan P tanah sendiri penting untuk diketahui. Efektivitas aplikasi pupuk hayati untuk pengkayaan hara N dan P dapat lebih terjamin. Demikian juga kelayakan kandungan C-organik tanah sebagai penyangga hara dan

energi organisme tanah perlu ditetapkan agar aplikasi pupuk hayati dapat terjamin nilai fungsionalnya.

Teknik aplikasi pupuk hayati ditujukan agar organisme fungsional positif, baik jumlah maupun jenisnya yang terkandung dalam pupuk hayati dapat berkembang sesuai dengan fungsinya untuk meningkatkan kesuburan tanah. Masalah yang dihadapi Indonesia merupakan negara kepulauan (± 17.000 pulau) di kawasan tropika basah dan memiliki diversifikasi sumber daya lahan sangat lebar. Pasokan mineral berasal dari aktivitas vulkanik maupun marine yang beragam jenis, jumlah maupun intensitasnya. Saat terjadi erupsi juga terjadi sterilisasi hayati tanah oleh paparan panas yang mencapai $>700^{\circ}\text{C}$. Paparan panas akibat kebakaran untuk sementara waktu dapat meningkatkan N-NH_4^+ , fosfor tersedia, Na^+ , K^+ , dan Mg^{2+} serta menurunkan KTK dan Ca^{2+} (Gimeno-Garcia *et al.* 2000 dalam Firmansyah dan Subowo 2012). Setelah dua tahun pasca kebakaran mengalami penurunan akibat rendahnya laju mineralisasi yang banyak diperankan oleh organisme tanah. Akibatnya diversitas/keanekaragaman sumber daya hayati tanah secara spasial dan waktu sangat tinggi. Untuk itu teknologi aplikasi *pupuk hayati* hendaknya juga memperhatikan kondisi daya dukung yang bersifat spesifik lokasi tersebut. Pada tanah bekas erupsi gunung api tentunya membutuhkan aplikasi hayati tanah lebih lengkap sesuai dengan daya dukung tahapan suksesi ekologisnya.

Yusnaini *et al.* (2008) mendapatkan bahwa di hutan primer Lampung tidak ditemukan cacing tanah akibat pH tanah masam. Perbaikan pH tanah menjadi faktor penting yang harus disediakan untuk dapat mendayagunakan fungsi cacing tanah. Sebaliknya Sudriatna *et al.* (1992) mendapatkan bahwa inokulasi *Rhizobium* pada tanah yang telah mengandung *Rhizobium* 4.10^3 sel/g tanah tidak efektif meningkatkan produksi kedelai. Sementara Kurnia (1996) mendapatkan bahwa rehabilitasi tanah *Typic Haplohumults* terdegradasi dengan pemberian bahan organik dapat meningkatkan populasi makrofauna (cacing tanah, rayap, dan uret) dan memperbaiki struktur tanah dibanding tanpa pemberian bahan organik. Anwar *et al.* (2011) melaporkan bahwa organisme tanah yang paling erat korelasinya dengan produksi kedelai pada tanah Ultisols adalah cacing tanah, dengan model persamaan: $Y = -0,237X^2 + 7,845 X + 5,28$ ($R^2 = 0,853$). Nilai konstanta 5,28, artinya tanah Ultisols masih bisa menghasilkan kedelai apabila terdapat minimal 5,28 ekor cacing tanah/ m^2 dengan nilai maksimum 200,02 ekor cacing tanah/ m^2 .

Untuk mengantisipasi kondisi ini sistem produksi pupuk hayati umumnya diarahkan ke bentuk universal dengan formula bentuk konsorsia dengan berbagai jenis organisme fungsional dalam satu kemasan agar memiliki spektrum pemakaian luas. Hasil aplikasi menjadi sangat bervariasi, pada tempat-tempat

tertentu positif dan pada tempat lainnya tidak nyata dan bahkan dapat memberikan hasil negatif. Aplikasi pupuk hayati sebaiknya dilakukan pada habitat tanah dengan kandungan bahan organik sebagai sumber energi dan hara yang mencukupi untuk mendukung aktivitasnya. Sementara kesuburan tanah pertanian di Indonesia rendah akibat rendahnya kandungan bahan organik dan ketersediaan hara. Aplikasi pupuk hayati tanpa diikuti pemberian bahan organik sebagai sumber energi untuk mendukung kehidupannya kurang memberikan pengaruh nyata terhadap target yang diharapkan. Penetapan parameter kunci untuk memberikan jaminan keberhasilan aplikasi pupuk hayati menjadi penting, seperti kandungan C-organik tanah, kandungan enzim *nitrogenase*, dan kandungan *fosfatase*.

Tantangan dan solusi dalam aplikasi pupuk hayati untuk pemulihan kesuburan tanah dapat dilakukan langkah sebagai berikut:

1. Aplikasi pupuk hayati yang memiliki fungsional tinggi untuk memperbaiki kesuburan tanah dapat dilakukan dengan pengkayaan populasi hayati tanah yang belum tersedia pada tanah tersebut.
2. Apabila populasi hayati tanah target telah tersedia/tercukupi di dalam tanah (*native*) dapat dilakukan uji efektivitasnya.
3. Apabila memiliki nilai efektivitas rendah, maka dapat diperkaya dengan jenis lain yang memiliki efektivitas lebih tinggi.
4. Pilihan organisme selain kemampuan fungsional perombak bahan organik, penambat N, dan pelarut fosfat perlu juga dilakukan pengujian terhadap peluang peningkatan ketersediaan hara mikro lainnya yang penting dalam meningkatkan produksi tanaman (kuantitas maupun kualitas)

7.3. Teknik/inokulasi pupuk hayati

Pada dasarnya karier yang digunakan pada pupuk hayati dapat berupa cair maupun padatan yang sangat tergantung pada target organisme yang diharapkan dan lama penyimpanan. Pupuk hayati dalam bentuk cair umumnya digunakan untuk organisme tunggal. Sedangkan pupuk hayati padat umumnya digunakan untuk pupuk hayati konsorsia yang memiliki spektrum penggunaan lebih luas dan masa simpan lebih lama. Adapun teknik inokulasi pupuk hayati dilapangan dapat dilakukan sbb:

1. Inokulasi langsung.

Inokulasi langsung dapat dilakukan untuk semua bentuk pupuk hayati, baik padat maupun cair dengan menempatkan secara langsung pupuk hayati pada titik target/titik tanam yang diharapkan. Sebelum diinokulasikan pupuk hayati cair dari kemasan diencerkan terlebih dahulu sesuai dengan jumlah populasi yang diharapkan dari masing-masing titik inokulasi dengan mengikuti petunjuk teknis dalam kemasan. Demikian juga halnya untuk pupuk hayati padat dengan pengaturan penurunan populasi/pengenceran menggunakan

air atau tanah halus yang diambil dari tempat tanam. Setelah inokulasi perlu dijaga kadar air tanah sekurang-kurangnya pada kapasitas lapang untuk pertanaman lahan kering.

2. Pellet.

Inokulasi secara pellet dilakukan dengan menempelkan pupuk hayati pada jaringan tanaman target dengan menggunakan bahan perekat. Tujuan dari perekatan ini agar terjamin terjadinya kontak langsung antara organisme pupuk hayati target dengan jaringan tanaman yang diharapkan. Hal ini penting karena interaksi antara organisme target dengan jaringan tanaman hanya berlangsung pada umur fisiologi tertentu, sehingga perlu jaminan keberadaan organisme pupuk hayati pada saat dibutuhkan. Untuk itu jenis pupuk hayati yang memiliki bahan aktif organisme simbiotik dengan tanaman sangat layak untuk diinokulasi dengan teknik pellet, seperti bakteri *Rhizobium* dengan benih/jaringan akar tanaman *Legumiosae*. Teknik inokulasi ini hanya dilakukan untuk pupuk hayati padat. Inokulasi pellet ini sangat penting juga dilakukan untuk tanah-tanah pasiran yang memiliki laju infiltrasi-perkolasi tinggi, tanah dengan tingkat kesuburan rendah (terutama kandungan Corganik tanah), dan inokulasi pada musim hujan.

7.3.1. Teknik pemberdayaan sumber daya hayati lokal/insitu (SHL)

Kekayaan sumber daya hayati lokal/*native* di Indonesia sebagai negara *megabiodiversity* secara alami pada prinsipnya cukup melimpah dan dalam kondisi keseimbangan (*steady state*). Namun pada lahan budi daya/pertanian intensif pada umumnya telah mengalami kemerosotan populasi/terdegradasi, utamanya populasi organisme heterotrof (termasuk fauna tanah). Pemberdayaan sumber daya lokal ini perlu diperhatikan terhadap perkembangan populasinya, baik keanekaragaman jenis maupun jumlah masing-masing jenis serta peranan fungsionalnya. Untuk jenis yang memiliki fungsional positif terhadap pengembangan komoditas target ditingkatkan nilai fungsionalnya, sementara jenis yang memiliki nilai fungsional negatif ditekan perkembangannya.

Belakangan ini telah dikembangkan pemberdayaan organisme lokal fungsional positif, baik mikroorganisme lokal (MOL) maupun fauna tanah lokal sebagai pupuk hayati setempat melalui perbanyakan masing-masing secara kultur untuk mikroorganisme tanah dan *rearing* untuk fauna tanah. Selain melalui perbanyakan/pengkayaan tersebut perlu juga dilakukan langkah-langkah perbaikan habitat alaminya, antara lain sbb:

1. Perbaikan aerasi tanah.

Pengolahan tanah secara terbatas dilakukan untuk memperbaiki aerasi tanah disekitar habitat organisme target (fauna). Selanjutnya setelah fauna

target bermigrasi ke tempat yang baru (areal olahan), pengolahan tanah dilakukan pada areal bekas yang ditinggalkan oleh organisme tersebut. Demikian seterusnya pengolahan tanah dilakukan secara bergantian sampai tercapai kondisi yang ideal untuk fauna target secara lestari/berkesinambungan.

2. Pemberian bahan amelioran sebagai sumber hara dan energi.

Mengoptimalkan aktivitas organisme fungsional untuk kesuburan tanah diperlukan dukungan sumber hara dan energi. Evaluasi kendala pilihan bahan amelioran untuk pengembangan populasi organisme target penting dilakukan. Bahan organik/kompos merupakan salah satu bahan amelioran/pembaik tanah sebagai sumber energi maupun hara bagi organisme tanah. Selain itu dapat juga digunakan bahan kapur, P-alam, ataupun pupuk buatan.

3. Pengendalian predator/musuh alami.

Keberadaan predator pada suatu ekosistem pada prinsipnya juga diperlukan untuk menjaga keseimbangan lingkungan. Tanpa ada pengendalian ini justru dapat menimbulkan ketidakseimbangan ekosistem, seperti terjadinya peledakan hama penyakit ataupun terjadinya gangguan lingkungan (*blooming*). Untuk itu keberadaan predator cukup dikendalikan pada batas populasi tertentu dimana fungsional sistem tetap berjalan secara seimbang dan positif terhadap pengembangan komoditas target.

4. Pengadaan areal penyangga alami.

Hambatan utama pemberdayaan populasi organisme fungsional positif pada tanah pertanian adalah adanya pengolahan tanah, pemupukan dan penggunaan pestisida yang intensif. Organisme fungsional positif tanah yang memiliki kemampuan mobilitas (fauna tanah) akan melakukan migrasi ke habitat lain yang aman. Untuk itu perlu disediakan lahan disekitar lokasi yang tidak terpengaruh oleh perlakuan yang harus kita aplikasikan. Selanjutnya apabila kondisi sudah membaik organisme tersebut dapat kembali ke lahan. Areal penyangga ini dapat berupa kebun permanen (*gumuk*) disekitar lahan dengan naungan, tersedia air dan perlu diperkaya dengan amelioran sumber energi dan hara. Pada zamannya keberadaan gumuk ini sangat dikeramatkan bagi anak-anak, karena di dalamnya banyak ditemukan ular, burung-burung, dll. Namun belakangan ini dengan sistem pertanian intensif gumuk-gumuk tersebut dimanfaatkan untuk areal produksi, sehingga habitat penyangga bagi predator hilang.

7.3.2. Teknik aplikasi pupuk hayati cacing tanah endogaesis

1. Olah tanah secukupnya dan berikan bahan organik/kompos secara vertikal/dibenamkan ke dalam tanah, apabila bahan organik belum matang dapat dilakukan dengan ditabur sebagai mulsa setelah pengolahan tanah. Hindari penempatan bahan organik yang masih berpotensi mengeluarkan gas di bawah areal jelajah cacing tanah.
2. Taburkan inokulan kokon/cacing tanah dewasa secara merata setelah tanam, hindari aplikasi di siang hari.
3. Sampai dengan 7 hari setelah tanam jaga kadar air tanah pada kondisi kapasitas lapang ($\pm 35\%$).
4. Monitoring kadar bahan organik tanah, apabila telah menurun sampai dengan $< 2,0\%$ dapat ditambahkan bahan organik dengan dimulsakan atau ditimbun dalam lubang (*joglangan*) secara terpencair/spot-spot.

7.3.3. Teknik aplikasi pupuk hayati BGA

1. Aliri air pada sawah yang akan diaplikasi pupuk hayati BGA sampai sedalam 2,5 – 5,0 cm.
2. Tutup pintu masuk air apabila pengairan sudah cukup dan biarkan menggenang dan air sudah tidak mengalir/tenang.
3. Taburkan pupuk hayati BGA secara merata, sebaiknya dilakukan sebelum dilakukan penanaman. Perlakuan inokulasi ini dapat dilakukan sebanyak 3 kali pada musim yang berturutan.
4. Pertahankan air tetap tergenang dan tidak mengalir keluar dari pematang.
5. Apabila diperlukan penambahan air dapat ditambahkan melalui 1 pintu untuk setiap petak dan dijaga agar tidak terjadi aliran yang deras dan menyebar rata serta tidak tumpah keluar dari petakan.

7.3.4. Teknik aplikasi pupuk hayati dari kelompok mikroba.

1. Olah tanah secukupnya dan airi sampai kapasitas lapang dan berikan bahan organik/kompos secara mulsa/dibenamkan ke dalam tanah, apabila bahan organik belum matang dapat dilakukan dengan ditabur sebagai mulsa setelah pengolahan tanah.
2. Taburkan/inokulasikan pupuk hayati merata pada areal rencana titik tanam, hindari aplikasi di siang hari.
3. Ulangi inokulasi 1 minggu sekali sampai pada puncak pertumbuhan vegetatif tanaman.

7.3.5. Teknik inokulasi pupuk hayati/dekomposer perombak bahan organik.

1. Siapkan tempat pengomposan dapat dalam lobang atau kotak penimbunan di permukaan tanah masing-masing seluas 1m x 1m x 1m atau lebih.
2. Siapkan bahan organik dengan dipotong-potong panjang $< 5,0$ cm.

3. Siapkan inokulan dekomposer dan encerkan dalam air
4. Sebarkan bahan organik setebal 20 cm secara merata pada dasar tempat pengomposan.
5. Airi lapisan bahan organik dengan air secukupnya sampai mencapai kapasitas lapang.
6. Inokulasikan *dekomposer* secukupnya sesuai dengan aturan yang tertera dalam kemasan secara merata.
7. Tambahkan pupuk N secukupnya sebagai *starter* untuk aktivitas *dekomposer* (tergantung bahan organik yang dikomposkan).
8. Sebarkan lagi bahan organik di atasnya setebal 20 cm secara merata.
9. Inokulasikan lagi dekomposer seperti sebelumnya.
10. Ulangi lagi seperti tersebut diatas sampai bahan organik habis (Gambar 15).
11. Lapsi/tutup rapat tumpukan bahan organik ini dengan plastik hitam.
12. Amati perkembangan peningkatan suhu pada tumpukan bahan organik dan perkembangan tekstur bahan organik.
13. Setelah temperatur menurun dan stabil, serta tekstur bahan organik menjadi lunak, proses pengomposan selesai dan kompos dapat dipanen.



Gambar 15. Bak pengomposan yang telah ditutup plastik dan pemanenan kompos. (Foto : Santosa)

VIII. PENUTUP

Tanah merupakan suatu sistem kehidupan yang kompleks yang didalamnya mengandung bahan mineral, bahan organik, air, udara dan berbagai jenis organisme. Organisme tanah merupakan salah satu bagian tanah yang memiliki beragam fungsi yang dinamis untuk menjalankan berbagai proses vital bagi kehidupan terestrial. Masalah utama kegiatan usaha tani di kawasan tropika basah adalah rendahnya kandungan hara tanah, ketersediaan bahan organik tanah, dan kemampuan tanah menahan air. Upaya menurunkan kehilangan bahan organik tanah dengan melibatkan organisme tanah dapat menekan percepatan kehilangan hara dan bahan organik serta meningkatkan kemampuan tanah menahan air dari subsistem tanah.

Mikroba dan fauna tanah memiliki peranan penting dalam melaksanakan berbagai aktivitas metabolisme yang berlangsung di dalam subsistem tanah. Peran organisme tanah dalam mempengaruhi kesuburan dan produktivitas tanah melalui perbaikan sifat fisik tanah, peningkatan ketersediaan hara, konservasi bahan organik dan hara tanah, serta dapat berperan sebagai hama-penyakit tular tanah ataupun sebagai predator. Dalam daur hara dan energi dalam subsistem tanah, fauna tanah (*herbifora*, *carnifora*, dan *detritifora*) memiliki peranan penting dalam fragmentasi bahan organik serta mengakumulasi kembali dalam biomassa tubuhnya, selanjutnya oleh mikroba tanah (*dekomposer*) bahan organik didekomposisi dan dilepaskan sebagai senyawa anorganik (hara) yang dapat diserap oleh tanaman.

Dalam upaya pengembangan pertanian intensif dan untuk memenuhi kebutuhan pangan, aplikasi pupuk anorganik dan pestisida sintetik yang berlebihan dapat mengakibatkan biaya produksi dan resiko gangguan lingkungan semakin besar. Organisme autotrof tanah yang membutuhkan hara anorganik berkembang pesat, sementara organisme heterotrof (fauna) yang membutuhkan bahan organik sebagai sumber energi menjadi terdesak. Populasi organisme tanah didominasi oleh kelompok mikroba (fungi, bakteri). Proses daur energi dan hara di dalam subsistem tanah menjadi pendek dan banyak diperankan oleh kelompok produsen dan pengurai (*dekomposer*), sehingga akan semakin mempercepat laju penyusutan kandungan bahan organik tanah.

Sinkronisasi pemberdayaan sumber daya hayati tanah fungsional secara menyeluruh dan terpadu untuk mendukung aktivitas masing-masing organisme tanah akan meningkatkan efisiensi pengelolaan sumber daya tanah. Evaluasi kesesuaian lahan pertanian ataupun perbaikan kesuburan tanah hendaknya mempertimbangkan peranan organisme tanah fungsional utama. Seperti organisme penambat N_2 bebas melalui aktivitas *enzim nitrogenase* dan organisme pelarut fosfat melalui aktivitas *enzim fosfatase*, organisme hama penyakit bawaan tanah dan cacing tanah yang dapat diwujudkan dalam peta daya dukung organisme fungsional tanah/petakelayakan aplikasi pupuk hayati.

Aplikasi pupuk hayati tanah dapat dilakukan sesuai kebutuhan, sehingga efisien dan tidak mengganggu keseimbangan ekosistem. Pengembangan pertanian semi organik dengan penggunaan pupuk anorganik, pupuk organik, dan pupuk hayati secara terpadu dengan menghindari penggunaan pestisida sintetik serta ditemukannya cacing tanah *endogaesis* di dalam tanah dan tingkat produktivitas tanah relatif stabil merupakan indikator menuju pengembangan pertanian ramah lingkungan yang lestari.

Demikian isi buku yang kami sajikan dan mudah-mudahan bermanfaat untuk mencapai pertanian ramah lingkungan dan lestari. Amin.

X. DAFTAR PUSTAKA

- Abrahamsen G. 1990. Influence of *Cognettia sphagnetorum* (Oligochaeta: Enchytraeidae) on nitrogen mineralization in homogenized mor. humic. Biol. Fertil. Soils 9 : 159 - 162.
- Alexander, M. 1977. Introduction of Soil Microbiology. John Wiley and Sons. New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore. 467P.
- Anas I. 2010. Peranan pupuk organik dan pupuk hayati dalam peningkatan produktivitas beras berkelanjutan. Seminar Nasional Peranan Pupuk NPK dan Organik dalam Meningkatkan Produktivitas dan Swasembada Beras Berkelanjutan. BB Litbang SDL. Pertanian, 24 Februari 2010. 20p. (Tidak dipublikasikan)
- Anwar, E.K., Damanhuri R., dan Partohardjono S. 1987. Serapan Hara Beberapa Varietas Padi Gogo pada Beberapa Tingkat Pemupukan N. Seminar Balittan Bogor, Badan Litbang Pertanian. Hal. 13 - 22. (Tidak dipublikasikan)
- Anwar E.K. 2007. Pengaruh inokulan cacing tanah dan pemberian bahan organik terhadap kesuburan dan produktivitas tanah Ultisols. Jurnal Tanah Tropika 12 (2): 121 - 130.
- Anwar, E.K., Ginting, C.B., dan Simanungkalit, R.D.M. 2008. Kepadatan populasi nematoda di lahan pertanian organik, semi organik dan konvensional. Buku II: 213 - 218. dalam Pros. Sem. Nas. dan Dialog Sumber Daya Lahan Pertanian. Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian.
- Anwar, E.K., Simanungkalit, R.D.M., Santoso, E., dan Sukristiyonubowo. 2010. Kepadatan populasi dan sebaran cacing tanah di lahan sawah sistem pertanian organik, semi organik dan konvensional. Biota 15 (1): 113 - 117.
- Anwar, E.K. dan Subowo. 2011. Effectiveness of commercial biofertilizer on fertilization efficiency in Ultisols for the growth and yield of caisim. J. Trops. Soils 16 (3): 191-199.
- Brata, K.R. 1999. The Introduction of earthworm as biological tillage agent for the improvement of soil physical and chemical properties in upland agriculture. P. 80 - 85. in Proc. Inter. Sem. Toward Sustainable Agriculture in Humid Tropics Facing 21st Century, Bandar Lampung Indonesia, September 27 - 28.
- Budiyanto. 2013. Keanekaragaman hayati tingkat jenis di Indonesia. <http://budisma.web.id/keanekaragaman-hayati-tingkat-jenis-di-indonesia.html>, 5 July 2013.

- Coleman, D.C. and Crossley, D.A.Jr. 1996. *Fundamental of Soil Ecology*. Academic Press. San Diego. New York. Boston. London. Sydney. Tokio. Toronto. 205 p.
- Dariah A., F. Agus, S. Arsyad, Sudarsono, dan Maswar. 2003. Hubungan antara karakteristik tanah dengan tingkat erosi pada lahan usaha taniberbasis kopi di Sumber Jaya Lampung Barat. *Jurnal Tanah dan Iklim* 21: 78 – 86.
- de Datta, S.K. 1987. *Principle and Practices of Rice Production*. John Wiley and Sons, New York. 638 p.
- Edwards, C.A. and J.R. Lofty. 1977. *Biology of Earthworms*. A Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York. 333 p.
- Elfiati. D. 2009. Peranan mikroba pelarut fosfat terhadap pertumbuhan tanaman. Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara. <http://library.usu.ac.id/download/fp/hutan-deni%20elfiati.pdf>. 5 Pebruari 2009.
- Estrade J.R; Anger, C, Bertrand, M, and Richard, G. 2010. Tillage and soil ecology: Partners for sustainable agriculture. *Soil & Tillage Research*. 111 (2010): 33–40. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/still
- Fender, W.M. and D. McKey-Fender. 1990. *Oligochaeta : Megascolecidae and other earthworms* from Western North America.p: 379 – 391. *In* Dindal, D.L. (ed.). *Soil Biology Guide*. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons. New York. Chichaster. Brisbane. Toronto. Singapore.
- Firmansyah, A. dan Subowo. 2012. Dampak kebakaran lahan terhadap kesuburan fisik, kimia, dan biologi tanah serta alternatif penanggulangan dan pemanfaatannya. *Jurnal Sumber daya Lahan* 2: 89 – 100.
- Fitriatin, B.N., arief, D.H., Simarmata, T., Santosa, D.A., dan Joy, B. 2013. Aktivitas fosfatase dan kandungan P Andisols serta hasil tanaman jagung manis yang dipengaruhi bakteri pelarut fosfat. Hal 315 – 327 *dalam* Pros. Semnas. Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi. Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian.
- Fragoso, C; G.G. Brown; J.C. Patron; E. Blanchart, P. Lavelle, B.Pashanasi, B. Senapati, and T. Kumar. 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the Tropics: The role of Earthworms. *Appl. Soil Ecol.* 6: 17 – 35.
- Giller K.E., M.H. Beare, P. Lavelle, A.M.N. Izac, and M.J. Swift. 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. *Applied Soil Ecology* 6: 3 -16.

- Ghulamahdi, M., Aziz, S.A., Melati, M., Dewi, N., dan Rais, S.A. 2006. Aktivitas nitrogenase, serapan hara dan pertumbuhan dua varietas kedelai pada kondisi jenuh air dan kering. *Bul.Agron.* (34) (1): 32 – 38.
- Gunarto L., F.A. Bahar, dan H. Taslim. 1987. Pengaruh pemberian N dan inokulasi *rhizobium* terhadap pembintilan akar serta hasil tanaman kedelai dan kacang hijau. *Agrikan.*2: 33 – 37.
- Hamim, Rachmania, N., Soemantri, I.H. dan Sumarni, N. 2009. Pengaruh Pupuk Biologi terhadap Pola Serapan Hara, Ketahanan Penyakit, Produksi dan Kualitas Hasil Tanaman Pangan dan Sayuran. Ringkasan Eksekutif Hasil-hasil Penelitian Kerjasama Kemitraan Penelitian Pertanian dengan Perguruan Tinggi, 2009. 54 p. (Tidak dipublikasikan)
- Hamzah A. dan I. Nasution. 1999. Pengaruh pemupukan N, P, K, pupuk hayati dan bahan organik terhadap populasi mikroba tanah dan pertumbuhan tanaman. Buku II: 191- 203 *dalam* Pros. Semnas Sumber Daya Tanah, Iklim, dan Pupuk. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Harley, J.L. and M.S. Smith. 1983. Mycorrhizal Symbiosis. Academic Press, Inc. New York. 483p.
- Hastuti, R.D. 2007. Bakteri penambat nitrogen hidup bebas. Hal. 23 – 30 *dalam* Saraswati, R., Husen, E. dan Simanungkalit R.D.M. (Eds.). Metode Analisis Biologi Tanah Balai Besar Litbang Sumber daya Lahan Pertanian.
- Hendriksen, N.B. 1990. Leaf litter selection by detritivor geophagous Earthworms. *Biol. Fertil. Soils* 10 : 17 - 21.
- Hindersah, R. dan Simarmata, T. 2004. Artikel kilas balik: Potensi rizobakterium *azotobacter* dalam meningkatkan kesehatan tanah. *Jurnal Natur Indonesia* 5 (2): 127 - 133.
- Hunt, S. 1997. Measurement of nitrogenase activity in N₂-fixing nodule of soybean. Vol 18:125-141. *In* J.C. Glas (ed.). Tested studies for laboratory teaching. Proceedings of the 18th Workshop/Conference of the Association for Biology Laboratory Education (ABLE).
- Jatmiko S.Y., N. Sutrisno, dan A. Ichwan. 2006. Pengaruh persiapan lahan dengan herbisida terhadap mikroorganisme tanah dan hasil padi. Buku III: 163-176 *dalam* Pros. Semnas Sumber daya Lahan Pertanian (Buku III). Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan Pertanian.
- Jordan,C.F. 1985. Nutrient Cycling in Tropical Forest Ecosystems. vol 18: 125-145 *In* J.C. Glas (Ed.). Tested studies for laboratory teaching proceeding. John Wiley and Sons, Chichaster.

- Kabar, P. dan E.K. Anwar. 2007. Teknologi perbanyak cacing tanah *Pheretima hupiensis*. Buku III: 13 – 20 dalam Pros. Sem. Nas. Sumber Daya Lahan Pertanian. hal: 23-30 dalam Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor
- Kader, M.A, M.H. Mian, and M.S. Hoque. 2002. Effect of *Azotobacter* inoculation yield and nitrogen uptake. On Line J.bio. Sci.2 : 259-251.
- Katupitiya S. and Vlassak. 1990. Colonization of weed roots by *Azospirillum brasilense*. Inorganic recycling in Asia and Pasific. Rappa Bull.6-8
- Kuhnelt, W. 1976. Soil Biology, with Reference to The Animal Kingdom. Faber and Faber, London.
- Kurnia U. 1996. Kajian Metode Rehabilitasi Lahan untuk Meningkatkan dan Melestarikan Produktivitas Tanah. Disertasi Program Pasca Sarjana, IPB. 76 p.
- Lal R. 1995. Sustainable Management of Soil Resources in the Humic Tropics. United nations University Press, Tokio-New York-Paris. p: 25 – 29.
- Las, I. dan D. Setyorini. 2010. Kondisi lahan, teknologi, arah dan pengembangan pupuk majemuk NPK dan pupuk organik. Semnas Peranan Pupuk NPK dan Organik dalam Meningkatkan Produksi dan Swasembada Beras Berkelanjutan. Balai Besar Litbang Lahan Pertanian, Bogor 24 Februari 2010. 47 p. (tidak dipublikasikan)
- Lavelle, P., and I. Barois. 1988. Potential use of *earthworms* in tropical soils pp : 273 – 279. In Edward and Neuhauser. (eds.). *Earthworm* in Waste and Environmental Management SPB Academic Publishing. The Haque, The Netherlands.
- Lavelle, P., Dangerfield, M., Fragoso, C., Eschenbrenner, V., Lopez-Hernandez, D., Pashanasi, B., and Brussaard, L. 1994. The relationship between soil macro-fauna and tropical soil fertility. pp. 137-170. In Woomer PL and Swift MJ. (eds.). The Biological Management of Soil Fertility. John Wiley & Sons, UK.
- Lee, K.E. 1985. Earthworms, Their Ecology and Relationships with Soil and Land Use. Academic Press (Harcourt Brace Jovanovich, Publishers), Sydney. Orlando. San Doego. New York. London. Toronto. Montreal. Tokyo. 411p.
- Linquist B.A; P.W. Singleton, R.S. Yost, and K.G. Cassman. 1997. Aggregate size effects on the sorption and release of phosphorous in an Ultisol. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 160 -166.
- Marinissen J.C.Y. and A.R. Dexter. 1990. Mechanism of Stabilization of Earthworm Cast and Artificial Cast. Biol. Fertil. Soils 11 : 234 – 238.
- Marscher, H. 1993. Mineral Nutrition of Higher Plant. Academic Press. 96p.

- Martin A. 1991. Short and long-term effects of endogeic earthworm *Milsonia anomala* (Omodeo) (*Megascolecidae*, *Oligochaeta*) of tropical savanna, on soil organic matter. *Biol. Fertil. Soils* 11 : 234 – 238.
- Meijboom, F.W., J. Hassink, and M. Van Noordwijk. 1995. Density fractionation of ingesta and faeces of ecophysiological earthworm species. *Soil Biol. Biochem.* 24 (12) : 1691 – 1697.
- Minnich J. 1977. Behavior and habits of the *earthworm*.p: 115 – 149. In the *earthworm book*, how to raise and use *earthworms* for your farm and garden. Rodale Press Emmanaus, P.A.
- Monreal,C.M., R.P.Zentner, and J.A. Robertson. 1997. An analysis of soil organic matter dynamics in relation to management, erosion and yield of wheat in long-term crops rotation Plots. *Can. J. Soil Sci.* 77 (4): 553 – 563.
- Moss R.P. 1981. Organic matter cycles in tropical soil and husbandry system with special refrence to Africa. p: 39 – 66. *In* Stonehouse, B. (ed.). *Biological Husbandry A Scientific Approach to Organic Farming*. Bufferworth, London. Brisbane. Toronto. Wellington,
- Munir. 1996. *Geologi dan Mineralogi Tanah*. Pustaka Jaya. 290 hlm.
- Neve, S.D. 2013. Nitrogen efficiency in intensif vegetable production system in central and west Java, Indonesia. Hal: 1-6 *dalam* Pros. Sem.Nas. Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi. Balai Besar Litbang Sumber daya Lahan Pertanian, Badan Litbang Pertanian.
- Niswati A., S. Yusnaini, dan M.A.S. Arif. 2008. Populasi mikroba pelarut fosfat dan P-tersedia pada rizosfir beberapa umur dan jarak dari pusat perakaran tanaman jagung (*Zea mays*, L.). *Jurnal Tanah Tropika* 13:2:123 - 130.
- Nurlaily, R. dan Subowo. 2011. Evaluasi media rearing cacing tanah endogaesis (*Pheretima hupiensis*). Buku I: 233 – 244 *dalam* Pros. Semnas Sumber daya Lahan Pertanian. Inovasi Teknologi Pengelolaan Sumber daya Tanah dan Tanaman. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan Pertanian.
- Nurmayulis dan Maryati. 2008. Kandungan nitrogen dan bobot umbi kentang yang diberi pupuk organik difermentasi, *azospirillum* sp, dan pupuk nitrogen di Cisarua, Lembang Jawa Barat. *Jurnal Tanah Tropika* 13:3:217 - 224.
- Parmelee, R.W., M.H. Beare, W. Cheng, P.F. Hendrix, S.J. Rider, D.A. Crossley Jr, and D.C. Coleman. *Earthworm* and enchytraeids in convensional and no-tillage agroecosystems: A biocide approach to assess their role in organic matter breakdown. *Biol.Fertil Soils* (10): 1 – 10.

- Rao, N.S. 1994. Mikroorganisme Tanah dan Pertumbuhan Tanaman. Penerbit Universitas Indonesia (UI Press). 354 p.
- Richards, B.N. 1978. Introduction to The Soil Ecosystem. Longman. London and New York.
- Rosmimik dan Yuniarti. 2007. Mikroba perombak bahan organik. Hal: 103 – 106 *dalam* Metode Analisis Biologi Tanah (Saraswati, R., Husen, E. dan Simanungkalit R.D.M. (eds.). Balai Besar Litbang Sumber daya Lahan Pertanian.
- Sabiham S, Anas I, Sutandi A, dan Hafif B. 2010. Peningkatan Sinergi Peran Eksudat Akar Barchiaria, Mikoriza dan Kompos Jerami Diperkaya K untuk menurunkan kadar Al Tanah 10-30% dan meningkatkan pati ubi kayu >10%. Ringkasan Eksekutif Hasil-hasil Penelitian Kerjasama Kemitraan Penelitian Pertanian dengan Perguruan Tinggi. Hal: 112-113. (tidak dipublikasikan)
- Salazar, S., Sanchez, L, Alvarez, J, Valverde, A, Galindo, P, Igual, J, Peix, A, and Santa-Regina. 2011. Correlation among soil enzyme activities under different forest system management Practices. Ecological Engineering 37: 1123 – 1131.
- Sanchez, P.A. 1976. Properties and Management of Soils in The Tropics. A Wiley and Sons, New York-London-Sydney-Toronto.
- Santosa E. 2009. Aktivitas Beberapa Isolat Bakteri Pelarut Fosfat Pada Berbagai Kadar C-organik tanah Ultisol. Makalah pada Semilokan Inovasi Sumber daya Lahan, Bogor, 24 -25 Nopember 2009. (Tidak dipublikasikan)
- Scheu, S. 1991. Mucus Excretion and Carbon Turnover of Endogeic Earthworms. Biol. Fertil. Soils 12 : 217 – 220.
- Scholes M.C., M.J. Swift, O.W. Heal, P.A. Sanchez, J.S. Ingram and R. Dalal. 1994. Soil fertility research in respons to the demand for sustainability. p: 1 – 15. *In* Woomer, P.L. and M.J. Swift (eds.). The Biological Management of Tropical Soil Fertility. John Wiley & Sons Pub.
- Schwert, D.P. 1990. Oligochaeta: *Lumbricidae* p.341-356. *In* D.L. Dindal (ed.). Soil Biology Guide. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons. New York. Chichaster. Brisbane. Toronto. Singapore.
- Senapati, B.K., Lavelle, P., Giri, S., Pashanasi, B., Alegre, J., Decaens, T., Jimenez, J., and Pati B.K. 1999. p: 199 – 237 *In* Lavelle *et al.* (eds.). *In* Soil Earthworm Technologies for Tropical Agroecosystems. Earthworm Management in Tropical Agroecosystems CABI Publshing.

- Simanungkalit, R.D.M., Riyanti, E.I., dan Linda. 1992. Tanggapan beberapa varietas kacang tanah terhadap Inokulasi Jamur mikoriza vesikular-asrbuskular. Vol 1: 103-110 *dalam* Prosiding Seminar Hasil Penelitian Tanaman Pangan. Balittan. Bogor.
- Stork, N.E., and P. Eggleton. 1992. Invertebrates as determinants and indicators of soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture* 7 (182):38 – 47.
- Subowo, Tini Prihatini, dan S. Komariah. 1984. Pengaruh *Rhizobium* strain lapang terhadap pertumbuhan vegetatif kacang tanah. Hal 321-330 *dalam* Prosiding Penelitian Tanah. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat.
- Subowo dan Tini Prihatini. 1987. Pengaruh inokulasi *rhizobium* strain NC-92 terhadap tanaman kacang tanah pada *Latosol* di Cicurug, Sukabumi. *Pross. No. 7/ Pen. Tanah/1987*
- Subowo, J. Subagja dan M. Sudjadi. 1990. Pengaruh bahan organik terhadap Pencucian hara tanah Ultisol Rangkasbitung, Jawa Barat. *Pemb. Pen. Tanah dan Pupuk* 9: 32 – 38.
- Subowo, Komariah, S., dan Sri Widati. 1998. Pengaruh inokulasi alga terhadap oksigen dan besi terlarut pada tanah sawah bukaan baru. Hal 103-117 *dalam* Prosiding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat Bidang Kimia dan Biologi Tanah (Pusat penelitian Tanah dan Agroklimat.
- Subowo. 2002. Pemanfaatan Cacing Tanah (*Pheretima hupiensis*) untuk Meningkatkan Produktivitas Ultisols Lahan Kering. Disertasi Program Pasca Sarjana IPB, Bogor. 94p.
- Subowo, I. Anas, G. Djajakirana, A. Abdurachman, dan S. Hardjowigeno. 2002. Pemanfaatan cacing tanah untuk meningkatkan produktivitas Ultisols lahan kering. *Jurnal Tanah dan Iklim* 20: 35 – 46.
- Subowo, Kentjansari, A. dan Sumantri, E. 2003. Aktivitas cacing tanah (*Pheretima hupiensis*) pada bahan tanah Ultisols lapisan atas di Terarium. Buku II: 137 – 156 *dalam* Pros. Sem. Nas. Inovasi Teknologi SD Tanah dan Iklim.
- Subowo, Sutardi, dan Retno Dwi. 2008. Potensi sumber daya tanah untuk pengembangan pertanian organik Di daerah Istimewa Yogyakarta. Buku I: 203 – 215 *dalam* Pros. Sem. Nas. dan Dialog SDL. Pertanian.
- Subowo, E. Santosa, dan I. Anas. 2010. Peranan biologi tanah dalam evaluasi kesesuaian lahan pertanian kawasan megabiodiversity tropika basah. *Jurnal Sumber Daya Lahan* 4 (2): 93-102.

- Subowo. 2010. Strategi Efisiensi penggunaan bahan organik untuk kesuburan dan produktivitas tanah melalui pemberdayaan sumber daya hayati tanah. *Jurnal Sumber daya Lahan* 4 (1): 13-25.
- Subowo. 2011. Peran cacing tanah kelompok *endogaesis* dalam meningkatkan efisiensi pengolahan tanah lahan kering. *Jurnal Litbang Pertanian* 30(4): 125 – 131.
- Subowo. 2011. Pengaruh aplikasi formula pupuk hayati terhadap produksi caisim pada tanah Inseptiosl Bogor. Buku I: 125-133 *dalam* Prosiding Seminar Sumber daya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian.
- Subowo, Anwar, E.K., dan Elsanti. 2012. Pengujian Efektivitas Kombinasi Pupuk Hayati HYT-a, HYT-b, HYT-c, dan HYT-d terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Padi Sawah. Laporan Hasil Kerjasama Balai Penelitian Tanah dan PT. Agrinos Indonesia, 35 hlm. (Tidak dipublikasikan)
- Subowo dan Elsanti. 2012. Pengujian Efektivitas Pupuk Hayati Green World Probiotik Blooming Untuk Tanaman Caisim di Rumah Kaca. Laporan Kerjasama Balai Penelitian Tanah dan PT. Utomo-Utomo. 11 hal. (Tidak dipublikasikan)
- Subowo, Anwar, E.K., J. Purwani, Elsanti, Khamdanah, dan Sarmah. 2013. Penelitian Sumber Daya Hayati Tanah Mendukung Swasembada Pangan Berkelanjutan. Laporan penelitian tanah TA 2013, Balai Penelitian Tanah Bogor, belum dipublikasikan, 40 hlm. (Tidak Publikasi)
- Sudharto T., H. Suwardjo, A. Barus, dan D. Supardy. 1988. Pemberian Cacing Tanah (*Peryonic excavatus*, *E. Perr*) dalam Usaha Rehabilitasi Lahan Rusak Akibat Pembukaan Lahan Secara Mekanis. Laporan: Hasil Penelitian Pasca Pembukaan Lahan Menunjang Transmigrasi di Kuamang Kuning-Jambi, Kerjasama Pusat Penelitian Tanah Bogor-Depatemen Transmigrasi. Hal. 93-98. (Tidak dipublikasikan)
- Sudriatna dan Subowo. 2007. Tanggap Kacang Hijau Terhadap Sisa Bahan Amelioran Pada Tanah Inceptisols dan Alfisols. Seminar Nasional Hasil-hasil Penelitian dan Pengkajian Teknologi Pertanian. Palembang 26 -27 Juli 2006. 12 hal. (Tidak dipublikasikan)
- Suganda H, M.S. Djunaedi, D. Santoso, dan S. Sukmana. 1997. Pengaruh cara pengendalian erosi terhadap aliran permukaan, tanah tererosi dan produksi sayuran pada Andosol. *J. Tanah dan Iklim* 15: 38 – 50.
- Suryaman P, Rochimin M, Yuniarti A, dan Nurbati B. 2009. Formulasi biofertilizer berbasis blue green algae (BGA) dan *Azolla Pinata* Sebagai pensubstitusi pupuk anorganik untuk meningkatkan produksi padi sawah. Ringkasan Eksekutif Hasil-hasil Penelitian Kerjasama Kemitraan Penelitian Pertanian dengan Perguruan Tinggi. Hal. 25-26.

- Swift, M.J., Heal, O.W. and Anderson, J.M. 1979. Decomposition in Terrestrial Ecosystem. Blackwell, Oxford.
- Syukur A, Hanudin E, dan Suhariyono. 2010. Pengkajian peningkatan efektivitas pupuk *Zeoneem* pada tanaman jeruk sampai 30% di lahan pasiran. Ringkasan Eksekutif Hasil-hasil Penelitian Kerjasama Kemitraan Penelitian Pertanian dengan Perguruan Tinggi. Hal: 169-170. (Tidak dipublikasikan)
- Tiunov A.V., M. Bonkowski, J. Alpei, and S. Scheu. 2001. Microfola, Protozoa, Nematoda in *Lumbricus terrestris* burrow walls: a laboratory experiment. *Pedobiologia* 45: 46 – 60.
- Vidyarthi, G.S. and R.V. Misra. 1982. The role and importance of organic materials and biological nitrogen fixation in rational Improvement of Agricultural Production. *FAO Soils Bulletin*, No. 45.
- Wallwork, J.A. 1970. *Ecology of Soil Animals*. McGraw-Hill, London. New York. Sydney. Toronto. Mexico. Johannesburg. Panama.
- Wambeke, A.V. 1992. *Soils of The Tropics: Properties and Appraisal*. McGraw-Hill, Inc. 343p.
- Wibowo S. 2000. Keragaman dan Populasi Cacing Tanah Pada Lahan dengan Berbagai Masukan Bahan Organik di Daerah Lampung. Thesis S-2, IPB. 203 p.
- Widyasunu, P. 2011. *Azolla microphylla* baik untuk pembuatan pupuk organik dan go clean agriculture. widyasunuunsoed@yahoo.com/purwandaru.widyasunu@gmail.com
- Williams, C.N. and K.T. Joseph. 1976. *Climate Soil and Crop Production in Humictropics*. Kualalumpur, Oxford University Press. London.
- Wolinska, A., and Stepniewska, Z. 2012. Dehydrogenase Activity in soil environment. <http://dx.doi.org/10.5772/48294>. p: 183 – 210.
- Yusnaini, S., A. Niswati, M.A.S. Arif, and M. Nonaka. 2008. The Changes of earthworm population and chemical properties of tropical soils under different land use systems. *Jurnal Tanah Tropika* 13(2): 131-137.
- Yusnaini, S., A. Niswati, S.G. Nugroho. K. Muludi, dan A. Irawati. 1999. Pengaruh inokulasi mikoriza vesikular arbuskular terhadap produksi jagung yang mengalami kekeringan sesaat pada fase vegetatif dan generatif. *Jurnal Tanah Tropika* 9: 1-6.
- Yusnaini, M.A.S. Arif, J. Lumbanraja, S.G. Nugroho, dan M. Monaha. 2004. Pengaruh jangka panjang pemberian pupuk organik dan inorganik serta kombinasinya terhadap perbaikan kualitas tanah masam Taman Bogo. Buku II: 283 – 293 *dalam* Pros. Semnas. Pendayagunaan Tanah masam, Puslitbang Tanah dan Agroklimat.